

IMPACTO DA SUJIDADE NA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Fernando Schuck de Oliveira – fernandoschuck@hotmail.com

César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

4.3. Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

Resumo. Os módulos fotovoltaicos acumulam sujeira na sua parte frontal ao serem expostos à intempérie. Esta sujeira depositada provoca a diminuição do desempenho do sistema de geração em função da redução da irradiância que efetivamente atinge as células fotovoltaicas que compõem os módulos. As perdas por sujidade dependem das condições meteorológicas do local, das características da instalação e do entorno de onde foi instalado o sistema. Uma forma de quantificar o impacto destas perdas é através da taxa de sujidade, uma grandeza adimensional que representa a relação entre o desempenho real e aquele esperado se não houvesse sujeira sobre os módulos. Neste trabalho será apresentada a avaliação do impacto da sujidade em um sistema experimental, composto por cinco módulos de silício cristalino de 245 W_p, instalado no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul na cidade de Porto Alegre.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Perdas por Sujeira, Simulação

1. INTRODUÇÃO

Os módulos fotovoltaicos, responsáveis pela conversão da radiação solar em eletricidade em sistemas fotovoltaicos, acumulam sujeira na sua parte frontal enquanto expostos. Esta sujeira depositada provoca, entre outros problemas, a diminuição do desempenho do sistema de geração e está relacionada com a redução da irradiância que efetivamente atinge as células fotovoltaicas que compõem os módulos (Polo et al., 2021). De acordo com Costa et al., 2021, as perdas por sujidade dependem das condições meteorológicas do local, das características da instalação dos módulos (inclinação, orientação azimutal, etc.) e das características do local onde foi instalado o sistema (zona urbana, zona rural, proximidade com estradas, etc.). A sujidade é resultado da deposição de poeira, dejetos de pássaros, poluentes e outros contaminantes na superfície frontal dos módulos (Araújo, 2020). Prever o impacto da sujidade no desempenho de sistemas fotovoltaicos ajuda a estimar os custos de operação e manutenção, permitindo avaliar a necessidade de limpeza dos módulos além daquela promovida de forma natural através da precipitação pluviométrica no local da instalação.

Costa et al., 2020, avaliaram o impacto da sujidade na operação de módulos de silício cristalino e de telureto de cádmio através de estações de sujidade instaladas em três cidades brasileiras: Belo Horizonte/MG, Porto Alegre/RS e Brotas de Macaúba/BA. A taxa de sujidade *SR* (do inglês, *Soiling Ratio*) representa a relação entre o desempenho real (módulo sujo) e o esperado (módulo limpo) em função da sujeira acumulada. É uma grandeza adimensional, com seu valor variando entre zero a um. A taxa de sujidade encontrada para a cidade de Belo Horizonte, considerando um período de dois anos e quatro meses, foi de 0,92. Para Porto Alegre, o valor encontrado foi próximo de um ao longo de um ano e três meses. Entretanto, quando considerado o maior período seco registrado (12 dias), a taxa de sujidade foi de 0,97. Para Brotas de Macaúba, o valor médio encontrado foi de 0,95 (estes resultados foram obtidos para a tecnologia de silício cristalino). Conceição, et al., 2020, considera como taxa de sujidade a relação entre o desempenho real e o esperado subtraído de um. Este resultado representa a diferença de desempenho do sistema fotovoltaico operando nestas condições.

Araújo et al., 2020, durante um período de treze meses, avaliaram o desempenho de uma instalação fotovoltaica de 3,9 kW_p na cidade de Fortaleza/CE. A métrica adotada foi o cálculo diário do desempenho global, *PR* (do inglês, *Performance Ratio*). Os autores fazem uma correlação entre este parâmetro e eventos de limpeza natural dos módulos devido à chuva. Os valores médios de *PR* encontrados para os dois períodos de estiagem foram, respectivamente, 0,84 e 0,87 e para o período chuvoso foi de 0,92.

Neste trabalho será apresentada a avaliação do impacto da sujidade em um sistema experimental, composto por cinco módulos de silício cristalino de 245 W_p, instalado no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul na cidade de Porto Alegre.

2. METODOLOGIA

Embora instalado em 2016, o sistema avaliado começou a ser monitorado apenas em julho de 2021. O período de avaliação considerado para este trabalho foi de julho a outubro de 2021. Como os módulos haviam sido lavados pela

última vez em dezembro de 2019, os dados obtidos pelo sistema de monitoramento abrangem a operação do sistema na condição em que os módulos apresentavam sujeira em suas superfícies frontais. Desta forma, para avaliar a perda de energia causada pela condição de sujeira dos módulos foi necessário recorrer à simulação computacional.

O programa de simulação utilizado foi o SAM (*System Advisor Model*), desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) (NREL, 2021). Para que seja possível simular um sistema neste software é necessário um arquivo climático com dados de irradiância e temperatura ambiente, além da definição dos modelos de módulo fotovoltaico e inversor a serem utilizados. O arquivo climático pode ser construído com dados históricos como, por exemplo, arquivos do tipo TMY (*Typical Meteorological Year*), ou com dados específicos de uma estação de monitoramento, permitindo, neste caso, simular um sistema com dados reais. Ao se usar um arquivo do tipo TMY não é requerido nenhum tratamento prévio quando ele é obtido de algum repositório (como por exemplo os arquivos disponibilizados pelo LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações) (LabEEE, 2021). Quando se utiliza dados de monitoramento, porém, é possível que o arquivo apresente algumas falhas, necessitando de correção antes de ser utilizado no software de simulação. O arquivo climático com dados de monitoramento foi obtido a partir da irradiância medida através de uma célula de referência de mesma tecnologia e instalada no mesmo plano dos módulos (orientação norte e inclinação de 20°) e da temperatura ambiente medida por um sensor Pt100, protegido da incidência da radiação solar. Os dados deste arquivo são obtidos com intervalos de uma hora, entretanto o dia 27 de agosto apresentou uma lacuna de oito horas, entre 8 h e 17 h. Estes dados foram preenchidos com a média dos dados, de mesmo horário, de quatro dias antes e quatro dias depois do dia 27 de agosto.

Como o objetivo deste estudo foi avaliar a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico nas condições sujo e limpo, foi necessário definir dois módulos para representar o sistema operando nestas duas condições. Para os dois casos, os parâmetros elétricos dos módulos foram definidos a partir da curva $I-V$ do arranjo fotovoltaico, obtida antes e após uma criteriosa limpeza dos módulos fotovoltaicos. Para obtenção destas curvas foi utilizado o equipamento traçador de curvas $I-V$, modelo PVPM 1100C, fabricado pela PVE. Este equipamento permite medir arranjos fotovoltaicos com tensões de até 1000 V e correntes de até 100 A e utiliza a carga capacitiva como método de polarização. Por possuir escalas de tensão e corrente menores (100 V e 10 A, respectivamente), também é possível medir módulos. As correntes de curto-circuito I_{SC} e do ponto de máxima potência I_{MP} são as mesmas do arranjo. As tensões de circuito aberto V_{OC} , e do ponto de máxima potência V_{MP} foram obtidas dividindo por cinco os valores obtidos para o arranjo. Estes parâmetros elétricos foram obtidos a partir da curva $I-V$ transladada para as condições padrão de teste, utilizando o método disponibilizado pelo software do equipamento PVPM 1100C. É importante ressaltar que o método adotado para obter os parâmetros elétricos dos módulos implica em uma aproximação, pois não considera o descasamento dos parâmetros individuais dos módulos devido à associação que forma o arranjo fotovoltaico. Dessa forma, os módulos obtidos são fictícios e tem apenas o compromisso de se aproximarem dos módulos reais. O inversor, por sua vez, foi definido através dos dados de catálogo.

3. RESULTADOS

3.1 Avaliação das perdas no arranjo fotovoltaico

Através das curvas do arranjo fotovoltaico, obtidas antes e após a limpeza dos módulos, foi possível avaliar as perdas por sujeira. A Tab. 1 mostra as diferenças encontradas nos principais parâmetros elétricos do arranjo, inclusive para a máxima potência, P_M .

Tabela 1 – Comparação dos principais parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico antes e após a limpeza.

Parâmetros	Arranjo Limpo	Arranjo Sujo	Diferença
V_{OC} (V)	184,6	182,8	-1%
I_{SC} (A)	9,14	8,10	-11,4 %
P_M (W)	1215,1	1077,8	-11,3%

Como já mencionado, a deposição de sujeira na superfície frontal dos módulos tem o efeito de reduzir a irradiância que efetivamente chega às células, apresentando um efeito pouco expressivo sobre V_{OC} quando comparado ao efeito sobre I_{SC} e P_M . Dessa forma, a avaliação do impacto da sujeira na operação de sistemas fotovoltaicos leva em consideração a variação que ocorre nestes dois últimos parâmetros. Por outro lado, utilizar apenas I_{SC} para esta análise implica em não considerar a possibilidade de uma distribuição não uniforme da sujeira sobre o arranjo, resultando em uma avaliação parcial do efeito, pois se estaria desconsiderando o efeito de *mismatch* causado pela operação dos módulos em condições de irradiância variada e/ou a atuação de o diodo de *bypass*. Contudo, os resultados para a variação de I_{SC} e P_M , mostrados na Tab. 1, sugerem, por serem praticamente iguais, que a sujeira sobre os módulos do arranjo está distribuída uniformemente, embora, conforme mostra a Tab. 2, haja diferenças quando os módulos do arranjo fotovoltaico são analisados individualmente a partir da curva $I-V$ obtida experimentalmente. Considerando o período em que o sistema operou (três anos) sem que houvesse qualquer intervenção de limpeza, a perda de desempenho devido a sujeira, em média anual, foi de, aproximadamente, 3,7%.

Tabela 2 – Comparação dos principais parâmetros elétricos de cada módulo do arranjo fotovoltaico antes e após a limpeza.

Módulo	V_{oc} (V)			I_{sc} (A)			P_M (W)		
	Limpo	Sujo	Diferença	Limpo	Sujo	Diferença	Limpo	Sujo	Diferença
Módulo 1	36,7	36,2	-1,4%	9,02	7,84	-13,1%	237,8	208,6	-12,3%
Módulo 2	36,6	36,3	-0,8%	9,14	8,07	-11,7%	241,3	214,9	-10,9%
Módulo 3	36,6	36,4	-0,5%	9,13	8,09	-11,4%	241,2	217,5	-9,8%
Modulo 4	36,8	36,4	-1,1%	9,14	8,14	-10,9%	240,4	216,7	-9,8%
Modulo 5	36,6	36,3	-0,8%	9,11	7,99	-12,3%	239,8	211,9	-11,6%

As condições de operação de um sistema fotovoltaico podem ser avaliadas através dos parâmetros de desempenho: produtividade de referência Y_R , produtividade do arranjo Y_A , produtividade final Y_F , desempenho global PR (*performance ratio*) e o fator de capacidade FC (Marion *et al.* 2005). Dentre estes parâmetros, o PR é o que melhor permite avaliar as perdas existentes na operação do sistema. Na Tab. 3 são apresentados os parâmetros de desempenho, calculados com os dados de monitoramento para o período de estudo.

Tabela 3 – Parâmetros de desempenho do sistema obtidos a partir dos dados de monitoramento.

Mês	Y_R (kWh/kW)	Y_A (kWh/kW)	Y_F (kWh/kW)	PR	FC (%)
Julho	124,06	104,63	95,15	76,69	12,78
Agosto	104,78	85,61	77,40	73,87	10,40
Setembro	108,38	88,40	79,75	73,58	11,07
Outubro	165,93	129,94	117,72	70,94	15,82

Avaliando-se o PR , observa uma tendência de redução no seu valor ao longo dos meses, indicando que as perdas estão aumentando. Não é possível afirmar que estas perdas estejam relacionadas apenas com acúmulo da sujeira depositada sobre os módulos, entretanto, a partir da análise da curva $I-V$ dos módulos, não foi possível identificar nenhum tipo de mau funcionamento. Também não foi constatada nenhuma anomalia nas conexões elétricas ao ser realizada a inspeção visual no sistema. Com relação à operação do inversor, embora nenhum teste tenha sido realizado, é possível considerar que seu funcionamento se manteve nas mesmas condições ao longo do período de avaliação frente ao valor constante da eficiência de conversão, 90%.

3.2 Avaliação da perda energética

Através de simulação foi possível avaliar a perda energética do sistema fotovoltaico no período de estudo devido à sujidade, entretanto foi necessário aferir a fidelidade entre os dados gerados pela simulação e os obtidos pelo sistema de monitoramento. A Tab. 4 mostra, para os meses de julho, agosto, setembro e outubro, a energia gerada pelo sistema antes da limpeza usando dados de simulação e os de monitoramento, permitindo avaliar as diferenças entre eles.

Tabela 4 – Comparação da energia gerada, em corrente contínua, pelo sistema fotovoltaico, antes da limpeza dos módulos, utilizando dados gerados pela simulação e os obtidos pelo sistema de monitoramento.

Mês	Energia – Monitoramento (kWh)	Energia – Simulação (kWh)	Diferença (%)
Julho	127,13	120,94	-4,87
Agosto	104,02	99,89	-3,96
Setembro	107,41	102,22	-4,83
Outubro	157,88	150,68	-4,56

Conforme mostrado na Tab. 4, a simulação subestima a geração em aproximadamente 5% quando comparada com os dados de monitoramento do sistema fotovoltaico. Considera-se, entretanto, para a finalidade deste estudo, que há uma boa aproximação entre os dados reais e os obtidos pela simulação, permitindo obter boa estimativa da energia produzida pelo sistema.

A análise do impacto da sujidade na geração de energia do sistema fotovoltaico foi realizada utilizando dados de simulação, mesmo para a condição em que os módulos estavam sujos. A Fig. 1 mostra a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico para os meses de julho, agosto, setembro e outubro, considerando os módulos sujos e limpos. A perda de energia foi de 60,3 kWh durante os quatro meses avaliados.

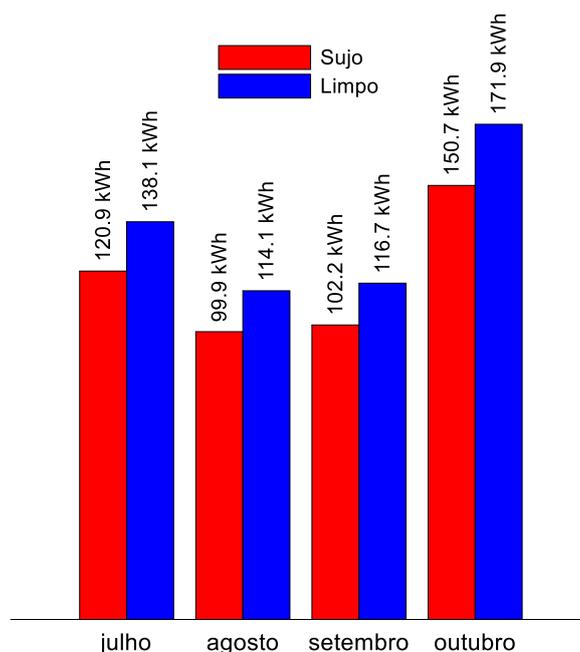


Figura 1 – Comparação da energia gerada em corrente contínua com os módulos sujos (em vermelho) e limpos (em azul).

A Tab. 5 mostra a produtividade de referência, e para as condições dos módulos sujos e limpos, a produtividade do arranjo, a produtividade final, o desempenho global e o fator de capacidade.

Tabela 5 – Parâmetros de desempenho do sistema nas condições sujo e limpo obtidos através de simulação.

Mês	Y_R (kWh/kW)	Y_A (kWh/kW)		Y_F (kWh/kW)		PR		FC (%)	
		Limpo	Sujo	Limpo	Sujo	Limpo	Sujo	Limpo	Sujo
Julho	124,06	113,63	99,54	101,90	89,22	0,82	0,71	13,70	11,99
Agosto	104,78	93,90	82,22	84,16	73,64	0,80	0,70	11,31	9,90
Setembro	108,38	96,07	84,13	86,15	75,41	0,79	0,69	11,96	10,47
Outubro	165,93	141,47	124,07	127,02	111,31	0,76	0,67	17,07	14,96

A partir dos dados apresentados na Tab. 4, é possível observar uma razoável melhora no PR após a limpeza dos módulos. É importante ressaltar que, nesta análise, não é possível atribuir a variação observada neste parâmetro ao aumento da sujidade ao longo dos meses, pois assumiu-se na simulação uma condição de sujidade constante, avaliada através da curva $I-V$ do arranjo obtida antes e após a limpeza dos módulos fotovoltaicos após o mês de outubro (último mês com dados monitorados).

4. CONCLUSÕES

A sujeira depositada nos módulos fotovoltaicos, de sistemas que estão em operação, causa a diminuição da capacidade desses geradores converterem a radiação solar em eletricidade. O conhecimento do efeito da sujidade no desempenho destes sistemas de geração contribui para estimar os custos de operação e manutenção. Este trabalho apresentou o estudo do impacto da sujidade no desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica que permaneceu sem limpeza por três anos. O PR calculado com os dados de monitoramento mostra uma tendência de queda ao longo dos quatro meses, indicando que as perdas aumentaram. É razoável atribuir que uma parcela das perdas se deve à sujidade, pois o exame das condições do sistema não atestou nenhuma outra falha que pudesse justificar a piora no desempenho do sistema. A avaliação da perda energética foi realizada através de simulação no software SAM. Os resultados indicaram que esta perda foi de 60,3 kWh nos quatro meses de avaliação. Também foi possível avaliar a melhora no desempenho global do sistema (PR) após a limpeza dos módulos, cujo valor, em média, passou de 0,7 (módulos sujos) para 0,8 (módulos limpos).

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

REFERÊNCIAS

- Araújo, D.N., Costa, S.C.S., Dupont, I.M., Carvalho, P.C.M., 2020. Impactos da Sujidade e Efeitos da Limpeza no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos, VIII CBENS - VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Conceição, R., Vázquez, I., Fialho, L., García, D., 2020. Soiling and rainfall effect on PV technology in rural Southern Europe. *Renewable Energy* 156, 743–747.
- Costa, S.C.S., Diniz, A.S.A.C., Santana, V.A.C., Kazmerski, L.L., 2020. Determinação das Taxas de Sujidade para Módulos Fotovoltaicos de Filme Fino e Silício Cristalino Instalados em Diferentes Zonas Climáticas Brasileiras, VIII CBENS - VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Costa, S.C.S., Kazmerski, L.L., Diniz, A.S.A.C., 2021. Impact of soiling on Si and CdTe PV modules: Case study in different Brazil climate zones. *Energy Conversion and Management: X* jornal, vol. 10.
- LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 2021. Disponível em: < <https://labeee.ufsc.br/>>. Acesso em: 10 dez 2021.
- Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K., Hayden, H., Hammond, B., Fletcher, Canada, B., Narang, D., Kimber, A., Mitchell, L., Rich, G., Townsend, T., 2005. Performance parameters for grid-connected PV systems. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista.
- NREL – National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model (SAM). 2021. Disponível em: < <https://sam.nrel.gov/>>. Acesso em: 10 dez 2021.
- Polo, J., Martín-Chivelet, N., Sanz-Saiz, C., Alonso-Montesinos, J., López, G., Alonso-Abella, M., Battles, F.J., Marzo, A., Hanrieder, N., 2021. Modeling soiling losses for rooftop PV systems in suburban areas with nearby forest in Madrid. *Renewable Energy*, vol. 178, pp. 420–428.

SOILING IMPACT ON THE PERFORMANCE OF GRID-TYE PV SYSTEMS

Abstract. *Photovoltaic modules accumulate dust and dirt on their surface when exposed to the weather. This deposited dirt decreases the performance of the photovoltaic systems due to the reduction of the irradiance that reaches the solar cells of the modules. Such losses depend on the local weather conditions, the characteristics of the installation and the surroundings where the system was installed. A way to quantify the impact of these losses is through the soiling rate, a dimensionless quantity that represents the difference between the real (dirty) and expected (non dirty) output power of the system. This work presents an evaluation of the soiling impact on an experimental photovoltaic system composed of five 245 W_p crystalline silicon modules installed at the Solar Energy Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul in thr city of Porto Alegre.*

Key words: *Photovoltaic Systems, Soiling Losses, Simulation*