

Otimização da frequência de manutenção preventiva de limpeza em módulos fotovoltaicos maximizando a receita líquida

Karine T. de Albuquerque*. Mário Mestria **. Pablo R. Muniz ***.

**Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES (e-mail: karineteofiloa@gmail.com).*

** *Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES (e-mail: mmestria@ifes.edu.br).*

*** *Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES (e-mail: pablorm@ifes.edu.br).*

Abstract: The superficial accumulation of particulate matter caused by atmospheric pollution, in photovoltaic modules attenuates the capacity for electric power generation, making the cleaning of these modules inevitable. The reduction in generation capacity decreases revenues from electric power generation, and cleaning has associated costs. For this reason, this work develops an equation for estimating net revenue considering these two factors mentioned, involving the time interval between cleaning. The net revenue equation was performed by the Newton and the Secant methods - in order to find the optimal cleaning frequency that maximizes the net revenue for this operation. Computational results show that non-optimization can lead to reduced net operating situations.

Resumo: O acúmulo superficial de materiais particulados, provenientes da poluição atmosférica, em módulos fotovoltaicos atenua a capacidade de geração de energia elétrica, sendo inevitável a limpeza desses módulos. A redução da capacidade de geração diminui as receitas com geração de energia elétrica, e as limpezas têm custos associados. Por esse motivo, este trabalho desenvolve uma equação de estimativa de receita líquida considerando esses dois fatores citados, envolvendo o intervalo de tempo entre as limpezas. A equação de receita líquida foi resolvida pelo método de Newton e pelo método da Secante - com o propósito de encontrar a frequência ótima de limpeza que maximize a receita líquida dessa operação. Os resultados computacionais mostram que a não otimização pode levar a situações operacionais com receita líquida reduzida.

Keywords: Power generation; photovoltaic modules; pollution; particulate matter; optimization methods.

Palavras-chaves: Geração de energia; módulos fotovoltaicos; poluição; materiais particulados; métodos de otimização.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação do setor de energia fotovoltaica (PV, do inglês *photovoltaic*) fez-se expressiva nos últimos anos devido à competitividade financeira de seus equipamentos, ao aumento da demanda de energia elétrica, bem como pela imprescindibilidade de redução de emissões de CO₂ (Esposito and Fuchs, 2013). A energia PV se tornou a energia que mais cresce no mundo. Em 2018, a capacidade instalada foi de cerca de 505 GWp, um aumento de mais de 100 GWp em relação a 2017 (REN21, 2019). No Brasil, sua participação na matriz elétrica aumentou de 0,1% para 1,4% de 2016 a 2018 (Ipea, 2019).

Apesar de todo o aumento do investimento em sustentabilidade, a poluição atmosférica ainda é um fator de risco não só para a saúde humana, fauna, flora, entre outros (Duchiade *et al.*, 1973; Dapper, Spohr and Zanini, 2016), mas também para os geradores fotovoltaicos. O acúmulo superficial de materiais particulados atenua a capacidade de módulos PV (Ramli *et al.*, 2016; Figgis *et al.*, 2017; Babatunde, Abbasoglu and Senol, 2018; Comerio *et al.*, 2019; Salari and Hakkaki-Fard, 2019). Entretanto, custos com a

limpeza de módulos muitas vezes são desconsiderados da avaliação econômica acerca da geração de energia solar. Quanto maior for a frequência de limpezas realizadas em módulos PV, ter-se-á maiores gastos, mas, em contra partida, maior capacidade de geração. E, em casos em que se faça menos limpezas nos módulos, há menor capacidade de geração de energia fotovoltaica.

Com base em estudos como o de Krause *et al.* (2019), percebeu-se a necessidade de elaborar um método matemático que conseguisse determinar as condições para receita líquida máxima com a geração PV, considerando a receita obtida com energia gerada e a despesa com a efetuação de limpezas dos módulos fotovoltaicos.

Há estudos publicados que fazem considerações acerca da otimização do custo e a periodicidade de limpeza. Resumidamente, concluem que: embora deva-se planejar operações de limpeza, o custo da sujidade não é um obstáculo à implantação de usinas fotovoltaicas; não se justifica a limpeza dos módulos PV quando a sujeira ocorre apenas devido à poeira sem excrementos significativos de pássaros; e, a frequência ideal para a limpeza de usinas fotovoltaicas é correlacionada a um nível limiar de sujidade (Naeem and

Tamizhmani, 2015; Jones *et al.*, 2016; Abderrezek and Fathi, 2017). Nota-se que não é feita uma otimização econômica para determinação da frequência de limpeza.

Também é sabido que os métodos de otimização Método de Newton e Método da Secante têm sido aplicados em diversos âmbitos de otimização de dispositivos PV (Chun and Kwasiński, 2011; Krismadinata *et al.*, 2013; Ghaffari, Krstić and Seshagiri, 2014), ainda que não tenham sido aplicados para a abordagem de otimização de receita líquida proposta aqui.

O Método de Newton foi escolhido devido à sequência gerada por esse método iterativo que converge de forma quadrática, e à característica de produzir resultados computacionais de modo rápido (Broyden, 1965; Simo and Taylor, 1985; Hartmann, 2005).

O Método da Secante é um método iterativo que não utiliza a derivada analítica e aproxima a substituição da derivada por uma razão matemática, necessitando de dois pontos iniciais para início das iterações. Isso o torna um método geral para qualquer função. Além disso, esse método tem convergência superlinear (Deuflhard, Freund and Walter, 1990; Martínez, 1990; Yakoubsohn, 1999).

Os dois métodos de otimização foram empregados através do *software* Matlab. Utilizamos Matlab devido às seguintes vantagens: desenvolve os códigos computacionais e realiza testes com os algoritmos de forma fácil com interface amigável, permite integrar bibliotecas externas e desenvolve aplicativos com interface gráfica para o usuário (MATLAB, 2020). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é propor um método de estimativa da frequência ótima para realização de limpeza de módulos fotovoltaicos, fazendo um estudo de caso no município de Vitória / ES - Brasil. Serão considerados os custos de limpeza e a queda de receita por geração de energia elétrica devido ao depósito de sujeira, através de algoritmos de otimização para análise da resolução do problema estabelecido nesse trabalho.

2. METODOLOGIA

Para resolver a equação de estimativa de receita líquida foram utilizadas técnicas de otimização empregando uma função objetivo, uma equação de receita líquida proveniente da relação entre a receita da geração de energia fotovoltaica e a despesa com a realização de limpezas nos módulos fotovoltaicos, estabelecidas em função do intervalo entre cada atividade de manutenção citada (limpeza).

Esta pesquisa tem abrangência exploratória e estudo de campo com experimentos empíricos. Foram utilizados métodos quantitativos e análise de dados. Para exemplificar o método desenvolvido, foram realizados estudos de caso baseados em dados disponíveis na literatura.

2.1 Modelamento matemático da receita líquida

A equação da receita líquida obtida para um gerador fotovoltaico genérico foi desenvolvida com o intuito de relacioná-la à receita obtida com a geração de energia elétrica e a despesa com a efetuação de limpezas dos módulos

fotovoltaicos.

Para calcular a energia elétrica E gerada em função da potência elétrica efetiva do gerador P no intervalo de tempo t , temos:

$$E = \int P dt \quad (1)$$

Considerando o intervalo de tempo de um ano para base amostral de cálculos de (1), define-se a energia elétrica gerada, em pu, para i , intervalo de tempo entre as limpezas:

$$E[pu] = \frac{365}{i} * \int_0^i P dt \quad (2)$$

O gráfico do artigo Krause *et al.* (2019) expresso na Fig. 1, representa a potência de geração fotovoltaica em pu (potência do módulo PV com sujeira em relação à sua potência quando limpo), em função dos dias que foram realizadas limpeza no módulo. Através desse gráfico é possível perceber que sem a realização da limpeza nos módulos ao longo dos dias, há um decréscimo de geração fotovoltaica. Com realização da limpeza, a usina volta a gerar energia em sua capacidade máxima.

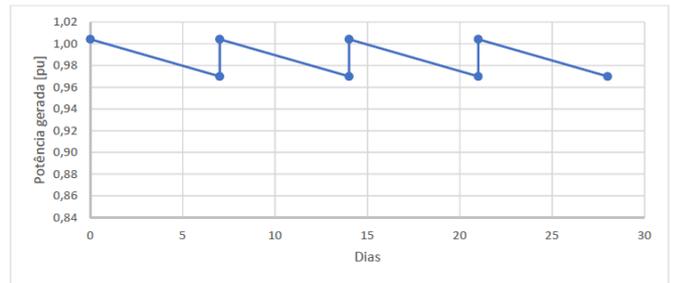


Fig. 1 Gráfico de geração de energia em função do intervalo de limpeza dos módulos (Krause *et al.*, 2019).

Como tem-se um decréscimo da capacidade de geração fotovoltaica na presença de sujeira, considera-se a função polinomial de 1º grau como negativa para esse caso, obtendo-se:

$$P = (-at + b) \quad (3)$$

Onde a é o coeficiente de decaimento da capacidade geração de energia elétrica em função do acúmulo de sujeira ao longo do tempo, e b é a constante para o ponto onde t é zero, ou seja, logo após a limpeza. Assim, b é igual a 1 pu, ou seja, capacidade máxima do gerador fotovoltaico. E, substituindo (3) em (2), tem-se:

$$E[pu] = \frac{365}{i} * \int_0^i (-at + 1) dt \quad (4)$$

Ao resolver a integral referente à equação (4), encontramos:

$$E[pu] = \frac{365}{i} * \left(\frac{-at^2}{2} + t \right) \Big|_{t=0}^i \quad (5)$$

Temos ainda que:

$$E[pu] = \frac{365}{i} * \left(\frac{-ai^2}{2} + i \right) \quad (6)$$

A equação (6) fornece a energia elétrica produzida pelo gerador fotovoltaico, em um ano (365 dias), de maneira

normalizada, em pu. Para obtenção do montante de energia gerado em unidade de engenharia, o valor obtido deve ser multiplicado pelo valor base de geração de energia, ou seja, pelo montante de energia gerado em um dia com o gerador sem deposição de sujidade. Isso resulta em:

$$E[kWh/ano] = \frac{365}{i} * \left(\frac{-ai^2}{2} + i \right) * (E_d) \quad (7)$$

A energia de um dia representada por E_d , referida em (7), para diferentes localidades pode ser calculada pelo produto da potência de pico do gerador fotovoltaico, P_{max} , e as horas de sol pleno equivalente por dia, hsp (CRESESB, 2014; Oliveira, 2018), conforme (8):

$$E_d = hsp * P_{max} \quad (8)$$

A equação de receita líquida é dada por:

$$L = R - D \quad (9)$$

Onde L refere-se à receita líquida, R a receita com geração de energia fotovoltaica e D a despesa com a limpeza dos módulos.

As equações de receita e despesa são dadas respectivamente por:

$$R[R\$/ano] = (S[R\$/kWh]) * E[kWh] \quad (10)$$

$$D[R\$/ano] = Q_t * C[R\$] = \frac{365}{i} * C[R\$] \quad (11)$$

S representado em (10) é o preço em reais da energia por kWh estabelecido pela distribuidora. Em (11), Q_t representa a quantidade de limpezas por ano, i é intervalo de tempo entre as limpezas em dias, e C é o custo de cada limpeza a ser realizada.

Substituindo as equações (7), (8), (10) e (11) em (9), obtém-se (12), que expressa a receita líquida por ano.

$$L[R\$/ano] = \left(\frac{-ai^2}{2} + i \right) * \frac{365}{i} * (hsp * P_{max}) * S - \left(\frac{365}{i} * C \right) \quad (12)$$

2.2 Métodos de otimização da receita líquida

Foram desenvolvidos dois algoritmos no Matlab com intuito de determinar o ponto ótimo para limpeza de módulos fotovoltaicos, para maximização da receita líquida, utilizando (12). Um dos algoritmos utiliza o Método de Newton e outro o Método da Secante.

Como se deseja realizar a maximização da receita líquida, ou seja, encontrar o ponto crítico da função, a primeira consideração a ser feita é que o ponto máximo ou crítico corresponde ao ponto da função em que a derivada é nula. Isso é válido aos dois métodos aplicados.

Para encontrar o ponto ótimo em casos de maximização de acordo com o Método de Newton, é preciso respeitar a seguinte notação matemática (Rao, 2009):

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f'(x^{(n)})}{f''(x^{(n)})} \quad (13)$$

Portanto, o pseudocódigo abaixo demonstra implementação no

programa Matlab do Método de Newton, para encontrar o ponto ótimo da função objetivo de estimativa de receita líquida desenvolvida:

```
ab = [0 a];
interacoes = 0;
v = f;
f = diff(f);
fi = diff(f);
while abs(ab(2) - ab(1)) > erro
    a = a - f(a)/fi(a);
    ab(1) = ab(2);
    ab(2) = a;
    interacoes = interacoes+1;
end
```

Já quando se almeja determinar o ponto ótimo pelo Método da Secante, para resolver a equação (12) faz-se uso da equação (14) para casos de maximização expressa por (Rao, 2009):

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - f'(x^{(n)}) \frac{(x^{(n)} - x^{(n-1)})}{f'(x^{(n)}) - f'(x^{(n-1)})} \quad (14)$$

O pseudocódigo da implementação no Matlab do Método da Secante está descrito abaixo:

```
ab = [a b];
iteracoes = 0;
while abs(ab(2) - ab(1)) > erro
    ab(1) = vpa(b);
    b = (a*f(b)-b*f(a))/(f(b)-f(a));
    ab(2) = vpa(b);
    iteracoes = iteracoes+1;
end
```

3. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Em primeiro lugar foi criado um *script* no Matlab para receber dados de diferentes usinas que compõem a função objetivo (12), conforme a demonstração abaixo:

```
syms x
d = input('Potência nominal do gerador fotovoltaico (kW):');
e = input('Custo de limpeza (R$):');
t = input('Custo do kWh estabelecido pela concessionária:');
h = input('Horas de pico de incidência solar do local:');
g = input('Coeficiente de decaimento da capacidade de geração de energia(%):');
o = g/100;
```

Com base nas entradas que o *script* recebe como potência nominal do gerador fotovoltaico e custo de limpeza, o programa atualiza a função objetivo (12) descrita abaixo:

```
y = (d*h);
f(x) = (((-o*x^2)/2)+x)*((365/x)*y*t)-((365/x)*e);
```

Posteriormente, foram feitas simulações, considerando cenários para análise de microgeração distribuída, em consumidores de baixa tensão, cuja potência máxima do gerador é 75 kWp (ANEEL, 2015). Os valores de potência

nominal para os geradores fotovoltaicos, 18 kWp e 25 kWp, foram escolhidos entre valores típicos para kits comercializados para aplicações prediais.

Adotou-se nessas simulações, o coeficiente de decaimento de capacidade de geração de energia α [%/dia] como componente da função, pois a literatura demonstra que há um percentual de redução da produção diária de eletricidade em módulos fotovoltaicos sujos, comparado a limpos (Fraga *et al.*, 2018; Junior, Cruz and Amaral, 2018). Em revisões recentes e completas da literatura, as perdas devido à sujeira variam de cerca de 6% em um período de 1 dia, podendo chegar a mais de 50% em períodos superiores a 6 meses, dependendo do material de fabricação dos módulos fotovoltaicos e das localidades em que estão instalados (Mani and Pillai, 2010; Adinoyi and Said, 2013; Sarver, Al-Qaraghuli and Kazmerski, 2013; Jones *et al.*, 2016; Saidan *et al.*, 2016). Neste trabalho que faz um estudo de caso no município de Vitória/ES, o coeficiente de decaimento foi considerado de forma que a perda diária de capacidade de geração fosse inferior a 1% ao dia – os coeficientes de decaimento testados no experimento foram de 0,4% e 0,6% por dia – e que a estabilização da capacidade de geração de energia fotovoltaica ocorresse em torno de 50% da capacidade nominal, 0,50 pu, em conformidade aos estudos desenvolvidos naquela localidade.

Esse estudo de caso é para cidade de Vitória/ES – Brasil. Portanto, foi aplicado o *hsp* de 5,5 horas, em conformidade, com os dados da Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE, 2013). O valor de custo de energia elétrica [R\$/kWh] para as simulações foi estimado conforme as tarifas do estado do Espírito Santo. O total do importe de fornecimento de energia elétrica é composto por: tarifa, PIS, COFINS e ICMS, somados com o valor da contribuição de iluminação pública e outros serviços (EDP, 2020). Visto que, a tarifa de energia elétrica é composta TUSD + TE que vem a ser igual a R\$0,53, com o acréscimo dos impostos, resulta em R\$0,76 de custo de energia elétrica (EDP, 2019) valor utilizado nos cenários simulados.

O custo total de limpezas de módulos é composto pelo custo da água, por outros materiais e insumos, além do custo da mão de obra e as horas de trabalho. Isso pode ser observado na literatura, em estudos estimativos de perda de produtividade de geradores fotovoltaicos em virtude de sujidade (Jones *et al.*, 2016; Rezende and Zilles, 2018). E para esse estudo, os custos de limpeza estimados foram de R\$ 100 e R\$ 200.

O método de otimização de Newton e o da Secante, por serem métodos de otimização iterativos, exigem valores dos pontos iniciais (x^n e x^{n-1}) para que sejam capazes de encontrar o ponto ótimo das funções.

Por ser uma metodologia com experimentos empíricos, optamos por usar um conjunto de execuções dos métodos iterativos a partir de múltiplos valores iniciais. Através desse estudo preliminar com vários pontos iniciais de partida com os dois métodos, verificamos que ambos métodos convergiram para a função de otimização proposta nesse trabalho.

Desta forma, verificamos ser uma maneira eficaz para encontrar o máximo da função para os diversos cenários não ocasionando falhas de convergência.

3.1 Cenários implementados

A Tabela 1 sintetiza a descrição dos cenários utilizados para simulação de maximização da receita líquida provinda da geração de energia fotovoltaica.

Tabela 1. Cenários implementados

Cenários	Potência (kWp)		Custo de Limpeza (R\$)		Decaimento de capacidade de geração (%/dia)	
	18	25	100	200	0,4	0,6
1A, 3A, 5A	X		X		X	
1B, 3B, 5B	X			X	X	
1C, 3C, 5C	X		X			X
1D, 3D, 5D	X			X		X
2A, 4A, 6A		X	X		X	
2B, 4B, 6B		X		X	X	
2C, 4C, 6C		X	X			X
2D, 4D, 6D		X		X		X

Os Cenários 1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C e 2D, presentes na Tabela 1 e na Tabela 2, foram simulados otimizando (12) a partir dos Métodos de Newton e da Secante a fim de determinar o ponto ótimo para frequência de limpezas dos módulos fotovoltaicos. Já os demais cenários – 3A a 6D - foram simulados considerando apenas a periodicidade de limpeza como 10 e 60 dias, sem que houvesse aplicação dos métodos de otimização. Estes cenários têm as mesmas características dos primeiros, alterando-se apenas a definição do intervalo entre limpezas, permitindo a avaliação do método proposto. Dito isso, se for observado a Tabela 2, percebe-se que a realização de limpezas a cada 10 ou a cada 60 dias, sem que haja otimização, leva a receitas líquidas inferiores à otimizada pelos métodos de Newton e da Secante.

A Tabela 3 se refere ao desempenho comparativo entre os métodos que foram simulados, apresentado resultados para alguns pontos iniciais adotados. Nessa tabela é evidenciado a quantidade de iterações efetuadas por eles para obtenção da receita líquida e da frequência de limpeza anual, em dias.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu uma equação matemática que serviu de função objetivo, que estima a receita líquida de geradores fotovoltaicos em função do intervalo entre limpezas e seu custo, considerando também a queda de capacidade de geração de energia em função da deposição superficial de sujidade nos módulos fotovoltaicos.

Para otimização dessa receita líquida, foram usados algoritmos baseados nos métodos de otimização de Newton e da Secante, implementados no ambiente do Matlab. A análise de diferentes cenários do município de Vitória/ES com diferentes intervalos entre limpezas demonstrou que a não otimização pode piorar o desempenho econômico dos geradores fotovoltaicos. A otimização dos intervalos de limpezas leva a desempenho econômico melhor, a despeito do desempenho técnico quanto ao montante de energia gerada. Desta forma, o excesso de limpezas implica em maior custo operacional.

Tabela 2. Receita líquida e frequência de limpeza

Cenário	Características	Receita Líquida	Frequência de Limpeza
1A	Potência: 18 kWp	R\$ 24.630	25 dias
3A	Limpeza: R\$ 100	R\$ 23.263	10 dias
5A	Fator: 0,4%/dia	R\$ 23.558	60 dias
1B	Potência: 18 kWp	R\$ 23.457	36 dias
3B	Limpeza: R\$ 200	R\$ 19.613	10 dias
5B	Fator: 0,4%/dia	R\$ 22.950	60 dias
1C	Potência: 18 kWp	R\$ 23.994	21 dias
3C	Limpeza: R\$ 100	R\$ 22.988	10 dias
5C	Fator: 0,6%/dia	R\$ 21.910	60 dias
1D	Potência: 18 kWp	R\$ 22.557	29 dias
3D	Limpeza: R\$ 200	R\$ 19.338	10 dias
5D	Fator: 0,6%/dia	R\$ 21.302	60 dias
2A	Potência: 25 kWp	R\$ 34.805	21 dias
4A	Limpeza: R\$ 100	R\$ 33.729	10 dias
6A	Fator: 0,4%/dia	R\$ 32.957	60 dias
2B	Potência: 25 kWp	R\$ 33.422	30 dias
4B	Limpeza: R\$ 200	R\$ 30.079	10 dias
6B	Fator: 0,4%/dia	R\$ 32.348	60 dias
2C	Potência: 25 kWp	R\$ 34.055	17 dias
4C	Limpeza: R\$ 100	R\$ 33.348	10 dias
6C	Fator: 0,6%/dia	R\$ 30.668	60 dias
2D	Potência: 25 kWp	R\$ 32.362	25 dias
4D	Limpeza: R\$ 200	R\$ 29.698	10 dias
6D	Fator: 0,6%/dia	R\$ 30.060	60 dias

Tabela 3. Desempenho dos métodos

Cenário	Número de Iterações - Método da Secante (pontos iniciais de 20, 30 e 40 dias)	Número de Iterações - Método de Newton (ponto inicial de 30 dias)
1A	11	5
1B	9	5
1C	6	6
1D	4	3
2A	7	6
2B	13	3
2C	9	10
2D	10	5

Em conformidade à literatura, verificou-se a partir da implementação dos algoritmos no Matlab que o método de Newton convergiu de forma mais eficaz do que o da Secante para a maioria dos cenários simulados. O método da Secante não converge quando as raízes usadas para os valores dos pontos iniciais estão muito longe do ponto de local ótimo, enquanto o método de Newton com apenas um ponto inicial é capaz de convergir, mesmo que este ponto inicial esteja distante do local do ponto ótimo. Portanto, os pontos iniciais do método da Secante tiveram que ser alterados mais vezes durante a execução das simulações para que houvesse convergência, como esperado. Todavia, ambos os métodos utilizados apresentaram a mesma receita líquida e o mesmo intervalo ótimo de limpeza para cada cenário avaliado.

Evidenciamos ainda que nos testes de forma empírica

utilizando os métodos iterativos, a partir de vários valores iniciais, não ocorreram falhas de convergência. Isso nos assegurou uma forma eficaz em encontrar o máximo da função. Nesse sentido, limitações desse trabalho em sua implementação dos métodos iterativos de otimização de Newton e da Secante devem-se ao fato da sensibilidade dos valores dos pontos iniciais utilizados para partida dos métodos. Assim, pesquisas futuras para escolha dos pontos iniciais de partida de forma não empírica serão analisadas adiante, dado que o foco de otimização desejado são os intervalos de limpezas para um melhor desempenho econômico.

Ainda como trabalhos futuros, poderão ser desenvolvidos outros cenários em diferentes cidades do país com diferentes usinas de geração devido à variação do custo de limpeza dos módulos PV, de potência instalada, de custo de mão de obra, de perda de produtividade de geradores fotovoltaicos em virtude da sujidade local, visando verificar generalidade da equação de receita líquida desenvolvida.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – Fapes, pelo financiamento parcial desta pesquisa através de bolsa de mestrado, referente ao Edital FAPES/CAPES nº 29/2018 – PROCAP 2019, processo de nº 86076507, e também através de fomento referente ao Edital FAPES/CNPq nº 04/2017 - PPP - Programa Primeiros Projetos, Termo de Outorga nº 140/2017.

REFERÊNCIAS

- Abderrezek, M. and Fathi, M. (2017) 'Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield', *Solar Energy*. Elsevier Ltd, 142, pp. 308–320. doi: 10.1016/j.solener.2016.12.040.
- Adinoyi, M. J. and Said, S. A. M. (2013) 'Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 60, pp. 633–636. doi: 10.1016/j.renene.2013.06.014.
- ANEEL (2015) 'Resolução Normativa no 687 de 2015 da ANEEL', Aneel, p. 24. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Appavou, F. et al. (2019) REN21 - 2019 Global Status Report. Paris: REN21.
- ASPE (2013) 'Energia Solar no Espírito Santo - Tecnologias, Aplicações e Oportunidades', Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo. Vitória, ES, p. 120.
- Babatunde, A. A., Abbasoglu, S. and Senol, M. (2018) 'Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 90(May 2017), pp. 1017–1026. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.102.
- Chun, S. and Kwasinski, A. (2011) 'Analysis of classical root-finding methods applied to digital maximum power point tracking for sustainable photovoltaic energy generation', *IEEE Transactions on Power Electronics*. IEEE, 26(12), pp. 3730–3743. doi: 10.1109/TPEL.2011.2157707.
- Comerio, A. et al. (2019) 'A review on impacts from dust deposition on photovoltaic modules', 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications

- (INDUSCON). IEEE, pp. 502–508. doi: 10.1109/induscon.2018.8627241.
- CRESESB (2014) ‘Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos’.
- Dapper, S. N., Spohr, C. and Zanini, R. R. (2016) ‘Poluição do ar como fator de risco para a saúde: Uma revisão sistemática no estado de São Paulo’, *Estudos Avancados*, 30(86), pp. 83–97. doi: 10.1590/S0103-40142016.00100006.
- Duchiade, M. P. et al. (1973) ‘Air pollution and respiratory diseases’, *Japanese Journal of Thoracic Diseases*, 11.
- EDP (2019) Tarifas - clientes atendidos em Baixa Tensão (Grupo B), EDP Espírito Santo Distribuição de Energia S/A. Available at: <https://www.edp.com.br/distribuicoes/saiba-mais/informativos/Paginas/Tarifa-de-Fornecimento-Baixa-Tensao.aspx> (Accessed: 15 January 2020).
- EDP (2020) ICMS, EDP Espírito Santo Distribuição de Energia S/A. Available at: <https://www.edp.com.br/distribuicao-es/saiba-mais/informativos/icms> (Accessed: 15 January 2020).
- Esposito, A. S. and Fuchs, P. G. (2013) ‘Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil’, *Revista do BNDS*, 40, pp. 85–114.
- Figgis, B. et al. (2017) ‘Review of PV soiling particle mechanics in desert environments’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 872–881. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.100.
- Fraga, M. M. et al. (2018) ‘Analysis of the soiling effect on the performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in Minas Gerais, Brazil’, *Solar Energy*. Elsevier, 163(March), pp. 387–397. doi: 10.1016/j.solener.2018.02.025.
- Ghaffari, A., Krstić, M. and Seshagiri, S. (2014) ‘Power optimization for photovoltaic microconverters using multivariable newton-based extremum seeking’, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. IEEE, 22(6), pp. 2141–2149. doi: 10.1109/TCST.2014.2301172.
- Ipea (2019) ‘Cadernos ods’, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
- Jones, R. K. et al. (2016) ‘Optimized Cleaning Cost and Schedule Based on Observed Soiling Conditions for Photovoltaic Plants in Central Saudi Arabia’, *IEEE Journal of Photovoltaics*. IEEE, 6(3), pp. 730–738. doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2535308.
- Junior, J. G. S., Cruz, S. R. and Amaral, L. S. (2018) ‘Impacto Da Sujidade Sobre O Desempenho De Sistemas’, (2018).
- Krause, R. C. K. et al. (2019) ‘GESTÃO DE DESEMPENHO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS FACE SOMBREAMENTO SUAVE: LIMPEZA X SUJEIRA’, in. ABRAMAN, pp. 1–16.
- Krismadinata et al. (2013) ‘Elimination of Harmonics in Photovoltaic Seven-level Inverter with Newton-raphson Optimization’, *Procedia Environmental Sciences*. Elsevier B.V., 17, pp. 519–528. doi: 10.1016/j.proenv.2013.02.067.
- Mani, M. and Pillai, R. (2010) ‘Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 14(9), pp. 3124–3131. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.065.
- Naeem, M. and Tamizhmani, G. (2015) ‘Cleaning frequency optimization for soiled photovoltaic modules’, 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/PVSC.2015.7355972.
- Oliveira, L. (2018) ‘Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de energia elétrica’, p. 63.
- Ramli, M. A. M. et al. (2016) ‘On the investigation of photovoltaic output power reduction due to dust accumulation and weather conditions’, *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 99, pp. 836–844. doi: 10.1016/j.renene.2016.07.063.
- Rao, S. S. (2009) *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 4th edn. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Rezende, V. G. S. de and Zilles, R. (2018) ‘Análise Das Perdas De Produtividade Em Geradores Fotovoltaicos Por Efeito De Sujidade’, *Cebens*, p. 10.
- Saidan, M. et al. (2016) ‘Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment’, *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 92, pp. 499–505. doi: 10.1016/j.renene.2016.02.031.
- Salari, A. and Hakkaki-Fard, A. (2019) ‘A numerical study of dust deposition effects on photovoltaic modules and photovoltaic-thermal systems’, *Renewable Energy*. Pergamon, 135, pp. 437–449. doi: 10.1016/J.RENENE.2018.12.018.
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A. and Kazmerski, 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*. Elsevier, 22, pp. 698–733. doi: 10.1016/j.rser.2012.12.065.