

ANÁLISE DO EFEITO DO ACÚMULO DE SUJEIRA NOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DA UTFPR – CÂMPUS CURITIBA

Édwin Augusto Tonolo – edwintonolo@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

Juliana D'Angela Mariano – julianadangela@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Sistemas de Energia

4.4 Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos

Resumo. Com o crescente aumento mundial do consumo de energia elétrica e o eminente esgotamento dos recursos fósseis, como carvão e petróleo, o mundo precisa investir em novas fontes de energia elétrica e renováveis. O estudo busca apresentar os efeitos da sujeira no desempenho dos sistemas fotovoltaicos e, para isso, buscou-se analisar dias que apresentassem curvas de irradiação livres de qualquer interferência. Assim, foram elaborados gráficos de irradiação de todos os dias dos meses de junho até outubro. O objetivo é comparar a performance dos sistemas fotovoltaicos pré limpeza programada, com o pós-limpeza. Após a limpeza, houve um período de estiagem, que durou 30 dias. Após o período de estiagem, houve dois períodos com grande acúmulo de chuva, sendo que entre esses dois intervalos obteve-se dias totalmente ensolarados, podendo assim ser analisado o efeito da autolimpeza após um grande período de seca e após um curto período sem chuvas. Foram estudados os índices de irradiação incidente no plano dos painéis fotovoltaicos e os valores de energia elétrica gerados, para que os dias fossem quantificados e comparados. Foi feita a comparação entre autolimpeza e ângulo de instalação, bem como a comparação entre instalações em diferentes locais da cidade de Curitiba. Observou-se que a limpeza programa surtiu efeito, aumentando a produção em relação ao período pré limpeza. Durante o intervalo de estiagem, houve acúmulo de sujeira, pois pode-se notar uma queda na performance, fato que foi melhorado após um período com grande volume de chuvas, demonstrando assim que a autolimpeza foi tão eficiente quanto a limpeza programada.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico, Análise de sujidade, Geração de energia fotovoltaica.

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 fonte de energia 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).

Pelo terceiro ano consecutivo, as emissões globais de dióxido de carbono relacionadas à produção de energia elétrica com combustíveis fósseis e da indústria, praticamente não sofreram aumento, em grande parte devido ao declínio do uso do carvão em todo o mundo, mas também devido a melhorias na eficiência energética e ao aumento do uso de energias renováveis. O ano trouxe reduções de preços sem precedentes, particularmente para módulos fotovoltaicos. As melhorias dos fatores de capacidade ajudam a tornar a energia solar fotovoltaica cada vez mais competitiva com as fontes de energia tradicionais (REN 21, 2017).

Em 2015, as energias renováveis forneceram cerca de 19,3% do consumo de energia final global, e o crescimento da capacidade instalada e produção continuou em 2016. No último ano, o investimento em energias renováveis chegou a vários países de economia em desenvolvimento e emergentes, alguns se tornando mercados importantes. A energia fotovoltaica foi a líder mundial em capacidade adicionada em 2016, com um total de 75GWp - equivalente a mais de 31.000 painéis fotovoltaicos instalados a cada hora (REN 21, 2017).

O Brasil possui um grande potencial de geração fotovoltaica. Comparativamente usando como exemplo a Alemanha, que é um dos líderes mundiais em sistemas fotovoltaicos instalados, no local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais energia elétrica do que no local mais ensolarado do país europeu (Pereira *et al.*, 2017). No entanto, a energia fotovoltaica corresponde a apenas 0,59% da eletricidade gerada no país, tendo em janeiro de 2018, uma capacidade instalada de 1,11GWp (935,33MWp fora do sistema de compensação de energia e mais 175,80MWp em micro e minigeração cadastrada no sistema de compensação) (ANEEL, 2018a) (ANEEL, 2018b).

Tendo como proposta analisar a tecnologia de geração de energia fotovoltaica, contribuir para a geração de energia limpa e renovável e auxiliar em pesquisas, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) instalou dois sistemas

em suas sedes na cidade de Curitiba, Paraná. Primeiro, em dezembro de 2011, foi inaugurado o sistema fotovoltaico instalado no telhado do Escritório Verde, na sede centro da universidade. Contém 10 módulos de silício policristalino, totalizando 2,1kWp e com inversor de 2kWp. O sistema foi instalado preservando a arquitetura do telhado, com inclinação de 15° e desvio azimutal de 22° para o oeste (Urbanetz Jr *et al.*, 2016) (Tonolo *et al.*, 2017).

Em fevereiro de 2016 entrou em operação o sistema fotovoltaico da sede Neville, em uma região afastada do centro, no bairro CIC, cidade industrial de Curitiba. Contém 34 módulos de silício policristalino, totalizando 10,2kWp e com inversor de 10kWp. O sistema foi instalado nas condições ideais, com inclinação igual à latitude, 25° e com orientação voltada ao norte, ou seja, com desvio azimutal de 0° (Urbanetz Jr *et al.*, 2016).

O desempenho do sistema fotovoltaico resulta do desempenho de seus componentes que, por sua vez, são afetados por fatores climáticos e perdas associadas. Quase todos os requisitos do sistema são únicos de alguma forma, de modo que a capacidade de antecipar os desafios no local e projetar o sistema em conformidade pode ajudar a garantir um ótimo desempenho do sistema (Mondoc e Pop, 2010).

Em um sistema fotovoltaico, a eletricidade gerada varia de acordo com as condições operacionais. 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, *mismatch*, perdas CC, perdas no inversor, perdas CA e neve (Mondoc e Pop, 2010) (Baltus *et al.*, 1997) (Wu *et al.*, 2009).

Existe uma necessidade real de avaliação de desempenho ao ar livre e monitoramento de tecnologias fotovoltaicas, especialmente para novas tecnologias sem experiência de campo, para estabelecer seu desempenho e os desvios observados nas condições padrão de teste. No entanto, um bom conhecimento de como os parâmetros de projeto fundamentais afetam o desempenho de um sistema de energia fotovoltaica é essencial para prever e alcançar uma maior eficiência de uma planta fotovoltaica (Mondoc e Pop, 2010).

O desempenho das tecnologias fotovoltaicas é normalmente previsto em condições laboratoriais padrão. Nas instalações ao ar livre, os sistemas fotovoltaicos raramente experimentam essas condições (Mondoc e Pop, 2010).

O acúmulo de sujeira nos módulos do sistema solar fotovoltaico é um processo natural. A poeira natural (solo) é uma fonte de contaminação para painéis fotovoltaicos, principalmente formados por partículas em suspensão no ar. A sujidade é o efeito da deposição de partículas durante um período de tempo em que não há limpeza externa presente. O tamanho das partículas de poeira pode variar dependendo da fonte (Bhol *et al.*, 2015) (Urrejola *et al.*, 2016).

A poeira é um termo geral para qualquer matéria em partículas com menos de 500 µm de diâmetro, que é aproximadamente a dimensão de uma fibra óptica usada para comunicações ou 10 vezes o diâmetro de um cabelo humano. A poeira pode compreender pequenas quantidades de pólen (vegetação, fungos, bactérias), células humanas ou de animais, pelos, e mais comumente, minerais orgânicos de derrames geomórficos, como areia, argila ou erosão calcária. Cinzas de erupções vulcânicas e poluição liberada pelos automóveis também são estudados. O tamanho das partículas, os constituintes e a forma do pó variam de região para região em todo o mundo. Além disso, o comportamento de deposição e as taxas de acumulação podem variar dramaticamente em diferentes localidades. Esses fatores são baseados na geografia, clima e urbanização de uma região. As condições ambientais importantes que se relacionam com essas características são a umidade / umidade, gradientes, velocidade do vento (variação na direção, velocidade) e variações de tempo (Sarver *et al.*, 2013).

O principal fator é que as partículas de sujidade podem se comportar como dielétricas, absorvendo luz incidente e reduzindo a transmissão ou mesmo produzindo reflexão ao mudar o ângulo de incidência da luz no módulo. A poeira diminui a radiação atingindo a célula solar e produz perdas na potência gerada (Bhol *et al.*, 2015) (Urrejola *et al.*, 2016).

Por este motivo, ajustar o ângulo de inclinação é importante para maximizar a potência de saída. O ângulo de inclinação ideal varia com a latitude e depende das condições climáticas. Cada estação do ano tem um ângulo de inclinação correspondente, aumentando a produtividade do gerador fotovoltaico (Abdeen *et al.*, 2017).

Uma das maiores preocupações do acúmulo de poeira é o ângulo de inclinação. Instalações na posição horizontal devem ser evitadas, uma vez que o acúmulo de poeira é a mais grave nesta situação. Estudos apontam que o ângulo de inclinação influencia no volume de poeira acumulada e a poeira afeta o funcionamento do sistema fotovoltaico (Abdeen *et al.*, 2017) (Xu *et al.*, 2017).

O objetivo do estudo é analisar os impactos da sujidade no rendimento de microgeradores fotovoltaicos, mais especificamente dos sistemas fotovoltaicos conectado à rede elétrica do EV e do Neville da UTFPR, com o objetivo de determinar as perdas por sujidade nesses sistemas. Analisar o efeito da autolimpeza nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR, para determinar se o local de instalação e o ângulo de instalação possuem alguma influência no acúmulo de sujeira.

2. MÉTODOS

O estudo da influência da sujeira nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR – câmpus Curitiba contemplou diversas etapas para o seu desenvolvimento, sendo iniciado pela coleta de dados de irradiação solar na plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Este órgão possui várias estações meteorológicas espalhadas pelo país, sendo compostas de uma unidade de memória central, um *datalogger*, ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos, que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora (INMET, 2017). Esses dados são disponibilizados em sua página, sendo facilmente acessados ao público de forma gratuita. Na Fig. 1 é

apresentada a localização dos sistemas fotovoltaicos e da base de coleta de dados do INMET, bem como a distância entre eles.

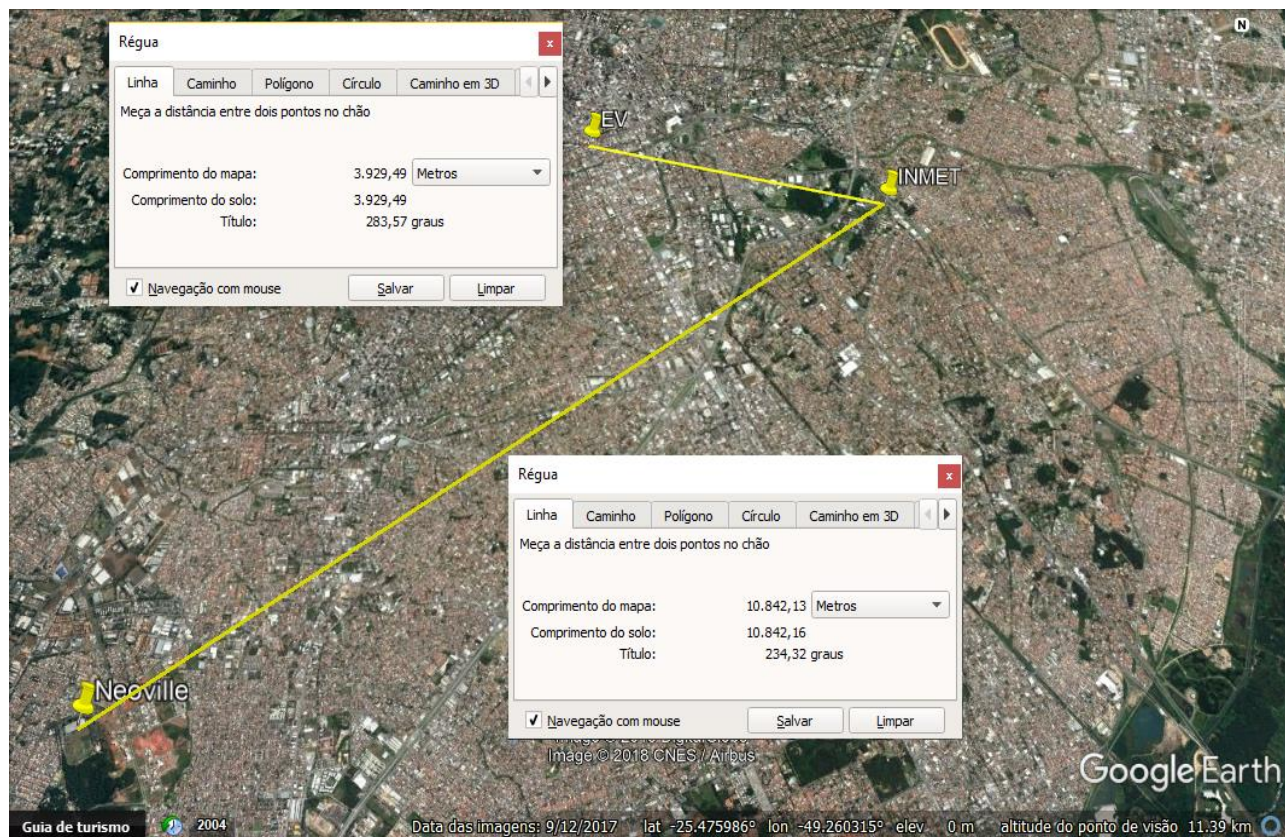


Figura 1 - Localização dos sistemas fotovoltaicos da UTFPR câmpus Curitiba e da base de coleta de dados do INMET.

Esses dados de irradiação foram coletados e analisados, de forma que dias selecionados apresentassem suas curvas características de irradiação semelhantes e sem nebulosidade. Assim, foram analisados todos os dias nos meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro. No portal do INMET, os dados de irradiação são apresentados em kJ/m^2 , no entanto eles foram convertidos para Wh/m^2 para tal análise. Já os dados de pluviosidade são apresentados em mm (milímetros), sendo que um milímetro de chuva corresponde a um litro de água por metro quadrado de área.

Como a base de coletas de dados do INMET e os sistemas fotovoltaicos estudados estão em lugares relativamente afastados um dos outros, podem ocorrer eventuais diferenças de irradiação total diária, principalmente por possível nebulosidade local que são bem frequentes, não invalidando o estudo, pois tratam-se de fenômenos rápidos e passageiros. Neste sentido, a sede centro da UTFPR instalou em 2015 um piranômetro termoeletrico modelo CMP 03, do fabricante Kipp&Zonen e um *datalogger* CR1000 da fabricante Campbell Scientific, o qual foi utilizado para confrontar os dados do INMET e deixar assim o estudo mais confiável. Os dados coletados pelo piranômetro apresentaram bastante similaridade, porém para fim de análise no artigo, somente os dados do INMET foram considerados (Almeida, 2015).

Com relação ao plano analisado, os dados disponibilizados pelo INMET estão com base no plano horizontal, enquanto que os dois sistemas fotovoltaicos apresentam ângulos de inclinação diferentes, 15° para o EV e 25° para o Neville, desvio azimutal diferentes, 22° para oeste no EV e 0° no Neville. Desta forma, construir uma análise para épocas de ano com dados diferentes, somente analisando o plano horizontal, não representaria a realidade dos fatos. Sendo assim, foi utilizado o software RADIASOL para o cálculo e simulação.

Este *software* foi desenvolvido e disponibilizado pelo Laboratório de Energia Solar Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo capaz de simular o comportamento real do gerador fotovoltaico, no que se refere à disponibilidade de irradiação solar ao longo do ano mediante parâmetros de entrada como coordenadas geográficas, irradiação local, inclinação e orientação dos módulos quando a inclinação do painel é diferente do ângulo da latitude local (Mariano, 2017).

Quanto à atividade de limpeza dos módulos fotovoltaicos, devido aos dois sistemas estudados estarem localizados em locais diferentes e afastados um do outro, estes foram limpos em datas diferentes. O trabalho de limpeza dos módulos fotovoltaicos do EV foi realizado dia 26/06/2017, durante aproximadamente uma hora e trinta minutos. Enquanto que o sistema fotovoltaico do Neville teve a limpeza efetuada dia 28/06/2017, durando aproximadamente duas horas.

Em ambas as instalações, a limpeza foi efetuada utilizando os mesmos procedimentos, ou seja, aplicando sabão em pó, vassoura e água nos módulos fotovoltaicos. No EV, região central da cidade de Curitiba, a sujeira apresentou coloração escura, o que indica apresentar mais fuligem de carros, sendo necessário esfregar mais para que pudesse ser removida. A sede do Neville, localizada uma região mais afastada do centro, com menos tráfego, a sujeira era mais caracterizada por poeira e alguns dejetos de aves. Na Fig. 2 são apresentadas as condições dos módulos fotovoltaico, no EV, antes e depois da limpeza (Tonolo *et al.*, 2017).

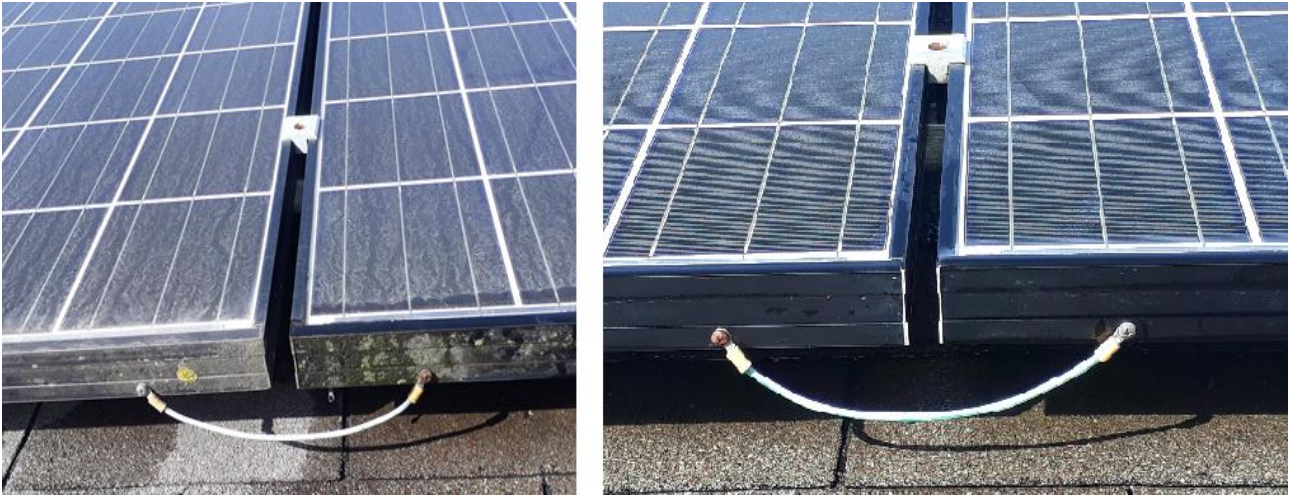


Figura 2 – Comparação entre antes e depois da limpeza dos módulos fotovoltaicos no EV.

Para fins de análise de autolimpeza, foram analisados os meses posteriores à atividade de lavagem dos módulos fotovoltaicos citada anteriormente. Observou-se que entre a segunda quinzena de agosto e a segunda quinzena de setembro ocorreu um período de aproximadamente 30 dias de estiagem, porém posteriormente ocorreram dias com um grande acúmulo de chuva. A fim de levantar o efeito da autolimpeza nos módulos, foram feitas análises relacionando um período pré e pós-limpeza programadas.

Uma outra forma de realizar a análise é fazendo o cálculo dos índices de mérito dos sistemas fotovoltaicos, que são cálculos utilizados para fazer a comparação de sistemas fotovoltaicos de diferentes potências e instalados em diferentes locais (Oliveira, 2000) (Benedito, 2009) (Marion *et al.*, 2005). Um dos índices de mérito é a relação entre a energia elétrica gerada (kWh) e a potência instalada do sistema fotovoltaico (kWp), chamado de *YIELD* ou produtividade, sendo calculada pela Eq. (1).

$$YIELD = \frac{\text{Energia Gerada [kWh]}}{\text{Potência instalada [kWp]}} \quad (1)$$

Outro índice de mérito, que auxilia na análise dos dados é a relação entre a produtividade e a quantidade de horas a 1000W/m², determinada taxa de desempenho (PR). A taxa de desempenho pode ser definida como a comparação da produção real do sistema fotovoltaico em relação à energia que o sistema poderia ter gerado se não houvessem perdas, conforme expressada pela Eq. (2).

$$PR = \frac{YIELD}{\frac{\text{Irradiação}}{1000}} \quad (2)$$

Por fim, os dados de geração dos sistemas fotovoltaicos, são obtidos acessando a memória da massa dos inversores. Os dados do EV são apresentados a cada 15 minutos e os dados do Neville são apresentados, em média, a cada 5 minutos. Com base nessa coleta de dados, foram feitas as comparações dos níveis de produção de cada sistema sob as circunstâncias acima mencionadas.

Ressalta-se que os todas as curvas de irradiação (INMET), irradiância (piranômetro instalado na sede Centro) e potência (inversores do EV e Neville) destes 5 meses de análise, foram tratadas e analisadas com objetivo de determinar o dia típico de irradiação e potência máxima, mas devido ao volume de informações, estes gráficos não serão trazidos para este estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das análises das irradiações diárias, de todos os dias dos meses de junho até outubro, foram selecionados cinco dias, com característica de céu limpo (sem nebulosidade) para serem analisados e comparados. O primeiro dia selecionado foi 17/06/17, para representar um dia típico pré-limpeza. As limpezas foram executadas nos dias 26/06/17 e 28/06/17, no EV e na sede Neville, respectivamente.

Em seguida, o dia 13/07/17 foi selecionado para a análise pós-limpeza. No período após a limpeza, o dia da segunda quinzena de agosto, até 21 de setembro, houve estiagem, onde o dia mencionado foi selecionado para análise. Após essa data, segundo dados do INMET, houve um período de chuva, totalizando 67mm e o dia 04/10/17 foi selecionado para estudo do efeito pós-estiagem. O período chuvoso permaneceu por mais alguns dias, sendo registrados mais 173mm de chuva, e por final foram levantados dados do dia 28/10/17 para análise após um período de altos índices acumulativos de pluviosidade.

Levando em consideração os dias escolhidos, o dia 21/09/17 que foi o dia analisado para a estiagem, e o dia 04/10/17, que foi o dia analisado pós-estiagem, houve uma média de pluviosidade de 5,18mm por dia. Comparando o dia 04/10/17 com o dia 28/10/17, houve uma média de 7,23mm de chuva por dia.

Na Fig. 3 é apresentado um gráfico da irradiância no plano horizontal, demonstrando o perfil dos dias elencados. Nota-se que para os meses de inverno, junho e julho, os níveis de irradiação são menores, e conforme os meses vão avançando, os níveis de irradiação se mostraram mais elevados. Também é possível observar que nas datas de setembro e outubro, há um período maior do dia com incidência de raios solares, conforme esperado.

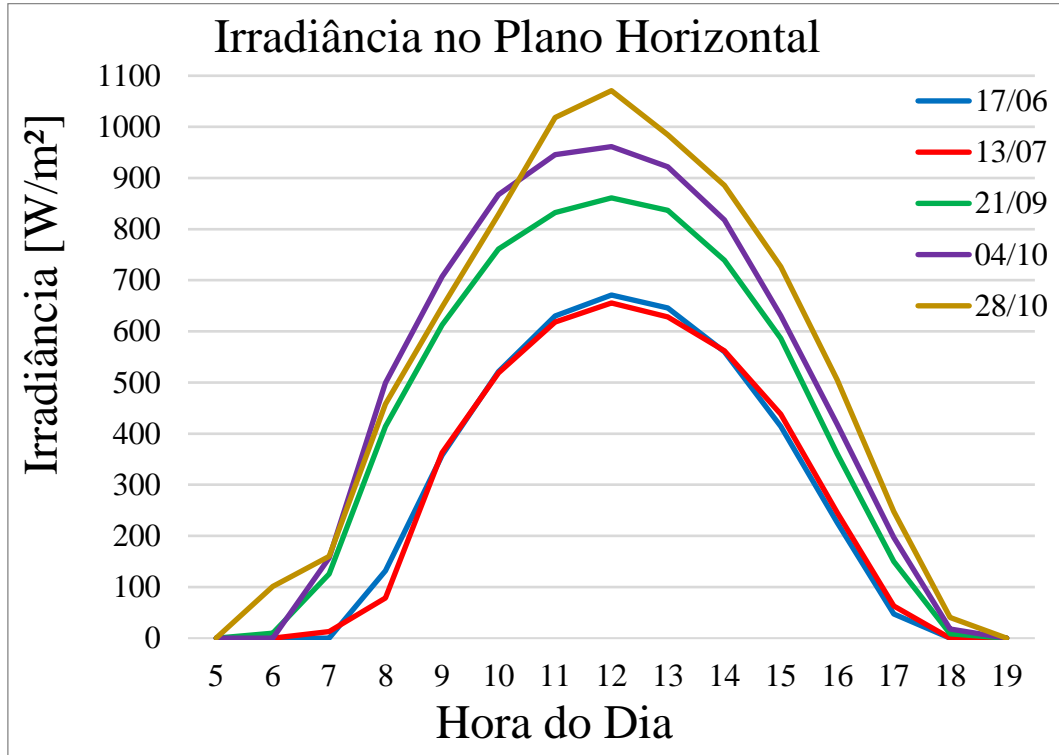


Figura 3 - Irradiância no plano horizontal.

Na Fig. 4 são apresentados os gráficos das potências registradas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede no EV e no Neville, para os dias elencados, em que mostram a variação dos níveis de potência conforme a irradiação solar presentes nos locais onde estão instalados.

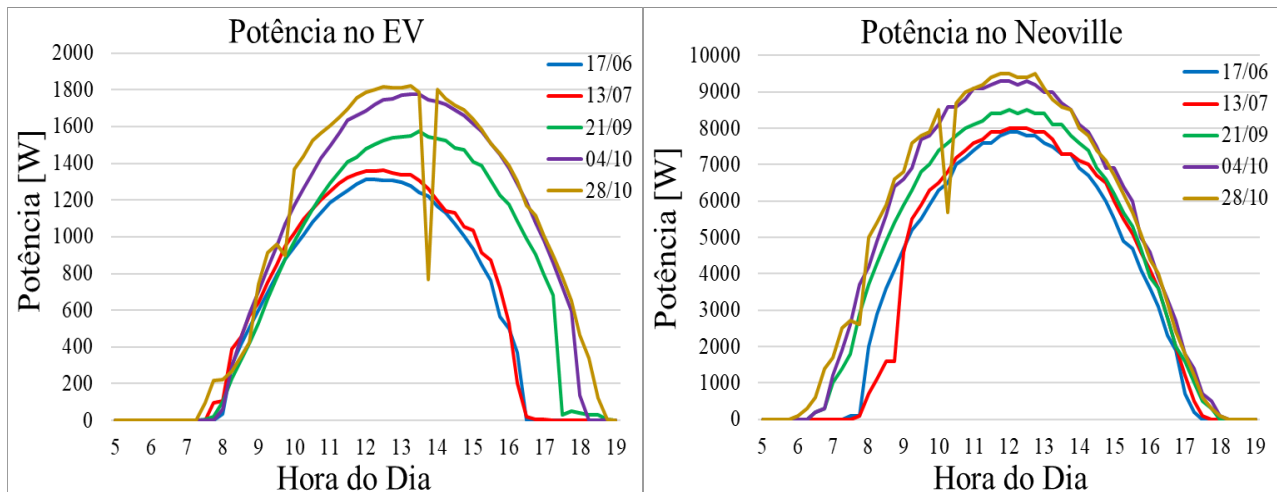


Figura 4 - Potência no EV e Neville.

Conforme mencionado anteriormente, o software RADIASOL foi utilizado para o cálculo dos níveis de irradiação no plano do painel fotovoltaico, e dessa forma pode-se fazer algumas observações conforme resultados apresentados nos gráficos da Fig. 4. Para o período de inverno, o painel do sistema fotovoltaico do Neville, com inclinação igual à latitude, 25°, apresenta um maior favorecimento, com irradiação total maior. Ao contrário acontece no período do verão, onde sistemas fotovoltaicos com menor inclinação, como o do EV, com 15°, apresentam favorecimento, o que influencia diretamente na potência gerada nestes sistemas.

Com relação à queda de potência observada no SFVCR do EV e do Neville, podem ser justificadas devido à ocorrência de sombreamento por nuvens, ou por desligamento da rede destes sistemas, ou ainda, falha do sistema de monitoramento.

Na Tab. 1 são apresentados os dados de irradiação no plano horizontal e no plano dos módulos, a eletricidade gerada pelos dois sistemas fotovoltaicos estudados e a precipitação para os dias elencados.

Tabela 1 - Dados obtidos para a análise dos dias selecionados.

Dia	17/06/17	13/07/17	21/09/17	04/10/17	28/10/17
Irradiação total no plano horizontal [Wh/m ²]	4.205,22	4.182,95	6.298,34	7.140,90	7.675,30
Irradiação no plano do painel EV [Wh/m ²]	5.142,00	4.984,00	6.827,00	7.322,00	7.562,00
Irradiação no plano do painel Neville [Wh/m ²]	5.738,00	5.490,00	7.060,00	7.270,00	7.270,00
Eletricidade gerada EV [kWh]	7,99	8,49	10,82	12,91	13,37
Eletricidade gerada Neville [kWh]	49,4	49,8	58,2	65,2	65,2
Precipitação [mm]	---	---	---	67,4	173,6

Analisando a Tab. 1, são feitas análises comparativas da irradiação no plano do painel e da produção de energia em cada um dos sistemas fotovoltaicos.

A primeira análise remete ao período pré e pós-limpeza, ou seja, os dias 17/06/17 e 13/07/17. Analisando a irradiação no plano do painel, nota-se que para o EV houve um decréscimo de 3,07% e no Neville de 4,23%, sendo que a eletricidade gerada obteve crescimento de 6,27% para o EV e 0,81% para o Neville.

A segunda análise é a comparação entre o dia pós-limpeza, 13/07/17 e o dia 21/09/17, data selecionada após um período longo sem chuvas. Analisando a irradiação no plano dos painéis, no EV houve um aumento de 36,98%, ao passo que a eletricidade gerada aumentou apenas 27,40%, números esses que demonstram que o período sem chuvas fez o sistema cair de produção. O mesmo acontece com o Neville, que teve um aumento de irradiação de 28,60%, porém um aumento de somente 16,87% na eletricidade gerada.

A próxima análise é entre o dia de estiagem, 21/09/17 e o dia pós longo período de chuvas, 04/10/17. Comparando os dados de irradiação no plano do painel, no EV, observa-se que houve um aumento de 7,25% na irradiação total e um aumento de 19,33% na eletricidade gerada. No Neville manteve-se a tendência, aumentando a irradiação total em 2,97% e a energia total gerada em 12,03%. Esses dados demonstram a efetividade da autolimpeza, pois após um período de seca, um alto volume de chuva surtiu grande efeito na taxa de desempenho dos sistemas fotovoltaicos, fazendo aumentar de 75,47% para 83,97% no EV, e de 80,82% para 87,93% no Neville.

A última análise é feita após um período de muitas chuvas, onde o sistema apresentou pouco diferença percentual nos dados, visto a proximidade dos dias, tendo assim pouco tempo para acumular sujeira.

Foram realizados os cálculos da produtividade e da taxa de desempenho, para facilitar a análise dos dias estudados, conforme apresentado nas Tab. 2 e Tab. 3.

Tabela 2 - Cálculo da produtividade e da taxa de desempenho para o EV

EV					
Dia	17/06/17	13/07/17	21/09/17	04/10/17	28/10/17
YIELD [kWh/kWp]	3,81	4,04	5,15	6,15	6,36
PR [%]	74,01	81,14	75,47	83,97	84,17

Tabela 3 - Cálculo da produtividade e da taxa de desempenho para o Neville

NEOVILLE					
Dia	17/06/17	13/07/17	21/09/17	04/10/17	28/10/17
YIELD [kWh/kWp]	4,84	4,88	5,71	6,39	6,39
PR [%]	84,40	88,93	80,82	87,93	87,93

Analisando os dados de YIELD, percebe-se que com o passar do inverno, com dias mais longos, a produtividade aumenta. A taxa de desempenho permite uma análise mais focada na performance do sistema com relação à sujeira. Analisando os dados para antes da limpeza, 17/06/17, e após a limpeza, 13/07/17, nota-se que em ambos os casos houve aumento, o que pode ser remetido à limpeza efetuada.

Comparando com o dia 21/09/17, que foi o dia estudado após o período de estiagem, percebe-se que os níveis de taxa de desempenho ficaram parecidos com os obtidos no dia 17/06/17, antes da limpeza, ou seja, o período de seca apresentou alta influência sobre o desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Analisando o dia 04/10/17, após um longo período de chuvas, novamente há um crescimento na taxa de desempenho, o que indica que a autolimpeza realizada pela chuva é bastante eficiente. Com relação ao último dia, os valores permaneceram praticamente os mesmos, o que indica que não houve tempo hábil para o acúmulo de sujeira e a chuva não teve uma ação muito determinante.

Com isso, pode-se afirmar que a taxa de desempenho apresentou crescimento nos dois casos, o que permite concluir que os dois sistemas apresentavam sujeira e que a limpeza surtiu grande efeito nos dois painéis.

4. CONCLUSÃO

Por meio da metodologia proposta neste trabalho, foi possível determinar o impacto da sujeira no rendimento dos sistemas analisados. Para isso, a aplicação do software RADIASOL se fez necessário, pois como os dois sistemas fotovoltaicos analisados estão instalados em diferentes angulações e desvios azimutais, e como a análise é feita através de vários meses, passando por diferentes estações do ano, cada uma das inclinações é favorecida em determinado período do ano. Como consequência, a máxima elevação acima do horizonte, durante o dia, muda. Durante o inverno sendo mais inclinado e durante o verão mais a pino. Assim, o sistema com inclinação de 25° tem mais vantagem no inverno, enquanto a de 15°, mais vantagens no verão.

A análise dos dias dos meses de junho até outubro foi feita para que se pudessem escolher dias com características semelhantes, que apresentasse curva de irradiação característica sem presença de nuvens. O estudo dos dados resultou em poucos dias para serem analisados, sendo escolhidos os dias 17/06, 13/07, 21/09, 04/10 e 28/10, cada um representando um período e situação diferente.

Os dados do INMET foram confrontados com os dados do piranômetro termoeletrico instalado na UTFPR campus centro, cabendo ressaltar que os sensores do INMET estão instalados afastados dos sistemas analisados, justificando alguma diferença de queda de potência, como ocorreu no dia 28/10, devido a uma possível nebulosidade ou desligamento. A intenção era de analisar a confiabilidade dos dados coletados na universidade, os quais se mostraram bastante positivos. Os dados do piranômetro não foram inseridos e nem utilizados nos cálculos apresentados.

Os dados de geração de energia elétrica e de potência foram obtidos acessando a memória de massa dos inversores instalados. Com isso foi possível o desenvolvimento das tabelas e comparações apresentadas.

Como pode ser observado nas tabelas apresentadas, a limpeza programada dos sistemas fotovoltaicos surtiu bastante efeito no desempenho do sistema. Após o período sem chuvas, o desempenho foi afetado basicamente pelo grande acúmulo de sujeira, no EV por estar localizada na região central da cidade, prioritariamente por fuligem, e no Neoville mais caracterizada por poeira.

A autolimpeza se mostrou bastante efetiva nos dois sistemas fotovoltaicos, como pode-se observar na Tabela 2 e Tabela 3, as quais mostram as taxas de desempenho. A autolimpeza fez o sistema apresentar praticamente o mesmo desempenho que teve após a limpeza.

Analisando a Tabela 2 e a Tabela 3, observa-se que a limpeza aparentemente surtiu menos efeito no Neoville, o que pode ser explicado pelo fato do EV sujar mais rapidamente, e quando a limpeza foi realizada, ainda não havia a real necessidade de ser realizada na sede Neoville, por ainda não apresentar uma queda de rendimento alta o suficiente que justificasse o serviço.

Uma explicação para o menor acúmulo de sujeira no Neoville é a sua inclinação maior, 25°, comparada com o EV com 15°, o que otimiza a autolimpeza, diminuindo a periodicidade de limpezas programadas.

5. REFERÊNCIAS

- Abdeenm E., Orabi, M., Hasaneen, E.S., 2017. Optimum Tilt Angle for Photovoltaic System in Desert Environment, *Solar Energy*, vol. 155, pp. 267–280.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018a. “Banco de Informações de Geração”: Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 23 Jan. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018b. “Registros de Micro e Minigeradores distribuídos efetivados na ANEEL”. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 23 Jan. 2018.
- Almeida, L. T., 2015. Implantação de um Piranômetro Termoeletrico na UTFPR para Análise do Potencial de Energia Solar Nesta Localidade, Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), UTFPR. Curitiba-PR, pp. 94.
- 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. 5.
- Benedito, R. S., 2009. Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo.
- Bhol, R., Dash, R., Pradhan, A., Ali, S.M., 2015. Environmental Effect Assessment on Performance of Solar PV Panel, International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, pp. 5.
- 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. 6.
- INMET, 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K., Hayden, H., Hammond, B., Fletcher, T., Canada, B., Narang, D., Shugar, D., Wenger, H., Kimber, A., Mitchell, L., Rich, G., Townsend, T., 2005. “Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems”, 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, Florida.
- Mondoc, B., Pop, F., 2010. Factors Influencing the Performance of a Photovoltaic Power Plant, 3rd International Conference on Modern Power Systems, pp. 6.

- Oliveira, S. H. F., 2002. Geração Distribuída de Eletricidade; Inserção de Edificações Fotovoltaicas à Rede no Estado de São Paulo, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Pereira, E. B., Martins F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima F. J. L., Rütther, R., Abreu S. L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., Souza, J. G., 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: TBN, pp. 88.
- REN21. 2017. Renewables 2017 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). Disponível em <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf>2017>. Acesso em: 09 Nov. 2017.
- Sarver, T., Qaraghuli, A.A., Kaz, erski, L.L., 2013. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 22, pp. 698–733.
- Tonolo, E.A., Mariano, J.D., das Neves, C.E.T., Silva, A.P.M., Urbanetz Jr, J., 2017. Estudo da Redução do Desempenho Devido ao Efeito da Sujeira nos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR – Câmpus Curitiba, Smart Energy, pp. 5.
- 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 Jr, J., Tiepolo G. M., Casagrande JR, E. F., Tonin F. S., Mariano, J. D., 2016. Geração Distribuída Fotovoltaica: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR em Curitiba, X CBPE, Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, pp. 12.
- Urrejola, E., Antonanzas, J., Ayala, P., Salgado, M., Sagner, G.R., Costés, C., Pino, A., Escobar, R., Effect of Soiling and Sunlight Exposure on The Performance Ratio of Photovoltaic Technologies in Santiago, Chile, Energy Conversion and Management, vol. 114, pp. 338–347.
- 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.
- Xu, R., Ni, K., Hu, Y., Si, J., Wen, H., Yu, D., 2017. Analysis of the Optimum Tilt Angle for a Soiled PV Panel. Energy Conversion and Management, vol. 148, pp. 100–109.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF DIRT IN THE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS OF UTFPR - CAMPUS CURITIBA

Abstract. *With the increasing global consumption of electricity and the imminent depletion of fossil resources such as coal and oil, the world needs to invest in new sources of electricity, renewables ones. The study aims to present the effects of dirt on the performance of photovoltaic systems and, for this, was sought to analyze days that presented irradiation curves free of any interference. Thus, irradiation graphs from all the days of the months from June to October were elaborated. The objective is to compare the performance of photovoltaic systems pre-cleaning with post-cleaning. After cleaning, there was a drought period, which lasted 30 days. After the drought period, there were two periods with high rainfall accumulation, and between these two intervals totally sunny days were obtained, so that the effect of self-cleaning after a long period of drought and after a short rainy period could be analyzed. The indices of irradiation incident on the plane of the photovoltaic panels and the electric energy values were studied, so that the days were quantified and compared. The comparison between self-cleaning and angle of installation was made, as well as the comparison between facilities installed in different places of the city of Curitiba. It was observed that the scheduled cleaning had a positive effect, increasing the production in relation to the pre-cleaning period. During the dry season, there was dirt accumulation, as it can be noticed a drop in performance, a fact that was improved after a period with high rainfall, demonstrating that self-cleaning was as efficient as scheduled cleaning.*

Key words: *Photovoltaic systems, Soiling analysis, Photovoltaic power generation.*