

***Smart Wireless Sensor* baseado na norma IEEE 1451 para Rastreamento e Estimação de Irradiância Solar**

Yan Ferreira da Silva* Anselmo Cardoso de Paiva**
João Viana da Fonseca Neto***

* Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do
Maranhão, MA, (e-mail:yan.ferreira@discente.ufma.br))

** (e-mail:paiva@nca.ufma.br))

*** (e-mail:jviana@dee.ufma.br)

Abstract: With the emergence of technologies aimed at IoT- (Internet Of Things), the world market for smart sensors has had a great growth in recent decades, leading to the development of algorithms and technology for new intelligent and indirect measurement architectures. Motivated by the demand for measurement devices for monitoring and control, this article presents the project for the development of an embedded system capable of estimating the angular position of the maximum solar irradiance in a set of photovoltaic cells and also performing the measurement of the irradiance value in the based environment in the IEEE 1451 standard that it is responsible for regulating is a set of Smart Transducer Interface (SMART) standards. The proposed system consists of hardware for online estimation of solar irradiation and secondary sensors such as photovoltaic cells, temperature and humidity, the signals are sent to a CLOUD to monitor the position of the sun in relation to the cells.

Resumo: Com o surgimento das tecnologias direcionadas para *IoT (Internet Of Things)*, o mercado mundial de sensores inteligentes teve um grande crescimento nas últimas décadas, conduzindo ao desenvolvimento de algoritmos e tecnologia para novas arquiteturas de medição inteligente e indireta. Motivado pela demanda de dispositivos de medição para monitoramento e controle, este artigo apresenta o projeto do desenvolvimento de um sistema embarcado capaz de estimar a posição angular da máxima irradiância solar em conjunto de células fotovoltaicas e também realizar a medição do valor da irradiância no ambiente baseado na norma IEEE 1451 que é responsável por regulamentar é um conjunto de padrões de interface de transdutor inteligente (SMART). O sistema proposto é constituído por um *hardware* para estimação *online* da irradiação solar e sensores secundários como células fotovoltaicas, temperatura e umidade, os sinais são enviados para uma NUVEM para fins de monitoramento da posição do sol em relação as células.

Keywords: Smart Sensors, Embedded Systems, Data Fusion, Internet of Things.

Palavras-chaves: Smart Sensores, Sistemas Embarcados, Fusão de Dados, Internet das Coisas.

1. INTRODUÇÃO

Os sensores tornaram-se parte fundamental no dia a dia das atividades humanas, boa parte dos equipamentos eletroeletrônicos possuem em sua estrutura algum tipo de sensor empregado no monitoramento de algum fenômeno químico, biológico ou grandezas física, não ficando restrito apenas a ambientes industriais Meijer (2008).

A *smartness* (esperteza) ou *intelligence* (inteligência) desta categoria de sensores se baseia em recursos como monitoramento do processo confiabilidade e disponibilidade, operação em ambientes insalubres/hostis para humanos, operação *on-line* e flexibilidade de uso. Os requisitos levam a componentes com recursos de funcionamento com maior grau de autonomia, com base em uma arquitetura descentralizada. Esses sensores oferecem uma ampla variedade de atributos, como facilidade de integração do sistema,

interoperabilidade, dimensionamento, portabilidade e modularidade, robustez a variações bruscas das condições ambientais, realizar medições e estimações indiretas Bhuyan (2013).

Em 1996 foi criada um conjunto de padrões de interface de transdutor inteligente desenvolvido pelo Comitê Técnico de Tecnologia de Sensor da Sociedade de Instrumentação e Medição do *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, a norma IEEE 1451 que descreve um conjunto de interfaces de comunicação abertas, comuns e independentes de rede para conectar transdutores (sensores ou atuadores) a microprocessadores, sistemas de instrumentação e redes de controle/campo. Um dos elementos principais desses padrões é a definição de folhas de dados eletrônicas do transdutor (TEDS) para cada transdutor/sensor, desta forma foi regulamentada o *Smart Sensor IEEE Lee* (2000).

A tecnologia dos *SS (Smart Sensor)* e *IS (Intelligent Sensor)* vêm sendo aplicadas em áreas de geração de energia alternativa, levando em consideração que as necessidades energéticas têm aumentado com o desenvolvimento industrial, com o aumento da população mundial e da qualidade de vida Sefa et al. (2009). De acordo com ANEEL (2019) no ano de 2019 houve um aumento de 44% de produção de energia proveniente de painéis solares, chegando a ultrapassar a marca de 1 GW em geração de energia. No entanto, os módulos fotovoltaicos são utilizados para converter a radiação solar em energia elétrica e têm uma eficiência na ordem de 16,5% em condições STC (*Standard Testing Conditions*) ANEEL (2018).

A metodologia proposta trata do desenvolvimento de um sistema embarcado para estimação irradiância e posição angular. Apresenta uma solução baseada em medição indireta e modelos matemáticos, onde é necessário determinar o valor de uma dada grandeza a partir da detecção de alguns estados do objeto em estudo, essa solução exige a fusão dos sinais que representam os estados medidos para obtenção do comportamento de estados não medidos.

O artigo é organizado em seções, na Seção 2 tem-se descrição e conceitos de sensores inteligentes e fusão sensorial. Na Seção 3 tem-se descrições sobre a modelagem matemática do sistema da célula fotovoltaica e sua complexidade para obtenção dos parâmetros de irradiância solar, ainda na seção 3 tem-se todo o do *hardware* do sensor onde são usadas conceitos e técnicas de *IoT* e medição indireta. Na Seção 4 é avaliada a metodologia utilizada para análise dos resultados obtidos através da sua aplicação. As conclusões e propostas para trabalhos futuros são apresentados na Seção 5.

2. PRELIMINARES

2.1 Sensor Inteligente

O sensor é um dispositivo que responde à um estímulo físico, químico ou biológico de maneira específica e geralmente a converte em um sinal elétrico que pode ser interpretado por um observador ou por um instrumento. Também são elementos fundamentais para sistemas de medição, monitoramento e controle. Existem diversos tipos de sensores disponíveis no mercado, para aplicações domésticas os mais usuais são sensores de temperatura e umidades que estão inseridos em diversos aparelhos eletroeletrônicos presentes no dia a dia Mukhopadhyay (2013) Soloman (2009).

Os sensores juntamente com o condicionamento de sinal em combinação com um microprocessador, estão presentes no mesmo pacote e podem ser definidos como instrumentos inteligentes. Hoje, esses sensores são aplicados como pode exemplo no rastreamento de movimento e sensores inerciais baseados em MEMS também estão sendo amplamente utilizados em aplicações médicas, *IoT*, indústrias e robótica Soloman (2009) e Bhuyan (2013).

2.2 Fusão Sensorial

Esta se refere à combinação simultânea de dados sensoriais de vários pontos para o fornecimento de informações mais confiáveis e precisas. As vantagens em potencial da fusão e

integração de multissensores é a redundância, complementaridade, pontualidade e custo das informações. A integração ou fusão de informações redundantes pode reduzir a incerteza geral. Vários sensores fornecendo informações redundantes, também podem servir para aumentar a confiabilidade no caso de erro ou falha do sensor. Informações mais oportunas podem ser fornecidas por vários sensores devido à velocidade real de operação de cada sensor ou ao paralelismo de processamento que pode ser possível como parte do processo de integração R. C. Luo (2002).

Os sistemas inteligentes são equipados com vários sensores que podem interagir e operar em ambientes não estruturados, sem o controle completo de um operador humano. Devido ao fato do sistema estar operando em um ambiente totalmente desconhecido, um sistema pode não ter conhecimento suficiente sobre o estado do mundo exterior. O armazenamento de grandes quantidades desse conhecimento pode não ser viável. Considerando o mundo em mudança dinâmica e os imprevistos, geralmente é difícil conhecer o estado do mundo a priori. Os sensores podem permitir que um sistema aprenda o estado do mundo conforme necessário e atualize continuamente seu próprio modelo de mundo Lawrence (2012).

A fusão multissensorial se refere a qualquer estágio do processo de integração em que existe uma combinação real de diferentes fontes de informações sensoriais em um formato representacional. A distinção entre integração e fusão serve para separar as questões mais gerais envolvidas na integração de múltiplos dispositivos sensoriais na arquitetura do sistema e no nível de controle das questões mais específicas que envolvem a fusão real de informações sensoriais Fourati (2015).

3. ARQUITETURA DO SMART SENSOR

A metodologia para o desenvolvimento de um sensor, chamado de inteligente, para o rastreamento do ângulo de radiação solar é apresentada nesta seção.

O sistema de medição *smart* desenvolvido e baseado em modelagem matemática do processo e na norma IEEE 1451.2 exibido na Figura 1, onde foi feita uma relação entre o sensores secundários que são mini células fotovoltaicas e sensores de temperatura e umidade usados para aquisição dos dados da radiação solar permitindo a estimação da irradiância solar.

A Figura 1 foi dividida em 2 partes, as linhas tracejadas representam a parte lógica e as linhas contínuas representam a parte física do hardware. A estrutura de sistemas e redes de aquisição de dados distribuídos. Os principais componentes dessa rede distribuída são o NCAP (*Network Capable Application Processor*), o *Smart Transducer Interface Module* (STIM) e a interface de comunicação entre introduzindo as funções de reprogramação dinâmica *online* do NCAP. A interface programável por software para suportar as interfaces de comunicação mais amplamente usadas NCAP e STIM na mesma estrutura assim formando um sistema embarcado capaz de captar e processar o dados captados no próprio dispositivo além de permitir conexão com outros dispositivos através de técnicas de *IoT* 1451.1-1999 (2000).

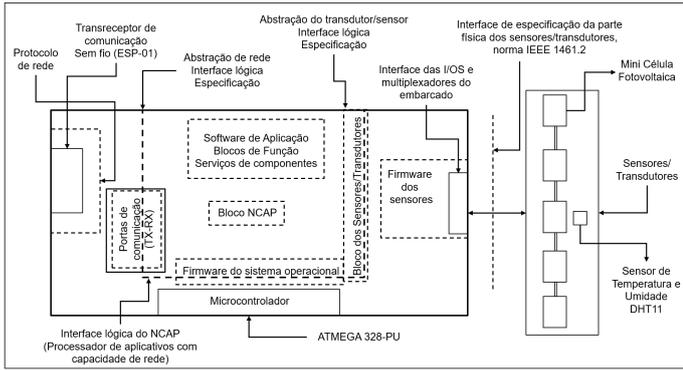


Figura 1. Diagrama de Blocos da representação do sistema de rastreamento e controle do SIRAIS (Sensor Inteligente de Rastreamento do Ângulo de Irradiância Solar): (1) Estrutura de captação dos sinais; (2) Monitoramento e processamento de dados.

O passo a passo do desenvolvimento do protótipo proposto é exibido na Figura 2, que apresenta-se o diagrama de blocos do funcionamento do sensor a ser desenvolvido. Com a quantidade de 5 células fotovoltaicas posicionadas de acordo ANEEL os pontos de maiores intensidade solar.

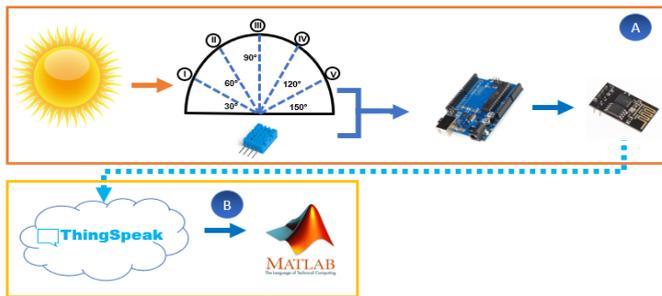


Figura 2. Esquema do sistema de rastreamento e controle do SIRAIS (Sensor Inteligente de Estimação do Ângulo de Incidência Solar): (A) Estrutura de captação dos sinais; (B) Monitoramento e processamento de dados.

Para a realização deste trabalho é desenvolvido um protótipo de *Smart Wireless sensor* exibido na Figura 5, baseado na norma IEEE-1451 que é responsável pela captação da irradiância solar e os ângulos de incidência (radiação) solar. Na Figura 2 (A) é ilustrado o *hardware* do sensor, responsável pela aquisição dos dados de irradiância e temperatura, onde estão localizadas as células fotovoltaicas e sensor de temperatura que são responsáveis por enviar os sinais para um microcontrolador o qual realiza toda a parte do tratamento e conversão de sinais, também executa os cálculos da medição indireta. Para a comunicação o microcontrolador utiliza um transceptor sem fio que realiza a transmissão dos dados adquiridos com um *web* servidor. Na Figura 2 (B) é exibido o sistema que é responsável pelo monitoramento e processamento de dados, nesta etapa os dados captados pelo *hardware* (Figura 2 (A)) e a partir do sistema físico os dados passam a serem monitorados e processados..

3.1 Modelo do Processo das Células fotovoltaicas

O modelo do processo para fins de obtenção do ponto de máxima potência gerada pela célula solar é dado por um circuito equivalente. representado na Figura 3.

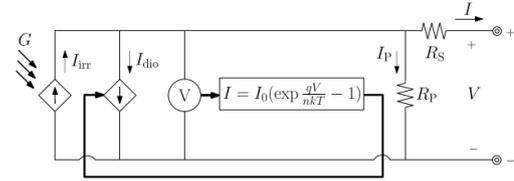


Figura 3. Modelo do diodo equivalente a célula fotovoltaica. (Mancilla-David et al. (2014))

Na Figura 3 é exibido o modelo de diodo anti-paralelo, o mesmo modelo é substituído por fonte de corrente controlada permitindo a representação da ligação das células em paralelo e/ou série em um único circuito com os detalhes de cada célula. Associando ao circuito elétrico da fotocélula, tem-se que a corrente no terminal do painel é dada por

$$I = I_{irr} - I_{dio} - I_p, \quad (1)$$

sendo I_{irr} corrente de irradiância que é gerada pelos raios solares incidentes na célula exposta a luz solar, I_{dio} é a corrente no diodo anti-paralelo que é responsável pela característica não linear da célula, I_p por sua é a corrente de derivação devido ao resistor *shunt* R_p . Substituindo em (1) expressões I_{dio} para I_p a corrente no terminal é dada por

$$I = I_{irr} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p}, \quad (2)$$

sendo $q = 1.602 \times 10^{-19}$ é carga elétrica do elétron, $k = 1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K que é a constante de Boltzmann, T é a temperatura da célula, I_0 trata-se da corrente de saturação do diodo, n é o fator ideal do diodo, R_S e R_p representam os resistores *shunt* em série e paralelo.

Tabela 1. Tabela de substituição para o modelo da célula fotovoltaica

Expressão Original	Substituição
$N_P I_{irr}$	I'_{irr}
$N_P I_0$	I'_0
$\frac{N_S}{N_P} R_S$	R'_S
$\frac{N_S}{N_P} R_P$	R'_P

Este modelo de relação possibilita a generalização para um grande número de células conectadas em série representadas por N_s e outra quantidade de células em paralelo representadas por N_p , para formar um arranjo de matriz de tamanho $N_S \times N_P$, assim formando um grupo de gerador de energia elétrica, esse modelo é conhecido como generalizado. Sendo assim o modelo generalizado assume um arranjo que é dado por

$$I = I'_{irr} - I'_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR'_S)}{N_S n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR'_S}{R'_P} \quad (3)$$

sendo que os valores devem ser interpretados conforme Tabela 1.

Na relação I-V, as características de desempenho de uma única celular solar e a matriz são dadas pelas Equações (2) e (3), e respectivamente os parâmetros I_{irr}, I_0, R_P, R_S e n dependem diretamente da irradiância solar (G). Já a temperatura da célula T influencia outros parâmetros de referência denominados $G_{ref}, T_{ref}, I_{irr,ref}, I_{0,ref}, R_{P,ref}, R_{S,ref}$ e n_{ref} descritos nas equações que são dadas por

$$I_{irr,ref} \frac{G}{G_{ref}} (1 + \alpha'_T (T - T_{ref})), \quad (4)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{E_{g,ref}}{kT_{ref}} - \frac{E_g}{kT} \right), \quad (5)$$

$$R_P = R_{P,ref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right), \quad (6)$$

$$R_S = R_{S,ref} \quad (7)$$

e

$$n = n_{ref} \quad (8)$$

Em (4), α'_T é o coeficiente de temperatura relativo da corrente de curto-circuito, que representa a taxa de variação da corrente de curto circuito em relação a temperatura da célula solar. A relação fornecida pelos fabricante é dada por

$$\alpha_T = \alpha'_T I_{irr,ref} \quad (9)$$

Em (5) E_g é a energia de *BandGap* (Banda Proibida) para o silício em eV. A expressão analítica para E_g é obtida através do ajuste de curvas a partir de medições experimentais. A expressão utilizada é dada por

$$E_g = 1.17 - 4.73 \times 10^{-4} \times \frac{T^2}{T + 636} \quad (10)$$

A equação I-V descrita em (3) mais a quebra do parâmetros constituintes descritos por (4) a (8) fornecem uma representação detalhada para o desempenho de uma matriz de tamanho arbitrário e pode ser usada para treinar uma RNA (rede neuronal artificial). Seguindo à metodologia descrita em Tian et al. (2012), os parâmetros de referência são específicos para células fotovoltaicas e podem ser obtidos a partir de informações disponíveis nas fichas técnicas dos fabricantes.

3.2 Estrutura de Captação

Neste trabalho explorar-se o mapeamento baseado em célula em medições de grandezas por meio de sensores primários, tais como: corrente, tensão, impedância gerados pela incidência e radiação solar nas mini células fotovoltaicas que são associados ao tempo da medição, e espaço associado com a disposição das células para uma trajetória da célula de maior geração para a de menor geração que sofre acréscimos e a célula de maior geração sofre decréscimo. Desta forma, a trajetória do sol que promove uma geração otimizada da energia útil para um percurso no sentido do amanhecer para final do dia, separar a mini célula com maior geração de energia devido à incidência normal ou próximo da normal a mesmo.

A estrutura do protótipo SIRAIIS (Sensor Inteligente de Estimativa do Ângulo de Incidência Solar) constitui-se em formato de um arco com 180° que é ilustrado na Figura 4. Esta estrutura é apresentada nos trabalhos Yan Silva et al. (2019) e Djamiykov et al. (2017), visando eficiência, rastreamento do movimento aparente do sol (incidência solar) e baixo custo em comparação aos rastreadores de estrutura fixa, que na maioria das vezes são acoplados a grandes painéis, exigindo um grande esforço de controle e são sensíveis a sombreamentos ocasionados por nuvens ou algum corpo estranho próximo a faixa de detecção do sensor Er and Balci (2018).

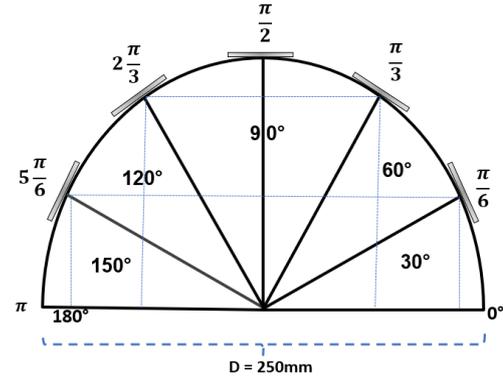


Figura 4. Diagrama da representação do sistema de distribuição das células do SIRAIIS.

Na Figura 4, as células à direita e à esquerda devem gerar uma potência menor do que a potência detectada na célula como a maior incidência de raios solares próximo da normal da superfície na célula.

O cálculo da trajetória solar para detecção do melhor ângulo é associado ao horário do período em questão, levando em consideração que os pontos de referência das células fotovoltaicas estão sincronizados com o horário da incidência normal a esses pontos fixos. Com o espaçamento uniforme de $\pi/6$ rad, as mini células fotovoltaicas estão distribuídas no arco da Figura 4. A primeira célula é localizada 30° e a última célula está localizada em 150°.

Considerando o problema da estimativa da posição angular mecânica (ângulo de radiação) θ_t^m da radiação solar que incide em uma dada área de células fotovoltaicas este é representado por um mapeamento das grandezas terminais nas células fotovoltaicas e medições de grandezas no ambiente esse mapeamento é representado por

$$\theta_t^m = f(G(V, I, T, U, t)), \quad (11)$$

sendo f a função que determina a melhor estimativa do ângulo para ajuste de um dado dispositivo de acordo com a posição relativa do sensor, G a potência gerada em watts por metro quadrado, V e I são as correntes e tensões, respectivamente, medidas nos terminais de uma dada mini célula fotovoltaica, U representa as medidas da umidade e da temperatura do ambiente na qual estão inseridas as células fotovoltaicas.

3.3 Sensores Primários-Medição Indireta

Os sensores primários são utilizados para medir a potência (W/m^2) gerada em cada mini célula fotovoltaica que é instalada em uma estrutura na forma de arco. Levando em consideração, as medições de temperatura e umidade do ambiente, estas células capturam os efeitos da incidência dos raios solares por meio da medição da potência gerada nos terminais das referidas células.

Por meio do processo fotovoltaico as placas convertem irradiância em energia, dependendo da posição do sol ocorre a variação de incidência dos raios solares sobre as células e consequentemente varia o nível de tensão geradas por elas. Afim de se obter os sinais de potência elétrica são adicionados resistores de 130 Ohms, que permitem à medição indireta das potências de cada placa equação utilizada é dada por

$$P_{pv} = \frac{V_{pv}^2}{R} \cdot 1000, \quad (12)$$

sendo V_{pv} tensão produzida pela célula, R é a resistência utilizada na saída das células e 1000 a transformação para mW, desta forma é possível obter a potência gerada por cada célula fotovoltaicas P_{pv} . Após o cálculo da potência geradas pela PV estima-se a Irradiância (G) é dada por

$$G = \frac{P_{pv}}{A \cdot e_{pv}}. \quad (13)$$

sendo G dado em W/m^2 , A_{pv} , e_{pv} é a taxa de eficiência da placa, área da célula de $25 \cdot 10^{-4} m^2$, desta forma o calculo da irradiância máxima a ser estimada considerando que seja estimado produção da célula P_{pvmax} é aproximadamente $123 \cdot 10^{-3} W$, tem-se que

$$G = \frac{123 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,17}, \quad (14)$$

resultando em

$$G_{max} = 289 W/m^2. \quad (15)$$

3.4 Canal de Comunicação

O canal de comunicação trata a respeito da transmissão e recepção dos sinais de tensão e corrente que são medidos nos terminais das mini células fotovoltaicas.

Após realizar a medição indireta das potências geradas pelas células fotovoltaicas, os dados são transportados para uma nuvem através de uma rede sem fio do tipo Wi-Fi. Para a realização do armazenamento, recepção e visualização dos sinais pré-processados é o utilizado a plataforma ThingsSpeak[®] que trata-se de um *web* servidor, na qual recebe os dados em tempo real transmitidos pela ESP-01. O *ThingSpeak* possui uma API (Interface de programação de aplicações) que permite a visualização e manipulação de dados coletados diretamente no *software* MATLAB[®], permitindo assim o monitoramento e processamento online transportados pelo *web* servidor.

3.5 Construção do SIRAIIS

O SIRAIIS, sensor proposto neste trabalho, é apresentado na Figura 5 trata-se de um sensor de baixo custo, com função de rastreamento e mapeamento dos ângulos de

radiação solar através da medição da irradiância solar, proporcionando assim o melhor posicionamento para painéis solares.

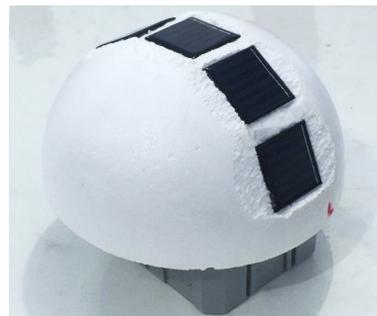


Figura 5. Protótipo do *Smart Wireless Sensor*.

A estrutura do sensor é montada sobre uma semi esfera de isopor com raio de 125 mm, apresenta um custo benefício superior em relação a outros materiais. Os demais componentes do sensor são apresentados na Figura 6.

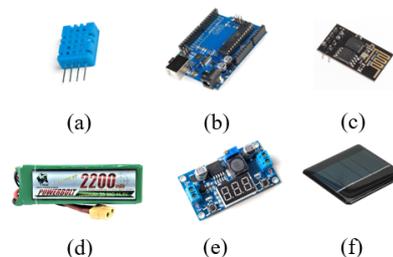


Figura 6. Componentes da estrutura do SIRAIIS - (a) Sensor DHT11; (b) Arduino; (c) ESP-01; (d) Bateria; (e) Regulador de tensão; (f) Célula Fotovoltaica.

Na Figura 6 (a) é exibido o sensor DHT11 responsável pelo monitoramento da temperatura e umidade interna do SIRAIIS, trabalha em uma faixa de medição de temperatura de 0° à $50^\circ C$ e umidade relativa do ar de 20 à 90% . Para este protótipo é usado apenas um sensor, uma vez que a temperatura entre as placas é uniforme, não havendo necessidade de monitoramento individual de cada célula solar. O processamento de dados adquiridos através das células e do DHT11 é realizado através da plataforma Arduino Uno R3, responsável também pela medição indireta, conforme a Figura 6 (b). Para a transmissão de dados é utilizado um módulo transceptor ESP-01, presente na Figura 6 (c), com suporte à rede *wireless* 802.11 b/g/n e com alcance aproximado de 90 metros. Uma bateria de Li-Po com uma carga 2200 mAh e 11,1 V, conforme Figura 6 (d). Para regular a tensão para 9 V que é recomendada para alimentação do Arduino é usado um regulador Tensão CC/CC Step Down Lm2596r Figura 6 (e) e a (f) corresponde ao modelo das placas usadas, com tamanho de 50x50 mm, tensão da máxima potência (V_{mp}) de 3,5 V, tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 4 V, potência máxima (P_{max}) de 165 mW, corrente de curto-circuito (I_{sc}) 50 mA, corrente de máxima potência (I_{mp}) 60 mA e taxa de máxima de eficiência de 17%, sua estrutura de sílcio policristalino, estes dados foram obtidos a partir do *datasheet* do fabricante.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos são realizados com cinco células fotovoltaicas e um sensor DHT11, estes são ligados a um microcontrolador Arduino Uno R3 que por sua vez está conectado ao transceptor ESP-01, conforme ilustrado na Figura 2.

Na Figura 2 exibe a estrutura de todo o sistema de medição e estimação, as linhas pontilhadas delimitam cada bloco das etapas do sensor, onde estão presentes duas etapas: captação/transmissão e monitoramento/processamento.

Os primeiros testes com os SIR AIS foram realizados em um ambiente controlado, no Laboratório de Sistemas Embarcados e Controle Inteligente da Universidade Federal do Maranhão. Para realizar a simulação são usadas lâmpadas incandescentes de 100 W simulando a irradiância emitida pelo sol assim e a captação da irradiância pelo sensor, nos gráficos são apresentados o comportamento on-line da irradiância conforme exibidos na Figura 7 temperatura e umidade do ambiente *in door*.

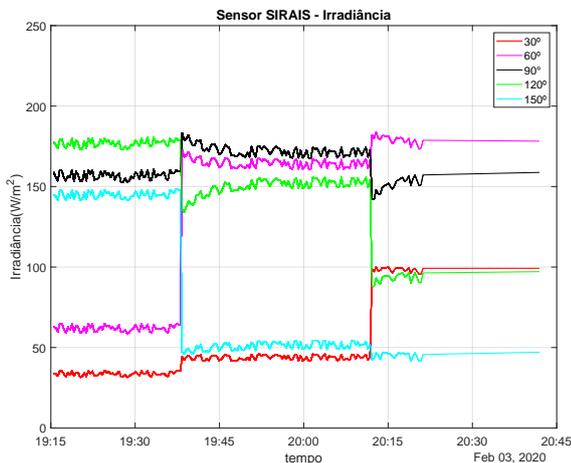


Figura 7. Monitoramento on-line da medição da irradiância pelo sistema supervisorio desenvolvido.

Para obtenção que é calculado por meio da tensão geradas pelas placas e da resistência, a Eq. (15) foi usada para calcular as potências geradas por cada placa e por vez para foram usada para obter os valores de irradiância, vale ressaltar que os valores já foram transformado para W/m^2 . No gráfico da irradiância da Figura 7 pode-se notar uma pequenas perturbações antes das 19 horas e 34 minutos, são ocasionada em decorrência de sombreamento e fontes de emissão luz afim de simular o comportamento de nuvens ou corpos estranhos. Outra parte do experimento foi a mudança busca da fonte de irradiância realizadas entre o período 19 horas e 35 minutos às 20 horas e 09 minutos, tais mudanças tem como o objetivo de exibir as variações de captação da irradiância entre os ângulos de radiação, por volta das 20 horas e 18 minutos foram desligadas todas as fontes de emissão de luz que perturbavam a captação da irradiância emitida pela lâmpada simulando o sol, é possível constatar uma melhora comportamento do sinal que é aparentemente linear, pouco ruidoso.

A Figura 7 e apresenta o monitoramento on-line dos dados coletados pelo sensor, deferentemente do *web* servidor exibido na Figura 8 que recebe os dados em tempo real do SIR AIS, isto se dar por conta do atraso dos dados de 15 segundos da nuvem para a plotagem no *software*, porém os dados são recepcionados para processamento direto da função da API do ThingSpeak® em tempo real diretamente no *software* de processamento, esse atraso na plotagem no supervisorio é por conta do protocolo de comunicação, evitando perda de informação com do servidor e sobrescrever o dado já coletado a armazenado no *web* servidor .



Figura 8. Monitoramento em tempo real da medição da irradiância pelo ThingSpeak®.

Na Figura 8 exibe a plotagem dos dados coletados do SIR AIS em um intervalo 15 segundos para cada coleta. Uma das vantagens do uso dos MQTT é por conta do armazenamento dos dados em uma nuvem, mesmo que ocorra algum problema como queda da conexão, os dados coletados até perda da conexão são armazenados na nuvem com isso evitando a perda da coleta caso ocorra uma falha grave no sensor ou seja danificado por algum fato externo a coleta não é comprometida.

O experimento foi realizado no dia 12 de janeiro de 2020, com início as 13 horas da tarde e finalização às 18 horas. Para o posicionamento do SIR AIS foi utilizado uma bússola para determinação do direcionamento leste e oeste do sensor exibido na Figura 9.



Figura 9. Sensores posicionados no dia da coleta.

Na Figura 9 exibe o sensor SIR AIS posicionado em cima de um telhado, vale salientar que o correspondente ao ângulo

30° foi posicionado para leste (o nascer do sol) e o ângulo de 150° para o oeste. O período de captação foram de 5 horas, e o resultado da coleta do dia são exibidos na Figura 10.

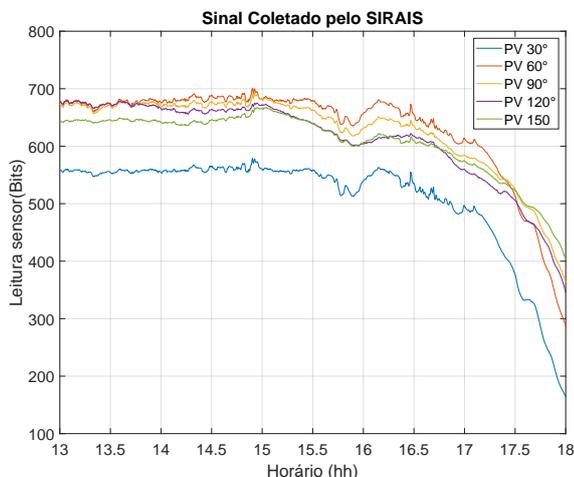


Figura 10. Sinais de entrada coletados pelo SIRAIIS em bits.

Os sinais captados por cada célula fotovoltaica são exibidos na Figura 10, cujo seu tamanho foi de 1175×5 amostras, as coletas foram realizadas no intervalo de 15 segundos. O sinal plotado teve uma variação visível no início da coleta entre o ângulo de 30° e 150°, por conta do posicionamento do sol e porque estão localizados nas extremidades do sensor, e o comportamento pode ser visto até o final da tarde quando o sol não era mais visível ao sensor após às 18 horas. As perturbações nos sinais captados são em decorrência de nuvens efeitos de sombreamento e outros objetos, além das ruídos ocasionadas por interferência magnéticas no sinal.

4.1 Datasheet do SIRAIIS

O SIRAIIS trata-se de um sensor Inteligente em um sistema fotovoltaico possibilita o registro de valores adicionais de medição, como a irradiância, temperatura ambiente e seu monitoramento.

Tabela 2. Dados de especificação do sensor

Dados Gerais	
Sensor	Sensor Inteligente de Rastreamento do Ângulo de Incidência Solar
Tensão de leitura	0 à 4 V
Tipo de Fotocélula	Silício policristalino
Faixa de Estimação de Irradiância solar	0 - 300 W/m^2
Faixa de leitura de temperatura	0 - 50 °C
Faixa de leitura de umidade %	0 - 90%
Alcance do WIFI	90 à 100 m
Alimentação	5 V
Dimensão (altura)	100 mm
Dimensão (largura)	130 mm
Dimensão (comprimento)	250 mm

O SIRAIIS conta com uma estrutura moderna que permite o monitoramento online, na Figura 13 é apresentada seu esquema de montagem .

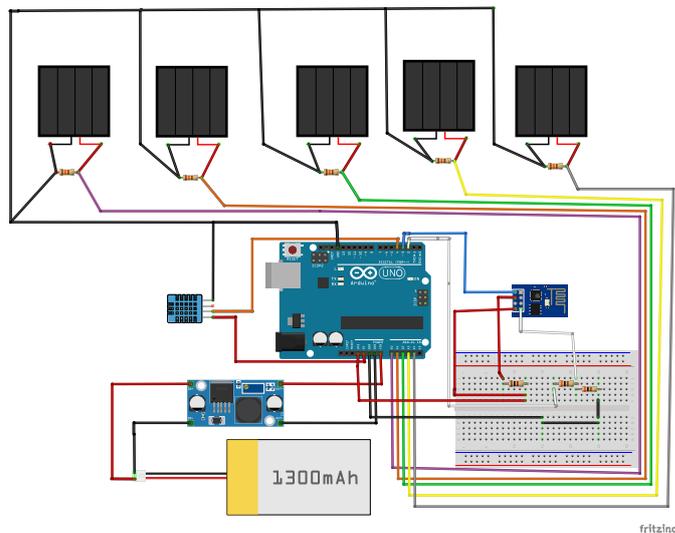


Figura 11. Projeto da montagem do SIRAIIS no Fritzing.

A Figura 11 exibe a estrutura do sensor que conta com 5 células fotovoltaica, sensor DHT11 de umidade e temperatura, bateria de Li-Po, módulo regulador de tensão *step-down* e ESP01(recomendado usar um circuito divisor de tensão na ESP01 por motivos de segurança), o seu consumo fica aproximadamente 80mAh.

Na Figura 12 é exibida a curvas simuladas de produção para captação da irradiância para um temperatura fixa de 25°C.

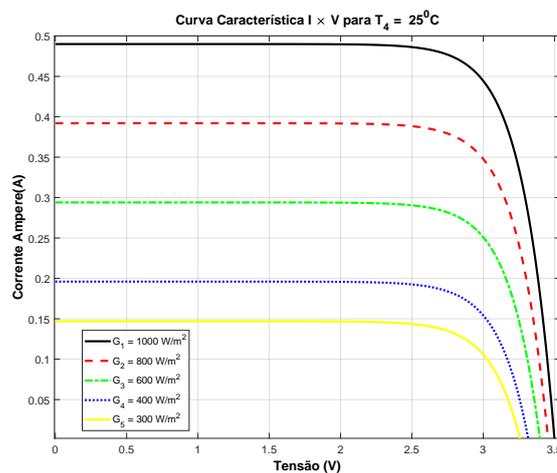


Figura 12. Curva de produção com temperatura fixa.

Observando a Figura 12, a melhor produção para 1000 W/m^2 possivelmente será captada quando for gerado uma corrente de 0,05 A e com uma tensão de 3,5 V. A Figura 13 exibe a produção para diferentes as simulações para 5 níveis de temperatura.

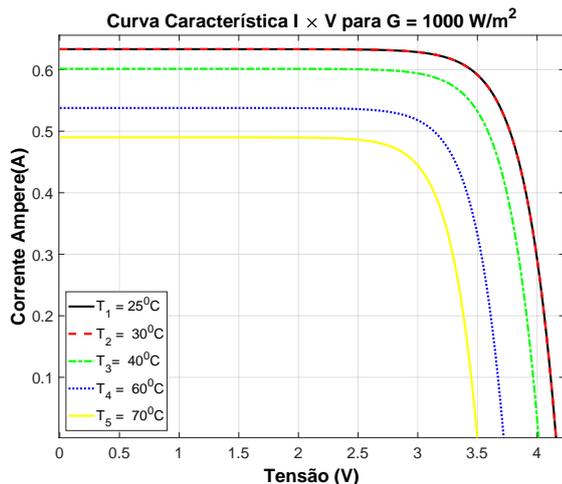


Figura 13. Curva da produção em relação a variação de temperatura.

Pode-se constatar ao observar a Figura 13 que a pior produção de energia em função da temperatura é por volta de 70°C e a melhor entre 25° e 30°C.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada metodologias para o desenvolvimento de um *smart* sensor usando para realização de estimação de irradiância e rastreamento de posição solar além de ser um elemento chave para aplicação de um sensor baseado em *software* usando técnica de rede neurais artificiais para estimação do maior ângulo de radiação solar com maior precisão e de baixo custo, isto levando ao ponto de máxima de potência (MPP). Os resultados obtidos através deste estudo foram satisfatórios viabilizando o desenvolvimento do sistema embarcado responsável pela captação do dados online e medição indireta da irradiância solar. Foi projetada e elaborada toda estrutura de funcionamento e desenvolver um sensor inteligente, foi possível obter conhecimento em outras áreas tais como *IoT*, fusão de dados. Outro ponto que pode ser salientando, foi o levantamento de um *data sheet* do sensor desenvolvido isso contribuindo para a replicação do trabalho.

REFERÊNCIAS

1451.1-1999, I. (2000). Ieee standard for a smart transducer interface for sensors and actuators - network capable application processor information model. *IEEE Std 1451.1-1999*, 1–480.

1451.2-1997, I. (1998). Ieee standard for a smart transducer interface for sensors and actuators - transducer to microprocessor communication protocols and transducer electronic data sheet (teds) formats. *IEEE Std 1451.2-1997*, 1–120.

ANEEL, A.N.d.E.E. (2019). Brasil ultrapassa marca de 1gw em geração distribuída. *ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica*.

ANEEL, A.N.d.E.E.E.S. (2018). Mapa da energia solar. www.aneel.gov.br ■ [aplicacoes](#) ■ [atlas](#) ■ [pdf](#) ■ [03-Energia-Solar\(3\)](#).

Bhuyan, M. (2013). *Intelligent Instrumentation : Principles and Applications*. CRC Press.

Djamiykov, T.S., Asparuhova, K.K., Mitev, I., and Lazarov, T.N. (2017). Sun tracker with sensor — photovoltaic cell. In *2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)*, 1–3. doi:10.1109/ET.2017.8124341.

Er, Z. and Balci, E. (2018). Dual axis solar angle tracking system without any sensor. *Journal of Energy Systems*, 2(3), 127–136.

Fourati, H. (2015). *Multisensor data fusion: from algorithms and architectural design to applications*. CRC Press.

Lawrence, K. (2012). *Sensor and data fusion: a tool for information assessment and decision making*. SPIE Press.

Lee, K. (2000). Ieee 1451: A standard in support of smart transducer networking. *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*.

Mancilla-David, F., Riganti-Fulginei, F., Laudani, A., and Salvini, A. (2014). A neural network-based low-cost solar irradiance sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(3), 583–591. doi:10.1109/TIM.2013.2282005.

Meijer, G. (2008). *Smart sensor systems*. J. Wiley and Sons.

Mukhopadhyay, S.C. (2013). *Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements*. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation 5. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition.

R. C. Luo, Chih-Chen Yih, K.L.S. (2002). Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions. *IEEE Sensors Journal*, 2(2), 107–119. doi:10.1109/JSEN.2002.1000251.

Sefa, I., Demirtas, M., and Çolak, I. (2009). Application of one-axis sun tracking system. *Energy conversion and Management*, 50(11), 2709–2718.

Soloman, S. (2009). *Sensors Handbook, Second Edition*. 2 edition.

Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, K., Muljadi, E., and Jenkins, P. (2012). A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels. *Solar energy - Elsevier*, 86(9), 2695–2706.

Yan Silva, F.d., Ferreira, E.F.M., Sousa, M.S., de Paiva, A.C., and da Fonseca Neto, J.V. (2019). Sensor inteligente para estimação do Ângulo e irradiação solar via redes neurais artificiais. *SBAI*.