

Economic Optimization of Maintenance against Soiling in Photovoltaic Plants

Leticia C. Gomes e Pablo R. Muniz

Abstract— The electrical energy produced by a photovoltaic system is directly associated with the availability of solar radiation. Nonetheless, external factors related to location and geographical conditions – such as atmospheric temperature, clouds, and altitude – can have major impacts on energy generation. One of these externalities is the sedimentation of materials on the surface of the photovoltaic module, which leads to significant reductions in the power generation capacity, resulting in costs to the generating plants. Cleaning is considered the most efficient maintenance to mitigate the impacts of soiling on photovoltaic modules. Therefore, this work aims to develop a model for analysis and optimization of preventive maintenance plans for cleaning photovoltaic modules, to mitigate the effects of dust deposition on energy generation and, consequently, on operational cash flow. Costs of production loss due to soiling were considered, as well as corresponding maintenance costs, as a function of the frequency of cleaning, and thus accounted for the OPEX costs of the power plant operation, to identify an optimum point of cleaning frequency, minimizing OPEX costs.

Index Terms—maintenance management, photovoltaic systems, power generation economics, soil.

I. INTRODUÇÃO

Segundo dados do IEA (International Energy Agency), a Energia fotovoltaica (PV, do inglês *photovoltaic*) apresentou aumento de 37% no período de 1990 a 2017 [1]. No Brasil, o crescimento da geração de energia fotovoltaica também é bastante expressivo segundo o Balanço Energético Nacional de 2019, o qual mostra um aumento de 316% de produção de energia fotovoltaica entre 2017 e 2018 [2].

Nesse contexto, uma quantidade significativa de tempo e recursos tem sido investida a fim de trazer o desempenho de geradores fotovoltaicos para um alto nível de previsibilidade de sua capacidade de geração e de eficiência do sistema [3]. Um fator que diminui a eficiência do sistema PV são as perdas por assentamento de sujidade [4]–[6], o que não tem sido lidado compreensivelmente quanto a seu modelamento, dada a sua complexidade de quantificação [7].

Os tipos de materiais particulados em suspensão na atmosfera do local de instalação do sistema PV se mostram decisivos na diminuição da produção de energia, indicando

perdas ínfimas, ou até reduções bastante significativas em função da deposição de sujidade. Em levantamento realizado em 22 pesquisas publicado em [8], verifica-se que a capacidade de geração de energia por módulos PV pode apresentar reduções da ordem de 4% a 78% ao ano devido ao depósito superficial de sujidade. Essa redução depende não só do tipo e da taxa de deposição da sujidade, mas também de fatores como velocidade e direção do vento, e ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, o que também varia em função da localização da usina [9], e do tipo de instalação dos módulos – fixos ou com rastreadores solares [10]. Dessa forma, infere-se que as perdas de geração não apresentam uma relação única com o tempo de exposição à sujidade. Em contrapartida, diversos estudos são desenvolvidos para se otimizar sistemas PV com ganhos de desempenho da ordem de poucos pontos percentuais [11], [12].

Atualmente, muitas análises econômicas não consideram ou consideram pouco significativas saídas de fluxo de caixa causadas pelos efeitos do acúmulo de sujidade na superfície de módulos PV, tais como custos relacionados à limpeza dos módulos, além de perdas de receita por déficit de geração e multas por não cumprimento de montante de energia entregue estipulado em contrato [8], [13]–[16]. Como exemplo, o contrato de comercialização de energia no ambiente regulado, contido no edital de leilão nº 01/2018 da Agência Brasileira de Regulação de Energia Elétrica (ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica), prevê na cláusula 10ª o ressarcimento por desvio negativo de geração, isso na ocorrência de descumprimento contratual no montante de energia contratada. Não obstante, verifica-se naquelas análises econômicas que fatores – por exemplo degradação natural de componentes do sistema PV e variações nos níveis de incidência de energia solar – foram levados em conta.

A redução da capacidade de geração de energia em função da deposição de sujidade não tem sido considerada como uma variável dependente do local de instalação; quando muito, é considerada um fator constante, um dado de entrada sem maiores explicações [13]–[15], [17]–[19].

Quando considerado, o impacto do assentamento de sujeira é abordado em análises econômicas por meio da inclusão de custos de manutenção vinculados a ciclos de limpeza do sistema. Como exemplo, cita-se uma análise econômica realizada para instalação de um sistema PV com capacidade de 1,2 MWp, em Pueblo (EUA) [20]. No estudo foram avaliados custos de limpeza para manutenção do sistema duas vezes ao ano, não considerando sua influência na geração de energia tampouco sua periodicidade economicamente adequada.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPES – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo através do Edital FAPES/CNPq nº 04/2017.

L. C. Gomes era graduanda em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Vitória, Av. Vitória, 1729, Jucutuquara, Vitória/ES, 29.090-100 (e-mail: leticiacolombi@outlook.com).

P. R. Muniz é professor no Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Vitória, Av. Vitória, 1729, Jucutuquara, Vitória/ES, 29.090-100 (e-mail: pablorm@ifes.edu.br).

Este trabalho se propõe a desenvolver um método de otimização econômica de planos de manutenção preventiva a fim de minimizar os custos globais oriundos do déficit de geração de energia elétrica causado pelo assentamento de sujidade em módulos de usinas PV. Trata-se de um método para os agentes do setor de comercialização de energia elétrica que possuem sua operação controlada via contrato estimarem um ponto ótimo de operação, em que se alcança o mínimo custo total da composição das despesas oriundas do plano de manutenção preventiva e das perdas de produção de usinas PV, ambos em função do depósito de sujidade. Para esse fim, este trabalho trata a deposição de sujidade como um fator incremental aos demais fatores que impactam na capacidade de geração, normalmente já considerados no planejamento da usina. O trabalho pontua as taxas de redução de geração de energia fotovoltaica em função do assentamento de sujidade, bem como bosqueja os possíveis custos associados ao consequente déficit de geração de energia para usinas PV, dentro das regras de comercialização de energia elétrica no Brasil.

II. GESTÃO DE CUSTOS DE USINAS FOTOVOLTAICAS EM FUNÇÃO DA SUJIDADE

A. Considerações Iniciais

A gestão da manutenção possui dois objetivos: assegurar a disponibilidade máxima dos equipamentos, e otimizar custos para um nível de disponibilidade predeterminado [21]. Os custos gerados pela função manutenção correspondem a custos com mão de obra, ferramentas e instrumentos, material aplicado nas reparações, custo com subcontratação e outros referentes à instalação ocupada pela equipe de manutenção. Os custos de manutenção ligados à produção são os decorrentes da indisponibilidade do equipamento. O custo da indisponibilidade concentra-se naqueles decorrentes da perda de produção, da não qualidade dos produtos, da recomposição da produção e das penalidades comerciais, com possíveis consequências à imagem da empresa [22], [23].

Dessa forma, há um compromisso entre custos de manutenção, custo da indisponibilidade e de produtividade, representado por meio das curvas apresentadas na Fig. 1. É possível notar que ao mesmo tempo em que há um aumento dos custos de manutenção, a curva de custos devido à parada de produção diminui. Isso porque se espera que o aumento de custos com a manutenção reflita em uma redução de paradas emergenciais. Desse modo, pode-se estabelecer um ponto ótimo de intervenção, que varia para cada tipo de instalação ou equipamento, no qual se proporciona um nível de disponibilidade capaz de gerar lucro máximo à operação [24].

B. Custos de Perda de Produção por Deposição de Sujidade

A fim de apontar os custos de perda de produção provenientes do déficit de geração devido à sujidade, é preciso primeiramente considerar os tipos de comercialização de energia elétrica no Brasil. De acordo com o Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004, a comercialização de energia dar-se-á em dois ambientes: Ambiente de Contratação Livre (ACL) ou Ambiente de Contratação Regulada (ACR) [25].

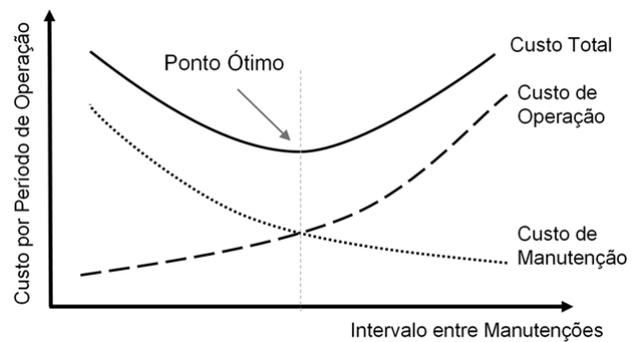


Fig. 1. Curvas de Custos de Operação e de Manutenção. Adaptado de [23].

Os contratos negociados no ACL são denominados Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Livre (CCEAL), possuindo condições de atendimento, preço e demais cláusulas de contratação livremente negociadas entre as partes [26].

De forma antagônica, no Ambiente de Contratação Regulada as operações de compra e venda de energia elétrica são realizadas principalmente por meio de leilões de compra ou leilões de ajuste. Os contratos originados dessa contratação são denominados Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR) [26], [27].

A composição dos custos de perda de produção em usinas PV decorrente dos impactos do assentamento de sujidade primeiramente considera a redução de receita da usina, visto que a redução de energia gerada acarreta uma redução na arrecadação. Além disso, contratos de comercialização dispõem de montantes contratados de energia em determinados períodos que, se não entregues, podem proporcionar ao contratante a necessidade de compra de energia no mercado, como por exemplo pela distribuidora local fora de ambiente contratual ou no ambiente de contratação livre. Sendo assim, a usina contratada pode vir a arcar com os custos decorrentes do montante de energia não entregue ao contratante, ressarcindo este pelos desvios negativos de geração. Por fim, por não atender ao mercado consumidor, se a usina vier a faltar quanto ao cumprimento de contrato em relação ao montante de energia entregue, ainda estará suscetível a penalização por multas decorrentes de não cumprimentos contratuais. Resumidamente, os custos totais por perda de produção se classificam em:

- Custo de Perda de Produção por Déficit de Geração Fotovoltaica;
- Custo de Perda de Produção por Penalidades por Insuficiência de Lastro de Energia; e
- Custo de Perda de Produção por Multas.

Como composição dos custos de perda de produção, a primeira parcela consiste na redução de receita da usina geradora, ou seja, no montante de energia não produzida em decorrência dos impactos do depósito de sujidade. Esta parcela é calculada a partir da variação da energia efetivamente gerada em relação ao montante de energia previsto pela usina fotovoltaica. Para este fim, é utilizado como fator multiplicador, em R\$/MWh, o preço estipulado em contrato, derivado do resultado dos leilões de energia no caso do Ambiente de Contratação Regulada [25].

Como disposto no Artigo 20 do Decreto nº 5.163/2004, os

editais de leilões elaborados pela ANEEL devem conter os “indicadores, fórmulas e parâmetros a serem utilizados no julgamento das propostas, observado o critério de menor tarifa”, e definindo em contrato com os agentes vencedores o preço para atendimento da demanda prevista [25]. Portanto, o cálculo dessa primeira parcela dar-se-á conforme (1).

$$C_{RR} = \Delta E_{Ger} \times P_{Cont} \quad (1)$$

Onde C_{RR} é o Custo da Redução de Receita da usina devido ao déficit de geração por depósito de sujidade, em um ano, em Reais; ΔE_{Ger} é o Montante de energia gerada prevista decrescida do montante efetivamente produzido pela usina devido aos impactos do assentamento de sujidade, em um ano; e P_{Cont} é o Preço estipulado em contrato, em R\$/MWh.

Como segunda parcela dos custos de perda de produção de usinas estipulados neste trabalho, está o custo referente ao montante de energia não entregue vindo a faltar no montante contratado pelo comprador definido em leilão. Como por exemplo, na Cláusula 4ª do Anexo II ao edital de Energia Nova A-6 de leilão N° 04/2019 da ANEEL estipula que os montantes de energia são considerados como requisito do VENDEDOR e recurso do COMPRADOR nos processos de apuração de insuficiência de lastro para venda e de cobertura contratual do consumo, respectivamente [28].

Sendo assim, é estipulado que tanto as operações de compra ou venda de energia elétrica devem ser lastreadas, sendo tal lastro composto pela garantia física proporcionada por empreendimentos de geração própria ou de terceiros, mediante a compra de contratos de energia [26]. Este módulo tem abrangência para todos os agentes da CCEE, tanto para ambiente de contratação livre quanto regulada.

A insuficiência de lastro de energia é calculada para os agentes que não apresentarem 100% de lastro para todas as suas operações com base em um histórico dos 12 meses anteriores ao mês de referência [26]. É previsto nas Regras de Comercialização que o cálculo da insuficiência de lastro seja realizado mensalmente. Dessa maneira, é apurado o nível de insuficiência de lastro de energia e posteriormente valorado monetariamente em função do preço para aplicação da penalidade [26].

Visto que é disposto em contrato o montante de energia a ser entregue pelo vendedor, usualmente em MWmédio, a contabilização da Insuficiência de Lastro de Energia se dá conforme (2).

$$ILE = (E_{Cont} \times 8760) - E_{Ger} \quad (2)$$

Onde ILE é a Insuficiência de Lastro de Energia da usina, em unidade de energia, no período de um ano; E_{Ger} é o Montante de energia efetivamente gerada pela usina, no período de um ano; e E_{Cont} é o Montante total de energia contratado em MWmédio, no período de um ano, ou seja, no período de 8760 horas.

Logo, se o termo ILE resultar em um valor positivo, a penalidade sobre o agente comercializador de energia deverá

ser aplicada. O preço de referência para penalização é determinado pelo maior valor entre o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) e o Valor de Referência [26].

O Preço de Liquidação das Diferenças é a ferramenta utilizada para a valoração dos montantes liquidados no Mercado de Curto Prazo (MCP) de energia, apurado pela CCEE, por submercado. A base de cálculo do PLD é o Custo Marginal de Operação (CMO), ou seja, o custo para se produzir o próximo MWh necessário ao sistema elétrico. Já o Valor de Referência corresponde ao valor médio ponderado de aquisição de energia proveniente de novos empreendimentos de geração, nos leilões realizados nos anos A-5 e A-3 (usinas que entram em operação comercial em até 5 anos e 3 anos após o leilão, respectivamente) fornecido pela ANEEL [26].

Por conseguinte, a parcela de custos de perda de produção referente a penalidades por insuficiência de lastro de energia, na condição $ILE > 0$, pode ser expressa por (3).

$$CP_{ILE} = ILE \times PP_{Ref} \quad (3)$$

Onde CP_{ILE} é o Custo da Penalidade por Insuficiência de Lastro de Energia, no período de um ano, em Reais; ILE é a Insuficiência de Lastro de Energia da usina, em unidade de energia, no período de um ano; e PP_{Ref} é o Preço de Referência para Penalização de usinas, em R\$/MWh.

Por fim, a terceira parcela considerada para contabilização dos custos de perda de produção devido aos impactos de sujidade em sistemas PV é em relação a penalidades aplicáveis devido ao não cumprimento de contrato.

De acordo com o Art, 5º da Resolução Normativa n° 846, publicada em 11 de junho de 2019 pela ANEEL [29], pode ser aplicada a penalidade de multa até o limite percentual de 1% incidente sobre a base de cálculo [29]. A base de cálculo para aplicação de multa aos agentes do setor de energia elétrica é o valor da Receita Operacional Líquida (ROL) ou o valor estimado da energia produzida nos casos de autoprodução e produção independente, ambos correspondentes aos doze meses anteriores à infração [29].

Portanto, a parcela dos custos de perda de produção correspondente à penalidade por multa é avaliada conforme definido em (4).

$$CP_{multa} = E_{Ger} \times P_{Cont} \times 0,01 \quad (4)$$

Onde CP_{multa} é o Custo da Penalidade por Multa, no período de um ano, em Reais; E_{Ger} é o Montante de energia efetivamente gerada pela usina, no período de um ano; e P_{Cont} é o Preço estipulado em contrato, em R\$/MWh.

Assim, a composição dos custos totais de perda de produção (CPP), em função dos impactos causados pelo depósito de sujidade em usinas fotovoltaicas, pode ser expressa pela soma das três parcelas supracitadas, conforme (5).

$$CPP = C_{RR} + CP_{ILE} + CP_{multa} \quad (5)$$

Onde C_{RR} é o Custo da Redução de Receita da usina devido

ao déficit de geração por depósito de sujidade, no período de um ano, em Reais; CP_{ILE} é o Custo da Penalidade por Insuficiência de Lastro de Energia, no período de um ano, em Reais; e CP_{multa} é o Custo da Penalidade por Multa, no período de um ano, em Reais.

Contudo, é necessário atentar que a aplicação de cada parcela que compõe os custos totais é definida de acordo com as características de cada usina e vínculos contratuais aos quais está submetida.

C. Custos de Manutenção Devidos à Deposição de Sujidade

A principal atividade de manutenção contra assentamento de sujidade em painéis fotovoltaicos é a limpeza de superfícies do sistema [30]. Assim, é necessário identificar os custos de manutenção preventiva em sistemas PV relativos à atividade de limpeza. Tais custos seriam [23], [31]:

- custos de mão de obra direta: são os custos de mão de obra própria, considerando número de horas alocadas ao serviço e o respectivo salário mensal, incluindo encargos;
- custos de materiais: custos associados aos materiais utilizados direta ou indiretamente, como insumos (óleo, graxa, produtos químicos, água e similares) além de recursos auxiliares para a realização do serviço.

Custos com recursos auxiliares para execução do serviço, como por exemplo instalação de andaimes, utilização de guinchos, plataformas suspensas, para casos de difícil acesso ao sistema PV podem ser considerados fixos ou variáveis, dependendo se já são disponibilizados de maneira contínua pelo empreendimento ou contratados para cada serviço.

Da mesma maneira, os custos de mão-de-obra podem ser considerados variáveis se considerados provenientes de contratos terceirizados. Por conseguinte, a composição dos custos de manutenção pode ser contabilizada por meio de diversas abordagens dependentes dos recursos disponíveis e contratos de serviço. Todavia, de forma geral, os custos de manutenção podem ser expressos por meio de (6).

$$CM_{Total} = CM_{Fixos} + CM_{Var} \times F_{Manut} \quad (6)$$

Onde CM_{Total} são os Custos Totais de Manutenção contra Depósito de Sujidade em Sistemas PV, em Reais; CM_{Fixos} são os Custos Fixos de Manutenção, em Reais; CM_{Var} são os Custos Variáveis de Manutenção, em Reais; e F_{Manut} é a Frequência de Manutenção ou Quantidade de Manutenções realizadas no período de tempo.

D. Custos Totais de Operação e Manutenção em Função de Sujidade

A fim de compor a curva de custos totais decorrentes dos impactos do assentamento de sujidade em sistemas PV, foram estratificados os custos de perda de produção e custos de manutenção em função da frequência de limpeza. Assim, para determinada frequência de limpeza f , os custos totais são expressos conforme (7).

$$CT_{Geral}(f) = CPP(f) + CM_{Total}(f) \quad (7)$$

Onde CM_{Total} são os Custos Totais de Manutenção contra Depósito de Sujidade em Sistemas PV, para frequência de limpeza f , em Reais; CPP são os Custos Totais de Perda de Produção, para frequência de limpeza f , em Reais; e CT_{Geral} são os Custos Totais do Impactos do Depósito de Sujidade em Sistemas PV, para frequência de limpeza f , em Reais.

Utilizando das premissas e método matemático descritos neste Capítulo II, o cálculo para estimativa do ponto ótimo de intervenção para manutenção preventiva foi estruturado utilizando a ferramenta Visual Basic for Applications (VBA) do *software* Microsoft Office Excel. A ferramenta apresenta como saída os custos de perda de produção, ou lucro cessante, custos de manutenção e custos totais em função da periodicidade de manutenção preventiva (limpeza dos módulos PV) da usina sob análise.

Sumarizando, os custos operacionais relativos a deposição de sujidade foram formulados e modelados em (1) a (6), com suas respectivas condições de aplicação e restrições estabelecidas, bem como as variáveis independentes. A função objetivo, estabelecida em (7), deve ser minimizada objetivando encontrar o ponto onde acontece o mínimo valor global de operação da usina. As variáveis dependentes, otimizadas, são o intervalo (frequência) de limpeza da usina, em semanas, e os custos de limpeza, de perda de produção e totais, em unidade monetária.

III. ESTUDO DE CASO

O modelo proposto foi aplicado em uma usina fotovoltaica com contrato de geração dentro do ACR. Para este exemplo, foi utilizado como fonte de dados os resultados do 30º Leilão de Energia Nova A-6, realizado em 18 de outubro de 2019 [32]. O empreendimento escolhido para análise foi o Gameleira 1, situado no Estado do Ceará, Brasil, cujas características são listadas na Tabela I [32].

TABELA I
DADOS DA USINA FOTOVOLTAICA GAMELEIRA 1

Característica	Valor
Potência habilitada	30 MW
Garantia Física	8,6 MWmédio
Lance vencedor	84,39 R\$/MWh
Montante de energia contratado	67.802 MWh
(estimado em 90% da Garantia física)	R\$ 273,89 / MWh

A escolha da Usina Gameleira 1 traz parâmetros técnico-comerciais do leilão vigentes quando esta pesquisa foi desenvolvida. Entretanto, não foram encontrados estudos relativos a perda de capacidade de geração fotovoltaica de energia em função de deposição de sujidade para sua região de instalação. Para localidades com tais estudos disponíveis, não foram localizados Leilões de Energia recentes. Para possibilitar a estimativa de perdas da usina em razão do depósito de sujidade, foi utilizado como base um estudo realizado na Região Metropolitana da Grande Vitória, Brasil. Este estudo, dentre seus resultados, evidenciou um perfil de redução de geração fotovoltaica em função do acúmulo de sujidade durante o período de análise de 30 dias [33].

A composição escolhida para estimar as perdas por depósito de sujidade foi a amostra de pó de construção civil, já que esta apresentou maiores concentrações químicas dos elementos oxigênio e carbono [33], ou seja, elementos que apresentam concentrações elevadas na composição de poluentes na atmosfera. É importante ressaltar que a determinação da composição da sujidade que se deposita localmente depende de procedimentos e análises específicas [34], [35], bem como a posterior estimativa da perda de capacidade de geração de energia [33]. Dessa forma, neste estágio não é possível se estimar o real perfil da composição da sujidade que se depositaria em superfícies na localidade de estudo.

Em virtude do perfil de redução de capacidade de geração escolhido, para composição das curvas de custo, a estratificação selecionada para intervalos de intervenção da manutenção preventiva foi em semanas. Assim, foram calculados os montantes de energia gerados se aplicada uma manutenção com periodicidade variando de semanal até uma periodicidade de limpeza de 52 em 52 semanas (anual).

Ao se avaliar o índice de precipitação da região do município de Milagres / CE, localização da Usina Gameleira 1, verificou-se que este pode permanecer até 3 meses do ano sem nenhuma ocorrência de chuvas em determinadas cidades [36]. Assim, com o intuito de estabelecer um perfil de perdas de capacidade de geração semanal de forma a suprir as características da região, extrapolou-se a perda de capacidade de geração de energia para até 12 semanas sem ação de limpeza natural (por chuva), ou artificial. A extrapolação foi feita por uma função linear de primeiro grau, baseando-se no comportamento típico dessas curvas [33].

O primeiro perfil utilizado considera que após a 6ª semana, o decaimento da capacidade de geração de energia se estabiliza, permanecendo constante. O segundo perfil considera que a estabilização ocorre da 12ª semana em diante. Adicionalmente, nota-se que a capacidade mínima de geração estimada é compatível aos valores encontrados na literatura, tipicamente entre 0,50 pu e 0,72 pu para um período de 3 meses [10], [37]–[42]. A Tabela II expõe os valores de potência gerada relativa em função do tempo.

TABELA II
CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DEPOSIÇÃO DE SUJIDADE

Tempo (semanas)	Capacidade de geração (pu)
1	0,930
2	0,852
3	0,809
4	0,780
5	0,758
6	0,741
7	0,727
8	0,715
9	0,704
10	0,695
11	0,686
12	0,679

Para estimativa dos custos relativos à manutenção preventiva de limpeza dos módulos PV, foi contabilizada a mão de obra

terceirizada, com remuneração prevista pela frequência do serviço de manutenção. Os custos relacionados aos materiais para execução da atividade não foram considerados nessa análise, dada a complexidade de estimar os recursos disponíveis e custos associados à manutenção, e ainda porque usualmente os custos de mão de obra se apresentam como mais significativos em serviços de manutenção do tipo limpeza. O cenário considerado é de uma usina instalada no nível do solo, não sendo necessária a utilização de recursos para acesso aos painéis como andaimes, plataformas suspensas, dentre outros.

Para estimar o tempo para execução de limpeza por módulo PV, considerando também o cumprimento de requisitos de segurança e ergonomia, propôs-se que a cada homem-hora (hh) 6 módulos de 2 m² são limpos, totalizando assim o valor de 15.625 hh para execução de toda a atividade de manutenção na Usina Gameleira 1. Considerando como base salarial o valor de R\$ 1.223,80 para serviços na área industrial com carga horária mensal de 220 horas, de acordo com a Convenção Coletiva de Trabalho [43], além dos encargos sociais e insumos com percentual adicional de 150% [44], têm-se a estimativa de hh de R\$ 13,91. Assim, o valor de mão de obra por atividade de limpeza de R\$ 217.343,75.

Sendo assim, a curva de custos de manutenção preventiva é construída a partir do valor da mão de obra referente a cada execução do serviço de limpeza em função da sua frequência.

Assim, a partir da determinação das características de fornecimento de energia da usina fotovoltaica, seu perfil de redução de geração de energia além dos custos relativos à limpeza dos módulos, foi possível simular os custos totais referentes à condição de assentamento de sujidade considerando os seis cenários estabelecidos.

A estimativa do montante previsto de geração de energia para a usina Gameleira 1 [32], não considerando a redução de capacidade em função da deposição de sujidade, é apresentada na Tabela III.

TABELA III
MONTANTE DE ENERGIA GERADA COM BASE NA GARANTIA FÍSICA DA USINA GAMELEIRA I

Característica	Valor
Garantia física	8,6 MWmédio
Energia gerada prevista para 1 ano	75.296 MWh
Energia gerada prevista por semana	1.448 MWh

IV. RESULTADOS

A. Cenários e Análises

Foram determinados e avaliados seis cenários que consideram as eventuais incidências dos custos de perda de produção em função da redução de receita da usina, da penalidade por insuficiência de lastro, e de penalidades por multa; e também o perfil de redução de capacidade de geração de energia, conforme indicado na Tabela IV.

A Fig. 2 apresenta as curvas de custos de manutenção (limpeza), de perda de produção e totais para cada um dos seis cenários. Nota-se que variando-se o cenário de composição de custos de perdas de produção, tanto os custos totais quanto à

frequência ótima de limpeza sofrem variações consideráveis.

TABELA IV
CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE ANÁLISE

CENÁRIO	I	II	III	IV	V	VI
Redução de receita	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Insuficiência de lastro	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Multas	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM
Perfil de redução de capacidade (semanas)	6	6	6	12	12	12

B. Comparativo dos Cenários Considerados

A Tabela V apresenta para cada cenário analisado, a periodicidade de manutenção que acarreta o menor custo total de gestão da usina no que tange aos impactos causados pela deposição superficial de sujeira nos módulos PV. Apresenta também os respectivos custos de perda de produção, custos de manutenção (limpeza) e o valor do custo total minimizado.

TABELA V
RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS CENÁRIOS – VALORES OTIMIZADOS PARA CUSTO MÍNIMO GLOBAL ANUALIZADO

PARÂMETRO	Cenário					
	I	II	III	IV	V	VI
Periodicidade de manutenção (semanas)	49	47	47	45	5	5
Custos de Perda de Produção (R\$1.000)	1.549	4.495	4.543	1.823	2.579	2.631
Custos de Manutenção (R\$1.000)	230,7	240,5	240,5	251,1	2.260	2.260
Custos Totais (R\$1.000)	1.780	4.735	4.783	2.074	4.840	4.892

Analisando os três primeiros cenários, com a adição de parcelas nos custos de perda de produção a cada cenário proposto, o ponto de mínimo custo total encontrado nos três cenários não apresentou uma grande variação, sendo o cenário I com ponto ótimo na periodicidade de 49 semanas e os cenários II e III, de 47 semanas. Isso porque, uma vez que o perfil de perdas por depósito de sujeira é o mesmo em todos os cenários, é esperado que a curva de perdas de produção apresente um comportamento semelhante já que os custos estão diretamente relacionados à variação de geração de energia.

O caso estudado também pôde evidenciar que, dentre as parcelas que compõem os custos de perda de produção, a que apresentou maior impacto no montante total foi a parcela referente às penalidades por insuficiência de lastro de energia.

Na Tabela V, é possível notar um incremento significativo do valor de mínimo custo total do cenário I para o cenário II, o qual se diferencia pela inclusão do valor referente à insuficiência de lastro de energia.

Por fim, o exemplo realizado no Cenário V pôde combinar ambas análises, tanto do impacto da parcela de devido à insuficiência de lastro de energia quanto da característica do perfil de redução de geração de energia, resultando em uma periodicidade ótima do plano de manutenção preventiva de apenas 5 semanas.

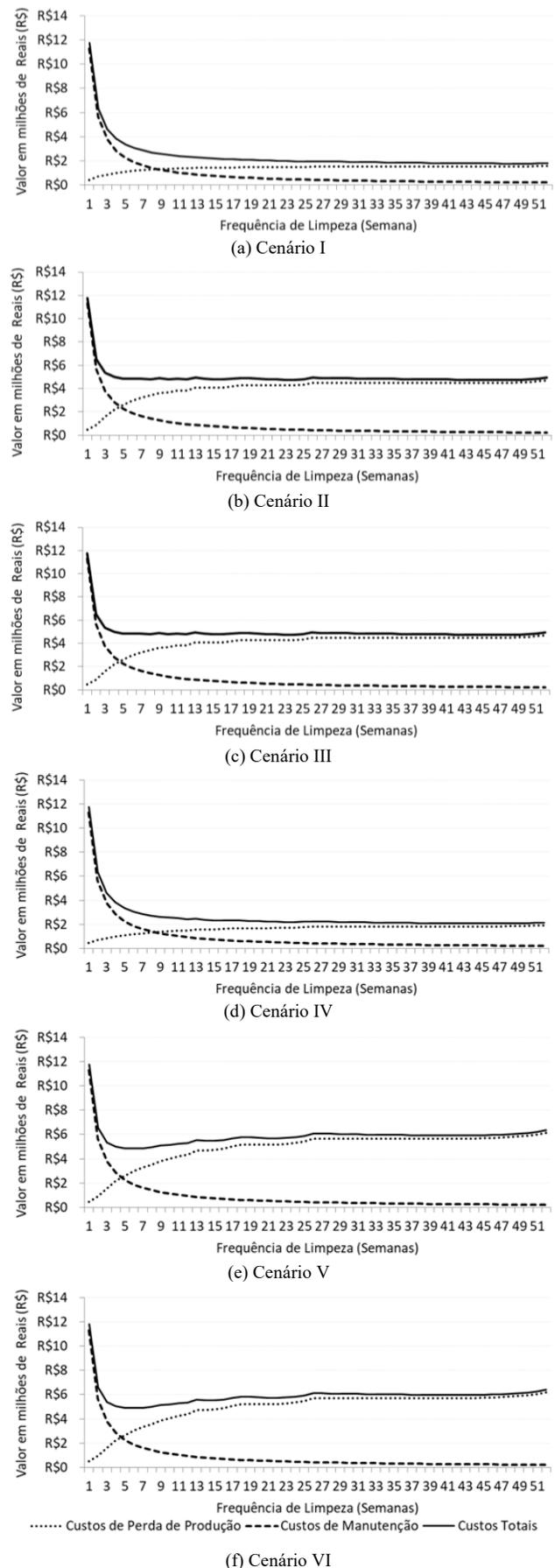


Fig. 2. Curvas de custos para os seis cenários avaliados.

Analisando os três últimos cenários (IV, V e VI), em que o perfil de perdas considerado é de que a capacidade de geração de energia sofre decaimento até a 12ª semana sem limpeza, nota-se a redução da periodicidade otimizada de limpeza em relação aos cenários anteriores (I, II e III). Logo, é possível observar o impacto que uma taxa de redução de capacidade de geração de energia mais acentuada demanda maior frequência de limpeza.

Cristaldi et al. sintetizam em [31] que diversos autores e normas técnicas apontam como ponto ótimo para intervenção da manutenção justamente aquele em que os custos de perda de produção se igualam ou superam os custos relativos à manutenção. Contudo, a aplicação desse método de análise eventualmente não seria o mais indicado. Isso devido à característica do perfil de redução de geração de energia, e, por conseguinte, da curva de perdas de produção. A Tabela VI apresenta os custos de manutenção e custos totais para cada cenário se fosse adotado o critério de periodicidade de manutenção no ponto da interseção das curvas de custos de perda de produção e de manutenção.

TABELA VI
RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS CENÁRIOS – VALORES PARA CUSTO MÍNIMO GLOBAL ANUALIZADO SEGUINDO CRITÉRIO TRADICIONAL

PARÂMETRO	Cenário					
	I	II	III	IV	V	VI
Periodicidade de manutenção (semanas)	9	5	5	9	5	5
Custos de Perda de Produção (R\$1.000)	1.335	2.579	2.632	1.384	2.579	2.632
Custos de Manutenção (R\$1.000)	1.256	2.260	2.260	1.256	2.260	2.260
Custos Totais (R\$1.000)	2.591	4.840	4.892	2.639	4.840	4.892

Verifica-se que os Cenários V e VI foram os únicos em que houve coincidência do ponto de interseção das curvas de manutenção e perdas de produção com o ponto ótimo de operação. Todos os outros quatro cenários apresentaram menor custo total em intervalos de manutenção diferentes ao ponto de interseção das curvas, alguns com custos totais bastante díspares. Assim, definir o ponto intervenção da manutenção como aquele em que os custos de perda de produção se igualam ou superam os custos relativos à manutenção poderia acarretar escolhas que não otimizariam os custos de operação da usina.

V. CONCLUSÃO

Concluiu-se, por meio do modelo de cálculo proposto, que a otimização da periodicidade não deve ser feita de modo como usualmente tem sido abordado – estabelecendo-se frequências de limpeza fixas ou em função somente de seu próprio custo - uma vez que ficou demonstrado que o ponto de mínimo custo total tem relativa complexidade em função das características comerciais e de deposição de sujidade superficial da usina. Para uma mesma usina, verifica-se que a periodicidade ótima de manutenção pode ter grande faixa de variação em função do

perfil de perda de capacidade de geração de energia face à deposição de sujidade, bem como as regras comerciais às quais está submetida.

Uma vez que o perfil de diminuição de capacidade de geração em função da sujidade é uma variável independente no método proposto, bem como são os custos de limpeza e a composição detalhada dos custos de perda de produção em função da sujidade, conclui-se que o método desenvolvido é aplicável a quaisquer usinas fotovoltaicas implementadas a partir da regulamentação de comercialização de energia vigente no Brasil, que foi adotada no desenvolvimento deste trabalho.

Adicionalmente, o modelo desenvolvido é facilmente adaptável a eventuais mudanças, adições ou exclusões nessas variáveis, facilmente adequável a novas condições externas.

Quão mais preciso for o conhecimento das condições e custos de limpeza e de perda de produção, naturalmente maior precisão terá a definição da frequência de limpeza dos módulos PV. Entretanto, um aspecto dificultador para emprego do método proposto é o conhecimento do perfil de perda de capacidade de geração da usina PV em função da deposição de sujidade local, pelo fato dessa característica depender de correlações do tipo e da taxa de deposição local a outros perfis semelhantes conhecidos, ou de análises empíricas no local de interesse. Essa é uma variável antecessora ao modelo proposto.

REFERÊNCIAS

- [1] International Energy Agency, “Renewables Information 2019: Comprehensive historical review and current market trends in renewable energy,” Paris, 2019.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (Brasil), “Balanço Energético Nacional 2019: Ano Base 2018,” Rio de Janeiro, 2019.
- [3] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 698–733, Jun. 2013.
- [4] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezadad, and S. Hajighorbani, “Power Loss Due To Soiling on Solar Panel,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1307–1316, 2016.
- [5] M. H. Bergin, C. Ghoroi, D. Dixit, J. J. Schauer, and D. T. Shindell, “Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust and Particulate Air Pollution,” *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 8, pp. 339–344, Aug. 2017.
- [6] R. N. Michels, M. G. Canteri, M. A. de A. e Silva, E. Gnoatto, J. A. A. dos Santos, and M. M. A. de Jesus, “Yield from photovoltaic modules under real working situations in west Paraná - Brazil,” *Acta Sci. Technol.*, vol. 37, no. 1, p. 19, Jan. 2015.
- [7] A. Rao, R. Pillai, M. Mani, and P. Ramamurthy, “Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance,” *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 690–700, 2014.
- [8] A. Comerio, P. R. Muniz, M. Rampinelli, and J. F. Fardin, “A review on impacts from dust deposition on photovoltaic modules,” *2018 13th IEEE Int. Conf. Ind. Appl.*, pp. 502–508, 2019.
- [9] V. Gupta, M. Sharma, R. K. Pachauri, and K. N. Dinesh Babu, “Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques,” *Sol. Energy*, vol. 191, no. August, pp. 596–622, 2019.
- [10] M. J. Adinoyi and S. A. M. Said, “Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules,” *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 633–636, Dec. 2013.
- [11] J. L. De Souza Silva, H. Soeiro Moreira, D. Bastos De Mesquita, M. V. Gomes Dos Reis, and M. Gradella Villalva, “Study of power optimizers for grid-connected photovoltaic systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 1, pp. 127–134, 2019.
- [12] B. Gleason, “Pv System - Comissioning,” *SOLARPRO*, vol. 2.6, pp. 34–56, 2009.
- [13] P. Vilaça Gomes et al., “Technical-economic analysis for the

- integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues,” *Energy Policy*, vol. 115, no. October 2017, pp. 199–206, 2018.
- [14] A. Calazans, M. Kelly, G. Chaudhry, and M. K. Siddiki, “Economic analysis of a photovoltaic system connected to the grid in Recife, Brazil,” in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015, pp. 1–5.
- [15] E. S. Hrayshat, “Viability of solar photovoltaics as an electricity generation source for Jordan,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 67–77, 2009.
- [16] S. I. Siddiki, S. Islam, A. Alahmed, Y. Alharthy, G. M. Chaudhry, and M. K. Siddiki, “Grid interactive PV system with battery backup - The viable alternative solution for power crisis in Rajshahi, Bangladesh,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 2016-Novem, pp. 3341–3344, 2016.
- [17] L. Cadavid, M. Jimenez, and C. J. Franco, “Financial analysis of photovoltaic configurations for Colombian households,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3832–3837, 2015.
- [18] L. Willer Oliveira and T. Cristina Jose Maria, “Planning of Renewable Generation in Distribution Systems Considering Daily Operating Periods,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 5, 2017.
- [19] G. Gilson Dranka, J. Donizetti De Lima, R. Da Costa Bonotto, and R. H. Soares MacHado, “Economic and Risk Analysis of Small-Scale PV Systems in Brazil,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 10, pp. 2530–2538, 2018.
- [20] A. M. Paudel and H. Sarper, “Economic analysis of a grid-connected commercial photovoltaic system at Colorado State University-Pueblo,” *Energy*, vol. 52, pp. 289–296, Apr. 2013.
- [21] F. Monchy, *A Função da Manutenção- Formação para Gerência da Manutenção Industrial*. São Paulo: Ebras / Durban, 1989.
- [22] V. MIRSHAWKA and N. OLMEDO, *Manutenção - combate aos custos na não eficácia - a vez do Brasil*. São Paulo: Makron Books, 1993.
- [23] A. Kardec and J. Nascif, *Manutenção: Função Estratégica*, 3rd ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- [24] D. L. de Figueiredo, “Indicadores de performance: um enfoque na gestão da manutenção,” in *Simpósio de Engenharia de Produção*, 2017.
- [25] Brasil, “Decreto N° 5.163 de 30 de julho de 2004 (Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências),” *Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos*. Brasília, 2004.
- [26] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Regras de Comercialização,” *CCEE*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ccee.org.br/>. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [27] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Razão de Ser,” *CCEE*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ccee.org.br/>. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [28] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado-CCEAR por Quantidade Produto 2025 / 2044 (Solar Fotovoltaica) - Anexo II ao Edital de Leilão N° 04/2019,” *ANEEL*. 2019.
- [29] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa N° 846/2019 (estabelece procedimentos, parâmetros e critérios para a imposição de penalidades aos agentes do setor de energia elétrica e dispõe sobre diretrizes gerais da fiscalização da Agência),” *ANEEL*. 2019.
- [30] D. Deb and N. L. Brahmhatt, “Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. October, pp. 0–1, 2017.
- [31] L. Cristaldi *et al.*, “Economic evaluation of PV system losses due to the dust and pollution,” *2012 IEEE I2MTC - Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc.*, pp. 614–618, 2012.
- [32] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Leilões,” *CCEE*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ccee.org.br/>. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [33] A. Comerio, “Avaliação do impacto de sujidade de módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica,” Universidade federal do Espírito Santo, 2019.
- [34] J. Méri Santos and N. C. Reis Júnior, “Caracterização e quantificação de partículas sedimentadas na região da Grande Vitória,” Vitória, 2011.
- [35] J. M. Santos, N. C. Reis, E. S. Galvão, A. Silveira, E. V. Goulart, and A. T. Lima, “Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, no. 27, pp. 22026–22039, Sep. 2017.
- [36] Secretaria dos Recursos Hídricos (Ceará), “Portal Hidrológico do Ceará,” 2019. [Online]. Available: <http://www.hidro.ce.gov.br/reservatorios/volume>. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [37] S. C. S. Costa, “Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012–2015,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 63, pp. 33–62, Sep. 2016.
- [38] S. A. M. Said and H. M. Walwil, “Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance,” *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 328–337, 2014.
- [39] M. A. Shirakawa *et al.*, “Microbial colonization affects the efficiency of photovoltaic panels in a tropical environment,” *J. Environ. Manage.*, vol. 157, pp. 160–167, 2015.
- [40] A. Gholami, A. Saboonchi, and A. A. Alemrajabi, “Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications,” *Renew. Energy*, vol. 112, pp. 466–473, 2017.
- [41] A. Gholami, I. Khazaei, S. Eslami, M. Zandi, and E. Akrami, “Experimental investigation of dust deposition effects on photovoltaic output performance,” *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 346–352, 2018.
- [42] B. R. Paudyal and S. R. Shakya, “Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu,” *Sol. Energy*, vol. 135, 2016.
- [43] Ministério do Trabalho e Emprego and Sindicato das Empresas de Conservação e Asseio do Estado do ES, “CONVENÇÃO COLETIVA DE TRABALHO 2019/2019,” *MTE*, 2019. [Online]. Available: www3.mte.gov.br/sistemas/mediador/Resumo/ResumoVisualizar?nrSolicitacao=MR064368/2018. [Accessed: 21-Apr-2020].
- [44] A. L. Mendes and P. R. L. Bastos, “Os Encargos Sociais Nos Orçamentos Da Construção Civil,” *Rev. TCU*, vol. 32, no. 89, pp. 11–22, 2001.



Leticia C. Gomes nasceu em São Gabriel da Palha - ES/Brasil, em 10 de março de 1995. Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil, em 2020.

Ela foi bolsista do Programa Ciências sem Fronteiras em 2015-2016 na Universidade de Melbourne, Austrália.

Estagiou na Estel Serviços Industriais Ltda - Aracruz/ES - Brasil, na Vale SA, Unidade de Tubarão/ES - Brasil, e na RWE Generation SE / Holanda. Fez Iniciação Científica direcionada ao uso de termografia infravermelha em manutenção preditiva.



Pablo R. Muniz nasceu em Vitória / ES, Brasil, em 1980. Bacharel em Engenharia Elétrica e Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, em 2002 e 2006, respectivamente. Doutor em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, em Salvador-BA, em 2014. Pós-doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (2017).

Atualmente é professor no Instituto Federal do Espírito Santo. Seus interesses de pesquisa incluem eficiência energética, energias renováveis e manutenção preditiva.