Sistema *wireless* de aquisição de dados com armazenamento em nuvem aplicado ao monitoramento de plantas fotovoltaicas

Douglas Chesini
Curso de Engenharia de Controle e Automação
Inst. Fed. de Educ., Ciênc. e Tec. do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha
Farroupilha - RS, Brasil
douglaschesini@hotmail.com

Ivan Jorge Gabe
Curso de Engenharia de Controle e Automação
Inst. Fed. de Educ., Ciênc. e Tec. do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha
Farroupilha - RS, Brasil
ivan.gabe@farroupilha.ifrs.edu.br

Resumo —A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia renovável que mais cresce no mundo. A fim de garantir uma operação confiável e estável de qualquer sistema fotovoltaico, um sistema de monitoramento eficiente é necessário. O uso de tais sistemas contribui para o reconhecimento do potencial de geração, análise de eficiência e uma grande variedade de informações sobre a instalação fotovoltaica, informações essas que contribuem para melhor conhecimento acerca desse tipo de energia. Porém, o uso desses sistemas é geralmente limitado pelo hardware e software dos fabricantes, afetando negativamente os custos, flexibilidade e integração de dados. E é nesse viés, que o presente trabalho apresenta um sistema de aquisição e visualização de dados, com armazenamento em nuvem, aplicado a sistemas fotovoltaicos. O sistema proposto usa um microcontrolador para coleta de dados de tensão, corrente, temperatura e irradiância, os quais são transmitidos via *Wi-Fi* e armazenados em um banco de dados MySQL, para posterior visualização em uma página Web desenvolvida. O projeto inclui os detalhes específicos do hardware, métodos e sistemas utilizados na aquisição, transmissão, armazenamento e visualização dos parâmetros coletados. O baixo custo de implementação, somado a alta flexibilidade, eficiência e simplicidade faz do sistema proposto uma opção viável, funcional e eficiente para o uso de informações de sistemas fotovoltaicos aberta à visualização e análise por qualquer usuário na internet.

***Palavras Chave* — Monitoramento; Aquisição de Dados; DAS; Sistema Fotovoltaico; Nuvem**

I. Introdução

A demanda de energia elétrica vem crescendo continuamente ao redor do globo. Somente no Brasil, entre 2006 a 2015 houve um aumento de 34 % no consumo de energia elétrica [1]. Isso se deve principalmente devido à industrialização e ao aumento do consumo de produtos eletroeletrônicos associado à melhoria das condições de vida e ao aumento populacional. A maior parte dessa energia é gerada através de fontes não renováveis, tais como carvão e derivados do petróleo. Entretanto devido a preocupações ambientais bem como a redução de combustíveis fósseis, fontes de energia renovável fazem-se cada vez mais necessárias. Estudos publicados pelo Conselho Europeu de Energia Renovável (EREC) em parceria com a ONG Greenpeace mostram que a energia renovável, combinada ao uso racional e eficiente de energia, será capaz de suprir metade da demanda energética mundial até 2050 [2].

Entre as fontes renováveis de energia, a solar fotovoltaica vem se destacando devido a sua abundância, versatilidade e incentivos governamentais. Cobrindo 0,16 % do globo terrestre, sistemas com 10 % de eficiência na conversão solar proporcionariam 20 TW de potência, quase o dobro da energia provinda de combustíveis fósseis [3]. Nos países participantes da Agência Internacional de Energia - Programa de Sistemas Fotovoltaicos (IEA-PVPS), entre 1992 e 2015 houve um aumento de 103 MW para 196,8 GW na potência fotovoltaica instalada [4]. Além disso, no final de 2016, instalações fotovoltaicas representavam 320 GW da potência instalada em todo mundo, sendo que 83,2 GW são da China, líder mundial nesse segmento [5]. Já no Brasil, a potência instalada cresceu de 0,4 MW em 2012 para 127,2 MW em setembro de 2017. Esse crescimento vem sendo incentivado principalmente por ações regulatórias, tais como a resolução 687/2015 da Aneel, que regulamenta a possibilidade de compensação da energia excedente produzida na micro e mini geração distribuída. Entretanto, mesmo com todos os incentivos, o Brasil ainda está longe dos países líderes em produção, uma vez que sua potência fotovoltaica instalada representa apenas 0,082 % da capacidade instalada atualmente [6].

Além de ser uma ótima alternativa para incrementar a matriz energética brasileira, a energia solar fotovoltaica também pode ser uma boa forma de geração de energia em locais de difícil acesso ou sem acesso a energia elétrica. Entretanto, a proliferação deste tipo de energia ainda esbarra em fatores como baixos rendimentos associados a altos custos de aquisição e à falta de conhecimento do potencial de geração para regiões específicas. Desse modo, faz-se necessário pensar em formas de maximizar a produção de energia pelos módulos fotovoltaicos para reduzir o tempo de retorno do investimento aumentando assim a viabilidade desse tipo de sistema.

Uma forma de aperfeiçoar esta produção pode ser através da utilização de um sistema de rastreamento solar, que garante a máxima incidência de radiação solar ao longo de um dia sobre os módulos, aumentado assim a energia produzida pela placa. Alguns testes mostram que em certas regiões geográficas

a utilização de seguidores solares pode aumentar em até 40 % a energia produzida por ano [7]. Entretanto, para atestar esse aumento da produtividade é necessário haver um sistema de aquisição de dados capaz de coletar dados desse tipo de sistema e usá-los como informação para um estudo de viabilidade dos seguidores solares sobre instalações fixas. Além disso, sistemas de monitoramento aplicados a plantas fotovoltaicas têm o objetivo de fornecer informações sobre o potencial de energia, potência extraída, condições de operação e outros fatores que podem ser utilizados como base de dados para aplicações de controle e monitoramento para esses sistemas. A aquisição de dados, atrelada aos sistemas de monitoramento em plantas fotovoltaicas exerce um papel fundamental na análise de geração, facilitando o estudo de tais tipos de sistemas, e invariavelmente, potencializando a popularização da energia solar fotovoltaica.

E é com esse compromisso que o presente trabalho tem como objetivo descrever o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados *wireless* flexível, de baixo custo e eficiente, aplicado a um sistema de monitoramento para plantas fotovoltaicas. O trabalho apresenta um estudo dos métodos de aquisição de grandezas concernentes à geração de energia fotovoltaica (tensão, corrente, irradiância e temperatura) e um projeto detalhado do hardware e software utilizados no sistema *datallogger*. Posteriormente o trabalho segue com a descrição da transmissão e armazenamento desses dados, bem como os dispositivos usados para este fim. Por último, a manipulação desses dados e sua consequente utilização no monitoramento em tempo real dos parâmetros de uma instalação local, para fornecimento de informações pertinentes através de um sistema de visualização Web.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: A seção II explica os sistemas de aquisição de dados, traz uma revisão bibliográfica de trabalhos já existentes e descreve os principais dispositivos usados para este fim. A seção III apresenta a arquitetura desenvolvida, detalhando todos os componentes de hardware escolhidos. Já a seção IV traz o desenvolvimento e implementação, explicitando os componentes de software envolvidos. A seção V trata sobre os dados coletados e aduz uma análise acerca do funcionamento do sistema, enquanto que a seção VI descreve o sistema de visualização de dados utilizado. Na seção VII são expostas as limitações do trabalho bem como as perspectivas de aperfeiçoamento do sistema. Finalmente, a seção VIII traz as conclusões acerca do trabalho e do sistema de aquisição de dados desenvolvido.

II. Sistemas de Aquisição de Dados

Com o crescente interesse pela geração de energia através do processo fotovoltaico, faz-se necessário desenvolver tecnologias capazes de adquirir informações sobre a produção em todas as dimensões possíveis. E é nesse viés que reside o desenvolvimento de sistemas de monitoramento capazes de manter a operação sustentável, controlada e com a obtenção de informações relevantes às instalações fotovoltaicas.

Uma grande variedade de *dataloggers* comerciais está disponível, mas em sua grande maioria são caros, altamente sofisticados e não podem ser facilmente gerenciados. Como resultado, é preciso desenvolver sistemas de aquisição de dados capazes de coletar e processar os dados, além de monitorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos durante sua operação [8]. Esses sistemas devem obter os parâmetros necessários de forma precisa, fácil de manusear, e com baixo custo de aquisição.

Sistemas de monitoramento produzidos pelos próprios fabricantes de inversores possuem algumas vantagens, tais como rápida instalação e configuração com seus respectivos inversores e alta taxa de confiabilidade. Por outro lado, esses dispositivos em sua imensa maioria não são compatíveis com inversores de outros fabricantes, os dados são armazenados em uma base de dados local e o sistema é pouco flexível. Grande parte dos sistemas de aquisição de dados, do inglês *Data Acquisition Systems (DAS)*, possui tecnologia importada para a maioria dos países subdesenvolvidos e o seu alto custo ainda é uma barreira para sua disseminação.

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de monitoramento fundamentado na facilidade de instalação, flexibilidade de implementação, confiabilidade dos dados, e principalmente baixo custo de instalação. Com o rápido crescimento de diferentes tecnologias de monitoramento, é fundamental examinar a operação e as características de cada uma delas. A seleção de um produto ou método apropriado é vital para um sistema de monitoramento fotovoltaico efetivo. Ao longo da última década, diferentes aspectos e sistemas de monitoramento foram idealizados, os quais servem de base de informação para a proposta desenvolvida neste trabalho.

A. Descrição de sistemas de aquisição de dados

Sistemas de monitoramento fotovoltaico possuem diversos elementos que trabalham em conjunto para obter os dados de maneira rápida e precisa. Um dos principais componentes desse tipo de sistema são os sensores, os quais são responsáveis por medir as variáveis em tempo real.

Outro componente importante é a unidade de condicionamento de sinal. Esta, por sua vez, amplifica o sinal do sensor preparando-o para o processamento. O sinal é processado em um microcontrolador que transmite a saída desses sinais condicionados para um computador em tempo real ou usando um protocolo específico. O computador usa esses dados para análise, visualização e armazenamento. Baseado em análises internas ou externas comandadas pelo usuário, o computador fornece comandos ao sistema para processamento e tomada de ações futuras. A Fig. 1 exibe um diagrama de blocos genérico com os elementos básicos que compõem um sistema de monitoramento fotovoltaico.

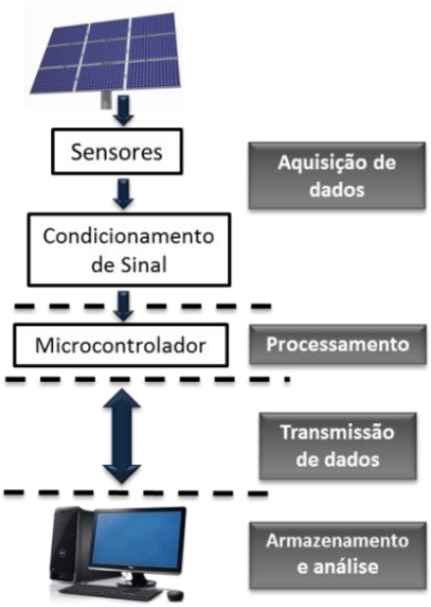

Fig.1 – Diagrama de blocos de um sistema de monitoramento genérico

B. Revisão de DAS Aplicados a plantas Fotovoltaicas

Um sistema de monitoramento de uma planta fotovoltaica isolada é apresentado por Belghith e Sbita na Primeira Conferência Internacional em Energia Verde [9]. O trabalho utiliza alguns sensores conectados a um microcontrolador que envia dados, através de mensagens de texto, para uma central usando dois modens GSM como forma de comunicação. Os dados recebidos são processados e uma plataforma interativa desenvolvida através do software LabVIEW fornece o controle supervisório da planta.

No entanto, um sistema microcontrolado de aquisição de dados é aplicado por Mukaro *et al*. [10] a uma planta fotovoltaica remota. O sistema usa um piranômetro como um sensor de radiação solar. As leituras dos sensores são coletadas pelo microcontrolador em intervalos de 10 minutos e armazenadas em uma memória serial externa até serem transferidas para um computador portátil. No final de cada período de medição, os dados adquiridos são transferidos ao computador através de uma interface serial via EIA-232.

Anwari *et al.* [11] apresenta um DAS aplicado a uma planta capaz de entregar 5 KW de potência. Dados de temperatura, irradiância, tensão e corrente foram adquiridos, processados e transmitidos via *Wi-Fi* (padão IEEE 802.11). A corrente é medida através de sensores de corrente enquanto que a tensão é obtida através de um divisor de tensão. Já os dados de temperatura ambiente e do painel são obtidos a partir de um sensor LM35 enquanto que a irradiância é obtida através de sensores do tipo LDR (*Light Dependent resistor*). Os dados são enviados pelo micro controlador e podem ser acessados de qualquer computador na rede.

Já no trabalho de Bian *et al.* [12] é proposto um sistema de aquisição de dados multifuncional para sistemas fotovoltaicos, onde uma variedade de dados meteorológicos bem como dados elétricos (corrente, tensão, etc.) são coletados através de sensores específicos. Esses sinais coletados através do módulo de aquisição são convertidos em dados digitais e transferidos para um chip FPGA. Esse chip é programado usando o ambiente LabVIEW e os dados podem ser analisados, julgados e armazenados. Através de um protocolo TCP/IP os dados são transferidos para um computador e analisados graficamente em tempo real. Mais esforços em desenvolver um sistema de aquisição de dados para sistemas fotovoltaicos foram trabalhados por Koutroulis [13]. A principal desvantagem desses métodos é a dependência de um computador e do uso de um software comercial, o que aumenta o preço do sistema e limita o uso disseminado.

Com este cenário, fica clara a necessidade do desenvolvimento de uma solução eficiente, acessível e de baixo custo para o sistema *datalogger*. Para tanto, é fundamental o conhecimento das grandezas que devem ser adquiridas para a análise de desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

C. Parâmetros monitorados

Algumas normas técnicas internacionais discriminam os parâmetros de sistemas fotovoltaicos que devem ser medidos. Especificamente, a norma IEC 61724 [14] determina as grandezas e os procedimentos a serem seguidos e lista várias diretrizes para o monitoramento e análise do desempenho elétrico de sistemas fotovoltaicos.

Entretanto, após estudos anteriores sobre sistemas de monitoramento, fica claro que os fatores operacionais e meteorológicos mais preeminentes para análise em sistemas fotovoltaicos são: tensão e corrente geradas pelo módulo, sua temperatura e a irradiância incidente sobre o mesmo. Outros parâmetros passíveis de serem analisados dependem de cada configuração das plantas fotovoltaicas [15].

Essas grandezas e os valores associados a elas têm um papel crucial na análise de geração de sistemas fotovoltaicos. Esses parâmetros, correlacionados entre si e associados a outras informações (tais como as especificações do módulo) são capazes de fornecer uma ampla gama de informações com respeito ao potencial de geração, desempenho e outros fatores concernentes ao sistema. Dessa forma, faz-se necessário um estudo dos métodos de obtenção dessas grandezas de modo que o valor a elas associado seja mensurado de forma confiável e eficiente.

1) Medição de Tensão

Dispositivos medidores de tensão são usados para medir vários níveis de tensão (baixa, média e alta) dependendo da configuração do sistema fotovoltaico. Essa medição pode ocorrer em diversos pontos do sistema tais como na saída do painel fotovoltaico, na saída do inversor, nos cabos, transformadores, condutores entre outros.

Para a análise de geração do sistema, a tensão pode ser medida na saída do módulo fotovoltaico. Esta tensão é de corrente contínua (CC) e pode ser obtida por meio da utilização de transdutores de tensão comerciais, ou simplesmente por divisores de tensão que reduzam a tensão a valores dentro do range aceitável pelo controlador [8][16]. A utilização de cada método varia de acordo com a precisão requerida bem como com o custo de implementação associado.

2) Medição de Corrente

Existem diversas técnicas disponíveis (baseadas nos mais diversos princípios físicos) para realizar a medição de corrente, sendo que a escolha da técnica mais apropriada depende da precisão requerida, custo envolvido, tamanho e largura de banda.

a) Medição de corrente baseada na primeira lei de Ohm: A tensão ao longo de um condutor é proporcional ao fluxo de corrente. Portanto usando um resistor *Shunt* em série com um circuito e medindo a tensão sobre esse resistor é possível encontrar a corrente que flui nesse circuito. Esse método possui um custo relativamente baixo, entretanto pode causar perdas de potência à medida que a corrente aumenta.

b) Medição de corrente baseada na primeira lei de indução de Faraday: Esse princípio é utilizado principalmente em dois dispositivos para medir corrente, na bobina de Rogowski e em transformadores de corrente. Esses métodos são bastante seguros uma vez que o dispositivo é isolado do circuito de medição. Entretanto, esses dispositivos são mais susceptíveis a erros e pouco aplicáveis para correntes contínuas.

c) Medição de corrente baseada no efeito do campo magnético: Ao contrário do princípio anterior, dispositivos de medição de corrente baseados no campo magnético são capazes de identificar ambos os campos magnéticos estáticos e dinâmicos. Esse princípio inclui diversas técnicas de medição, tais como o Efeito Hall e magneto resistências.

d) Medição de corrente baseada no efeito de Faraday: Nesse princípio baseiam-se métodos como a detecção por polarímetro e a detecção por interferômetro [15]. Esses métodos possuem uma isolação elétrica excelente e requerem baixas quantidades de energia. Entretanto são custosos e complexos de aplicar.

Os sensores baseados no efeito do campo magnético, mais precisamente no efeito Hall, são hoje os mais utilizados na medição de corrente uma vez que agregam grandes vantagens com respeito a outros princípios. Essas vantagens incluem dentre outras, isolação galvânica, invólucro reduzido e alta precisão de medida.

A medição de corrente elétrica por efeito Hall basicamente consiste em uma placa que é percorrida por uma corrente a ser mensurada. Essa corrente gera então um campo magnético que causa uma força de arrasto nos elétrons conduzidos na bobina semicondutora, gerando assim uma diferença de potencial de saída proporcional a corrente de entrada (Fig. 2).

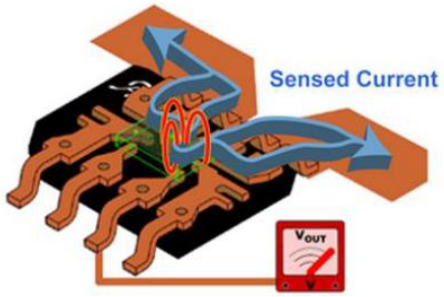

Fig.2 – Sensor de efeito Hall com encapsulamento em circuito integrado

3) Medição de Irradiância

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas que são construídas com um material semicondutor. Este, ao receber incidência de luz com energia suficiente para realizar a migração de portadores na junção PN de uma célula, gera o efeito fotovoltaico, transformando a luz em energia elétrica [17]. Dessa forma, o desempenho de sistemas fotovoltaicos é diretamente afetado pela radiação solar incidente.

O aumento da irradiância sobre os módulos fotovoltaicos, considerando uma temperatura constante, gera um acréscimo na tensão de circuito aberto e na corrente elétrica gerada pelo módulo. Isso significa que a potência elétrica produzida pelos módulos aumenta. Dessa forma é de fundamental importância a medição da irradiância para possíveis análises de geração, levantamento de curvas I-V do módulo, estimativa do potencial de geração do local de instalação do sistema e avaliação do rendimento de geração que a placa fotovoltaica oferece.

Existem diversas formas de medir a irradiância (direta, difusa ou global), sendo que esses sensores são baseados em diversos princípios: termoelétricos, calorimétricos, termomecânicos e fotovoltaicos [15]. Há dois sensores comumente usados para medição dessa grandeza:

- Pireliômetro: Esse dispositivo é usado para medição do fluxo de radiação direta. O sensor é formado por um tubo com uma pequena abertura (para excluir toda a radiação difusa) onde o elemento sensor situa-se no fundo do tubo.
- Piranômetro: Esse dispositivo é usado para medição da radiação global. Consiste em duas capas de vidro hemisféricas, com o sensor centrado no eixo da esfera. Esse dispositivo pode ser usado também para medir radiação difusa se o componente de radiação direta for eliminado. Os piranômetros podem ser do tipo fotovoltaicos (usam uma pequena célula de referência como sensor) e do tipo termoelétricos (usam termopares conectados a lâminas brancas e pretas ligadas em série).

4) Medição de Temperatura

Grande parte da energia solar absorvida por um módulo fotovoltaico não é convertida em energia elétrica, mas sim em calor. Isso causa um aumento de temperatura do módulo reduzindo assim sua eficiência. O *gap* de energia de uma célula fotovoltaica é reduzido se a temperatura do módulo aumentar. Isso significa um aumento da corrente de curto circuito em aproximadamente 0,1 %/ºC, e uma redução de 2 mV/ºC na tensão de curto circuito, para o silício cristalino [18]. Consequentemente a temperatura de um módulo é um importante parâmetro a ser medido a fim de analisar o desempenho do sistema fotovoltaico.

Existem diversos sensores de temperatura disponíveis no mercado, os quais são baseados em diversos princípios de funcionamento:

- Termopar: Esse tipo de sensor é passivo, ou seja, gera um sinal elétrico devido ao aquecimento da junção dos metais dissimilares que o compõem. Apesar de apresentar um baixo custo em relação aos outros, esse tipo de sensor necessita de estágios de amplificação (por gerar uma diferença de potencial muito pequena), o que pode aumentar a incerteza e a complexidade da medição.
- Termoresistências (RTDs): Trabalham no princípio da variação de resistência de um material em resposta à variação de temperatura. Esse tipo de sensor tem alta estabilidade, linearidade e precisão. Entretanto, por ser do tipo ativo, necessita uma fonte de excitação externa, e a pequena variação de resistência requer um circuito de condicionamento mais complexo.
- Circuitos integrados (CIs): Sensores de temperatura em circuitos integrados suportam uma variação tipicamente entre -55 ºC a 150 ºC. Esse tipo de sensor inclui um circuito de processamento eficiente e um certo condicionamento de sinal já embutido, de modo que os mesmos possam ser conectados diretamente ao microcontrolador.

D. Hardware de processamento

Os valores das grandezas a serem medidas pelo sistema de aquisição de dados precisam ser adquiridos, processados, e posteriormente transmitidos para um banco de dados. Tais tarefas requerem a utilização de um controlador capaz de processar a informação com rapidez e que possibilite uma fácil interface com a rede através de seus periféricos ou de dispositivos que façam uso dos mesmos.

O trabalho descrito por Petrescu *et al.*[19] utiliza um microcontrolador PIC24F32KA302, com um processador de 16 bits, interface serial e todos os periféricos necessários para a aplicação do sistema de aquisição proposto pelo autor. Esse microcontrolador, apesar de suas especificações técnicas suficientes, não vêm embarcado em uma plataforma de prototipagem eletrônica, dificultando assim a sua interface com o sistema.

Para suprir essa necessidade, *Treter* [20] propõe a utilização da plataforma *BeagleBone Black* (BBB) como o processador utilizado na aquisição de dados. A BBB é um pequeno computador embarcado que utiliza o processador Sitara AM3359 de 1Ghz, 512MB de memória RAM, 65 pinos digitais, entre outros. Apesar de ser uma excelente alternativa, no que se refere à robustez e qualidade, o custo de aquisição é alto, indo contra os objetivos desse trabalho.

Grande parte dos sistemas de aquisição de dados conta com microcontroladores munidos de características e recursos que mais se adaptem ao método de coleta de dados escolhido. Esses microcontroladores devem ser compatíveis com a estrutura de hardware utilizada na transmissão dos dados e seu possível armazenamento.

E. Transmissão e armazenamento dos dados

A transmissão dos dados do sistema de aquisição pode ocorrer de maneira cabeada, utilizando os mais diversos padrões de meio físico (USB, EIA-232, EIA-485, Ethernet) ou sem fio, ancorada em diferentes tecnologias (GSM, GPRS, Bluetooth, *ZigBee*, *Wi-Fi*) [15][21].

A maneira como os dados são transmitidos varia de acordo com o método de armazenamento a que esses dados são submetidos, o que, invariavelmente depende do modo de como esses dados serão processados e transformados em informação. No trabalho de Mukaro [22] é proposto o uso de uma memória serial EEPROM para armazenar os dados e a sua transmissão para o PC em intervalos fixos utilizando uma interface EIA-232. No entanto o sistema desenvolvido por Treter [20] transmite os dados via EIA-485 para um computador pessoal aonde os dados são processados. Já o sistema proposto por Ding [23] utiliza um módulo GSM para a transmissão para uma base de dados e exibição em uma página PHP.

Como visto, há uma grande gama de possibilidades no que tange a transmissão e armazenamento dos dados obtidos. A aplicação de cada método vai depender da disponibilidade de interface, hardware envolvido e principalmente, com a flexibilidade fornecida e o custo de implementação.

III. Arquitetura Desenvolvida

Tomando como base os estudos já existentes, percebe-se uma ampla gama de possibilidades no que diz respeito ao sistema de monitoramento, desde a aquisição dos dados até o armazenamento e análise. Entretanto, algumas dessas abordagens possuem soluções que atualmente não são as melhores opções de escolha no que diz respeito à eficácia e eficiência para sistemas de monitoramento fotovoltaico. Desse modo, o DAS desenvolvido representa uma nova abordagem para o sistema de armazenamento e transmissão de dados, visando para tal o baixo custo e a robustez do sistema.

O sistema desenvolvido, como sintetizado na Fig. 3, conta com um conjunto de sensores específicos para as principais grandezas em um sistema fotovoltaico. Esses sensores fornecem sinais com um condicionamento apropriado para um microcontrolador que é responsável pelo processamento dos dados, e posteriormente seu armazenamento na nuvem. Através de protocolos e padrões específicos os valores medidos são transmitidos via *Wi-Fi* para um servidor que os armazena em um banco de dados. Esses dados são usados para alimentar aplicações de monitoramento remoto e geração de informações relativas à produção de energia.

A. Sistema fotovoltaico utilizado

Os módulos fotovoltaicos são compostos de materiais semicondutores na forma de células, que realizam a conversão da radiação solar em energia elétrica na forma de corrente contínua (CC). Para que essa energia seja compatível com a rede (magnitude de tensão, frequência e requisitos de qualidade), é necessário utilizar inversores para transformar a

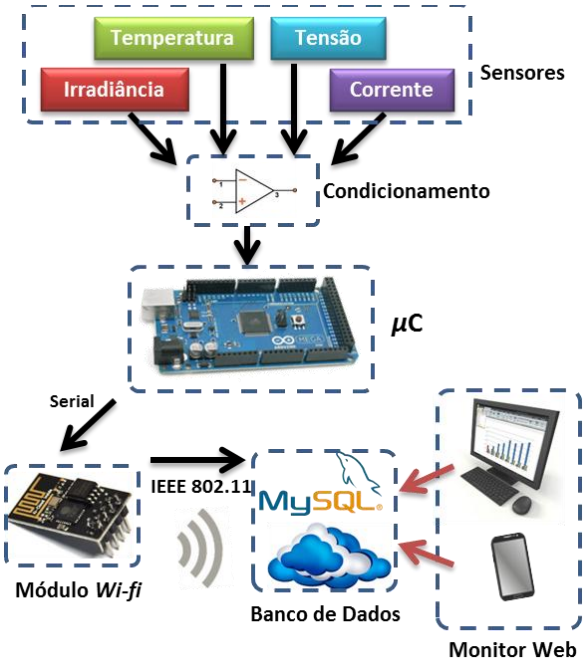

Fig.3 – Arquitetura proposta do sistema de aquisição de dados

potência de corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada (CA). A Fig. 4 mostra uma representação de um sistema conectado à rede.

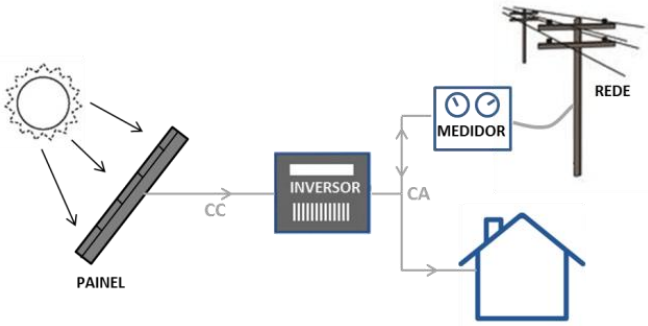

Fig.4 – Representação de um sistema fotovoltaico conectado à rede

Para a aquisição de dados de grandezas concernentes à análise de um sistema fotovoltaico, pode-se obter o valor das grandezas diretamente da saída do módulo conectado à rede através do inversor. Ou seja, visando à flexibilidade do sistema proposto, os parâmetros monitorados, detalhados na Seção II, podem ser extraídos na origem do sistema (no painel fotovoltaico), e não saída do inversor. Este serve somente como transformação de potência (CC-CA) para utilização na rede, que no caso deve ser a carga do sistema.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido tem embasamento e aplicação em uma pequena planta fotovoltaica instalada nas dependências da presente instituição de ensino. Essa planta é composta por um módulo fotovoltaico montado sobre uma estrutura de rastreamento solar, e de um módulo fixo, faceado ao Norte e com uma angulação de 29º com relação ao plano horizontal, conforme mostra a Fig. 5. Ambos os módulos são independentes, e possuem ligação com a rede através de inversores distintos. Os módulos fotovoltaicos nos quais se baseiam o sistema de aquisição de dados proposto são fabricados pela Kyocera, modelo KD250G-4FB2, com 250 W de potência, tensão de circuito aberto de 37 V, e corrente de curto-circuito de 9 A.

Fig. 5– Planta fotovoltaica utilizada

Assim, o sistema de aquisição de dados desenvolvido possui como finalidade principal a aquisição de valores das grandezas concernentes a ambas as configurações fotovoltaicas, fixo e móvel. Para tal, o sistema possui sensores independentes para cada configuração. O hardware desenvolvido (o qual será detalhado nas próximas seções) é responsável pela leitura, condicionamento, processamento, transmissão e armazenamento dos dados provindos dos sensores. Esses dados a serem gerados permitem a elaboração de diversos estudos comparativos (potencial de geração, viabilidade, entre outros), além de proporcionar a validação do sistema desenvolvido a partir dos dados adquiridos.

B. Processamento e Microcontrolador

Visando baixo custo de aquisição, facilidade de implementação, e eficiência/compatibilidade com as operações necessárias, o sistema de aquisição de dados proposto nesse trabalho se baseia na plataforma Arduino. O Arduino é uma placa de prototipagem eletrônica de hardware livre munida de um microcontrolador da Atmel AVR, com suporte a uma linguagem de programação essencialmente baseada em C/C++.

Dentre as diversas opções, a placa escolhida é o Arduino Mega2560. Essa placa utiliza um microcontrolador ATmega2560 de 16 Mhz, possui 256 KB de memória flash, 8 KB de RAM, 4 canais de comunicação serial, 16 entradas analógicas com 10 bits de resolução, 54 pinos de entrada/saída digital e 6 pinos de interrupção externa [24].

A escolha desse processador se baseia no fato do mesmo possuir software livre, simplicidade de programação, baixo custo de aquisição e principalmente capacidade de atender aos requisitos necessários para o sistema de aquisição de dados. Além disso, o Arduino Mega2560 permite uma simples e rápida conexão com diversos módulos (*bluetooth*, *Wi-Fi*, GSM, LAN, SD, etc.) tornando o sistema flexível e totalmente adaptável à aplicação necessária.

C. Hardware de Alimentação

Os sensores e os respectivos circuitos de condicionamento de sinal desenvolvidos necessitam alimentação de corrente contínua para seu funcionamento. Entretanto, muitos dos circuitos e topologias requerem potenciais diferentes. Assim sendo, foram desenvolvidos dois principais circuitos de alimentação para o sistema. O primeiro, exposto na Fig. 6, possui saídas 12 V e 5 V, sendo esta última provinda de um LM317 [25], o qual fornece a tensão desejada de forma precisa através da regulagem do potenciômetro.

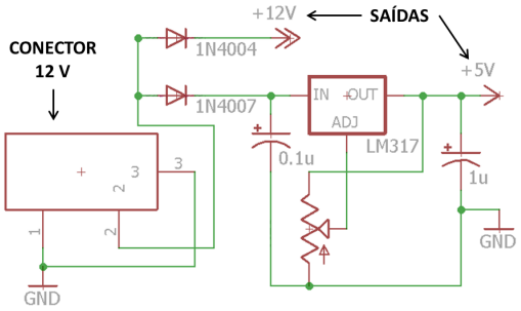

Fig. 6 – Alimentação para os circuitos

Além disso, os circuitos de condicionamento de corrente, tensão e irradiância fazem o uso de amplificadores operacionais que necessitam alimentação simétrica. A Fig. 7 mostra o segundo circuito de alimentação desenvolvido.

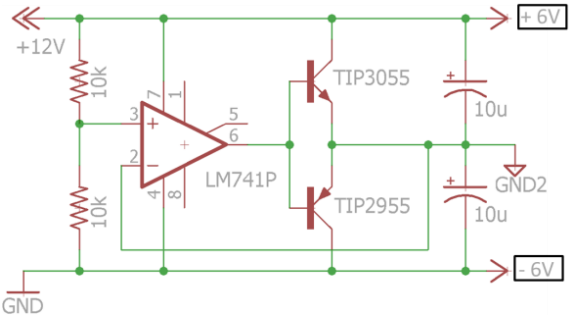

Fig. 7 – Fonte de alimentação simétrica para os Amp-Op

Nessa configuração, o circuito acaba criando um novo ponto de referência denominado GND2, simetricamente posicionado entre as tensões de referência. Ou seja, a diferença de potencial desse ponto em relação aos outros terminais, pela característica do circuito, possui mesma magnitude, porém com sinais opostos. Dessa forma, a tensão entre os terminais +12 V e GND2 equivale a +6 V. Analogamente, a tensão sobre o terminal GND, quando referenciado sobre o GND2 equivale a –6 V.

D. Hardware e sistema de sensoriamento

O sistema desenvolvido utiliza sensores e componentes de hardware específicos para a obtenção de cada uma das quatro grandezas mencionadas. Esses sensores foram escolhidos visando o baixo custo, facilidade de interfaceamento, e principalmente precisão dados obtidos. A maneira como foi feita a obtenção de cada grandeza será melhor explicada ao longo das próximas subseções.

1) Coleta de dados de tensão

A medição de tensão é um dos componentes principais na análise do potencial de geração de energia elétrica de um sistema fotovoltaico, fornecendo informações sobre o desempenho e possíveis interrupções na geração. Desse modo, o sistema projetado conta com um sensor de tensão para medição da tensão CC de saída do módulo.

A solução mais barata e eficiente, e invariavelmente a mais utilizada, faz o uso de um divisor de potência resistivo, como exposto na Fig. 8. Nessa configuração, um divisor de tensão com referência no GND é criado através da conexão de duas resistências em série.

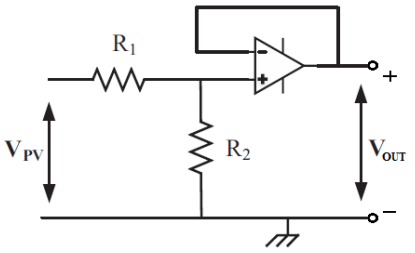

Fig. 8 – Divisor de tensão com condicionador de tensão

A tensão de entrada (saída do módulo) é aplicada ao longo das duas resistências e a tensão de saída é medida em paralelo com a resistência de menor valor, a qual é conectada a um circuito de condicionamento (para eliminar o efeito das impedâncias). Desse modo, a tensão de entrada é transformada em uma tensão de amplitude mensurável pelas entradas analógicas do microcontrolador.

A equação que reproduz o circuito pode ser representada por (1), sabendo que V_{PV} é a tensão de saída do módulo fotovoltaico e que V_{OUT} é a tensão de saída desejada.

$$V_{OUT} = V_{PV} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad (1)$$

O terminal positivo da saída é conectado à entrada analógica do controlador. Por esse motivo, como a entrada analógica suporta até 5 V e a saída máxima do módulo é 37 V, R_1 e R_2 são calculados tal que a tensão sobre R_2 seja próxima (mas não ultrapasse) 5 V quando a tensão de entrada for máxima, ou seja, igual a tensão de circuito aberto. Isso garante que o valor seja representado por toda a faixa de bits (2^{10}), aumentando assim a resolução da leitura.

Aplicando os valores os valores em (1), chega-se a uma relação de R_1/R_2 = 6,4. O divisor resistivo construído faz o uso de R_1=640 kΩ e R_2=100 kΩ, garantindo uma baixa corrente no circuito, e consecutivamente a utilização de resistores de baixa potência. O ponto médio entre os resistores é ligado à entrada de um amplificador operacional na configuração de *buffer*, sendo que a saída deste é o ponto a ser conectado ao Arduino. A Fig. 9 mostra o circuito final desenvolvido para o sensor de tensão. O terminal IN-2 é conectado em paralelo à saída positiva do módulo fotovoltaico, enquanto que o terminal oposto é conectado à saída negativa.

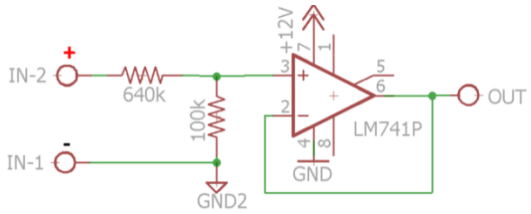

Fig. 9 – Circuito do sensor de tensão

2) Coleta de dados de corrente

Devido às relações custo-efetividade, simplicidade de operação, e robustez, o circuito encapsulado ACS712-20A se destaca como uma solução para medição de corrente contínua e alternada. Esse circuito integrado é baseado no efeito Hall, possui uma alta isolação e uma baixa impedância, fornecendo uma saída de tensão linear e proporcional a corrente que passa pelo dispositivo [26]. A entrada da placa é ligada em série com o circuito do sistema fotovoltaico para que a corrente gerada pelos painéis passe pelo sensor. A Fig. 10 mostra a placa utilizada.

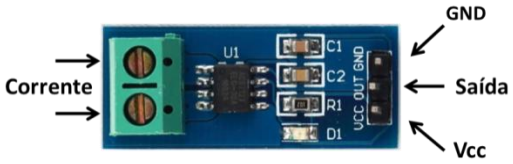

Fig. 10 – Placa integrada do ACS712-20A

Esse dispositivo é capaz de perceber correntes de até ±20 amperes. Entretanto, por ser bidirecional, a tensão de saída (para uma alimentação de 5 V) é $V_{CC}/2$ quando a corrente de entrada é nula. A uma temperatura de 25 ºC, a sensibilidade do componente é de aproximadamente 100 mV/A. Para a aplicação no sistema de sensoriamento fotovoltaico e a utilização com o microcontrolador, é necessário um circuito de condicionamento para "ajustar" o sinal do sensor de forma a garantir a maior precisão possível de leitura.

O conversor A/D do microcontrolador possui uma resolução de 10 bits. Ou seja, as entradas analógicas de 0 a 5 V são convertidas para um valor proporcional de 0 a 1023 níveis. Entretanto, para os módulos fotovoltaicos, a corrente máxima gerada varia de zero a um valor máximo o qual é determinado pela máxima condição de radiação incidente. Esse valor pode chegar a ser 10 a 15 % maior que a corrente de curto circuito do módulo (9 A para o módulo Kyocera KD250G-4FB2), uma vez que esta é especificada para uma irradiância de 1000 W/m².

Considerando a corrente máxima e a sensibilidade do transdutor, a tensão de saída do ACS712 varia entre 2,5 V e 3,5 V (0 – 10 A). Isso significa um valor entre 512 e 716 no conversor A/D do microcontrolador. Desse modo, toda a faixa de corrente estaria sendo representada por somente 204 valores digitais no microcontrolador, ou seja, a mínima variação perceptível de corrente seria de aproximadamente 49,02 mA.

Faz-se então fundamental aplicar na saída do sensor um circuito de instrumentação (Fig. 11) capaz de trazer a saída do sensor para uma variação linear entre 0 a 5 V para um range máximo de entrada entre 0 e 10 A, trazendo assim a resolução de leitura de corrente para aproximadamente 9,76 mA. Dessa forma, é utilizada a melhor resolução possível no conversor A/D do microcontrolador, aumentando assim a precisão do resultado para a medida de corrente do módulo fotovoltaico.

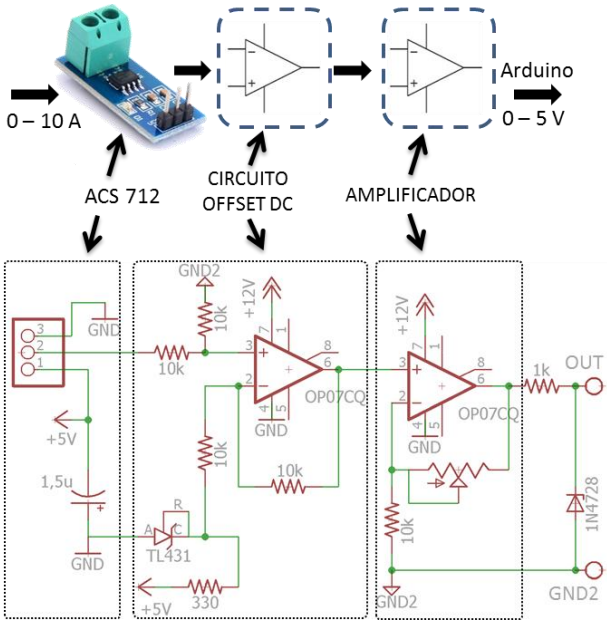

Fig. 11 – Condicionamento requerido para o sensor de corrente

A saída do ACS é conectada a um subtrator com referência de 2,5 V obtida por meio do TL431 [27] para remover o offset nato do sensor. A saída é então amplificada linearmente (ganho = 5) para maximizar a resolução de leitura pelo controlador. Assim, uma corrente máxima de 10 A (1 V na saída do ACS712) é transformada em 5 V na saída do circuito a ser conectado à entrada analógica do Arduino.

3) Coleta de dados de irradiância

Embora os dispositivos comerciais para medição de irradiância sejam muito precisos, eles possuem um custo extremamente elevado. No entanto é possível obter a radiação solar incidente no local geográfico desejado medindo a corrente que flui dos terminais de um módulo fotovoltaico devidamente calibrado.

A irradiância solar (medida em W/m²) é obtida através de um módulo de referência o qual converte o fluxo solar incidente em energia elétrica. A saída desse módulo é ligada em paralelo com um resistor shunt. A corrente que circula (proporcional à irradiância) é suficiente para criar uma diferença de potencial nas fronteiras do resistor a qual possa ser medida pelo microcontrolador. A Fig. 12 mostra um esquema genérico da estimativa de irradiância global através da medição da tensão de um módulo de referência pelo microcontrolador.

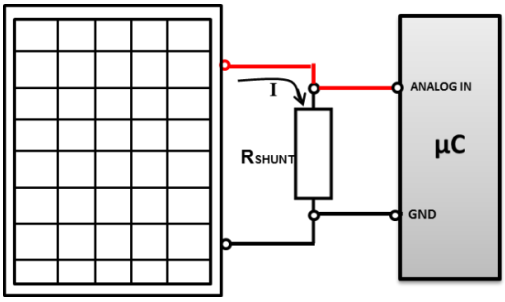

Fig. 12 – Esquema genérico do sensor de irradiância

Uma vez que a entrada analógica do microcontrolador é entre 0 e 5 V, é fundamental que o valor da resistência seja calculado de modo que a tensão sobre a mesma não ultrapasse 5 V quando a corrente gerada pelo módulo de referência for máxima (em condições de irradiância máxima). A equação (2) demonstra o calculo do valor de resistência máxima possível do resistor shunt, sabendo que R_{SHUNT} é a resistência (dada em Ohms), e I_{max} é a corrente de curto circuito do módulo de referência (dada em Amperes).

$$R_{SHUNT} \leq \frac{5\,V_{DC}}{I_{max}} \qquad (2)$$

Uma vez possuindo o resistor, o sensor de irradiação é calibrado para obter a sensibilidade do sistema, ou seja, a relação entre a grandeza de entrada (irradiância) e a grandeza de saída (tensão). Essa calibração pode ser feita utilizando um sensor de irradiação global comercial (piranômetro) ou um módulo de referência previamente calibrado e com sensibilidade conhecida. O procedimento consiste basicamente na medição de irradiância, ao mesmo tempo em que acontece a medição da tensão sobre o resistor da célula de referência. Dessa forma, através de consecutivas medições e procedimentos de linearização, encontra-se uma constante em $(W/m^2)/V$ referente à irradiância global para cada Volt no resistor. Essa constante deve ser multiplicada pelo valor de tensão no microcontrolador para fornecer então o valor de irradiância global mensurado.

Os módulos de referência utilizados são de 10 W de potência máxima, e corrente de curto circuito de 0,6 A. As constantes obtidas nas calibrações estão expostas na Tabela I.

TABELA I - VALOR DAS CONSTANTES

Módulos Referência[a]	***Resistor (Ω)***	***Constante (W/m²/V)***
1	4,647	323,708
2	5,200	301,742

[a.] Um módulo para cada um dos dois sistemas analisados (fixo e móvel)

Da mesma forma que com as outras grandezas, a medição de irradiância também deve passar por um circuito de condicionamento. Entretanto, como o resistor já é calculado para fornecer uma tensão de amplitude mensurável, a tensão sobre o resistor (no terminal positivo do módulo de referência) passa por somente por um *buffer* para isolar o efeito das impedâncias.

4) Coleta de dados de temperatura

Diante da facilidade de implementação e da precisão requerida, a medição de temperatura (ºC) é obtida com um sensor numérico do tipo circuito integrado, o qual se comunica diretamente com o microcontrolador, como mostra a Fig. 13. Esse sensor, DS18B20 [28], possui saída digital regulável entre 9-12 bits e usa o padrão de comunicação *One-Wire*, o qual permite múltiplos sensores serem conectados no mesmo barramento, usando assim somente um pino digital do microcontrolador. Ademais, diferentemente dos sensores com saída analógica, o DS18B20, por se tratar de um sensor digital, possui maior imunidade a ruídos e, portanto, o valor a qual ele representa tem maior confiabilidade.

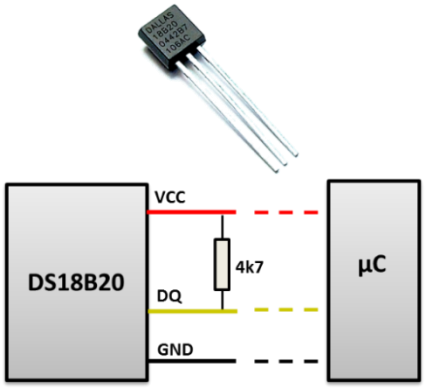

Fig. 13 – Diagrama elétrico do sensor de temperatura DS18B20

Para a medição de temperatura, o sensor em questão é fixado na parte traseira de cada um dos módulos, centralizado em uma das células fotovoltaicas que o compõem. A face plana lateral do sensor é posicionada rente à traseira do painel, e todo seu entorno é colado com um adesivo plástico (cola quente). Isso garante, além da fixação do sensor, uma proteção contra a humidade e o vento, condições que, podem alterar o valor mensurado.

E. Transmissão dos dados

Como um dos objetivos a ser alcançado no sistema de aquisição de dados é a flexibilidade do sistema no que tange à implementação, o uso de um método de transmissão sem fio (*wireless*) é fundamental. Dessa forma, os dados coletados pelo controlador são transmitidos para um servidor que hospeda um

banco de dados onde o valor das grandezas coletado ficará armazenado.

O módulo ESP8266 (Fig. 14) é um SOC (Sistema em Chip) com protocolo TCP/IP integrado que consegue dar a qualquer microcontrolador acesso à rede *Wi-Fi*. O ESP8266 é capaz tanto de hospedar uma aplicação quanto descarregar todas as funções de redes *Wi-Fi* a partir de outro processador de aplicação.

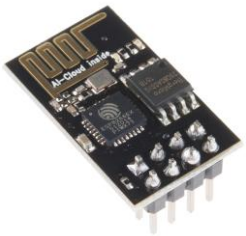

Fig. 14 – Módulo ESP8266 para conexões Wi-Fi

Esse SOC possui um processador de 32-bit (Tensilica Xtensa LX106) que roda a 80 MHz, 64 KB de memória RAM de instruções e 96 Kb de dados [29]. Possui também uma memória Flash de 512 KB, conectores GPIO, barramentos I2C, SPI, UART entre outros recursos. Esse módulo é compatível com os padrões IEEE 802.11 b/n/g podendo ser amplamente utilizado na grande maioria das redes.

A conexão com o controlador se dá por meio de uma porta Serial. Essa conexão permite ao Arduino tanto exercer funções de programação no módulo ESP, quanto solicitar informações e requisições que façam uso do protocolo TCP/IP embutido no Chip. Entretanto, é necessário configurar o ESP para operar no modo estação, de modo que ele passe a ser mais um dispositivo conectado à rede, podendo assim trocar informação através da mesma. Por fim, para que a informação seja transmitida para um meio externo, é necessário implementar a lógica cliente-servidor, de modo que o ESP possa enviar a informação para o banco de dados fazendo uso dos elementos da rede. A Fig. 15 exemplifica o uso do módulo *Wi-Fi* para a transmissão dos dados ao servidor.

Fig. 15 – Transmissão dos dados do ESP para um banco de dados

O ESP8266 é alimentado por 3,3 V e suas entradas/saídas trabalham neste mesmo nível de tensão [29]. Entretanto, o pino do transmissor (Tx) do Arduino opera em 5V quando em nível alto. Dessa forma, faz-se necessário um simples circuito para condicionar a sua conexão com o Arduino. Assim sendo, tanto a alimentação da placa quanto o sinal do transmissor vindo do controlador são ajustados para o nível de tensão aceito pelo SOC. A Fig. 16 mostra o circuito utilizado.

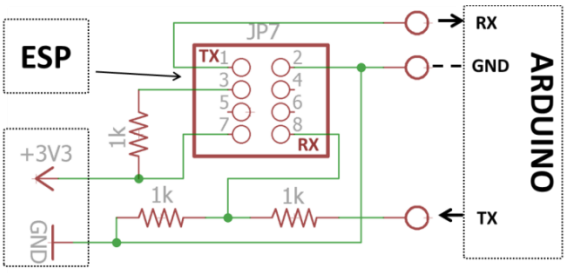

Fig. 16 – Circuito de conexão entre Arduino e ESP8266

Nesse cenário, a transmissão dos dados fica condicionada à existência de um ponto de acesso à rede *Wi-Fi*. Entretanto isso não chega a ser um impasse, uma vez que devido à expansão desse tipo de conexão nos últimos anos, pontos de acesso estão disponíveis ou podem ser facilmente instalados e configurados.

F. Armazenamento dos dados coletados

Como mencionado na seção anterior, os dados relativos aos valores das grandezas mensuradas são transmitidos e então armazenados em um banco de dados. O banco utilizado é estruturado na plataforma MySQL, a qual é um sistema de gerenciamento de banco de dados que usa a linguagem SQL (*Structured Query Language*) como interface. O MySQL é atualmente o banco de dados livre mais usado atualmente devido à sua ubiquidade em plataformas heterogêneas e pilha de aplicativos, além do seu desempenho conhecido, confiabilidade e facilidade de uso [30].

A escolha do armazenamento em um banco de dados frente a outros métodos, tais como a utilização de um cartão de memória ou transmissão para um computador, é fundamentalmente pelo fato dos dados serem mantidos na nuvem. Isso, além de manter os dados seguros contra qualquer mudança acidental ou perdas, permite que os dados sejam acessados remotamente, flexibilizando a manipulação da informação e a criação de aplicações variadas que façam o uso desses dados.

O banco utilizado é hospedado em um servidor interno da instituição de ensino devido aos custos e principalmente devido à garantia de um maior espaço de armazenamento, e facilidade no desenvolvimento do sistema de visualização. Ademais, a hospedagem em um servidor local garante uma maior velocidade na transmissão, minimizando os *delays* do processo.

Nesse banco existe uma tabela, previamente criada, constituída por 12 colunas. A primeira coluna indica um numero identificador de requisição (ID), utilizado como auxiliar e para contagem de dados recebidos. Entre a coluna 2 e a coluna 11 situam-se os valores de grandeza concernentes aos sistemas fotovoltaicos fixo e móvel (tensão, corrente, irradiância, temperatura e potência). Na última coluna é alocado o momento (data e hora) de execução do pedido.

G. Sistema de backup dos dados

Hoje em dia, apesar das redes serem robustas, podem haver problemas de desconexão e indisponibilidade das mesmas. Uma vez que a transmissão dos dados é condicionada à presença de uma rede *Wi-Fi*, possíveis problemas na rede podem interromper a transmissão e fazer com que os dados desse período de indisponibilidade da rede sejam perdidos.

Uma vez que DAS desenvolvido tem como finalidade propiciar dados para o estudo comparativo entre os sistemas fotovoltaico fixo e móvel, é crucial que os dados sejam coletados de maneira continua.

Além do sistema *wireless* de aquisição de dados, o conjunto desenvolvido possui adicionalmente um sistema de *backup* dos dados que independe de conexão com a rede. Esse sistema armazena os dados de maneira "intermitente" durante o período de gravação, para fornecê-los ao usuário quando eles não estiverem armazenados no banco devido à indisponibilidade da rede.

Esse armazenamento é alcançado através do uso de um shield *Data Logging* da Adafruit [31]. Esse shield nada mais é do que uma placa com pinos de conexão direta ao Arduino, munida de um módulo RTC (*Real Time Clock*) e um módulo SD, que permite armazenamento de dados em um cartão SD. Esse dispositivo, associado ao respectivo código desenvolvido, possibilita a eliminação da perda dos dados em caso de falhas na rede, garantindo assim maior confiabilidade dos dados extraídos do sistema.

IV. Desenvolvimento e Implementação

Após a caracterização individual de cada um dos "módulos" que compõem o sistema de aquisição de dados, faz-se necessário a junção física dos elementos de hardware que compõe o sistema. Da mesma forma ocorre a elaboração dos componentes de software, para que o *datalogger* funcione conforme o estabelecido.

A. Implementação física do hardware

O circuito geral que representa o sistema de aquisição de dados desenvolvido é apresentado na Fig. 17. onde V_M, I_M, G_I e T_M representam a tensão, corrente, irradiância e temperatura, respectivamente. Na figura, os elementos dentro dos tracejados (sensor de temperatura e irradiância) encontram-se fisicamente instalados junto ao sistema fotovoltaico, uma vez que estes necessitam estar inseridos no meio a ser analisado. Já os blocos externos ao tracejado representam os elementos instalados em conjunto dentro do prédio da instituição de ensino.

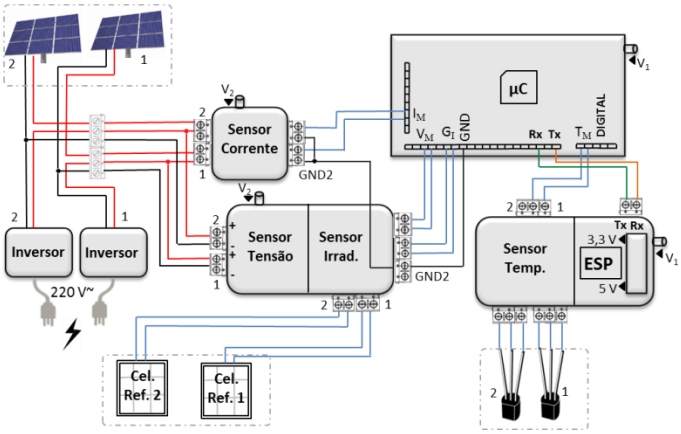

Fig. 17 – Esquema geral de conexões do sistema

Como mencionado na seção III, os amplificadores operacionais dos módulos de coleta dos dados de tensão e corrente são alimentados simetricamente. Isso significa que o terminal negativo da alimentação desses módulos possui potencial diferente do terminal negativo de alimentação dos circuitos, que são alimentados por fonte simples de 12 V. Devido a essa diferença de potencial, esses circuitos devem ser alimentados por fontes de alimentação 12 V distintas (V1 e V2 respectivamente). Entretanto, as tensões de referência de cada bloco (GND2 para tensão e corrente, e GND para os demais) devem estar interconectadas, criando assim um referencial comum com o controlador. Como é possível de se ver pela Fig. 17, essa interconexão é alcançada simplesmente através da ligação entre o GND e GND2, uma vez que os restos das ligações ocorrem pelo uso de fontes das mesmas fontes de alimentação.

Cada um dos sensores das grandezas estabelecidas, tanto para o sistema fixo quanto para o móvel, foram implementados e construídos em placa de circuito impresso. A escolha da construção individual de cada placa, ao invés de uma placa contendo o hardware agrupado, reside em dois principais fatores. Além da maior facilidade proporcionada, a construção individual da cada bloco possibilita a validação de cada circuito de forma mais ágil e independente.

Entretanto, uma vez que os blocos foram construídos separadamente, a ligação entre os sensores, os elementos de processamento e transmissão, e a alimentação deve acontecer de maneira harmoniosa a fim de garantir o funcionamento do sistema. Os módulos foram organizados de tal forma a garantir as ligações da Fig. 17, e facilitar a alimentação externa do sistema. Desse modo, os componentes, devidamente isolados, foram montados sobre uma placa metálica provinda de um painel elétrico. Os sensores foram ligados em blocos terminais devidamente fixados na placa, garantindo assim a facilidade de conexão com os módulos fotovoltaicos e com os sensores de temperatura e irradiância associados. A Fig. 18 mostra o sistema devidamente montado.

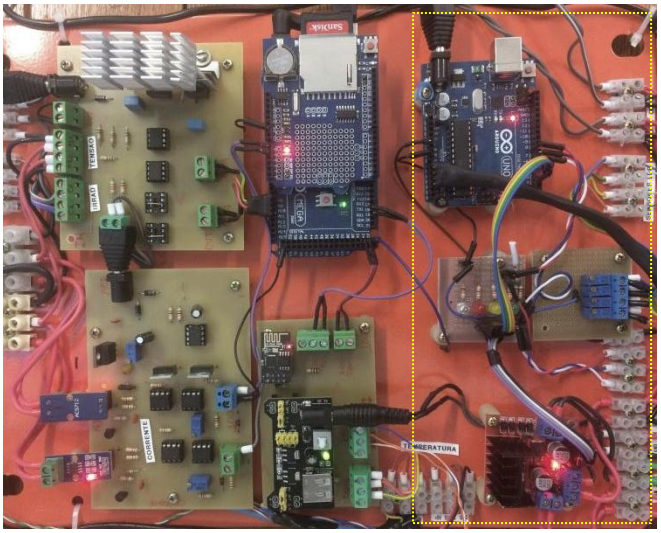

Fig. 18 – Sistema de aquisição de dados montado

Na Fig. 18 os elementos dentro do tracejado são referentes ao controle de rastreamento da posição solar (módulo fotovoltaico móvel), não contendo ligação direta com o sistema desenvolvido.

B. Software e sistema de controle

Todo o ciclo de processamento, desde a leitura dos sensores até a transmissão dos dados é controlado pelo Arduino. Isso engloba desde a leitura das portas de entrada, manipulação das variáveis, comunicação com os módulos, e conseguinte transmissão dos dados. Entretanto, a simples transmissão dos dados não atesta seu armazenamento. Dessa forma esses dados precisam de uma interface de software para serem armazenados no banco. Essa interface é hospedada no próprio servidor utilizado.

1) Software no Arduino

O código desenvolvido para o controlador tem início com a declaração de variáveis, e configuração dos pinos analógicos e digitais. Logo em sequência acontece a inicialização dos módulos (SD e RTC) do *shield* datalogger seguido pela inicialização dos sensores e das portas de comunicação serial. O próximo passo consiste no uso da comunicação serial com o ESP8266, para realizar a conexão do módulo com a rede *Wi-Fi* selecionada. Essa etapa engloba dois estágios principais: a definição do ESP para operar no modo estação, seguida pela conexão propriamente dita, através de um *login* de rede e senha fornecidos. A Fig. 19 mostra um fluxograma básico que descreve a atuação do software no microcontrolador.

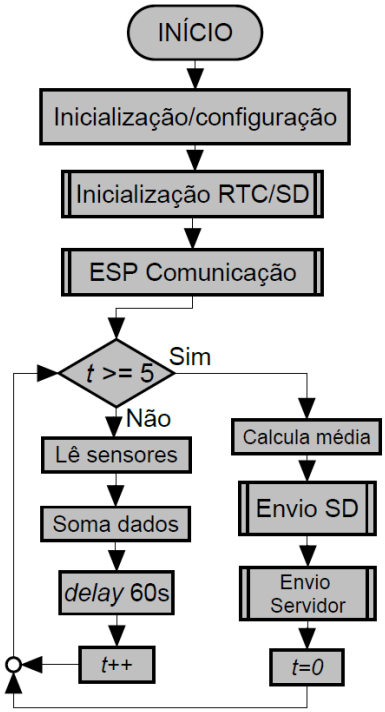

Fig. 19 – Fluxograma do algoritmo de processamento no Arduino

Uma vez conectado a rede, o programa entra em seu laço principal. Nesse laço, a cada 60 segundos, o Arduino realiza a leitura de todos os sensores conectados, e armazena os valores lidos de cada pino em uma variável associada. O valor lido em cada pino é acrescido ao valor anterior da variável. A cada 5 ciclos de leitura, correspondentes a 5 minutos, é calculada a média de cada variável e em seguida é realizado o envio para o cartão de memória e para o servidor. Devido à natureza de variação da posição solar, o intervalo estabelecido entre gravações distintas é o suficiente para fornecer os dados com uma resolução satisfatória dentro da norma IEC 61724 [14].

a) Envio para o cartão SD: Essa etapa inicia com a organização dos dados de forma sequencial em uma variável do tipo *string*. A media de cada valor de grandeza é adicionada a esse vetor, precedida de um prefixo identificador. As últimas posições são compostas pelo horário do momento atual de gravação. Feito isso, o controlador, abre um novo arquivo no formato de texto padrão (*.txt*), e realiza o envio dos dados para uma nova linha desse arquivo, que posteriormente é fechado. O algoritmo está montado de tal forma a criar um novo arquivo e nomeá-lo com a data atual a cada vez que o uma nova data for identificada, ou seja, na primeira gravação de cada dia.

b) Envio para o Servidor: Toda a etapa de comunicação e envio para o servidor é vinculada necessariamente à conexão serial entre o Arduino e o módulo ESP8266. Na primeira instância, o controlador aloca seu processamento para a criação de uma conexão com o servidor utilizando o protocolo TCP. Através do endereço de IP e da porta de comunicação fornecida, o controlador se conecta ao banco e fica pronto para realizar solicitações de comunicação. Da mesma forma que o anterior, o envio para o servidor necessita a criação de um vetor de texto com os dados, que, dessa vez são precedidos pelo endereço do banco no qual os dados serão armazenados. Quando o vetor estiver devidamente montado, com as grandezas e os respectivos valores, é solicitado então o envio. Após a transmissão, a comunicação é encerrada até o próximo ciclo.

O algoritmo é também guarnecido de condições que determinam o intervalo útil de envio dos dados. Fazendo o uso dos sensores de corrente, o Arduino identifica o início e o fim dos períodos de geração de energia elétrica. Dessa forma, o controlador realiza o ciclo de leitura e envio no período do dia, onde os dados são relevantes. No período noturno, o Arduino permanece em um estado de espera até a identificação do início do próximo dia, quando então, todo o ciclo de leitura, transmissão e gravação é reiniciado.

Nos períodos onde a rede *Wi-Fi* estiver indisponível, o envio para o servidor não será realizado. Entretanto, a gravação no cartão SD será realizada normalmente de forma a creditar maior confiabilidade às possíveis analises sobre as grandezas. No retorno da disponibilidade da rede, o ESP retoma a conexão com o ponto de acesso, restituindo o processo de envio para o banco de dados no servidor.

2) Software no Servidor

No servidor, o código desenvolvido em na linguagem PHP é responsável pela interconexão dos dados recebidos com o banco de dados. Ou seja, o algoritmo se preocupa fundamentalmente em identificar uma nova solicitação de comunicação vinda do Arduino, e então "receber" os dados enviados pelo controlador. Quando verificado o recebimento, o algoritmo realiza uma varredura na *string* e identifica cada um dos valores das grandezas concernentes (tensão, corrente, irradiância e temperatura de cada módulo) através do seu prefixo.

Cada grandeza identificada é transferida para uma variável específica. Nessa etapa, o algoritmo se encarrega também de calcular a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos em cada um dos dois sistemas (fixo e móvel) através de uma simples multiplicação da corrente pela tensão. Uma vez em posse de todas as grandezas elementares, o algoritmo aloca cada um dos valores, em uma nova linha, nas respectivas colunas da tabela do banco de dados. A última coluna da tabela recebe uma marca temporal, ou seja, uma variável do tipo *timestamp* que fornece a data e horário exatos do momento de alocação dos dados na tabela. A conexão com o banco é encerrada até a próxima solicitação. Dessa forma, o algoritmo no servidor fica em espera até que seja identificado um novo envio de dados vindo do Arduino, reiniciando assim o ciclo, e gravando uma nova linha na tabela.

V. Coleta dos Dados e Funcionamento

Após o desenvolvimento completo do DAS proposto, a coleta foi iniciada e os valores obtidos foram armazenados no banco de dados. A leitura de cada um dos módulos sensores construídos (excetuando-se o de irradiância) foi validada fazendo o uso de instrumentos de medição de maior precisão e fidelidade notória. Os dados de tensão e corrente foram

comparados com as leituras obtidas através de um multímetro marca Minipa modelo ET-2600, com contagem de 4 3/4 dígitos e precisão de ±0,5 % +1D na escala utilizada (4/40/400 V), e de ±1,2 % +3D na escala de corrente, partindo do pressuposto de que o instrumento está calibrado. O sensor de temperatura, por sua vez, foi comparado com um pirômetro digital. Em medições repetidas e sob diferentes condições de entrada (diferentes instantes de tempo) foi possível identificar o valor absoluto das taxas máximas de erro para cada módulo sensor. A Fig. 20 mostra uma representação do erro relativo para cada uma das 13 medições levantadas na validação dos sensores de tensão, corrente e temperatura respectivamente.

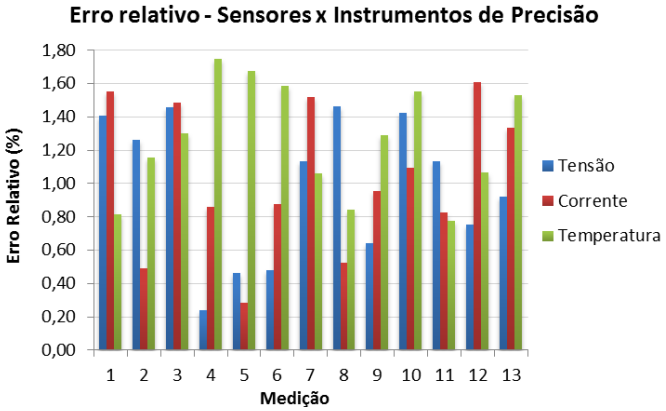

Fig. 20 – Representação do módulo do erro relativo nas medições

A linearidade de um sistema é dada por (3) onde Md é a maior distância entre a reta de saída e a curva real e FE_s é o fundo de escala de saída.

$$Linearidade\ (\%) = 100 \times \frac{Md}{FE_s} \qquad (3)$$

Conhecendo o maior erro de cada grandeza, e sabendo que o fundo de escala é 37 V para a tensão e 10 A para a corrente, a Tabela II traz os resultados que sumarizam a validação desenvolvida.

TABELA II - RESUMO DA ANÁLISE DE ERROS NOS SENSORES

Sensor	*Erro Relativo Médio (%)*	*Linearidade (%)*
Tensão	0,98	1,16
Corrente	1,03	0,94
Temperatura	1,26	– [b]

[b] O sensor não possui fundo de escala definido, de modo que sua linearidade não pode ser determinada.

Os sensores de irradiância, por sua vez tiveram sua validação comprovada no momento da realização da calibração, tomando como verdadeiro o valor fornecido pelo piranômetro, e posteriormente, através da calibração indireta. Através dos resultados obtidos é possível perceber que os sensores desenvolvidos possuem o fator de linearidade baixa, atestando assim a precisão do sistema. O sensor de temperatura, apesar de possuir um erro relativo maior, fornece uma medida confiável, uma vez que a precisão requerida para essa grandeza tem menor escala.

No que tange e à alocação de dados, considerando um período de geração de 12 horas, e sabendo que cada hora comporta 12 leituras, um dia completo gera aproximadamente 144 novas linhas de dados na tabela do banco de dados. Tomando esse valor como base, DAS desenvolvido gera aproximadamente 4300 linhas de dados mensais. Entretanto, é importante frisar que esse período de geração pode sofrer variações consideráveis por dois principais motivos: a alteração da inclinação terrestre ao longo do ano (alterando a trajetória relativa de rotação da Terra com respeito ao Sol), e as condições climáticas desfavoráveis.

Durante o período de validação do sistema, os valores das grandezas coletados mostraram-se coerentes com os valores esperados, considerando as condições de irradiância dos períodos avaliados. As possíveis diferenças entre medições em períodos subsequentes têm relação com as condições de irradiância, afetada diretamente pelos agentes naturais tais como nebulosidade e fumaça. Dos dados coletados, a principal variação, ainda que pequena, é relativa à medição de temperatura. Essa variação decorre fundamentalmente do vento incidente sobre o sensor, reduzindo momentaneamente a temperatura lida pelo sensor. Entretanto, essa disparidade entre as medições de temperatura não é significativa devido a natureza de precisão requerida para essa grandeza em sistemas fotovoltaicos. Assim, a regularidade do sistema, agregada à precisão dos dados obtidos permite que estes possam ser usados para gerar os mais diversos tipos de informação.

Para melhor ilustrar o funcionamento do sistema de aquisição, transmissão, e armazenamento, plotou-se um gráfico (utilizando os valores da tabela do banco) para demonstrar visualmente os dados adquiridos ao longo de um dia ensolarado. A Fig. 21 mostra um gráfico contendo simultaneamente o comportamento de cada uma das quatro grandezas coletadas ao longo do período de geração. Na figura, a variação das curvas no período entre as 8:25 h e 9:30h é relativa a um sombreamento sobre o painel decorrente de um poste de energia elétrica, não contendo relação com instabilidades de leitura.

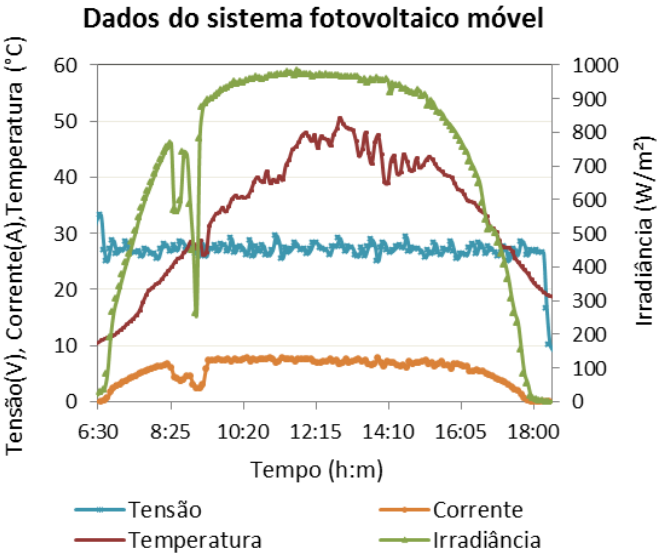

Fig. 21 – Dados coletados em 25/09/2017 relativos ao sistema móvel

Como um dos objetivos do trabalho é fornecer os dados para serem utilizados na comparação de viabilidade e geração entre as duas topologias instaladas, a potência gerada em cada um dos sistemas foi graficamente comparada. A Fig. 22 mostra as curvas obtidas para cada um dos sistemas. Na figura é possível perceber o incremento de potência dada a utilização do módulo com sistema de rastreamento frente ao módulo fixo. Esse tipo de informação, bem como os mais diversos tipos de estudos e análises a respeito da tecnologia fotovoltaica são viabilizados a partir do sistema desenvolvido e do banco de dados gerado.

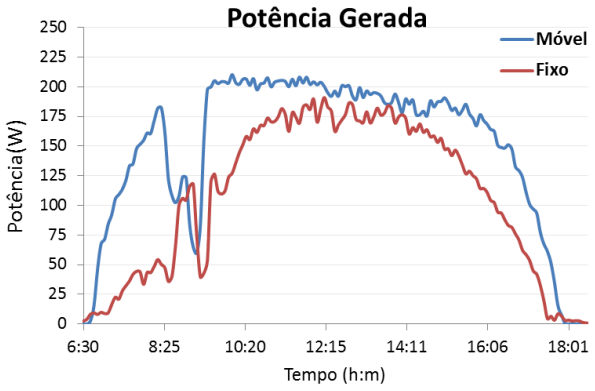

Fig. 22 – Comparação de potência para o dia 25/09/2017

A análise gráfica dos dados é invariavelmente a melhor forma de estudar o comportamento de determinada grandeza, ou de comparar sistemas, tais como o do caso em questão. Entretanto, para não condicionar a analise visual ao acesso ao banco, é fundamental a disponibilidade dos dados em um local de acesso livre, rápido e dinâmico.

VI. Sistema de Visualização dos Dados

A análise quantitativa dos dados é essencial para obter conclusões e gerar informação a respeito da geração de energia, condições climáticas, eficiência, desempenho, e outros parâmetros relativos à instalação fotovoltaica. Nessa instância, é fundamental a geração de gráficos e histogramas que transformem os dados obtidos, tornando-os facilmente exploráveis por qualquer usuário.

A interface de monitoramento pode ser feita utilizando softwares específicos ou utilizando sistemas de hipertexto baseados na Web [32]. Os principais softwares capazes de criar interfaces gráficas e se conectar com o banco de dados são pagos e necessitam de licença para operar. Alguns exemplos são o MATLAB e LabView ou softwares SCADA, tais como o Elipse. A necessidade de licença torna o sistema custoso e pouco flexível uma vez que restringe a visualização dos dados a computadores específicos que possuam o software instalado.

Por esse motivo, o presente trabalho se baseia no monitoramento do sistema fotovoltaico através do uso sistemas Web. Com a aquisição dos dados e seu armazenamento na nuvem, é interessante que a informação possa ser acessada facilmente e de maneira rápida de qualquer lugar, em qualquer momento.

A. Sistema de monitoramento Web

Sistemas Web têm a vantagem de funcionarem através da Internet, sem a necessidade da instalação de softwares ou *plugins*. Sistemas desse tipo são multi-plataforma e podem ser acessados por computadores, celulares, tablets entre outros. O desenvolvimento do sistema Web pode ocorrer usando as linguagens HTML, CSS, PHP e Javascrip. A criação de uma página Web geralmente não impõe o uso de um ambiente específico, podendo ser usada por computadores com diferentes sistemas operacionais e um simples editor de texto.

O Sistema Web desenvolvido é hospedado na nuvem, dentro do Servidor. A comunicação entre o banco de dados e a aplicação é realizada por meio de uma página em PHP. A aplicação realiza as consultas necessárias no banco e retorna os valores para atualizar os gráficos automaticamente, sem a necessidade de o usuário demandar de forma específica. Além disso, para tornar a aplicação prática de ser utilizada, o sistema conta com botões, abas e links que facilitam a navegação e trazem a informação de forma acessível e uniforme.

B. Informação Exibida

O monitor Web conta com gráficos, diagramas e histogramas relativos aos dados coletados para que a análise de geração seja feita de maneira eficaz. Todos os gráficos plotados consideram o sistema fixo e o sistema com rastreamento solar. A informação exibida em cada um dos gráficos fornece a possibilidade de comparar os sistemas em todas as dimensões, dentro dos parâmetros coletados. O monitor Web desenvolvido é composto basicamente pelas seguintes informações:

- Detalhes sobre o projeto e o sistema instalado;
- Gráficos diários de tensão, corrente, temperatura e irradiância vs. tempo;
- Histogramas filtráveis de energia produzida;
- Informações de contato e localização do sistema.

Essas informações estão separadas em abas para facilitar a navegação. Os gráficos diários (Fig. 23) possuem filtros que permitem a seleção da data e consequente visualização dos dados relativos a qualquer período. Os histogramas, por sua vez, possuem filtros de meses e anos, permitindo a escolha e visualização dos dados de qualquer período desejado, como mostra a Fig. 24.

A informação do sistema fica disponível 24 horas por dia em uma página Web, onde o usuário consegue acessá-la de qualquer dispositivo através de uma URL específica [33]. Na página, o usuário consegue visualizar o valor dos parâmetros do sistema fixo e do sistema móvel, em tempo real ou em qualquer momento de determinado dia. Ademais, as curvas exibidas permitem que seja avaliado o desempenho do sistema, monitorando assim a instalação fotovoltaica na qual o sistema é aplicado.

O banco de dados pode fornecer uma vasta gama de informações do sistema fotovoltaico e é uma importante ferramenta de uso acadêmico. O sistema de visualização desenvolvido permite o monitoramento da operação, energia gerada em vários períodos, potência instantânea e uma grande variedade de informações para tomada de decisões ou para diferentes tipos de análise aplicada.

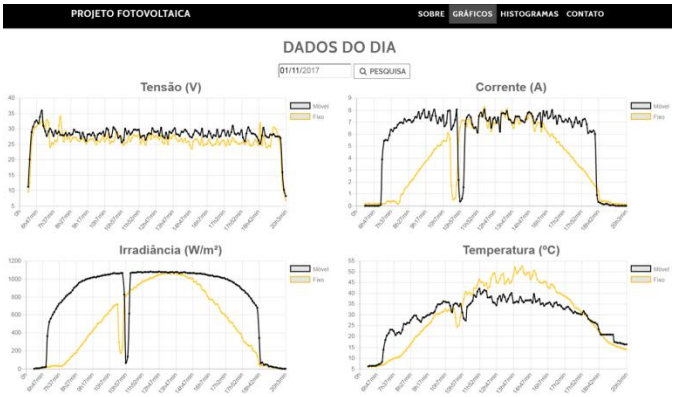

Fig. 23 – Aba "Gráficos" do monitor Web desenvolvido

VII. Vulnerabilidades e Aperfeiçoamentos

Apesar de o sistema desenvolvido ser robusto e ter uma precisão dentro dos limites aceitáveis pela norma IEC 61724 [14], existem alguns pontos que devem ser considerados acerca

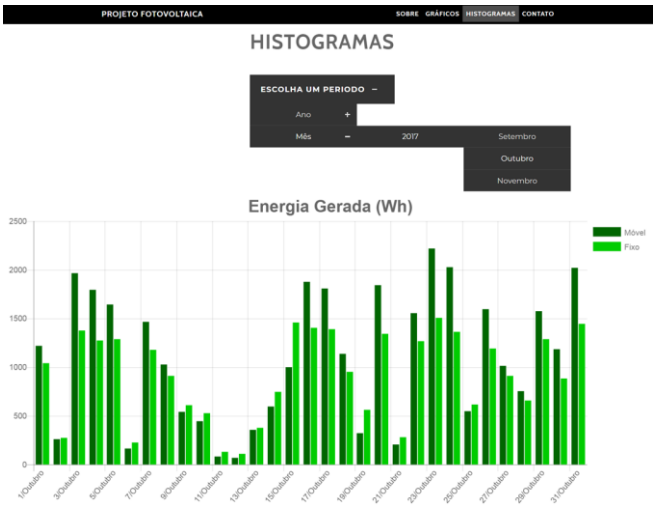

Fig. 24 – Aba "Histogramas" do monitor Web desenvolvido

do trabalho. Primeiramente, a arquitetura desenvolvida teve o objetivo principal de cumprir com as necessidades do projeto, levando em consideração sua aplicação na planta fotovoltaica descrita. Neste caso específico, os sensores externos possuíam conexão direta com o Arduino (internamente montado) por meio de cabos de rede do tipo par trançado. A distância do local de instalação dos módulos fotovoltaicos ao prédio onde o Arduino e os demais componentes de hardware se localizam não excede 15 metros, de modo que a queda de tensão sobre os cabos é desprezível.

Para locais onde a planta fotovoltaica é remotamente localizada com respeito ao ponto de acesso à rede *Wi-Fi*, a arquitetura do sistema de aquisição dos dados deve ser alterada para garantir o funcionamento e a confiabilidade do sistema. Uma vez que, devido à distância, a ligação entre os sensores e as portas analógicas do controlador não pode acontecer de maneira direta, faz-se crucial o incremento de mais um controlador. O primeiro deles, situado próximo às plantas fotovoltaicas, seria conectado diretamente aos sensores concernentes, ficando responsável pela aquisição dos valores de grandezas medidos. Por intermédio de um protocolo de comunicação específico (Modbus, por exemplo) e de um meio físico apropriado (EIA-485, ZigBee, Rádio,...) os valores coletados seriam transmitidos para o segundo controlador. Este segundo controlador, utilizando toda a lógica descrita no trabalho, receberia os dados e os transmitiria via *Wi-Fi* para o banco de dados. A Fig. 24 resume a adaptação do sistema transmissão dos dados para plantas fotovoltaicas remotas.

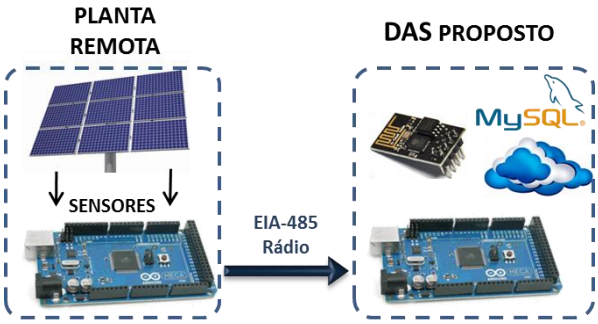

Fig. 24 – Adaptação do DAS proposto para plantas fotovoltaicas remotas

O segundo ponto que deve ser considerado refere-se ao backup e recuperação automática dos dados. O sistema desenvolvido conta com o *shield* SD que armazena os dados mesmo na ausência de rede. Entretanto, na ausência desta, os dados no servidor não são atualizados. Melhorias futuras intentam a recuperação automática dos dados no reestabelecimento da conexão com a rede. Dessa forma, os dados coletados no período de indisponibilidade, e armazenados no SD, poderiam ser transmitidos sequencialmente ao servidor quando a conexão estiver reestabelecida, garantindo assim que nenhum dado seja perdido.

O terceiro ponto a ser considerado tange à proteção do hardware envolvido contra descargas atmosféricas. Para o caso específico da planta fotovoltaica utilizada, esse cuidado não possui pertinência, uma vez que todo o local de instalação do sistema já possui um sistema de proteção robusto. Para plantas fotovoltaicas não protegidas por sistemas de aterramento, é fundamental o dimensionamento de um sistema de proteção. É importante frisar essa necessidade para proteger todo o DAS desenvolvido, evitando assim que descargas atmosféricas tragam consequências indesejadas para o hardware utilizado.

É importante atentar também a importância de se realizar uma inspeção periódica para verificar o estado dos sensores (principalmente os externos), conexões e leituras. As variações de temperatura, umidade e outros fatores físicos podem causar o aumento da incerteza na leitura, agregando desvios entre o valor lido e o valor verdadeiro. Por esse motivo, a realização de calibrações periódicas atesta maior confiabilidade dos dados coletados ao longo do tempo. É oportuno ter em mente que o sistema desenvolvido possui suas limitações, tais como as citadas nesta seção, além da falta de um hardware dedicado para o sistema. Estas serão alvo de aprimoramentos em trabalhos futuros, mas não retraem o grande potencial do sistema desenvolvido no monitoramento de sistemas fotovoltaicos.

VIII. Considerações Finais

O presente trabalho descreveu a análise e elaboração de um novo sistema de aquisição de dados e visualização aplicado a sistemas fotovoltaicos. O sistema desenvolvido usa um controlador Arduino Mega2560 para a obtenção dos dados dos sensores, que por sua vez foram escolhidos visando o baixo custo de implementação, associado aos requisitos de precisão da norma IEC 61724. Diferentemente dos DAS convencionais, os valores de grandeza mensurados são transmitidos via padrão IEEE 802.11(*Wi-Fi*) diretamente para um banco de dados hospedado na nuvem. Isso permite uma grande flexibilidade na implementação do sistema de monitoramento, uma vez que, a hospedagem do sistema na Web permite que a informação torne-se disponível para qualquer usuário com acesso à internet.

Existem inúmeros métodos para a coleta do valor de cada grandeza, baseados nos mais diversos tipos de sensores. O sistema desenvolvido fez o uso dos sensores descritos na seção III devido à ligação estrita entre custo e precisão requerida. O sensor de tensão utilizado é invariavelmente o método mais eficiente para medição dessa grandeza. A corrente, por sua vez utiliza um sensor de efeito hall com custo bastante reduzido, mas que, devido às características do componente, necessita um circuito de condicionamento para aumentar a resolução de leitura. Já o sensor de irradiância, apesar de não possuir a mesma precisão do que um instrumento de medição comercial destaca-se pela sua simplicidade e efetividade na medição. Quanto ao sensor de temperatura, o seu formato digital de saída associado à precisão de ±0,5 ºC para a faixa de operação do sistema garante a confiabilidade dos dados obtidos.

O controlador utilizado destaca-se pelo baixo custo de aquisição agregado à facilidade de programação e ao poderio de processamento e recursos necessários para a proposta. No que tange à transmissão dos dados, a utilização de um meio

físico *wireless* torna o sistema extremamente flexível e garante a redução de custos e espaço na instalação do hardware. O ESP8266 utilizado na transmissão dos dados possui uma capacidade de processamento elevada. A sua utilização como meio de transmissão entre o os dados coletados no Arduino e o banco garantem uma relação custo-efetividade condizente com a necessidade, garantindo a transmissão livre de falhas para o endereço destino. Na utilização do banco de dados para o armazenamento dos dados transmitidos, foi possível confirmar a robustez e praticidade na execução desse objetivo, ratificando a escolha desse método. O banco de dados a permite o acesso histórico e atual da informação de forma remota, e assegura maior facilidade no desenvolvimento do sistema Web. Este que, por sua vez possui uma interface amigável, exibindo informações importantes sobre a tecnologia em questão e fornecendo um monitoramento confiável, flexível e de livre acesso.

O custo do sistema proposto é consideravelmente menor que o dos dispositivos comerciais disponíveis, garantindo uma economia de mais de 80%, com pouca perda de precisão e confiabilidade. A arquitetura desenvolvida possui hardware e software de fácil construção e desenvolvimento. Isso torna o sistema totalmente adaptável e adequado para cada aplicação pretendida no monitoramento de sistemas fotovoltaicos.

O sistema de aquisição de dados proposto representa uma ferramenta de hardware e software original, complexa e muito útil na obtenção de informações concernentes a sistemas fotovoltaicos. A arquitetura apresentada neste trabalho, desde a aquisição de dados até o desenvolvimento do sistema de monitoramento Web viabiliza a sua utilização em grande parte das plantas fotovoltaicas atualmente instaladas. A sua flexibilidade de implementação associada ao baixo custo previsto de construção faz com que o sistema tenha, de fato, um grande potencial de aplicação.

REFERÊNCIAS

[1] EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2016, Ano Base 2015, Rio de Janeiro, 2016.

[2] EREC, Conselho Europeu de Energia Renovável, [R]evolução energética - Perspectivas para uma energia global sustentável, Stuttgart, Alemanha, 2007.

[3] H. Mousazadeh et al., “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 1800-1818, Elsevier, 2009.

[4] IEA PVPS, International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme, Trends in photovoltaic applications, 21th edition, 2016. Disponível em: http://www.iea-pvps.org.

[5] ISE(2017), Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Photovoltaics Report, Freiburg, July, 2017.

[6] ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios, Brasília, 18 de outubro de 2017.

[7] E. Lorenzo, M. Perez and A. Ezpeleta, “Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis”, Progress in Photovoltaics 10, 2002, pp. 533–543.

[8] M. Fuentes, M. Vivar, J.M. Burgos, J. Aguilera, J.A. Vacas, “Design of an accurate low-cost autonomous datalogger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards”, Solar Energy Materials & Solar Cells 130, 2014, Elsevier, pp. 529-543.

[9] O. Ben Belghith and L. Sbita, "Remote GSM module monitoring and photovoltaic system control", 2014 First International Conference on Green Energy ICGE 2014, Sfax, 2014, pp. 188-192.

[10] R. Mukaro and X. F. Carelse, "A microcontroller-based data acquisition system for solar radiation and environmental monitoring", in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 48, no. 6, Dec 1999, pp. 1232-1238.

[11] M. Anwari, A. Hidayat, M.I. Hamid and I. Taufik, “Wireless data acquisition for photovoltaic power system”, in Proceedings of International Congress: Telecommunications Energy Conference, Incheon, Korea, October 2009, pp.1-4.

[12] L. Bian, X. Zou, Y. Zhai and H. Liu, “A multifunctional data acquisition system for photovoltaic plants”, 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012), Yantai, 2012, pp. 598-602.

[13] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, “Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy systems monitoring”. Renew. Energy 28, 2003, pp. 139-152.

[14] IEC 61724, Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines for Measurement, Data Exchange, and Analysis, 1st ed., International Electrotechnical Commission (IEC), Switzerland, Geneva, 1998.

[15] S.R. Madeti and S. N. Singh, “Monitoring system for photovoltaic plants: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, 2017, Elsevier, pp. 1180-1207.

[16] M. Benghanem, “Low cost management for photovoltaic systems in isolated site with new IV characterization model proposed”, Energy Conversion and Management 50(2009), Elsevier, pp.748-755.

[17] S. J. Durand, “Attaining a 30-year photovoltaic system lifetime: The bos issues”, Progress in Photovoltaics: research and applications, Wiley Online Library, V.2, n.2, 1994, pp. 107-113.

[18] V. M. Andreev and V. A. Grilikhes, “Photovoltaic conversion of concentrated sunlight”, John Wiley, Nova York, 1997.

[19] C. Petrescu, C. Lupu, F. S. Tudor and M. Azzouzi, “Data acquisition system for recording of photovoltaic panel power”, 2nd International Conference on Systems and Computer Science, Villeneuve d'Ascq, 2013, pp. 121-126.

[20] M. E. Treter, “Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados e monitoramento para o diagnóstico de centrais de geração fotovoltaica”, Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, 2016.

[21] S. C. S. Jucá, P.C.M. Carvalho and F. T. Brito, “A low cost concept for data acquisition systems applied to decentralized renewable energy plants”, Sensors 11, 2011, pp.743-756.

[22] R. Mukaro, X.F. Carelse and L. Olumekor, “First performance analysis of a silicon-cell microcontroller-based solar radiation monitoring system”, Solar Energy 63(1998), Elsevier, pp. 313-321.

[23] J. Ding, J. Zhao and B. Ma, “Remote monitoring system of temperature and humidity based on GSM”, Image Signal Process 2009, 2009, pp.1-4.

[24] Atmel Corporation, Atmel ATmega64/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V, ATMega2560 Datasheet, Fev. 2014.

[25] Texas Instrument, LM317 3-Terminal Adjustable Regulator, LM317 Datasheet, Set. 1997 [Revisado em: Set., 2016].

[26] Allegro MicroSystems LLC, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor, ACS-712 Datasheet, 2006 [Revisado em: Nov., 2012].

[27] Texas Instrument, TL43xx Precision Programmable Referencer, TL431 Datasheet, Ago. 2004 [Revisado em: Jan., 2015].

[28] Maxim Integrated Products Inc, Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer, 2015.

[29] Espressif Systems IOT Team, ESP8266EX Datasheet Version 4.3, ESP8266 Datasheet, Jun. 2015 [Revisado em: Abr., 2017].

[30] K. I. Satoto, R. R. Isnanto, R. Kridalukmana and K. T. Martono, “Optimizing MySQL database system on information systems research, publications and community service”, 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, 2016, pp. 1-5.

[31] Adafruit Industries, Adafruit Data Logger Shield, Datalogger Datasheet, Revisado em: Jun., 2006.

[32] J. P. Lahti, A. Shamsuzzoha and T. Kankaanpää, “Web-based technologies in power plant automation and SCADA systems: A review and evaluation”, 2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, Penang, 2011, pp. 279-284.

[33] IFRS Campus Farroupilha, “Fotovoltaica - Produção de energia elétrica renovável no IFRS - Campus Farroupilha”, 2017, disponível em : <http://web.farroupilha.ifrs.edu.br/fotovoltaica/>, [Acessado em: 11/11/2017].