



Sensor capacitivo interdigitado de baixo custo para detecção de sujidade em superfícies aplicadas a sistemas fotovoltaicos

Felipe Walter Dafico Pfrimer¹, Driely Mancini², Alessandro Paulo de Oliveira¹, Alberto Yoshihiro Nakano¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Brasil (pfrimer@utfpr.edu.br)

²BRF S.A., Brasil

Resumo: Este artigo apresenta um sensor capacitivo interdigitado de baixo custo para detectar sujidade em superfícies associadas a módulos fotovoltaicos. O protótipo usa ponte capacitiva, condicionamento de sinal e ESP32. Ensaios com talco e pó cosmético indicaram aumento de tensão com deposições sucessivas, demonstrando viabilidade como prova de conceito.

Palavras-chave: sensor capacitivo; sujidade; capacitor interdigitado; sistemas fotovoltaicos; ESP32; monitoramento

INTRODUÇÃO

A geração solar fotovoltaica depende da conversão da radiação incidente em energia elétrica. Embora os módulos fotovoltaicos sejam projetados para operar por longos períodos em ambiente externo, seu desempenho é afetado por fatores ambientais como temperatura, irradiância, umidade, vento, sombreamento e deposição de partículas sobre a superfície frontal. Entre esses fatores, a sujidade, ou *soiling*, é particularmente relevante porque reduz a radiação transmitida às células solares e pode provocar perdas energéticas acumuladas ao longo do tempo.

A sujidade resulta do acúmulo de poeira, partículas minerais, fuligem, sais, poluentes atmosféricos e material orgânico sobre o vidro ou polímero transparente do módulo. Esse material pode absorver, refletir ou espalhar a luz incidente, reduzindo a corrente fotogerada. Revisões recentes mostram que o impacto da sujidade depende de condições locais, como clima, regime de chuvas, inclinação dos módulos, composição das partículas e frequência de limpeza natural ou artificial (Borah, Micheli e Sarmah, 2023; IEA PVPS, 2022; Wan et al., 2024).

O monitoramento da sujidade é importante porque permite planejar a limpeza dos módulos com base em condição real, e não apenas por calendário. A limpeza frequente pode reduzir perdas, mas aumenta custos de operação, consumo de água, uso de mão de obra e risco de danos mecânicos. Por outro lado, limpezas pouco frequentes podem reduzir a energia gerada. Assim, sensores de sujidade podem apoiar decisões de manutenção preventiva em sistemas fotovoltaicos de diferentes portes.

Diferentes métodos têm sido investigados para detectar ou estimar sujidade. Há abordagens baseadas em comparação entre módulos limpos e sujos, sensores ópticos, células de referência, análise de imagens, modelos de desempenho e dispositivos dedicados de medição. Trabalhos recentes têm explorado tanto sensores de campo quanto técnicas baseadas em aprendizado profundo para identificação de poeira em painéis solares (Alatwi et al., 2024; Muller et al., 2021). Apesar desses avanços, ainda há espaço para soluções simples, de baixo custo e facilmente integráveis a microcontroladores.

O monitoramento pode ser realizado por técnicas diretas ou indiretas. Métodos indiretos estimam perdas por meio da potência gerada, irradiância e modelos de desempenho. Métodos diretos utilizam superfícies de referência, sensores dedicados ou imagens da superfície. Relatórios técnicos e revisões recentes destacam que a variabilidade local é uma das principais dificuldades para generalizar resultados, pois a mesma densidade de poeira pode ter impactos distintos dependendo da composição, cor, granulometria e umidade do material depositado (IEA PVPS, 2022; Younis, Cotfas e Cotfas, 2024).

Neste contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento e a avaliação experimental de um sensor capacitivo interdigitado para detecção de sujidade em superfícies. O sensor é baseado na alteração da capacitância causada pela presença de material depositado sobre os eletrodos. A proposta aprofunda a etapa capacitiva apresentada em estudo anterior sobre sensores de sujidade baseados em fotoresistores e capacitores interdigitados (Mancini, 2023). O foco do trabalho é validar uma prova de conceito eletrônica, usando cir-



cuito de condicionamento de sinal, microcontrolador ESP32 e materiais simuladores de sujidade. Diferentemente de métodos ópticos, a proposta capacitiva não depende diretamente da intensidade luminosa, o que pode ser vantajoso para medições complementares em sistemas embarcados.

MATERIAL E MÉTODOS

Visão geral do sistema

O sistema desenvolvido foi concebido para detectar alterações provocadas pela deposição de material sobre uma superfície sensora. A arquitetura geral do sensor capacitivo é apresentada na Figura 1. O diagrama resume a cadeia de excitação, medição, condicionamento e aquisição, iniciando na geração do sinal alternado pelo ESP32, passando pela ponte capacitiva e pelos circuitos analógicos, até a leitura digital do sinal condicionado. As leituras foram realizadas por conexão do circuito ao computador usado como interface de aquisição, permitindo o acompanhamento dos ensaios.

No diagrama, o ESP32 gera o sinal de excitação pelo conversor digital-analógico (DAC) e realiza a leitura do sinal condicionado pelo conversor analógico-digital (ADC). O filtro ativo suaviza o sinal de excitação antes de aplicá-lo à ponte capacitiva, formada pelo sensor interdigitado e por um capacitor de referência. A deposição de material altera o ramo sensor e produz um sinal diferencial, que é elevado pelo amplificador, convertido em nível contínuo pelo retificador de precisão e suavizado pelo filtro passa-baixas. O circuito de proteção adapta a tensão à faixa segura do ADC, permitindo o registro da resposta pela interface de aquisição.

Sensor capacitivo interdigitado

O sensor utilizado é um capacitor interdigitado com eletrodos paralelos sobre placa de circuito impresso. A Figura 2 mostra o componente empregado nos ensaios. A região ativa é formada pelos eletrodos intercalados, sobre os quais o material simulador de sujidade foi depositado.

Capacitores interdigitados são formados por eletrodos condutores alternados, geralmente em formato de dedos paralelos, posicionados sobre um substrato isolante. Essa geometria é amplamente empregada em sensores porque concentra linhas de campo elétrico na região próxima à superfície e permite interação direta com materiais depositados sobre os eletrodos (Habiboush et al., 2024; Igreja e Dias, 2004). Diferentemente de um capacitor de placas paralelas ideal, parte do campo elétrico se distribui pela região acima dos eletrodos. Assim, materiais colocados sobre a superfície ativa interagem com o campo elétrico e podem alterar a capacitância equivalente.

Esse princípio é explorado em sensores de umidade,

presença de líquidos, caracterização dielétrica e medição de propriedades de materiais, incluindo sensores capacitivos de campo franjado baseados em estruturas interdigitadas (Mizuguchi et al., 2015). No caso da sujidade, a hipótese é que partículas depositadas sobre os eletrodos modifiquem a permissividade efetiva da região sensível. A variação de capacitância, embora pequena, pode ser convertida em variação de tensão por meio de uma ponte capacitiva e de circuitos de condicionamento.

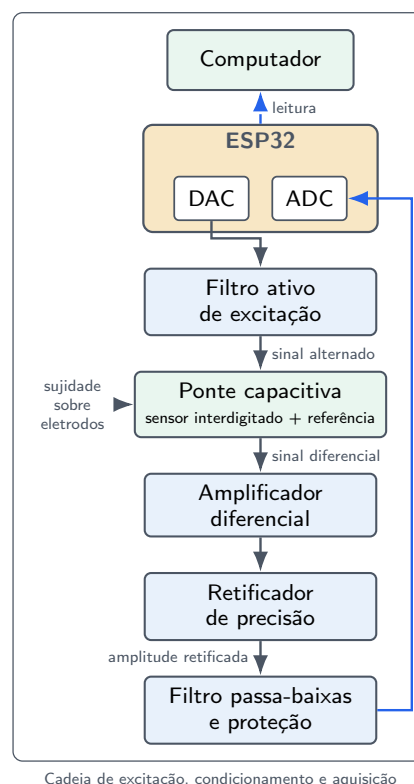


Figura 1: Diagrama em blocos do sistema capacitivo proposto.

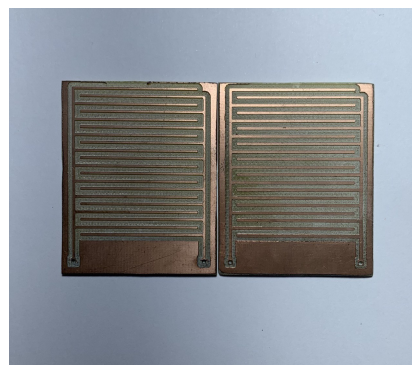


Figura 2: Capacitor interdigitado utilizado como elemento sensor de sujidade.



O uso de eletrodos interdigitados apresenta vantagens para uma prova de conceito de baixo custo: o sensor pode ser fabricado em placa de circuito impresso, possui geometria plana, pode ser instalado em superfície semelhante à de deposição e é compatível com circuitos eletrônicos simples. Como limitação, a resposta depende da geometria dos eletrodos, da espessura da camada depositada, da distribuição das partículas, da umidade e das propriedades dielétricas do material.

O funcionamento esperado é baseado na alteração da capacitância equivalente quando um material é colocado sobre os eletrodos. Dessa forma, materiais particulados, ao ocuparem a região do campo elétrico franjado, modificam a permissividade efetiva do meio. Essa alteração é convertida em tensão por meio do circuito de condicionamento.

Ponte capacitiva

Para medir variações pequenas de capacitância, foi utilizada uma ponte capacitiva inspirada na ponte de Wheatstone. A Figura 3 apresenta o arranjo experimental da ponte com a indicação dos pontos medidos. Um capacitor funciona como referência e o outro como sensor exposto ao material. Quando os elementos estão em condições semelhantes, a diferença entre os ramos tende a ser menor. Quando o material é depositado sobre o sensor, ocorre desbalanceamento da ponte.

O sinal de interesse é a diferença entre os pontos centrais dos dois ramos da ponte, indicados pelas marcações coloridas na Figura 3, dada por

$$V_{dif} = V_{out+} - V_{out-}. \quad (1)$$

Assim, alterações na capacitância do ramo sensor modificam a amplitude do sinal diferencial em relação ao ramo de referência.

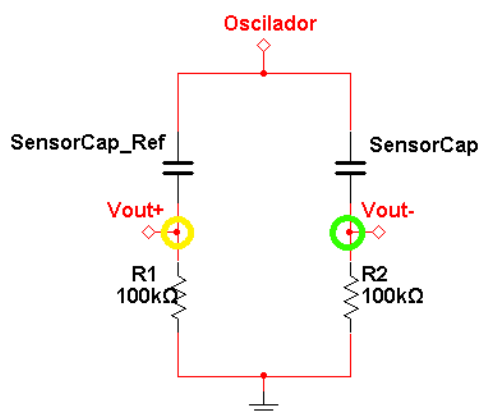


Figura 3: Ponte capacitiva com indicação dos pontos de medição do sinal diferencial, destacados por marcações coloridas.

Como a grandeza medida é capacitiva, a ponte foi ex-

citada por sinal alternado. O microcontrolador ESP32 foi utilizado para gerar uma forma de onda senoidal por meio de sua saída DAC, com período de aproximadamente $200 \mu s$, correspondente a uma frequência de 5 kHz. Esse sinal passou por filtragem e amplificação antes de alimentar a ponte, buscando reduzir ruído de quantização e obter amplitude adequada para o circuito.

Condicionamento de sinal

O condicionamento de sinal do sensor capacitivo foi dividido em etapas: geração e filtragem do sinal de excitação, ponte capacitiva, amplificação diferencial, retificação de precisão, filtragem passa-baixas e leitura pelo ADC do microcontrolador. Essa arquitetura converte a variação capacitiva em um nível de tensão contínua proporcional, adequado para aquisição digital.

A etapa de amplificação diferencial é necessária porque a informação de interesse está na diferença entre os sinais dos dois ramos da ponte. A Figura 4 apresenta o circuito amplificador de diferenças. Foram utilizados buffers de entrada e amplificação para elevar o sinal diferencial a uma faixa mais adequada ao processamento posterior. Os buffers reduzem o carregamento sobre a ponte capacitiva, enquanto o estágio diferencial fornece uma saída proporcional a

$$V_{amp} = G (V_{out+} - V_{out-}). \quad (2)$$

Para resistores pareados na configuração diferencial, o ganho pode ser aproximado por $G \approx R_5/R_3$. No circuito implementado, $R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ e $R_5 = R_6 = 470 \text{ k}\Omega$, resultando em ganho diferencial nominal $G \approx 47$ vezes. Os amplificadores operacionais usados como buffers apresentam ganho unitário e têm a função principal de isolar a ponte capacitiva da etapa amplificadora, reduzindo o carregamento dos ramos de medição.

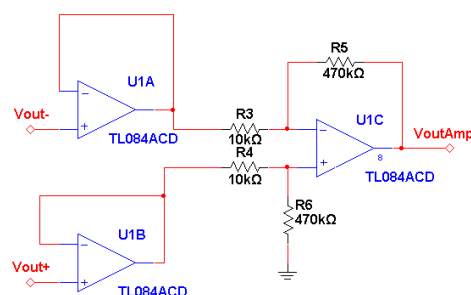


Figura 4: Circuito amplificador de diferenças utilizado no condicionamento do sinal capacitivo.

Após a amplificação, o sinal alternado foi retificado. A Figura 5 mostra o retificador de precisão de onda completa empregado, com indicação dos pontos de medi-



ção por marcações coloridas. Essa etapa permite transformar a amplitude do sinal alternado em uma forma mais adequada para filtragem e leitura por ADC. O uso do retificador de precisão é importante porque a queda direta dos diodos poderia introduzir erro significativo em sinais de baixa amplitude. No circuito, o primeiro estágio realiza a retificação com realimentação por diodos, enquanto o segundo estágio atua como somador inversor para recompor os semiciclos em uma saída proporcional ao módulo do sinal amplificado. No somador, R_{14} e R_{15} possuem 10 k Ω . Já os resistores R_{12} e R_{13} , ambos de 10 k Ω , foram associados em paralelo, resultando em uma resistência equivalente de 5 k Ω . Essa associação foi adotada pela indisponibilidade de um resistor de 5 k Ω durante a montagem, mantendo o valor necessário para o ganho relativo desse ramo do somador.

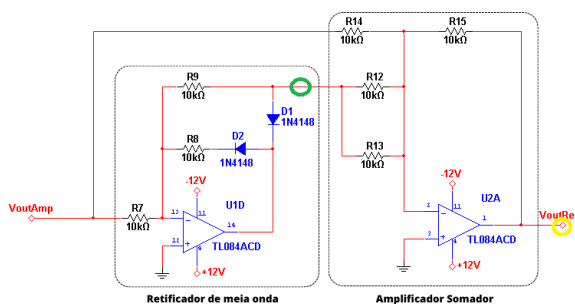


Figura 5: Retificador de precisão de onda completa utilizado no circuito de condicionamento, com pontos de medição destacados por marcações coloridas.

Na sequência, o sinal passa por filtro passa-baixas e por um circuito de proteção da entrada analógica do microcontrolador. A Figura 6 apresenta essa etapa. O filtro passa-baixas tem a função de obter uma tensão contínua associada ao valor médio da onda retificada, reduzindo a ondulação remanescente antes da leitura pelo ADC do ESP32. Considerando o resistor de entrada e o capacitor do filtro, a frequência de corte aproximada é dada por

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

Com $R_{16} = 10 \text{ k}\Omega$ e $C_2 = 1 \mu\text{F}$, obtém-se $f_c \approx 15,9 \text{ Hz}$. Essa frequência é suficientemente baixa para aproximar o valor médio do sinal retificado, preservando a variação lenta associada à deposição manual do material sobre o sensor. A rede resistiva associada à entrada do ADC auxilia na limitação de corrente e na proteção da leitura analógica.

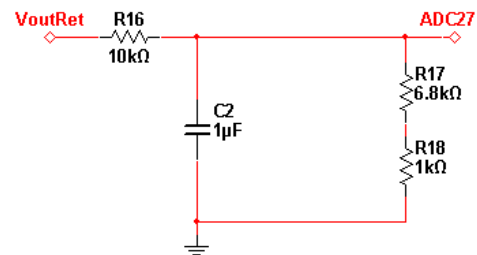


Figura 6: Filtro passa-baixas e divisor de proteção para a entrada ADC do microcontrolador.

Procedimento experimental

Os ensaios foram realizados em bancada com dois materiais simuladores de sujidade: talco e pó cosmético comercial. Esses materiais foram escolhidos por permitirem deposição visível e resposta inicial do sensor. As porções foram aplicadas manualmente sobre a região sensora, com massa estimada entre 0,4 g e 0,7 g por porção. A deposição manual foi suficiente para avaliar a prova de conceito, mas não configura um procedimento metrológico de calibração.

Foram registradas leituras em quatro condições: sensor limpo, primeira porção, segunda porção e terceira porção. A tensão de saída foi medida com multímetro e também com a leitura do microcontrolador. A comparação entre esses dois métodos permitiu avaliar se a aquisição embarcada era coerente com a instrumentação de bancada.

Ensaio laboratoriais são úteis para validar conceitos de sensores, mas exigem cuidado quando se pretende quantificar sujidade. A deposição manual de partículas pode demonstrar tendência de resposta, porém não garante controle de massa, área, homogeneidade e repetibilidade. Revisões recentes sobre práticas experimentais para simulação indoor de sujidade recomendam controle da densidade de poeira, caracterização do material, padronização do espalhamento e comparação com métricas ópticas ou elétricas (Younis, Cotfas e Cotfas, 2024).

Montagem experimental

A montagem física do protótipo foi composta por caixa com tampa em acrílico, placa de ensaio, circuitos de condicionamento, microcontrolador e sensor capacitivo interdigitado. A caixa foi usada como suporte experimental para simular uma superfície exposta à deposição, ainda que sem reproduzir integralmente as condições reais de um módulo fotovoltaico em campo.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resposta do sensor capacitivo à deposição de material

Os resultados indicaram aumento da tensão de saída com a deposição sucessiva de material sobre o sensor. A Tabela 1 apresenta os valores medidos com multímetro. Em todos os ensaios, a tensão na condição limpa foi inferior à tensão após a terceira porção, o que confirma que a presença do material provocou alteração detectável no circuito.

No primeiro teste com talco, a tensão aumentou de 0,192 V para 0,259 V entre a condição limpa e a terceira porção, correspondendo a aproximadamente 34,4%. No segundo teste com talco, a variação foi de 0,192 V para 0,279 V, equivalente a 45,8%. No terceiro teste com talco, a tensão passou de 0,172 V para 0,224 V, representando 30,3%. No ensaio com pó cosmético, a variação foi de 0,196 V para 0,286 V, equivalente a 45,9%.

Observa-se que o último ponto do primeiro teste medido com multímetro apresentou crescimento pequeno

em relação à segunda porção. Essa discrepância pontual pode estar associada à deposição manual não uniforme, à acomodação do material sobre os eletrodos, à variação de contato elétrico, ao ruído da ponte capacitiva ou ao tempo de estabilização da leitura. Por isso, o resultado deve ser interpretado como tendência experimental inicial, e não como calibração quantitativa da massa depositada.

A Figura 7 apresenta a curva de variação da tensão de saída considerando tanto o multímetro quanto o microcontrolador. A tendência crescente demonstra que o sensor capacitivo respondeu à deposição incremental de material.

Comparação entre multímetro e microcontrolador

As medições realizadas com o microcontrolador acompanharam a tendência observada no multímetro. A Tabela 2 apresenta os valores registrados pela leitura embarcada. As pequenas diferenças entre instrumentos são esperadas devido à resolução do ADC, ruído, tolerância dos componentes, filtragem e conversão analógico-digital.

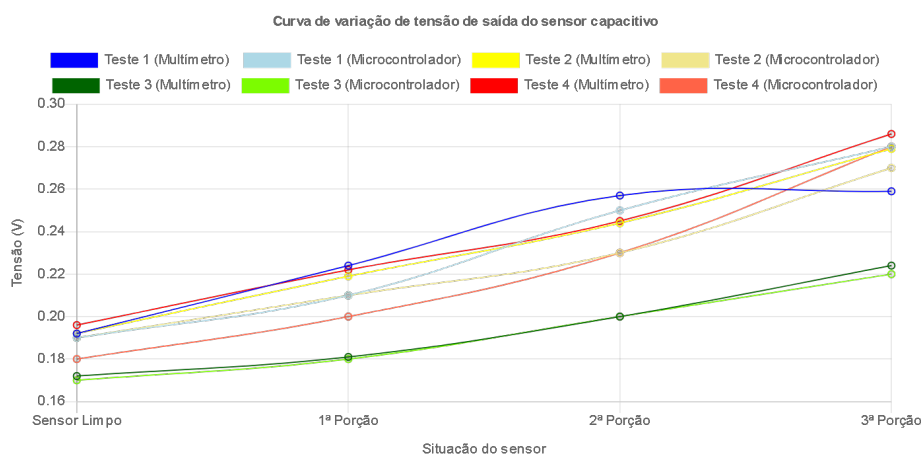


Figura 7: Variação da tensão de saída do sensor capacitivo para diferentes porções de material depositado.

Tabela 1: Tensão de saída do sensor capacitivo medida com multímetro.

Teste	Substância	Sensor limpo (V)	1ª porção (V)	2ª porção (V)	3ª porção (V)
1	Talco	0,192	0,224	0,257	0,259
2	Talco	0,192	0,219	0,244	0,279
3	Talco	0,172	0,181	0,200	0,224
4	Pó cosmético	0,196	0,222	0,245	0,286

Tabela 2: Tensão de saída do sensor capacitivo medida com microcontrolador.

Teste	Substância	Sensor limpo (V)	1ª porção (V)	2ª porção (V)	3ª porção (V)
1	Talco	0,19	0,21	0,25	0,28
2	Talco	0,19	0,21	0,23	0,27
3	Talco	0,17	0,18	0,20	0,22
4	Pó cosmético	0,18	0,20	0,23	0,28



Os resultados mostram que a leitura embarcada foi suficiente para identificar a variação de tensão causada pela deposição. Isso é importante para aplicações futuras, pois reduz a dependência de instrumentos externos e permite integração com registro de dados e processamento por *software*.

Sinais do circuito de condicionamento

Além da resposta final em tensão contínua, foram avaliados sinais intermediários do circuito. Nas capturas de osciloscópio, os canais de medição são diferenciados pelas cores verde e amarelo, mantendo correspondência visual com as marcações indicadas nos esquemas dos circuitos. Assim, as cores destacadas nas Figuras 3 e 5 auxiliam na identificação dos pontos medidos nas formas de onda apresentadas nas Figuras 8, 9 e 10.

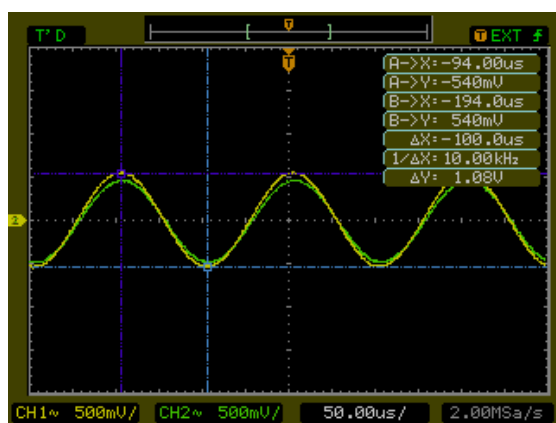


Figura 8: Tensão de saída diferencial da ponte capacitiva sem interferência externa.

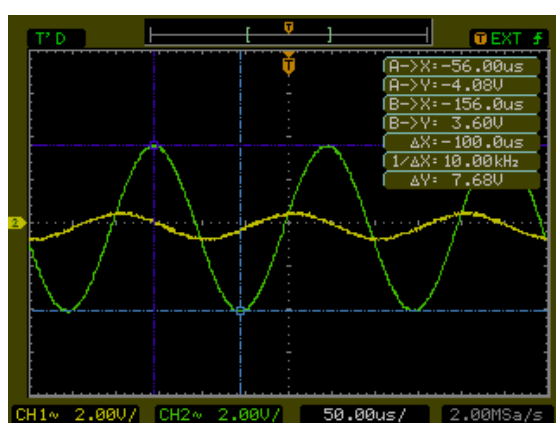


Figura 9: Tensão de saída diferencial da ponte capacitiva com presença de material sobre o sensor.

As Figuras 8 e 9 apresentam, em sequência, a saída diferencial da ponte sem interferência externa e com interferência externa (material sobre o sensor) nos pontos de medição indicados na Figura 3. Na Figura 10

são observados os sinais na etapa de retificação, conforme os pontos indicados na Figura 5.

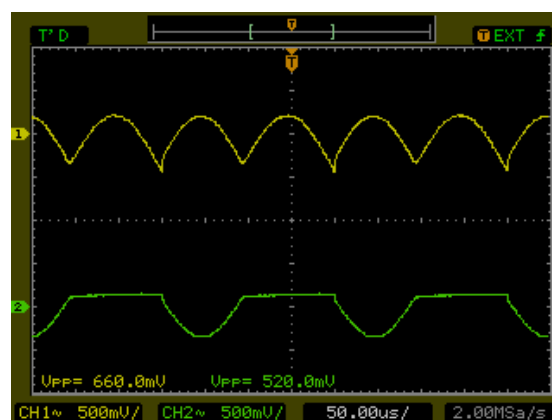


Figura 10: Sinais medidos na etapa de retificação de precisão, com forma de onda retificada obtida a partir do sinal alternado amplificado.

Na condição sem interferência externa, os dois capacitores apresentam respostas próximas, e o sinal diferencial é reduzido. Quando material é depositado sobre o sensor, ocorre desbalanceamento da ponte e aumento do sinal diferencial, evidenciando a alteração provocada na capacitância do sensor. Os pontos de medição do retificador de precisão foram indicados anteriormente na Figura 5; a forma de onda retificada confirma a conversão do sinal alternado amplificado em uma forma adequada para extração de valor médio pelo filtro passa-baixas.

Discussão

Os resultados demonstram que o sensor capacitivo interdigitado foi capaz de diferenciar a condição limpa da condição com material depositado. A resposta crescente nas deposições sucessivas sugere que a alteração da permissividade efetiva na região dos eletrodos foi convertida em uma variação mensurável de tensão. Neste estágio, o sensor não estima diretamente a perda de geração fotovoltaica, mas fornece uma variável elétrica associada à presença de material particulado sobre uma superfície de referência.

Uma vantagem da abordagem capacitiva é que ela não depende diretamente da intensidade luminosa. Isso diferencia o sensor de métodos puramente ópticos e permite medições mesmo em condições de baixa iluminação. Além disso, a geometria plana do capacitor interdigitado facilita sua instalação em superfícies de referência expostas ao mesmo ambiente dos módulos fotovoltaicos.

Apesar disso, a interpretação quantitativa ainda exige cuidado. A resposta do sensor depende da quantidade de material, da distribuição sobre os eletrodos, da umidade, da granulometria e da composição dielétrica das



partículas. A literatura recente reforça que ensaios de sujidade devem controlar massa, área e propriedades do material para que os resultados possam ser associados a densidade de deposição ou perda de desempenho fotovoltaico (Younis, Cotfas e Cotfas, 2024; Wan et al., 2024).

Os materiais utilizados neste estudo, talco e pó cosmético, funcionaram como simuladores de sujidade, mas não representam toda a complexidade da poeira real encontrada em campo. Em instalações fotovoltaicas, a sujidade pode incluir areia, argila, sais, fuligem, pólen, partículas industriais e material orgânico. Estudos recentes em condições externas mostram que a resposta dos módulos depende fortemente da composição do material depositado e do clima local (Elamim et al., 2024).

Outra limitação está no método de deposição. As porções foram aplicadas manualmente, sem controle fino da distribuição espacial. Essa escolha é aceitável para uma prova de conceito, mas não para a calibração final. Para evoluir o sensor, recomenda-se usar massas conhecidas, peneiramento ou dispersão controlada, repetição estatística e comparação com medidas ópticas de transmitância ou com a resposta elétrica de uma célula fotovoltaica de referência.

Em relação à eletrônica, o circuito apresentou funcionamento compatível com a proposta. A necessidade de excitação alternada, amplificação diferencial, retificação e filtragem torna o sistema mais complexo que sensores resistivos simples, mas melhora a capacidade de converter pequenas variações capacitivas em sinais legíveis por microcontrolador. Para campo, ainda seriam necessários encapsulamento, proteção contra umidade, estabilidade térmica, calibração de offset e análise de deriva ao longo do tempo.

Comparado a métodos por imagem, o sensor capacitivo fornece uma medição pontual e local. Técnicas recentes de aprendizado profundo podem identificar visualmente poeira em painéis solares com bons resultados em bases específicas (Alatwi et al., 2024), mas exigem câmera, processamento e condições adequadas de iluminação. O sensor capacitivo, por outro lado, pode operar como nó simples de monitoramento, com baixo custo e baixo volume de dados.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma versão completa e focada no sensor capacitivo interdigitado para detecção de sujidade em superfícies associadas a sistemas fotovoltaicos. O protótipo utilizou ponte capacitiva, circuito de condicionamento de sinal, retificação, filtragem e leitura por microcontrolador ESP32.

Os ensaios com talco e pó cosmético indicaram aumento da tensão de saída com deposições sucessivas. As variações entre sensor limpo e terceira porção ficaram entre 30,3% e 45,9% nas medições com múlti-

metro, e a leitura por microcontrolador acompanhou a mesma tendência. Esses resultados demonstram a viabilidade inicial da abordagem como prova de conceito. O sensor ainda não deve ser considerado um instrumento calibrado para medir massa de sujidade ou perda energética em módulos fotovoltaicos. Para isso, são necessários ensaios com massa conhecida, controle da área de deposição, diferentes tipos de poeira real, avaliação de umidade e temperatura, testes externos prolongados e comparação direta com módulos ou células fotovoltaicas.

Como continuidade, recomenda-se integrar o sensor a uma superfície de referência instalada com a mesma inclinação dos módulos fotovoltaicos, registrar dados em longo prazo e avaliar algoritmos de compensação e limiares de limpeza. A arquitetura capacitiva mostra potencial para sistemas de monitoramento distribuído de baixo custo, especialmente quando combinada a microcontroladores e registro digital dos dados.

REFERÊNCIAS

ALATWI, A. M.; ALBALAWI, H.; WADOOD, A.; ANWAR, H.; EL-HAGEEN, H. M. Deep Learning-Based Dust Detection on Solar Panels: A Low-Cost Sustainable Solution for Increased Solar Power Generation. *Sustainability*, v. 16, n. 19, 8664, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16198664>.

BORAH, P.; MICHELI, L.; SARMAH, N. Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches. *Sustainability*, v. 15, n. 24, 16669, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152416669>.

ELAMIM, A.; SARIKH, S.; HARTITI, B.; BENAZ-ZOUZ, A.; ELHAMAOU, S.; GHENNIQUI, A. Experimental studies of dust accumulation and its effects on the performance of solar PV systems in Mediterranean climate. *Energy Reports*, v. 11, p. 2346-2359, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.078>.

HABBOUSH, S.; ROJAS, S.; RODRÍGUEZ, N.; RIVADENEYRA, A. The Role of Interdigitated Electrodes in Printed and Flexible Electronics. *Sensors*, v. 24, n. 9, 2717, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24092717>.

IEA PVPS. *Soiling Losses: Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants*. Report IEA-PVPS T13-21:2022, 2022. Disponível em: <https://iea-pvps.org/key-topics/soiling-losses-impact-on-the-performance-of-photovoltaic-power-plants/>.

IGREJA, R.; DIAS, C. J. Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 112, n. 2-3, p. 291-301, 2004.



<https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.01.040>.

MANCINI, D. *Sensores de sujidade em superfícies utilizando fotoresistores e capacitores interdigitados com aplicação em painéis solares*. 2023. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2023. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/37088>.

MIZUGUCHI, J.; PIAI, J. C.; DE FRANCA, J. A.; DE MORAIS FRANCA, M. B.; YAMASHITA, K.; MATHIAS, L. C. Fringing Field Capacitive Sensor for Measuring Soil Water Content: Design, Manufacture, and Testing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 64, n. 1, p. 212-220, 2015. <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2335911>.

MULLER, M.; MICHELI, L.; SOLAS, A. F.; GOSTEIN, M.; ROBINSON, J.; MORELY, K.; DOORAGHI, M.; ALGHAMDI, Y. A.; ALMU-

TAIRI, Z. A.; ALMONACID, F.; FERNANDEZ, E. F. An In-Depth Field Validation of “DUSST”: A Novel Low-Maintenance Soiling Measurement Device. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 29, n. 8, p. 953-967, 2021. <https://doi.org/10.1002/pip.3415>.

WAN, L.; ZHAO, L.; XU, W.; GUO, F.; JIANG, X. Dust deposition on the photovoltaic panel: A comprehensive survey on mechanisms, effects, mathematical modeling, cleaning methods, and monitoring systems. *Solar Energy*, v. 268, 112300, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112300>.

YOUNIS, A.; COTFAS, P. A.; COTFAS, D. T. Systematic indoor experimental practices for simulating and investigating dust deposition effects on photovoltaic surfaces: A review. *Energy Strategy Reviews*, v. 51, 101310, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101310>.