

IoT Network and Sensor Signal Conditioning for Meteorological Data and Photovoltaic Module Temperature Monitoring

R. Pereira, S. Jucá, P. Carvalho, and C. Souza

Abstract—The present paper describes the design, development, implementation and validation of an Internet of Things (IoT) network with sensors signal conditioning circuits for monitoring decentralized photovoltaic (PV) plants. The system intends to reduce costs of commercial dataloggers and sensing modules which require control and data storage using proprietary software. We applied our IoT monitoring network in three PV plants installed in Fortaleza and Maracanaú cities, Brazil, and in Cologne, Germany. The applied embedded solutions (namely, ESP 8266 and ESP 32) are based on free software and hardware and communicate with a Cloud server via Wi-Fi. A website, called Web Monitor, was developed in PHP for online and real-time data consultation in form of charts. The main objective of the proposal is to measure PV module temperature, providing data for the analysis of PV module's efficiency and for fault detection in case of PV cells overheating. Solar irradiance, ambient temperature, relative air humidity and wind speed are also monitored, getting more data to analyze the effect of meteorological parameters on the PV module's performance. The proposed system was designed in compliance with IEC 61724:1998 standard and the obtained charts are discussed in the results section considering different periods of the year. Finally, we validate the proposed temperature conditioning system with a commercial piece of equipment and a correlation of 0.9999 was achieved.

Index Terms—Photovoltaics, Sensor Signal Conditioning, IoT Monitoring Network.

I. INTRODUÇÃO

COM relação às fontes renováveis de energia, os sistemas de monitoramento online são de grande importância na análise do potencial solar ou eólico de uma região, nos procedimentos de detecção de falhas, na verificação prática de dados de projeto e na otimização da eficiência de conversão das usinas [1], [2]. Comumente, para o monitoramento, são utilizados equipamentos caros tais como: *dataloggers* e equipamentos eletrônicos de sensoriamento, controle e armazenamento de dados; os quais usam geralmente software

proprietário, baixo número de conexões de sensores e manutenção restrita ao fabricante.

Uma solução atual para essa questão, e considerando o crescente número de unidades de geração de energia descentralizadas, é o desenvolvimento de módulos microcontrolados e distribuídos de monitoramento, os quais apresentam flexibilidade de instalação e manutenção e, atualmente, têm custos bastante reduzidos [3].

Além disso, para melhor atender os requisitos de transmissão de dados em larga escala em diversos setores como industrial, comercial e inclusive residencial, o desenvolvimento de módulos de monitoramento deve ter como requisito básico a capacidade de operar dentro da infraestrutura da Internet e dentro do conceito de Nuvem Computacional. O conceito de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) surgiu para otimizar o monitoramento e a disponibilização de dados de sensores, aumentando assim a conectividade dos dispositivos dentro desse conceito [4]. Um exemplo de integração de Nuvem Computacional e IoT é visto em [4]. Os autores descrevem uma infraestrutura de Nuvem para agregar e armazenar dados de diferentes fontes de dispositivos IoT.

Um sistema de aquisição e transmissão de dados baseado em uma popular plataforma de prototipação eletrônica, o Arduino, com armazenamento local e suporte a até 16 sensores para medição de temperatura de módulos fotovoltaicos (FV) é proposto por [5]. Uma solução de hardware implementando algoritmo dedicado para verificar a confiabilidade dos módulos FV e melhorar a eficiência geral do sistema é apresentado em [6]. Um novo sensor de temperatura para monitoramento contínuo de um módulo FV que alimenta um satélite ligado à terra é apresentado em [7]. Uma revisão bibliográfica sobre sistemas de baixo custo aplicados ao monitoramento de plantas descentralizadas de energia é apresentada em [8]. Os sistemas analisados utilizam o microcontrolador PIC16F com display LCD para visualização local de dados; e Arduino, com envio dos dados para um site via cabo Ethernet.

Em [9], é proposto um sistema de módulos utilizando *Power Line Communication* (PLC), em que o módulo PLC escravo coleta parâmetros elétricos de módulos FV e envia para o módulo PLC mestre. Um *datalogger* comercial recebe então os dados do módulo PLC mestre via RS-232 e do inversor FV da planta em estudo via RS-485 para envio à Internet via Ethernet ou Wi-Fi. Uma arquitetura multissensor de baixo custo com sensores de tensão, corrente, irradiância e temperatura para o monitoramento (no nível do painel) de um sistema FV, é

Este estudo foi financiado em parte pela *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001 e pelo CNPq (Projeto: 420133/2016-0 Universal 01/2016).

Renata I. S. Pereira e Cleonilson P. Souza, Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Elétrica, João Pessoa, 58051-970, Brasil (e-mails: renata@dee.ufpb.br e protasio@cear.ufpb.br).

Sandro C. S. Jucá, Instituto Federal do Ceará, Eixo de Computação, Maracanaú, 61939-140, Brasil (e-mail: sandrojuca@ifce.edu.br).

Paulo C. M. Carvalho, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 60455-760, Brasil (e-mail: carvalho@dee.ufc.br).

apresentada com o objetivo de detectar as causas das perdas de eficiência de geração [10].

Visando eliminar as desvantagens relacionadas aos equipamentos convencionais de monitoramento online geralmente aplicados a usinas de geração centralizada, no presente artigo é proposta uma rede de monitoramento de plantas FV utilizando o conceito IoT. Com o objetivo de modularizar e reduzir custos, oferecendo processamento de dados em tempo real, a rede IoT proposta é composta por dois módulos de hardware de baixo custo e software livre. O primeiro é baseado no SoC (*System On a Chip*) ESP 32, o qual é utilizado para realizar monitoramento online da irradiação solar incidente no módulo FV e também da temperatura na superfície posterior, pois a eficiência da geração FV é afetada de acordo com o nível da temperatura no módulo [11]. O segundo é baseado no SoC ESP 8266, utilizado para medição da velocidade do vento, da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar. Com a rede IoT proposta, os dados medidos podem ser obtidos e disponibilizados de forma online para avaliar a eficiência FV, caso contrário, seria necessário usar dados meteorológicos para estimar matematicamente a eficiência [12]. Para permitir o monitoramento remoto dos dados coletados em forma de gráficos, um site chamado Web Monitor foi desenvolvido em linguagem PHP, onde é possível obter dados em tempo real e selecionar a visualização diária de todos os parâmetros armazenados em um banco de dados MySQL. Dessa forma, a partir de qualquer dispositivo computacional conectado à Internet, pode-se realizar o monitoramento remoto e online dos parâmetros críticos para a geração de energia FV com base na norma IEC 61724:1998 [13]; além de possibilitar que falhas sejam detectadas em tempo real. Desta forma, uma interface de aplicação web para monitorar remotamente o desempenho de sistemas de geração [14] é altamente necessária. Em síntese, a rede IoT proposta consiste em um sistema de monitoramento completo desde o monitoramento das variáveis físicas e ambientais, transmissão de dados para um banco de dados em Nuvem, até a visualização remota e em tempo real dos dados através do Monitor Web, acessado via Internet por qualquer dispositivo computacional. Considerando a revisão de literatura realizada, os sistemas pesquisados falham em atender a todos esses pontos juntos em um mesmo projeto.

II. SISTEMA DE MONITORAMENTO IoT E CONDICIONAMENTO DE SINAIS DESENVOLVIDO

As medições de temperatura de módulos FV têm sido geralmente negligenciadas no Brasil, onde 12 horas de Sol por dia são geralmente obtidas com irradiação diária média de 5,5 kWh/m² [15]. Com essa motivação, é descrito neste trabalho o projeto e o desenvolvimento de uma rede IoT modular, como mostrado na Fig. 1, focada em monitoramento de dados meteorológicos e da geração FV. A rede IoT desenvolvida consiste atualmente de três plantas FV: Colônia-Alemanha (Lat.: 50.933730, Long.: 6.988664); Fortaleza-Brasil (Lat.: -3.737491, Long.: -38.572781) e Maracanaú-Brasil (Lat.: -3.872287, Long.: -38.612233). Para cada planta da rede IoT, os módulos FV são monitorados de forma individual a fim de possibilitar detecção de falhas. O conceito de implementação de unidades de monitoramento individuais é baseado na redução de custos, na modularidade e na praticidade da instalação, já que usinas FV podem ter centenas de módulos.

A Fig. 1 mostra a unidade de monitoramento IoT instalada na cidade de Maracanaú, Brasil. A usina de Maracanaú monitora dados de temperatura no centro e na borda de cinco módulos FV e irradiação solar usando um módulo baseado em ESP 32. Já o módulo baseado em ESP 8266 é responsável pelos dados de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A usina de Fortaleza consiste em seis módulos FV e monitora os mesmos parâmetros, exceto a temperatura nas bordas. Em Colônia, apenas a temperatura no centro dos cinco módulos FV é monitorada. O monitoramento de variáveis meteorológicas permite a análise qualitativa e quantitativa de recursos ambientais e permite tomadas de decisões de forma mais eficiente [16]. As três plantas trabalham em paralelo enviando dados de todos os sensores a cada minuto, 24 horas por dia. A norma IEC 61724:1998 especifica que o intervalo de amostragem para parâmetros que variam diretamente com a irradiância deve ser no máximo de 1 minuto. Para parâmetros com constantes de tempo maiores, um intervalo arbitrário pode ser especificado entre 1 e 10 minutos [13]. Com relação à sincronização de dados, o registro de data e hora é padronizado em todas as usinas da rede IoT.

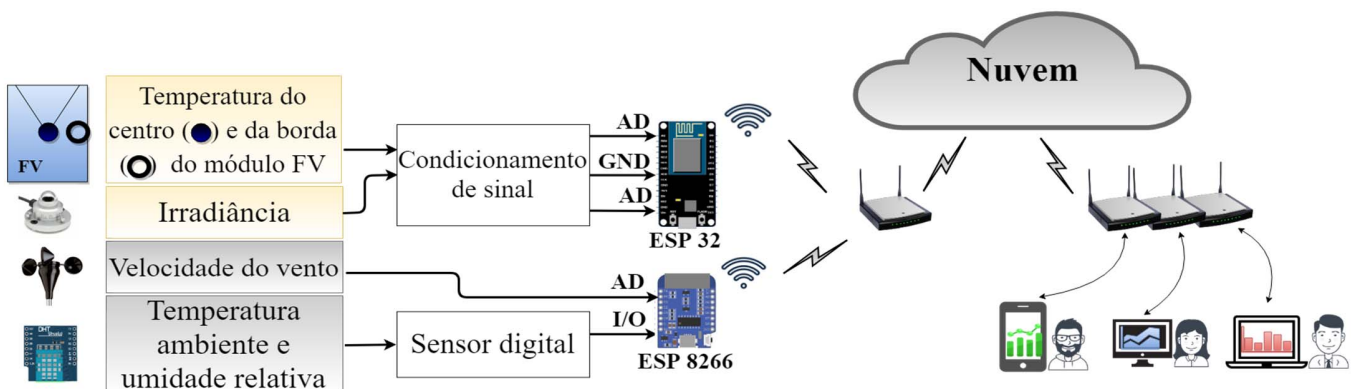


Fig. 1. Sistema de monitoramento IoT desenvolvido.

A. Sistema Embarcado ESP 32 e Circuitos de Condicionamento

O módulo IoT ESP 32 *Cloud on Chip* com software e hardware livres foi lançado em setembro de 2016. O ESP 32 é um SoC com microcontrolador *dual-core*, rádio Wi-Fi/Bluetooth *dual-mode*, entre outros periféricos integrados. O microcontrolador opera com frequência de até 240 MHz e pode atingir 600 DMIPS (Dhrystone MIPS - *Million Instructions per Second*). O ESP 32 é um SoC para IoT de baixa potência projetado para aplicações móveis, eletrônicos vestíveis, entre outros; programável em Linguagem C utilizando o framework ESP-IDF da Espressif [17]. As configurações iniciais do projeto foram feitas com a *toolchain* do Windows® no ambiente SSH MinGW. Em seguida, para o desenvolvimento do código e depuração, foi utilizado o software Eclipse. Com relação à programação, as principais etapas do código do ESP 32 estão descritas no Anexo I.

Na Tabela 1, o módulo IoT ESP 32 é comparado com outras plataformas comerciais equivalentes utilizadas para a finalidade de monitoramento IoT. Para a comparação de custo, selecionaram-se plataformas com antena Wi-Fi embarcada, periféricos e processamento equivalentes. Os preços foram obtidos a partir de pesquisa em diversas lojas virtuais com sede na China, nos Estados Unidos e no Brasil. Observa-se que o ESP 32 apresentou o melhor custo-benefício dentre todos.

TABELA 1
COMPARAÇÃO DE CUSTO DO ESP 32 COM OUTRAS PLATAFORMAS

Placa de desenvolvimento IoT	Custo China	Custo EUA	Custo Brasil
ESP 32 [18]	\$ 3	\$ 8	\$ 13
Banana Pi Zero H2 [19]	\$ 25	\$ 35	\$ 65
Orange Pi Zero H2 [20]	\$ 10	\$ 22	\$ 34
Tiva CC3200 Texas [21]	\$ 30	\$ 31	\$ 100
Raspberry Pi Zero W [22]	\$ 13	\$ 21	\$ 29

Para monitorar a temperatura do módulo FV, o sensor Pt100, que é um Detector de Temperatura Resistivo (RTD, do inglês *Resistance Temperature Detector*) foi escolhido. A Fig. 2 mostra o circuito com ESP 32 e os cinco sensores Pt100 conectados, montados em uma caixa com vedação para operar em campo instalado sob uma *string* FV. Os sensores Pt100 com encapsulamento TO-92 tem dois pinos e foram soldados a cabos manga (Fig. 3 (a)).

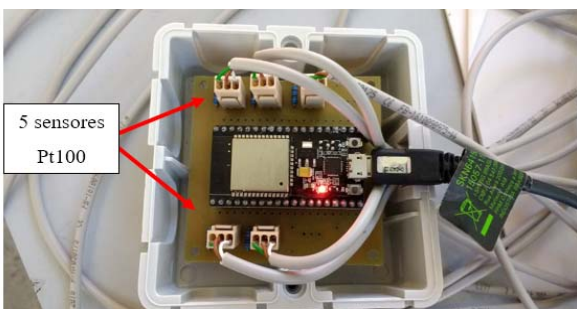


Fig. 2. Sensores Pt100 conectados ao módulo IoT ESP 32.

Em seguida, foram fixados à parte posterior dos módulos FV com cola térmica resistente à temperatura e isolados com silicone (Fig. 3 (b)).



Fig. 3. Sensor Pt100 (a) fixado ao módulo FV e isolado com silicone (b).

Para a conversão dos valores de resistência do Pt100 em valores de tensão de acordo com as especificações do conversor analógico-digital (ADC) do ESP 32, foi desenvolvido um circuito de condicionamento de sinal. Neste projeto, a conexão de três fios foi implementada.

Para a medição de tensão de acordo com a variação de resistência do Pt100, foi necessário utilizar uma ponte de *Wheatstone* (Fig. a - Anexo II). Assim, quando o Pt100 (RT1) for 82Ω , a tensão de saída entre os pontos V_{in1} e V_{in2} é 0 V. À medida que a resistência aumenta com a temperatura, uma diferença de tensão é medida entre os pontos V_{in2} e V_{in1} . A variação de $0,385 \Omega$ do Pt100 corresponde a $0,008 V$ e equivale a $1^\circ C$ de variação. Como a diferença de tensão é relativamente baixa, um circuito amplificador diferencial baseado no CI LM358N é usado para adequar o sinal ao ADC do ESP 32, como mostrado na Fig. a (Anexo II).

Para a leitura dos sensores Pt100, foi desenvolvido um circuito de multiplexação, em que oito entradas são lidas por um mesmo canal ADC através do CI 74HC4051. Desta forma, é possível expandir o número de sensores conectados ao ESP 32. O CI multiplexador é alimentado com a tensão de $3,3 V$ fornecida pelo ESP 32. Os ADCs do ESP 32 têm resolução de 12 bits e suportam medições em 18 canais (pinos habilitados via firmware). Para verificar a linearidade da curva de entrada-saída do ADC e identificar a escala que melhor se ajusta à curva do sensor, foi necessário calibrar o canal.

Para o monitoramento da irradiância solar, o piranômetro LP02 Hukseflux [23] foi aplicado. O piranômetro de Fortaleza tem uma sensibilidade de $18,56 \mu V/W/m^2$ e o de Maracanaú, $15,07 \mu V/W/m^2$. Como o sinal de saída do piranômetro LP02 é relativamente baixo para ser lido pelo ADC do ESP 32, cuja resolução é da ordem de $1 mV$, foi necessário desenvolver um condicionamento de sinal baseado em amplificador operacional a ser aplicado em ambas as plantas de Fortaleza e Maracanaú.

Para delimitar a faixa de amplificação, é necessário considerar os valores máximos de irradiância que podem ser atingidos no local a ser instalado o sistema. Para o caso de Fortaleza e Maracanaú, por exemplo, a irradiância pode apresentar picos em torno de $1.200 W/m^2$, portanto, para este valor, o sinal de saída do piranômetro será de $22,3 mV$. Considerando que o ADC começa a converter a partir de $11 mV$ (zona morta) e pode ser configurado para ler valores até $3,3 V$, o circuito foi projetado para a faixa de $11 mV$ a $3,3 V$.

Na Fig. b (Anexo II) são mostrados o circuito desenvolvido e a tensão de saída amplificada ($14 mV$ a $1,81 V$) para a faixa de entrada do piranômetro ($22 \mu V$ a $22 mV$).

B. Sistema Embarcado IoT ESP 8266

O SoC ESP 8266 [24] é uma versão anterior e com menos recursos que o ESP 32, lançada em 2014. O ESP 8266 contém um único canal ADC de 10 bits de resolução com faixa de 0 a 1 V. A placa mini D1 da Wemos, que é compacta e fornece módulos de sensores acopláveis, como o sensor DHT11, foi selecionada. O anemômetro para medição de velocidade do vento foi conectado ao canal ADC disponível e o DHT11 digital conectado a um pino GPIO.

Para medição da velocidade do vento, foi escolhido o anemômetro de onda senoidal de baixo nível NRG #40C com frequência proporcional à velocidade do vento. O sensor possui um fator de escala de 0,765 m/s/Hz e *offset* de 0,35 m/s. Portanto, é necessário desenvolver uma lógica para leitura dos valores, se um circuito de conversão não estiver disponível. O anemômetro possui um ímã de quatro polos que induz uma tensão de onda senoidal em uma bobina, produzindo um sinal de saída com frequência proporcional à velocidade do vento [25]. Para calcular a frequência da onda senoidal, estabeleceram-se algumas condições e parâmetros de programação. Uma das condições é a identificação da borda de subida para o início da contagem dos pontos da onda usando o ESP 32 ADC.

Depois de identificar o número de pontos na onda senoidal, o período e conseqüentemente a frequência, podem ser calculados. No entanto, o ADC não lê valores negativos, portanto, os pontos do semiciclo negativo são considerados '0'. O período é então obtido a partir da quantidade de pontos contados nos semiciclos positivo e negativo. Considerando os erros de leitura do ADC para valores de baixa frequência do anemômetro, o valor de 27 bits foi definido como o ponto inicial da borda de subida e não o valor '0'. Entretanto, isso não interfere na contagem dos pontos, porque o padrão da onda se repete no próximo ciclo. Os valores são então contados até que a leitura (V_{AD}) seja maior que 27 novamente e se as outras condições forem satisfeitas. Assim, inicialmente definiu-se uma flag em 1, quando o valor fosse menor que 27 para identificar transição da borda de descida para a borda de subida. Além disso, o valor atual do AD deve ser maior que o anterior. Para isto armazena-se o valor anterior em uma variável (V_{ant}) e compara-se com o valor atual armazenado em outra variável (V_{atual}). Por fim, se V_{ant} for menor que 27, V_{atual} for maior que V_{ant} e flag igual a 1, tem-se o início da borda de subida e inicia-se a contagem na variável V_{pos} .

Definiu-se um intervalo de 10 ms para a contagem dos pontos em V_{pos} , uma vez que para velocidade do vento de 6 m/s (típica rajada em Fortaleza e Maracanaú), a frequência é de 7,5 Hz e o período é de 130 ms. Logo, 10 ms é ideal para identificar vários pontos na onda, além de filtrar eventuais ruídos de alta frequência. Após calcular V_{pos} , obtém-se o período da onda a partir de (1):

$$Período = (V_{pos} + 1) \cdot 0,01 \quad (1)$$

Em que 0,01 são os 10 ms do intervalo de leitura. A frequência é o inverso do período e a velocidade do vento (Vel) é calculada de acordo com (2):

$$Vel = (freq \cdot 0,765) + 0,35 \quad (2)$$

Em que 0,765 m/s/Hz é o fator de escala e 0,35 m/s é o offset. A Fig. 4 mostra as condições necessárias para a construção da lógica de leitura de onda senoidal com o ADC. Na Fig. 5, três exemplos de formas de onda de saída do anemômetro são ilustrados: uma forma de onda de baixa frequência em (a), frequência média em (b) e alta frequência em (c). Por exemplo, se V_{pos} for igual a 17, em (a), o período seria 180 ms, a frequência 5,55 Hz e a velocidade 4,6 m/s. O fluxograma mostrado na Fig. 6 detalha como a lógica foi implementada.

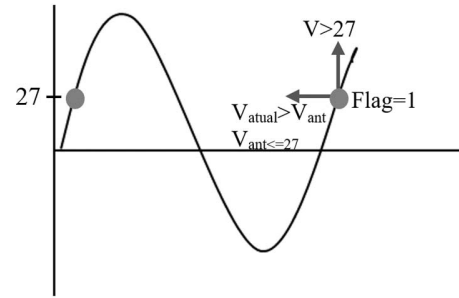


Fig. 4. Forma de onda do anemômetro e condições para a lógica de leitura do ADC.

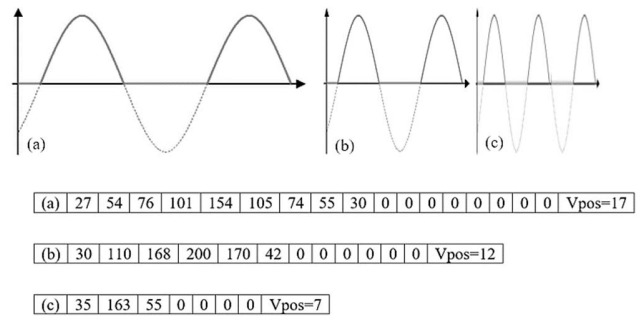


Fig. 5. Exemplos de formas de onda de saída do anemômetro.

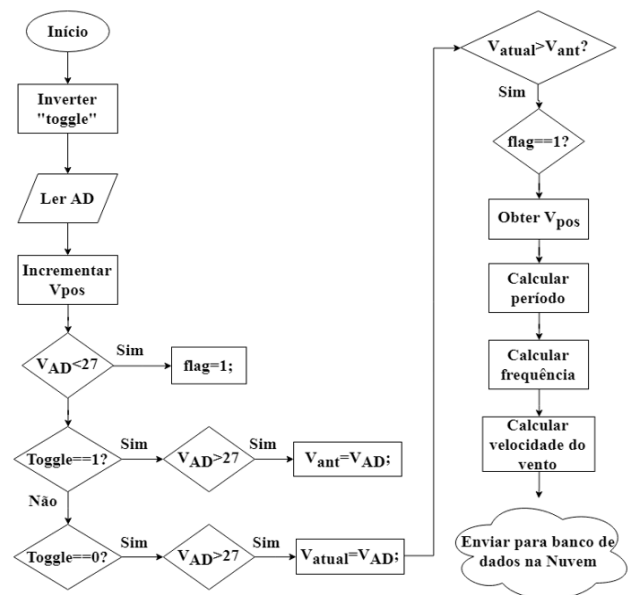


Fig. 6. Fluxograma do código de leitura do anemômetro com ESP 8266.

Por fim, na Tabela 2 são descritas as características técnicas dos módulos IoT utilizados.

TABELA 2
CONFIGURAÇÃO DO ESP 32 E DO ESP 8266

ESP 32	ESP 8266
Bluetooth 4.2 BLE	--
802.11 b/g/n Wi-Fi	802.11 b/g/n Wi-Fi
Processador dual core 32 bits	Processador <i>single core</i> 32 bits
LX6 Xtensa	L106 Xtensa
Frequência típica de 80 MHz	Frequência típica de 80 MHz
448 kB ROM	64 kB ROM
520 kB SRAM	160 kB SRAM
Até 16 MB de memória <i>flash</i>	Até 16 MB de memória <i>flash</i>
3x SPI	2x SPI
2x I ² C	1x I ² C
2x I ² S	2x I ² S
SDIO/SD/MMC	SDIO/SD
3x UART	2x UART
CAN	--
Ethernet 10/100Mbps	--
IR (<i>Infrared</i>)	IR (<i>Infrared</i>)
16x PWM	8x PWM
Sensor de Temperatura interno	--
Sensor <i>touch</i> de 10 canais	--
AD de 12 bits e suporte para até 18 canais (multiplexado)	1 canal AD de 10 bits

III. RESULTADOS

Em Fortaleza e Maracanaú, julho foi um dos meses de 2018 com maior geração de energia, por fazer parte do período seco no Ceará (segundo semestre). A planta FV de Fortaleza gerou 235,8 kWh e a planta de Maracanaú 161,4 kWh. O dia 10 de julho foi o dia de menor geração com apenas 3,6 kWh em Fortaleza e 2,2 kWh em Maracanaú. O dia de maior geração ocorreu no dia 20 de julho, com um total de 8,8 kWh em Fortaleza, enquanto em Maracanaú apenas 6,1 kWh foram gerados.

Considerando o dia de maior geração de energia, os dados coletados pelo sistema de monitoramento IoT mostram que a temperatura máxima do módulo FV atingiu aproximadamente 60°C em Fortaleza, enquanto em Maracanaú a temperatura dos módulos é 11°C mais baixa (49°C) como pode ser observado na Fig. 7. Isso é devido à Maracanaú ter maior incidência de ventos que em Fortaleza e a estrutura de sustentação da planta FV favorece a circulação do vento sob e sobre os cinco módulos. Em Fortaleza, os seis módulos FV estão instalados sobre um teto de concreto. Na Fig. 7 (a), as curvas FV1a até FV5a correspondem à temperatura no centro de cada um dos cinco módulos de Maracanaú; e as curvas FV1b, FV3b e FV5b correspondem à temperatura nas bordas dos módulos à esquerda da *string* (FV1), ao centro (FV3) e à direita (FV5), respectivamente. Por outro lado, na Fig. 7 (b), cada linha representa a temperatura de um dos seis módulos FV (FV1 a FV6) de Fortaleza. O gráfico de irradiância de Maracanaú (Fig. 8 (a)) é mais estável no dia de maior geração, mas apresenta valores mais baixos (pico de aproximadamente 915 W/m²) do

que em Fortaleza, com picos de 970 W/m² (Fig. 8 (b)). Vale ressaltar que a forma da curva de temperatura do módulo FV segue a da irradiância.

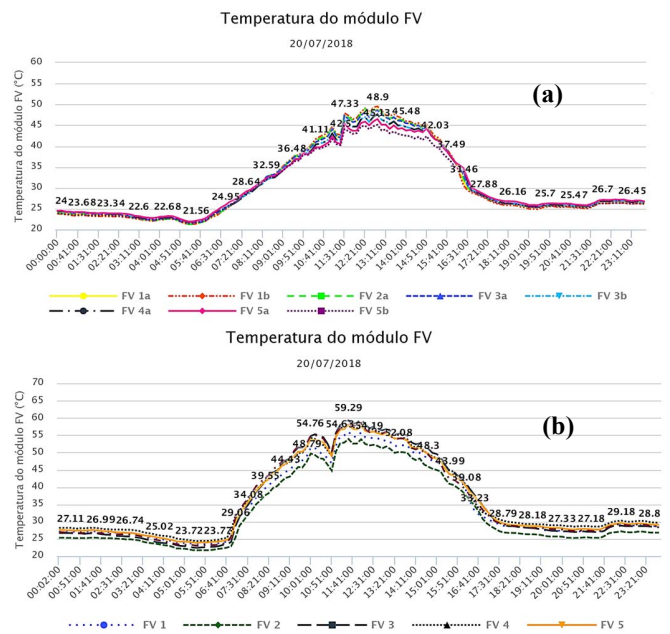


Fig. 7. Temperatura dos módulos FV em Maracanaú (a) e Fortaleza (b) – 20/07/2018.

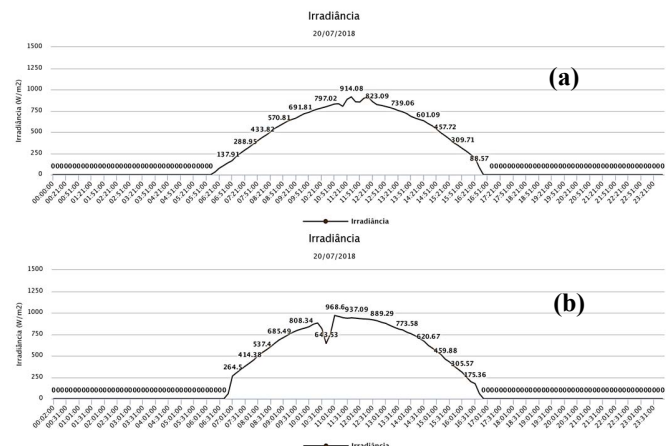


Fig. 8. Irradiância em Maracanaú (a) e Fortaleza (b) – 20/07/2018.

Em Colônia-Alemanha, durante o verão, a temperatura dos cinco módulos FV alcançou valores próximos de 65°C (Fig. 9) em 20/07/2018. Em Colônia, as horas de Sol totalizam 16 horas neste período (05:40h às 21:40h). Na Fig. 10 é mostrada a média mensal da temperatura dos módulos FV na planta de Colônia em janeiro/2018 (inverno) e abril/2018 (primavera). Observa-se que os picos máximos no inverno chegam a aproximadamente 12°C e na primavera, 40°C.

Na Fig. 11 é mostrada a temperatura dos módulos FV em um dia chuvoso (07/02/2019) em Maracanaú. O primeiro semestre do ano nesta região é caracterizado por alta incidência de chuvas e de períodos nublados. A Fig. 12 mostra a curva de irradiância obtida neste dia. O pico máximo atingiu aproximadamente 242 W/m² às 14:00h e a geração total foi de apenas 1,3 kWh/kWp.

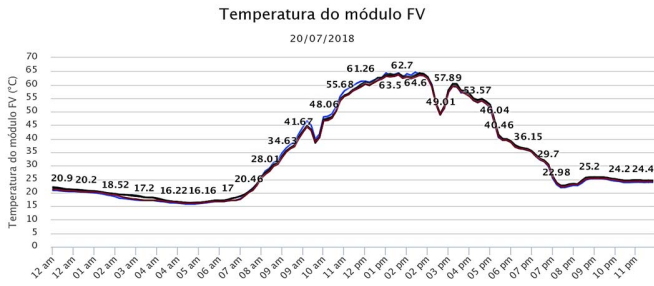


Fig. 9. Temperatura dos módulos FV em Colônia, Alemanha – 20/07/2018.

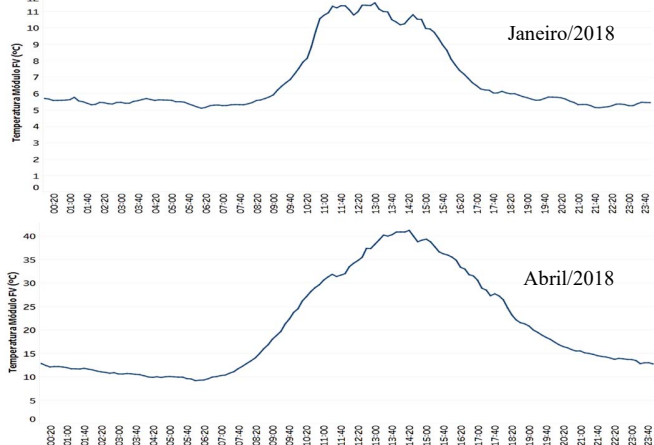


Fig. 10. Temperatura dos módulos FV em Colônia, Alemanha-jan e abr/2018.

O sistema proposto é validado usando um Controlador Lógico Programável (CLP) com canais ADC de 12 bits de resolução.

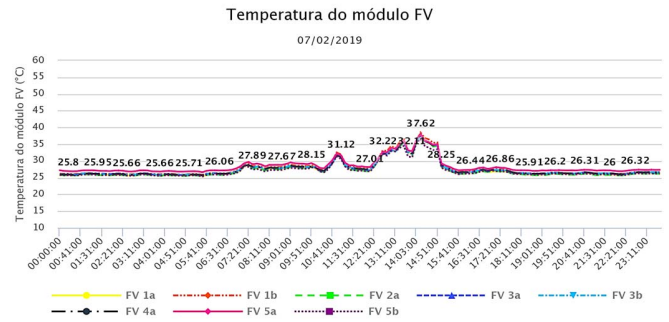


Fig. 11. Temperatura dos módulos FV em Maracanaú – 07/02/2019.

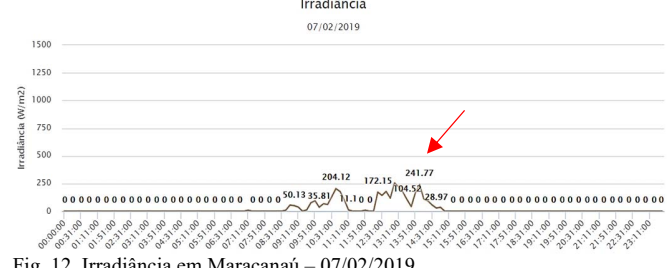


Fig. 12. Irradiância em Maracanaú – 07/02/2019.

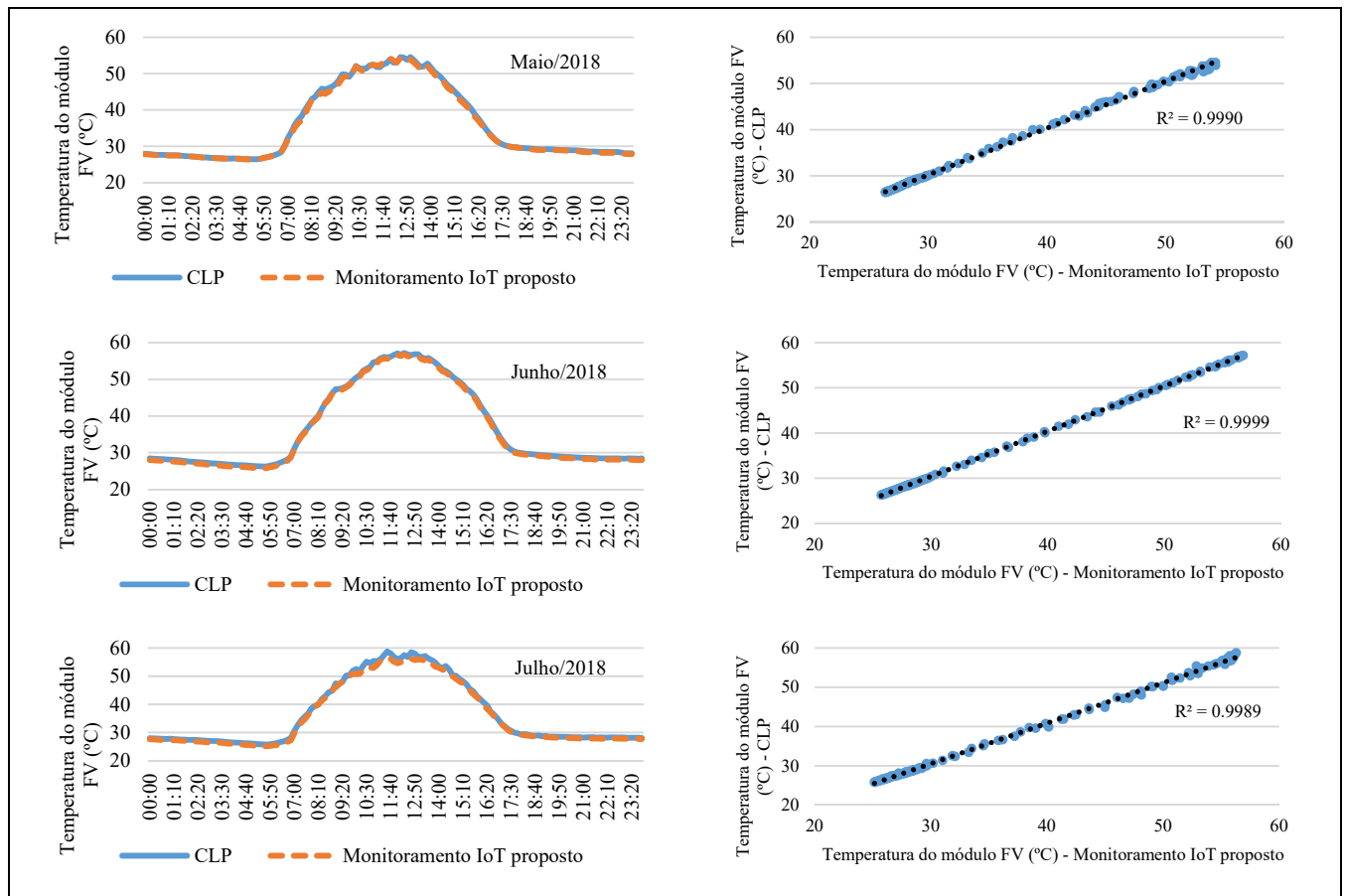


Fig. 13. Médias mensais de temperatura do módulo FV medidas em maio, junho e julho de 2018 pelo monitoramento IoT proposto e correlação com CLP.

Na Fig. 13 são mostradas as curvas de temperatura média mensal do módulo FV medidas em maio, junho e julho de 2018. Usando o erro médio quadrático (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*), a correlação entre o sistema de monitoramento IoT proposto e o sistema de referência adotado (CLP) foi melhor em junho ($R^2=0,9999$).

IV. CONCLUSÃO

A rede de monitoramento IoT projetada, implementada e testada propõe sistemas embarcados de baixo custo multiplataforma (Linux, Windows® e Mac OSX), baseados em hardware e software livres, permitindo distribuição online para desenvolvimento e pesquisa de projetos.

O ESP 8266 e o ESP 32 comunicam-se com a nuvem via Wi-Fi, o que é uma desvantagem em instalações remotas localizadas sem conexão cabeada. A partir do Web Monitor desenvolvido, é possível monitorar em tempo real (tempo de amostragem de um minuto) as três plantas FV e gerar gráficos diários. Assim, falhas podem ser detectadas antecipadamente.

A irradiância solar, a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento foram coletadas para permitir uma análise mais precisa do impacto dessas variáveis no desempenho da geração elétrica, juntamente com a temperatura do módulo FV.

Circuitos de condicionamento de sinais para Pt100, piranômetro e anemômetro foram desenvolvidos e calibrados utilizando equipamentos comerciais e apresentaram medidas dentro da faixa de erro específica de cada sensor. Os dados de temperatura do sensor Pt100 foram comparados com dados de outro sensor Pt100 conectado a um CLP. Usando RMSE, a correlação calculada atingiu 0,9999 em junho/2018.

Os sistemas de monitoramento propostos podem ser expandidos para coletar dados de outros tipos de sensores analógicos ou digitais, bem como para outros tipos de aplicações que utilizam fontes de energia renováveis. Os sistemas estão trabalhando em campo há mais de um ano, enviando dados a cada minuto para a nuvem 24 horas por dia.

Para desenvolvimentos futuros, uma rede de sensores sem fio com nós sensores alimentados usando colheita de energia (*energy harvesting*) será proposta para evitar uso de baterias ou fontes conectadas à rede elétrica.

AGRADECIMENTO

Renata I. S. Pereira gostaria de agradecer ao *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (DAAD-Alemanha) e à CAPES-Brasil pela bolsa de doutorado no país e de doutorado sanduíche concedida; Paulo C. M. Carvalho gostaria de agradecer ao CNPq pela bolsa de pesquisador concedida e UFC e IFCE pela disponibilidade de laboratórios e equipamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] R. I. S. Pereira, S. C. S. Juca, and P. C. M. Carvalho, "Online Monitoring System for Electrical Microgeneration via Embedded WiFi Modem," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 7, pp. 3124–3129, 2016.
- [2] I. M. Dupont, R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, and P. C. M. Carvalho, "Internet of Things Data acquisition system applied to photovoltaic water pumping," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 10, pp. 2547–2560, 2018.
- [3] R. I. S. Pereira, I. M. Dupont, P. C. M. Carvalho, and S. C. S. Jucá, "IoT Embedded Linux System based on Raspberry Pi applied to Real-Time Cloud Monitoring of a decentralized Photovoltaic plant," *Measurement*, vol. 114, no. August 2017, pp. 286–297, 2017.
- [4] B. Vanelli *et al.*, "Internet of Things Data Storage Infrastructure in the Cloud Using NoSQL Databases," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 4, pp. 737–743, 2017.
- [5] H. E. Gad and H. E. Gad, "Development of a new temperature data acquisition system for solar energy applications," *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 337–343, 2015.
- [6] L. Ciani, L. Cristaldi, M. Faifer, M. Lazzaroni, and M. Rossi, "Design and Implementation of a on-board Device for Photovoltaic Panels monitoring," in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2013.
- [7] C. R. Jeevan Doss, M. Kumaravel, B. George, and J. K. V., "Novel Method for the In Situ Measurement of the Temperature of a Satellite's Solar Panel," in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2013.
- [8] M. De Lima Pereira and J. Renato De Brito Sousa, "Monitoring Systems Used in Photovoltaic Microgeneration: A Review," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 9, pp. 1671–1676, 2017.
- [9] J. Han, J. D. Jeong, I. Lee, and S. H. Kim, "Low-cost monitoring of photovoltaic systems at panel level in residential homes based on power line communication," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 63, no. 4, pp. 435–441, 2017.
- [10] B. Ando, S. Baglio, A. Pistorio, G. M. Tina, and C. Ventura, "Sentinella: Smart Monitoring of Photovoltaic Systems at Panel Level," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 8, pp. 2188–2199, 2015.
- [11] L. Zhu, A. Raman, K. X. Wang, M. A. Anoma, and S. Fan, "Radiative cooling of solar cells," *Optica*, vol. 1, no. 1, pp. 32–38, 2014.
- [12] E. Barykina and A. Hammer, "Modeling of photovoltaic module temperature using Faiman model: Sensitivity analysis for different climates," *Sol. Energy*, vol. 146, pp. 401–416, 2017.
- [13] British Standard, "IEC 61724: 1998. Photovoltaic system performance monitoring — Guidelines for measurement, data exchange and analysis." 1998.
- [14] A. Salawu, M. Harms, M. O. Neal, and S. Oonk, "A Mobile Friendly Web-based System for Monitoring Smart Sensors," in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2018.
- [15] ANEEL, "Energia Solar," *Atlas da Energia Elétrica do Brasil*, 2005. [Online]. Available: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf).
- [16] O. A. Chase, S. Member, A. N. Carvalho, E. S. S. Andrade, J. F. Almeida, and C. T. Costa, "Environmental Measurement Technology: An Approach to the Amazonian Environment," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1036–1041, 2018.
- [17] Espressif Systems, "ESP 32 Get Started," *READ THE DOCS*, 2017. [Online]. Available: <http://esp-idf.readthedocs.io/en/latest/get-started/>.
- [18] Espressif Systems, "ESP32 Datasheet," 2018. [Online]. Available: http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [19] Sinovoip and Foxconn team, "Banana Pi," 2018. [Online]. Available: <http://www.banana-pi.org/bpi-zero.html>. [Accessed: 10-Jun-2019].
- [20] Xunlong Software CO., "Orange Pi," 2016. [Online]. Available: <http://www.orangepi.org/>. [Accessed: 10-Jun-2019].
- [21] Texas Instruments, "CC3200 SimpleLink™ Wi-Fi® and Internet-of-Things Solution, a Single-Chip Wireless MCU," 2015.
- [22] R. P. Foundation, "Raspberry Pi," 2019. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>. [Accessed: 20-Jan-2017].
- [23] Hukseflux Thermal Sensors, "USER MANUAL LP02 Second class pyranometer," 2012. [Online]. Available: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/LP02_manual_v1606.pdf. [Accessed: 02-Feb-2019].
- [24] Espressif, "ESP8266EX Datasheet," *Espressif Systems Datasheet*, 2018. [Online]. Available: https://www.adafruit.com/images/product-files/2471/0A-ESP8266_Datasheet_EN_v4.3.pdf.
- [25] NRG, "NRG # 40C Anemometer," 2010. [Online]. Available: <http://www.windandsun.co.uk/media/277060/NRG-40C-Anemometer-data-sheet.pdf>.

ANEXO I

As principais etapas do código do ESP 32 estão descritas a seguir:

- 1) Inicialização do ESP 32.
- 2) API Wi-Fi é inicializada no modo estação; ESP 32 recebe um endereço IP na rede Wi-Fi.
- 3) Hora e data são extraídas do servidor NTP e armazenadas em uma variável para serem incrementadas via temporizador interno.
- 4) A *string* final completa é criada concatenando-se as *strings* de data e hora e dos valores dos sensores.
- 5) API cURL executa o comando GET no servidor e posta os valores medidos no banco de dados.
- 6) Os dados são tratados no servidor e depois alocados na tabela específica do banco de dados MySQL.
- 7) Se postados corretamente, os dados são imediatamente exibidos no Web Monitor.
- 8) O banco de dados pode então ser acessado remotamente e o usuário pode monitorar a planta na forma de gráficos ou registros (*logs*) de qualquer lugar do mundo através da página Web Monitor usando dispositivos computacionais com acesso à Internet.

ANEXO II

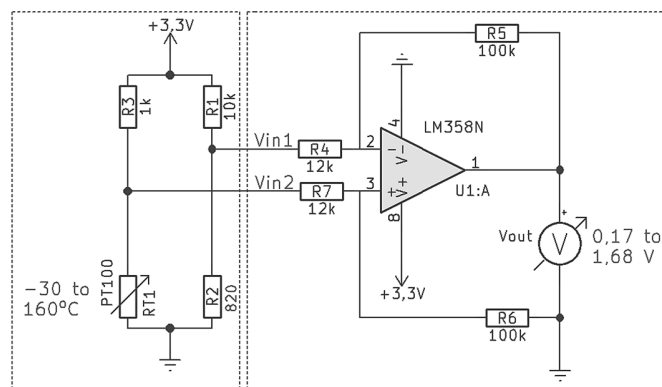


Fig. a. Circuito de condicionamento de sinal do Pt100.

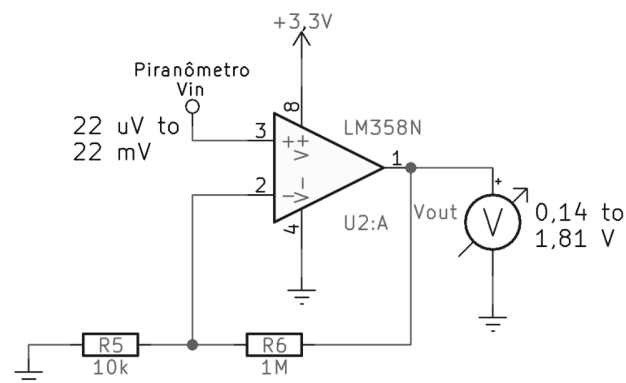


Fig. b. Circuito de condicionamento de sinal do piranômetro.



Renata Imaculada Soares Pereira é doutora (2018) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (UFC) com bolsa de doutorado sanduíche na TH Köln (Technische Hochschule Köln) – Alemanha. Concluiu mestrado (2014) em Engenharia Elétrica pela UFC. Atualmente é pesquisadora de pós-doutorado na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) com bolsa PNPD CAPES. No Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE - Campus Maracanaú) concluiu Tecnólogo em Manutenção Industrial (2012) e curso técnico em Automação Industrial (2009). Áreas de atuação: Sistemas embarcados IoT, Aquisição de dados e Monitoramento online em Nuvem, Energias Renováveis.



Sandro César Silveira Jucá é doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (UFC) e professor/pesquisador do IFCE - Campus Maracanaú. É membro do corpo docente do ProfEPT (Mestrado em educação profissional e tecnológica em rede nacional) e do Mestrado Acadêmico em Energias Renováveis (PPGER) com pesquisas na área de Mecatrônica e Engenharia Elétrica nos seguintes temas: Energias Renováveis, Sistemas Embarcados, IoT, EaD, Robótica e Educação Profissional.



Paulo Cesar Marques de Carvalho possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (1989), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1992) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Paderborn, Alemanha (1997). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. Tem atividades de ensino, pesquisa e extensão nos temas: geração fotovoltaica, geração eólica e biodigestores. Coordena o Laboratório de Energias Alternativas da UFC. Bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq.



Cleonilson Protásio de Souza é doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2006) com pós-doutorado pela University of Washington Tacoma em 2018. Atualmente é Bolsista de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora do CNPq - DT2 e foi Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - PQ2 pelo CA de Microeletrônica entre os anos de 2010 e 2013. Suas áreas de interesse são: desenvolvimento de sistemas de colheita de Energia (Energy Harvesting) visando Redes de Sensores sem-fio (RSSF) e IoT (Internet of Things), teste de circuitos integrados e sistemas eletrônicos embarcados. Membro do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Micro e Nanoeletrônicos (INCT NAMITEC) e membro do IEEE TC-13 - Wireless & Telecommunications in Measurements.