

SMART SOLAR ENERGY - SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PRODUÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

Arthur Bueno Stein (FETLSVC) - arthurbuenostein2@gmail.com

Artur Gabriel da Silveira (FETLSVC) - contatoarturgabriel@gmail.com

Diego Ramos Moreira (UNISINOS) - dramasm@edu.unisinos.br

Aline Cristiane Pan (UFRGS) - aline.pan@ufrgs.br

Resumo:

O projeto “Smart Solar Energy – Sistema de monitoramento de produção solar fotovoltaica” – consiste em um sistema de monitoramento on-line, baseado na construção de um dispositivo capaz de monitorar as situações em que se encontram os módulos fotovoltaicos. Para isso, foi desenvolvido um aplicativo para smartphone, que possibilita o envio de notificações de alerta ao usuário sobre sombreamento e sujeira nos módulos. A partir da combinação de uma interface de hardware composta por sensores de corrente contínua do tipo Hall, transformador de corrente, sensor de sujeira, sensor fotovoltaico e um microcontrolador ESP32 destinado a realizar a conversão dos dados para serem enviados ao servidor on-line e visualizados em um aplicativo para Android, desenvolvido na plataforma Thunkable. Através dos custos de aquisição dos componentes envolvidos no desenvolvimento do protótipo, é notável que o custo do dispositivo é significativamente baixo, visto que comparado as perdas que se pode obter no sistema, a partir de sombreamentos ou sujeira a aquisição do sistema se mostra relevante. Além disso, o dispositivo pode ser adaptado para monitorar apenas a sujeira com o custo reduzido a 25% do valor inicial. Simulou-se uma usina de 327 kWp instalada em Novo Hamburgo no RS e o custo de limpeza ao final de 10 anos seria de aproximadamente R\$ 29.019,10. No entanto, o ganho econômico gerado por estas limpezas seria de R\$ 80.117,32, o que representaria uma lucratividade financeira de aproximadamente 50% do valor gerado pela usina, ou seja, o tempo de retorno desta usina se reduziria a metade.

Palavras-chave: *Monitoramento, Sujeira, Módulo Fotovoltaico*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

SMART SOLAR ENERGY – SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PRODUÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

¹Arthur Bueno Stein – arthurbuenostein2@gmail.com

¹Artur Gabriel da Silveira – contatoarturgabriel@gmail.com

¹Diego Ramos Moreira – diego.moreira@liberato.com.br

¹Jeferson Cristiano Wiederkehr – jefersoncw@liberato.com.br

²Aline Cristiane Pan – aline.pan@ufrgs.br

¹Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, Curso Técnico de Eletrotécnica

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Engenharia de Gestão de Energia

Resumo. O projeto “Smart Solar Energy – Sistema de monitoramento de produção solar fotovoltaica” – consiste em um sistema de monitoramento on-line, baseado na construção de um dispositivo capaz de monitorar as situações em que se encontram os módulos fotovoltaicos. Para isso, foi desenvolvido um aplicativo para smartphone, que possibilita o envio de notificações de alerta ao usuário sobre sombreamento e sujeira nos módulos. A partir da combinação de uma interface de hardware composta por sensores de corrente contínua do tipo Hall, transformador de corrente, sensor de sujeira, sensor fotovoltaico e um microcontrolador ESP32 destinado a realizar a conversão dos dados para serem enviados ao servidor on-line e visualizados em um aplicativo para Android, desenvolvido na plataforma Thinkable. Através dos custos de aquisição dos componentes envolvidos no desenvolvimento do protótipo, é notável que o custo do dispositivo é significativamente baixo, visto que comparado as perdas que se pode obter no sistema, a partir de sombreamentos ou sujeira a aquisição do sistema se mostra relevante. Além disso, o dispositivo pode ser adaptado para monitorar apenas a sujeira com o custo reduzido a 25% do valor inicial. Simulou-se uma usina de 327 kWp instalada em Novo Hamburgo no RS e o custo de limpeza ao final de 10 anos seria de aproximadamente R\$ 29.019,10. No entanto, o ganho econômico gerado por estas limpezas seria de R\$ 80.117,32, o que representaria uma lucratividade financeira de aproximadamente 50% do valor gerado pela usina, ou seja, o tempo de retorno desta usina se reduziria a metade.

Palavras-chave: Monitoramento. Sujeira. Módulos Fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao rápido desenvolvimento, maiores exigências de conforto, maior mobilidade e crescente aumento da população mundial, o consumo de energia está aumentando ano a ano. No cenário atual, combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás, estão entre as fontes mais utilizadas para atender a energia demandada. O esgotamento de energia fóssil e a degradação ambiental levaram à crescente demanda por energia limpa e renovável. Assim, muitos países tomaram decisões e planos de grande escala de exploração e utilização de fontes não poluentes. Entre fontes de energia renováveis, a energia solar é a mais promissora e confiável. Em muitos países, os governos estão incentivando a instalação das usinas de energia solar (Tyagi *et al.*, 2013) (Chen *et al.*, 2015).

Desde maio de 2016 até junho de 2019, houve um aumento significativo da capacidade total instalada de micro e minigeração fotovoltaica de aproximadamente 26 MWp para 870 MWp, representando uma expansão de 3.346,15%, contribuindo para ultrapassar a marca de 1GW na geração distribuída. Dentre os estados que mais aderiram à micro e à minigeração, superando 10 mil unidades consumidoras, está o Rio Grande do Sul em segundo lugar com 12 mil unidades e 144,4 MW instalados (Brasil, 2019).

Este avanço evidente na potência instalada é proveniente da redução dos custos de aquisição dos módulos fotovoltaicos produzidos na China, o aumento constante na tarifação de energia elétrica e a acessibilidade de financiamentos de projetos de energia fotovoltaica. No decorrer de 2018, o preço dos módulos fotovoltaicos sofreu uma queda abrupta de US\$ 0,354 para US\$ 0,244/W, representando uma redução de cerca de 30% (VDMA, 2018). Esta redução é consequência da imposição de limites nas ajudas por parte do governo chinês para os novos sistemas fotovoltaicos.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da radiação solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. O dispositivo que realiza esta conversão é a célula solar fotovoltaica. Várias células solares associadas em série e/ou paralelo formam o módulo fotovoltaico. O módulo é a unidade básica de todo o sistema e o seu funcionamento célula-a-célula limita a capacidade de produção da usina fotovoltaica (Groth, 2013). A energia é produzida

em corrente contínua, utiliza-se de um inversor para convertê-la em corrente alternada possibilitando sua inserção na rede elétrica.

A pesquisa de Barbosa (2018), permitiu entender o funcionamento de um sistema fotovoltaico e o impacto que a sujeira sob os módulos fotovoltaicos pode causar no rendimento do sistema como um todo. Através dos dados obtidos dos testes de campo, foram feitas análises técnicas que permitiram comparar os valores de geração de energia advinda dos módulos totalmente limpos com as que continham acúmulo de “sujeiras”, possibilitando a constatação de uma perda no rendimento de aproximadamente 10%. O acúmulo de sujeira foi agregado durante aproximadamente um ano nos módulos “sujos” analisados, já os módulos limpos tiveram manutenção semanal de limpeza feita com água e utilizando um pano tipo flanela limpo. Constatou-se então que, através de um procedimento relativamente simples, prático e de baixo custo, é possível fazer um sistema fotovoltaico apresentar rendimento nominal muito próximo do apresentado quando o sistema é novo, sem incidência de desgaste pelo tempo e pela sujeira. Para isso as manutenções de limpeza dos módulos fotovoltaicos devem ser feitas periodicamente, visto que o acúmulo de sujeira é diferente de acordo com o lugar onde o sistema está implantado podendo ser realizadas idealmente, limpezas semanais, quinzenais ou mensais.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de um sistema de monitoramento *on-line* das condições de operação dos módulos solares fotovoltaicos a partir de um aplicativo para smartphone. A proposta é que o protótipo diferencie os principais fatores que interferem na produção de energia elétrica, além de identificar como monitorar estas condições. Para isso, utiliza-se da combinação de uma interface de hardware capaz de medir os parâmetros de corrente elétrica e sujidade dos módulos, e registrar em um servidor de armazenamento de dados *on-line* possibilitando, serem lidos e notificados através de um aplicativo para smartphone

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A tecnologia dos sistemas fotovoltaicos está cada vez mais desenvolvida e acessível em todo mundo. O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel quando verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (Blasques e Pinho, 2007). Células fotovoltaicas são fabricadas majoritariamente com materiais semicondutores, ou seja, um material com características intermediárias entre um condutor e um isolante. As características de um sistema fotovoltaico dependem dos materiais empregados na constituição das células, podendo ser eles o silício, germânio, gálio, entre outros elementos. Os mais comumente utilizado é o silício. A sua eficiência de conversão da luz solar em eletricidade para a indústria situa-se na ordem dos 15 a 18 % (Pereira e Oliveira, 2015). Um conjunto de células fotovoltaicas, devidamente conectadas eletricamente e acondicionadas para resistir as intempéries, é denominado módulo fotovoltaico e a principal especificação de um módulo é a potência nominal.

O rendimento do sistema fotovoltaico resulta do desempenho de seus componentes que, por sua vez, são afetados por fatores climáticos e perdas associadas. O desempenho das tecnologias fotovoltaicas é normalmente previsto em condições laboratoriais padrão (AM1,5G, 25° C e 1000 W/m²). Nas instalações ao ar livre, os sistemas fotovoltaicos raramente experimentam essas condições (Mondoc e Pop, 2010).

O *datasheet* dos módulos vendidos pela empresa *Canadian Solar* (Fig.1), apresenta as curvas de corrente elétrica versus diferença de potencial (I -V) resultantes de diferentes irradiâncias incidentes. Pode-se verificar que a corrente elétrica obtida é diretamente proporcional a irradiância incidente (Pinho e Galdino, 2014).

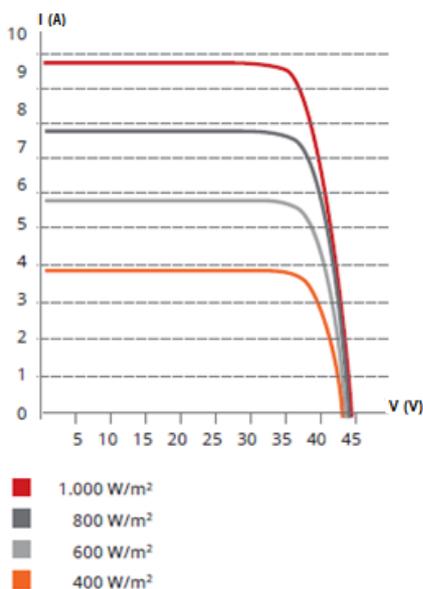


Figura 1 - Curvas I-V de acordo com a radiação solar. – Fonte: *Canadian Solar*, 2019.

Algumas perdas no sistema fotovoltaico são causadas por uma interação entre o meio ambiente, pelo inversor e pelos módulos. Destacam-se como fatores de perdas a diminuição da eficiência nominal (envelhecimento), o ângulo de incidência solar, sujeira, temperatura, sombreamento, incompatibilidade, perdas no inversor, perdas de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA) (Mondoc e Pop, 2010) (Baltus *et al.*, 1997) (Wu *et al.*, 2009). Um estudo da Sociedade Alemã de Energia Solar (DGS, 2013) quantificou os fatores de perdas em um sistema fotovoltaico, e estes estão elencados percentualmente na Tab. 1.

Tabela 1 – Fatores de perdas de um sistema fotovoltaico

Fatores de perdas	Variação
Sombreamento	0,0 – 5,0%
Sujidade	1,0 – 3,0%
Reflexão	3,0 – 5,0%
Variação do espectro AM1,5G	1,0 – 2,0%
Mismatch	0,5 – 2,5%
Condições diferente dos padrões de testes	4,0 – 9,0%
Perdas CC	0,5 – 1,5%
Perdas na conversão de energia	0,5 – 3,0%
Perdas no inversor	3,0 – 7,5%
Perda nos condutores elétricos	0,2 – 1,5%

Um modo de se analisar alguns dos fatores de perdas no sistema fotovoltaico é observando a curva característica corrente elétrica versus diferença de potencial (I-V) do sistema, como ilustrado na Fig. 2. O ponto de máxima potência (P_{MP}) ou do inglês *Maximum Power Point* (M_{PP}) é o ponto da curva na qual o produto da corrente elétrica pela diferença de potencial é máximo (URBANETZ, 2014).

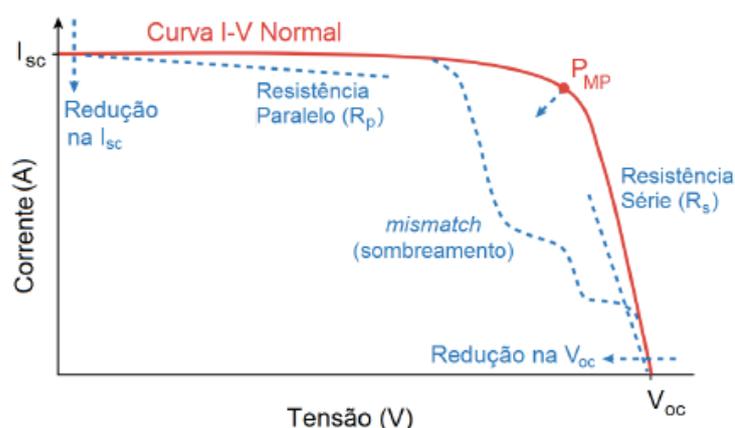


Figura 2 - Anomalias da curva I-V de um módulo fotovoltaico. – Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

A alteração da curva I-V pela resistência série (R_s) pode ser resultado de problemas nas interconexões elétricas de um módulo da fileira, ou problemas externos na fiação e conexões entre fileiras. A resistência em paralelo (R_p) é resultante de defeitos internos, ou seja, problemas na fabricação das células solares. Sombreamento parcial ou acúmulo de sujeira (de modo não homogêneo) também podem causar este mesmo efeito na curva. Redução na corrente de saída (I_{sc}) é causada por degradação dos painéis ou acúmulo de sujeira. Redução na diferença de potencial de saída (V_{oc}) é causada pelo aumento de temperatura nos módulos, podendo ser causada pelo modo de instalação (com pouca ventilação embaixo do painel). Degradações dos módulos ou curtos em diodos de desvio *by-pass* também causam este efeito. As perdas por *mismatch* (descasamento) causam o aparecimento de “degraus” na curva, como no caso de sombreamento parcial (Pinho e Galdino, 2014).

Sombreamento parcial é um fator de perda significativa em uma usina solar fotovoltaica. O sombreamento previsível pode ser causado por árvores, postes e construções no entorno, sendo pela própria arquitetura do sistema projetado. O sombreamento pode ser imprevisível, como por exemplo, quando acumulam folhas ou dejetos de pássaros. Quando uma folha cai sobre uma célula no módulo, como representado na Fig.3, ela recebe menos radiação solar, tornando-se uma resistência e limitando a corrente de todo o conjunto série das células conectadas. Além da perda de potência, há risco de danos ao módulo, pois a potência que não está sendo entregue ao gerador é dissipada no local, podendo ocasionar pontos quentes no módulo fotovoltaico (Pinho e Galdino, 2014). Para proteger o módulo e evitar a ocorrência desses pontos quentes, os módulos normalmente incluem um ou mais diodos de desvio *by-pass*. Esses diodos oferecem um caminho alternativo para a passagem de corrente e, com isso, limitam a dissipação de potência no conjunto de células sombreadas.

Fatores externos também podem alterar a eficiência de um painel fotovoltaico, o nível de irradiância de um determinado local onde o sistema será instalado e a temperatura a que o mesmo estará exposto são os principais fatores analisados antes da instalação de uma usina solar fotovoltaica. No entanto, um fator bastante importante tem sido deixado de lado por empresas que implementam esse tipo de tecnologia, o “fator sujeira”. Ocorre que na composição do ar além de oxigênio, nitrogênio e gás carbônico, existe outros fatores que podem ocasionar o acúmulo de sujeira nos módulos fotovoltaicos, fatores estes como poeira, restos de seres vivos ou organismos microscópicos como o ácaro, lama, folhas, fezes ornitológicas e outros tipos de materiais que possam impedir a passagem dos raios solares até as células dos módulos fotovoltaicos. Estes elementos, com o passar do tempo formam uma camada de sujeira sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos causando assim uma possível perda na produção de energia (Mundo Estranho, 2011).

O estudo realizado na Universidade de Patos de Minas (UNIPAM) por Barbosa (2018) analisou a produção de uma usina fotovoltaica em duas condições, limpa e com a sujidade ambiente acumulada durante um ano. A micro usina do UNIPAM não faz uso de banco de baterias ou algo similar para suprir a energia nos períodos em que não houver radiação. Como a usina é diretamente conectada à rede elétrica, o objetivo foi produzir o máximo de energia para a rede no período em que houver radiação disponível. De acordo com os dados obtidos para os meses de junho e julho de 2016 foi possível obter a potência elétrica a cada hora do dia, e assim o regime de produção diária dos meses em estudo é previsto de acordo com o gráfico indicado na Fig. 3. Após a análise e comparação dos dados obtidos no inversor 3 utilizado na *string* para esta usina do UNIPAM, onde houveram limpezas repetidamente nos módulos durante 1 ano, a eficiência de geração aumentou em 10,26%, no mês de junho. A Fig. 4 apresenta a comparação da potência gerada a cada hora da *string* 3 antes e depois da limpeza.

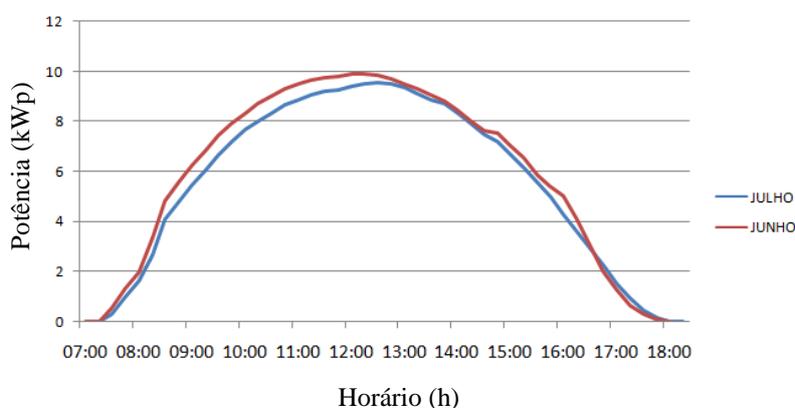


Figura 3 – (a) Curva da potência produzida na usina em kWp a cada hora do dia. – Fonte: Barbosa (2018).

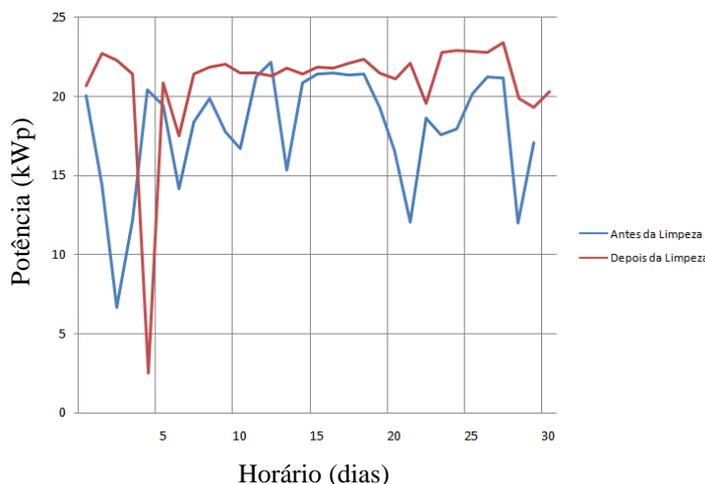


Figura 4 - Comparação da produção de energia antes e depois da limpeza realizadas no mesmo período – Fonte: Barbosa, 2019.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida por este trabalho se classifica, quanto ao objeto, como tecnológica, visando a materialização de um protótipo; quanto a forma de abordagem, caracteriza-se como quantitativa, pois utiliza-se de parâmetros estatísticos, para analisar os dados numéricos; quanto ao objetivo, é uma pesquisa bibliográfica, buscando conhecimentos já existentes sobre energia fotovoltaica; e de campo, pois foi realizada no lugar onde ocorre o fenômeno.

Através das pesquisas bibliográficas, entrevista e reuniões com os orientadores, os alunos adquiriram conhecimentos sobre os princípios para a aquisição de dados necessários para a análise e monitoramento do sistema fotovoltaico, baseado no funcionamento de acordo com a Fig. 5.

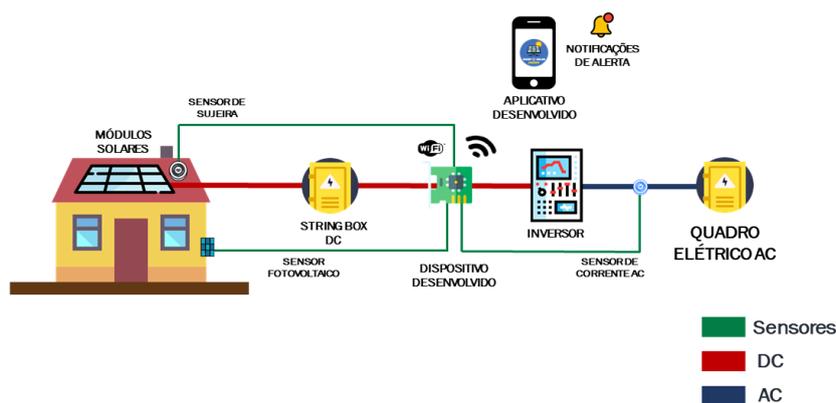


Figura 5 – Diagrama de funcionamento do projeto.

O dispositivo é acoplado juntamente ao inversor, sendo responsável pela leitura dos seguintes parâmetros: CC de cada *string*, sensor de sujeira, dados de radiação solar e de CA. Com isso, é possível correlacioná-los para se obter parâmetros de sujeira e sombreamento sobre os módulos.

O sensor de sujeira, elaborado pelos alunos, parte do princípio de padronização da leitura dos valores da luminosidade de LEDs sob um LDR. Este equipamento é fixado no mesmo ambiente dos módulos e na mesma inclinação, para amostras equivalentes de sujidade. Os valores de diferença de potencial monitorados, são padronizados por algoritmos programados no ESP32 e enviados para o servidor.

O circuito responsável por monitorar as CC de cada *string* é constituído pelo sensor ACS712, baseado no Efeito Hall, que pode suportar ± 30 A (bidirecional). O valor nominal de CC dos módulos fotovoltaicos varia entorno de 9,0 A e em caso de curto-circuito a corrente pode chegar, com margem de segurança, a 10 A. Partindo da necessidade de monitorar correntes máximas de 10 A, foi necessário construir um circuito amplificador diferencial de ganho 3, possibilitando o aumento na resolução das medidas a serem realizadas. O circuito projetado é baseado na utilização do LM358 CI Amplificador Operacional ($A_{mp}O_p$) que é um circuito integrado muito utilizado em projetos e prototipagem.

Com o intuito de monitorar a corrente elétrica disponibilizada para a rede, e assim calcular a potência gerada optou-se por utilizar o sensor de corrente robusto SCT-013-000, do tipo alicate. Pois, o mesmo possibilita rápida conexão com o circuito a ser medido. Além disso, o sensor de corrente não invasivo SCT-013-000 foi utilizado com a intenção de monitorar a CA disponibilizada pela usina para a rede. Este sensor pode medir CA de 0 até 100 A sem necessitar da interrupção do circuito, pois o seu princípio de funcionamento utiliza o transformador de corrente (TC) que modifica a corrente primária de até 100 A, que percorre o centro do núcleo ferromagnético, proporcionalmente para uma corrente menor de 50 mA. Além disso, possui um cabo multipolar com plug de saída P2 para conectar o sensor a placa. Todos os algoritmos foram baseados nos cálculos realizados seguindo os passos que estão disponíveis no site *Open Energy Monitor* (2019).

O sensor fotovoltaico é utilizado para monitorar as condições que se encontra a radiação solar para poder parametrizar os valores lidos de CC em cada *string*. Com isso, é possível relacionar a diferença de potencial gerada para se obter um ponto de referência, caso haja incidência máxima no sensor e não possuir a corrente máxima em alguma *string*, ocorrerá o alerta via aplicativo. O sensor utilizado constitui-se de uma célula solar fotovoltaica de silício multicristalina com V_{oc} de 6 V e potência de 1 W, interligado a um circuito divisor de diferença de potencial e *buffer* por meio de um conector Jack P2. Para realizar a medição utilizou-se de um amplificador operacional LM358 com ligação em função de *buffer*. O *buffer* é responsável de isolar as resistências dos circuitos de entrada e saída, reduzindo as perdas no divisor de diferença de potencial. Além disso, são utilizados diodos 1N4148 ultrarrápidos, que possuem velocidade de comutação máxima de 4 ns, para grampear a diferença de potencial máxima, protegendo contra surtos de diferença de potencial.

O aplicativo foi desenvolvido na plataforma de desenvolvimento de aplicativos *Thunkable* (2019) e se deu através da combinação de blocos lógicos. A função do aplicativo é receber os dados do servidor *Thingspeak* (2019), informar os valores recebidos e enviar notificações sobre a situação em que se encontram os módulos. O *Thingspeak* é um servidor *on-line* de armazenamento de dados na nuvem capaz de receber as informações do ESP32 e armazená-las. A tela de monitoramento de dados do aplicativo apresentado na Fig. 6 foi dividida em visão geral (a), gráficos (b), visão nominal e visão técnica (c), onde:

- a visão geral apresenta os valores de corrente da *String 1* e *String 2*, potência e notificações visuais sobre sombreamento e sujeira;
- os gráficos mostram as ilustrações gráficas de CC, CA, potência e sujidade gerada pelo *Thingspeak* das últimas leituras feitas;
- a visão técnica exhibe todos os dados monitorados pelo *Thingspeak* em forma descritiva;

- a visão nominal expõe os dados da usina cadastrada, e possibilita alterar o padrão de sujeira da notificação da aba de visão geral.



Figura 6 - Layout do aplicativo desenvolvido: (a) visão geral, (b) gráficos e (c) visão técnica.

A comunicação do *Thingspeak* com o aplicativo é feita através de chaves de acesso fornecidos pelo site. Para receber os valores do servidor é feita a configuração na aba de blocos do *Thunkable* adicionando blocos lógicos com os valores informados na aba de API Key do *Thingspeak*. Os dados recebidos do servidor estão em formato JSON e, a partir de combinações lógicas, é possível converter em TXT.

A Fig. 7 apresenta o protótipo desenvolvido conforme o detalhamento anterior. As caixas foram desenhadas no software *CAD 3D Autodesk Inventor* e confeccionadas em acrílico com corte à laser. Calculando os custos de aquisição dos componentes do protótipo, obteve-se o valor de R\$ 309,28. Além disso, o dispositivo pode ser adaptado para monitorar apenas a sujeira, com o custo de aquisição dos componentes de R\$ 96,46.

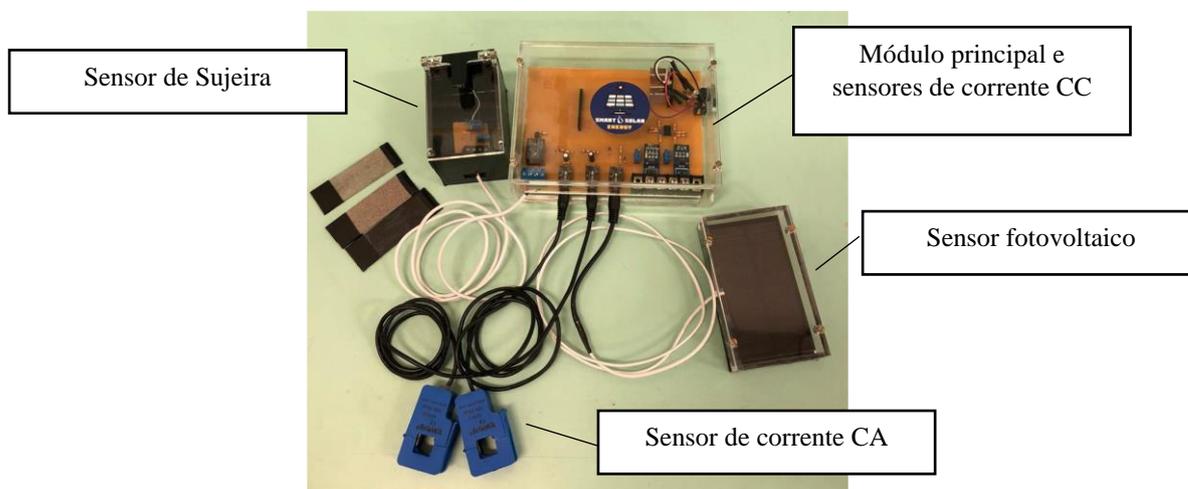


Figura 7 – Protótipo desenvolvido

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados para análise foram obtidos através de ferramenta de pesquisa, entrevista, e a partir da elaboração do protótipo. Os dados da entrevista foram analisados de forma qualitativa e descritiva apresentando os principais pontos a serem considerados na confirmação da eficiência do sistema desenvolvido. A construção do protótipo foi analisada de forma qualitativa apresentando os pontos em que o protótipo se mostra vantajoso. Pode-se confirmar a eficiência do protótipo através de pesquisas feitas e referenciadas no referencial teórico deste trabalho sobre os efeitos do sombreamento na geração solar fotovoltaica.

O protótipo desenvolvido possui características que atendem as necessidades de um sistema fotovoltaico, sendo capaz de monitorar os valores de corrente elétrica produzido, e as condições de sujeira em que se encontram os módulos fotovoltaicos. O monitoramento de CC realizado pelo módulo sensor ACS712 e o amplificador operacional LM358 demonstrou ruídos identificados como diferença de potencial de *ripple* para correntes perto de 10 A. Estes ruídos foram amenizados incluindo um filtro de média móvel na programação do ESP32.

Os testes foram realizados na sala de eletrônica do Curso Técnico de Eletrotécnica, da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha de Novo Hamburgo – RS, para avaliar a variação dos alertas das condições da usina em função das correntes contínuas de cada *string*, bem como vincular estes valores às condições em que se encontram o céu para a certificação de que há problemas na usina. Além disso, o sensor de sujeira influencia na parametrização dos alertas. Testando o sensor de sujeira através de 3 padrões de sujeira (limpo, pouco sujo e muito sujo) aplicados sobre o vidro do sensor, obteve-se os valores de diferença de potencial apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Testes com sensor de sujeira

	LIMPO					POUCO SUJO					MUITO SUJO				
MEDIDA	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
VALOR (V)	2,88	2,88	2,88	2,89	2,89	2,65	2,65	2,66	2,65	2,65	1,73	1,78	1,77	1,75	1,78
MEDIDA	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
VALOR (V)	2,90	2,87	2,88	2,88	2,90	2,66	2,64	2,65	2,67	2,65	1,77	1,77	1,76	1,78	1,77
MÉDIA	2,88 V					2,65 V					1,77V				

A partir das amostragens foram definidos 2 padrões, sendo eles:

- Possível sujeira nos módulos → Se o sensor de sujeira estiver lendo valores menores ou iguais que 2,79 V;
- Módulos limpos → Se o sensor de sujeira estiver lendo valores maiores ou iguais que 2,80 V.

Com os padrões aplicados na programação do aplicativo, o dispositivo apresentou eficiência para notificar o usuário de possíveis problemas, de acordo com as simulações.

No que diz respeito à comunicação *Wi-fi*, o servidor *Thingspeak*, possui um atraso de 15 segundos para o armazenamento de dados, deixando o dispositivo com um atraso insignificante para o monitoramento de sujeira, visto que a sujeira é um fator cumulativo que não necessita o monitoramento constante, com curtos períodos de atualização.

Utilizando de dados de usinas fotovoltaicas existentes, foi possível constatar a eficiência do produto, evidenciando as perdas por sujeira e comparando-as com o investimento em um serviço de limpeza dos módulos. Considerando os dados disponibilizados pela empresa Soul Renováveis (2019), de Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul (RS), os custos de limpeza por módulos para usinas estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 - Custos com limpeza – Fonte: Soul Renováveis (2019).

		Custo Geral	Custo por módulo
	<= 32 módulos	R\$ 216,00	
32	80	nº módulos x Custo p/ mód	R\$ 4,92
81	160	nº módulos x Custo p/ mód	R\$ 3,96
161	270	nº módulos x Custo p/ mód	R\$ 3,11
271	380	nº módulos x Custo p/ mód	R\$ 2,82
381	500	nº módulos x Custo p/ mód	R\$ 2,54
501	750	nº módulos x Custo p/ mód	R\$ 3,41

A partir destas informações, se fez necessário avaliar até que ponto seria necessário o investimento de limpeza em uma usina solar fotovoltaica. Para isso, considerou-se os dados de geração mensal média, a área em que os módulos foram instalados, o número de módulos e o valor da tarifa de um cliente da empresa Soul Renováveis de Novo Hamburgo, RS, como exemplo (Tab. 3).

Tabela 3 – Dados de uma usina fotovoltaica instalada pela empresa Soul Renováveis.

Cliente	Potência	Geração Mensal Média	Área Instalada	Nº de Módulos	Valor da Tarifa
Indústria	327 kWp	35.778 kWh/mês	1.702 m ²	851	R\$ 0,42

A partir destes dados foi possível elaborar uma simulação em que a sujidade influencie diretamente na geração fotovoltaica, considerando a perda anual de 10,26% por sujidade, segundo o estudo desenvolvido e referenciado anteriormente pela UNIPAM (Barbosa, 2018), a perda anual do rendimento dos módulos fotovoltaicos de 2,5% no primeiro ano de uso e 0,7% para os anos seguintes. A Tab. 4 apresenta os dados obtidos por esta simulação para a usina descrita na Tab. 3 (característica industrial) e os ganhos financeiros obtidos através da limpeza da mesma.

Tabela 4 – Simulação de ganhos com limpeza em uma usina industrial.

Ano	Geração (kWh/mês)	Anual (kWh)	Economia (R\$)	Ganho Anual com Limpeza (R\$)
0	35.778	429.336	180.321,12	-
1	34.884	418.603	175.813,09	18.038,42
2	34.639	415.672	174.582,40	33.986,52
3	34.397	412.763	173.360,32	48.072,78
4	34.156	409.873	172.146,80	60.500,79
5	33.917	407.004	170.941,77	71.451,98
6	33.680	404.155	169.745,18	81.088,02
7	33.444	401.326	168.556,96	89.552,95
8	33.210	398.517	167.377,07	96.975,15
9	32.977	395.727	166.205,43	103.469,00
10	32.746	392.957	165.041,99	109.136,42

Considerando 851 módulos para esta usina, e sabendo que quando ultrapassa o número de 750 o valor considerado é de R\$ 3,41 por módulo. O custo de limpeza para esta usina seria de R\$ 2.901,91, o que torna evidente que o investimento de contratação de um serviço de limpeza deve ser realizado anualmente, para que haja o maior rendimento da produção. O custo ao final dos 10 anos que foram simulados seria de aproximadamente R\$ 29.019,10. A Fig. 8 apresenta os valores financeiros (R\$/mês) para melhor exemplificação das condições que será submetida esta usina solar fotovoltaica, caso haja a limpeza ou não.

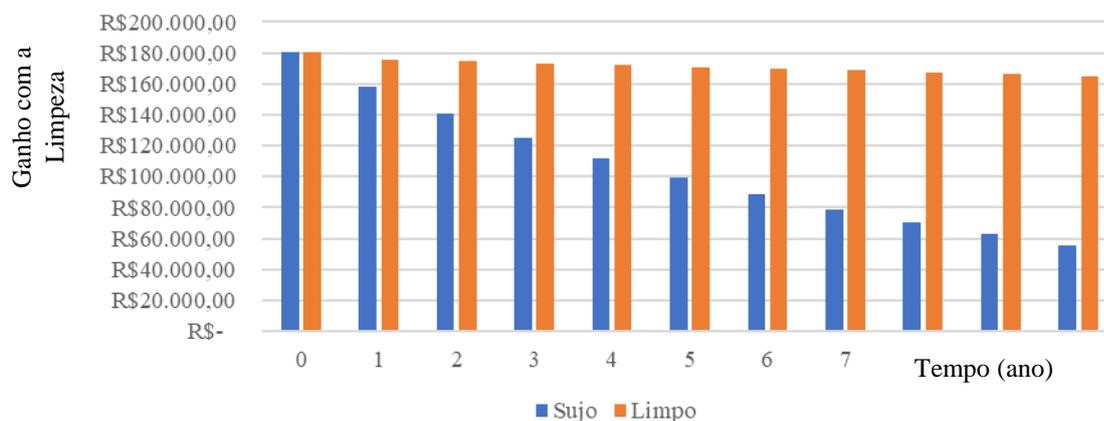


Figura 8 – Representação gráfica dos ganhos por limpeza em uma usina industrial (Tab. 3).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os conhecimentos adquiridos e os dados obtidos durante a execução deste projeto de pesquisa pode-se verificar que o objetivo de construir um dispositivo capaz de monitorar as condições de uma usina solar fotovoltaica, bem como alertar sobre prováveis problemas em um aplicativo para smartphone foram alcançados. A partir da combinação de uma interface de hardware composta por: sensores de CC do tipo Hall, transformador de corrente, sensor de sujidade, sensor fotovoltaico e um microcontrolador ESP32 destinado a realizar a conversão dos dados para serem enviados ao servidor *on-line* e visualizados em um aplicativo para *Android*, desenvolvido na plataforma *Thunkable*.

A partir do referencial teórico foram identificados os principais problemas causadores das perdas na produção de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. Com isso, analisando gráficos de representação dos fatores que dependem a produção de energia, como diferença de potencial e corrente elétrica, foi possível identificar como monitorar a variação de energia.

Através dos custos de aquisição dos componentes envolvidos no desenvolvimento do protótipo, é notável que o custo do dispositivo é significativamente baixo, visto que comparado as perdas que se pode obter no sistema, a partir de sombreamentos ou sujeira a aquisição do sistema se mostra relevante. Além disso, o dispositivo pode ser adaptado para monitorar apenas a sujidade com o custo reduzido a 25% do valor inicial. Simulou-se uma usina de 327 kWp instalada em Novo Hamburgo no RS e o custo de limpeza ao final de 10 anos seria de aproximadamente R\$ 29.019,10. No entanto, o ganho econômico gerado por estas limpezas seria de R\$ 80.117,32, o que representaria uma lucratividade financeira de aproximadamente 50% do valor gerado pela usina, ou seja, o tempo de retorno desta usina se reduziria a metade.

É necessário transformar o dispositivo desenvolvido em um produto potencialmente comercializável, já que o mesmo é um protótipo. Por isso, torna-se evidente a continuação deste trabalho a fim de aprimorar o dispositivo e buscar resultados prático do mesmo.

REFERÊNCIAS

- Brasil, 2019. Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída: Regulamentos da Agência possibilitaram avanço da geração distribuída. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)
- Baltus, C.W.A., Eikelboom, J. A., Van Zolingen, R. J. C., 1997. Analytical Monitoring of Losses in PV Systems. 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 1-5.
- Barbosa, E. R.; Faria, M. S. F.; Gontijo, F. B., 2018. Influência da sujeira na geração solar fotovoltaica. VII CBENS – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado – RS. pp. 1-7.
- Blasques, L. C. M., Vale, S. B., Pinho, J. T., 2007. Sistema Solar Fotovoltaico para Geração de Eletricidade na Estação Científica Ferreira Penna do Museu Paraense Emílio Goeldi, Caxiuana – Pará, I CBENS – I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Chen, B., Ye, L., Cui, T., Bi, W., 2015. Power Loss Analysis for Low - voltage Distribution Networks with Single – Phase Connected Photovoltaic Generation. 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 1-6.
- DGS - German Solar Energy Society. Planning and Installing Photovoltaic Systems. 2013.
- Groth, J. A, 2013. Usina de geração fotovoltaica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, pp. 121.
- Mondoc, B. Pop, F., 2010. Factors Influencing the Performance of a Photovoltaic Power Plant. 3rd International Conference on Modern Power Systems, pp. 1-6.
- Open energy monitor. Disponível em: <<https://openenergymonitor.org/>>. Acesso em Set. 2019.
- Pereira, F. A. S., Oliveira, M. Â. S., 2015. Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica. 2. ed. Brasil: Publindústria, Eduções Técnicas, pp 1-395.
- Pinho, J. T.; Galdino, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CRESESB. 2014.
- Por Redação Mundo Estranho. Como se forma a poeira?. Mundo estranho. Sao Paulo Sp, 18 apr. 2011. Disponível em: <<http://mundoestranho.abril.com.br/ciencia/como-se-forma-a-poeira/>>. Acesso em:25/08/2019.
- THINGSPEAK. Disponível em: <<https://thingspeak.com/>>. Acesso em Set. 2019.
- THUNKABLE. Disponível em: <<https://thinkable.com/>>. Acesso em Set. 2019.
- Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N.A., Selvaraj, J.A.L., 2013. Progress in solar PV technology: Research and achievement, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 20, pp. 443-461.
- Urbanetz, J., 2010. Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Wu, T. F., Chang, C. H., Chang, Y. D., Lee, K.Y., 2009. Power Loss Analysis of Grid Connection Photovoltaic Systems. International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), pp. 6.
- VDMA, 2019. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2019. Mechanical Engineering Industry. 10th edition. Disponível em:< <https://itrvp.vdma.org/documents/27094228/29066965/ITRPV02019.pdf/78cb7c8c-e91d-6f41-f228-635c3a8abf71>>. Acesso em Set. 2019.

INTELLIGENT SOLAR ENERGY – MONITORING SYSTEM FOR SOLAR PHOTOVOLTAIC PRODUCTION

Abstract. The project "Smart Solar Energy - Monitoring system for photovoltaic solar production" - consists of an online monitoring system, based on the construction of a device capable of monitoring the situations in which the photovoltaic modules are found. For this, a smartphone application was developed, which makes it possible to send alert notifications to the user about shading and dirt in the modules. From the combination of a hardware interface composed of direct current sensors of the Hall type, current transformer, dirt sensor, photovoltaic sensor and an ESP32 microcontroller designed to convert the data to be sent to the online server and viewed in an Android application, developed on the

Thinkable platform. Through the acquisition costs of the components involved in the development of the prototype, it is notable that the cost of the device is significantly low, since compared to the losses that can be obtained in the system, from shading or dirt, the acquisition of the system is relevant. In addition, the device can be adapted to monitor only dirt with the cost reduced to 25% of the initial value. A 327 kWp plant installed in Novo Hamburgo in RS was simulated and the cleaning cost at the end of 10 years would be approximately R \$ 29,019.10. However, the economic gain generated by these cleanings would be R \$ 80,117.32, which would represent a financial profitability of approximately 50% of the value generated by the plant, that is, the return time of this plant would be reduced by half

Key words: *Dirt. Monitoring. Photovoltaic Module.*