

INFLUÊNCIA DE DETERMINADOS PARÂMETROS SOBRE A ENERGIA PRODUZIDA POR UM SISTEMA FOTOVOLTAICO USANDO PROBABILIDADE

PRIMEIRO-NOME E. ÚLTIMO-NOME, SEPARADOS-POR VÍRGULAS, NOMES-INTERMEDIÁRIOS S. ABREVIADOS
(ESTILO: <AUTORES>)

Laboratório, Departamento, Universidade

Endereço para Correspondência

E-mails: em-uma-fonte-de-tamanho-fixo@como-Courier-News (de preferência)

UM AUTOR, SEGUNDO A. UTOR, ASSIM P. O. R. DIANTE

Laboratório de Qualquer Coisa, Depto. de Outra Coisa, Universidade de Algum Lugar

Caixa Postal 6969, 12345-678, Urbanopolis, DO, NOLAND

E-mails: um-autor@acme.com, segundo@acme.com.br, assim@dominio.pais

NÃO INCLUA AUTORES NA VERSÃO QUE SERÁ SUBMETIDA. SOMENTE A VERSÃO FINAL DE ARTIGOS ACEITOS É QUE INCLUIRÃO TODAS AS INFORMAÇÕES DOS AUTORES

Abstract↓ This paper presents an assessment of the cost of the energy produced by a grid connected PV system. The analysis is independent of its total cost and is based in the differences on the amount of energy produced, considering that capital and operational expenditures remain essentially constant throughout the PV system life span. Three PV system parameters were evaluated: albedo, tilt angle and soiling. The analysis is presented on probabilistic bases, and the influence of these parameters is informed together with its probability. Results show that all three parameters have little influence on the amount of energy produced and, consequently, on its cost. Consideration of probability made it possible to distinguish between apparently similar situations. For example, the adoption of different tilt angles and soiling leads to variations of about 7% in the cost of the energy produced. However, it can be observed that one situation has low probability (less than 5%), whilst the other has a high probability (greater than 30%). These results can support important decisions regarding the adoption of procedures to reduce the cost of energy produced.

Keywords↓ Solar Energy, Energy Cost, Probability.

Resumo↓ Este artigo apresenta a avaliação da influência de determinados parâmetros sobre o custo da energia produzida por um SFV conectado à rede. A análise independe do conhecimento dos custos totais do SFV e baseia-se nas diferenças da energia produzida, considerando que os gastos com investimento, operação e manutenção permanecem essencialmente constantes ao longo da vida útil do SFV. Foram avaliados três parâmetros do SFV, a saber: albedo, ângulo de inclinação e grau de sujidade. Toda a análise foi apresentada em bases probabilísticas, associando-se à influência desses parâmetros sobre o custo da energia produzida, a probabilidade para sua ocorrência. Os resultados mostram que todos os três parâmetros têm pouca influência sobre o montante de energia produzida e, conseqüentemente, sobre o custo desta energia. A consideração da probabilidade permitiu distinguir entre situações aparentemente similares. Por exemplo, a adoção de ângulos de inclinação e graus de sujidade diferentes acarretam em variações da ordem de 7% no custo da energia produzida. No entanto, ao se considerar a probabilidade, observa-se que uma situação tem baixa probabilidade de ocorrer (inferior a 5%), enquanto que a outra situação tem elevada probabilidade de ocorrer (superior a 30%). Esses resultados podem subsidiar decisões importantes, referentes à adoção de procedimentos visando reduzir o custo da energia produzida.

Palavras-chave↓ Energia Solar, Custo da Energia, Probabilidade.

1 Introdução

O custo da energia produzida por um sistema solar fotovoltaico (SFV) depende da energia produzida e dos gastos incorridos durante o projeto, a construção e a operação do SFV. Em princípio, os custos podem ser considerados aproximadamente constantes, uma vez que uma grande parte corresponde ao investimento inicial, referente à aquisição e instalação do SFV, enquanto que uma outra parte, muito menor, corresponde às despesas associadas à sua operação e manutenção. Por outro lado, a energia produzida é função de vários fatores, na sua maioria dependentes de escolhas e soluções adotadas durante a fase de concepção e execução do projeto do SFV. Além da própria tecnologia

escolhida para os módulos fotovoltaicos, podem-se citar: orientação e inclinação dos módulos, local de instalação, recurso solar disponível no local de instalação, aspectos meteorológicos (e.g. temperatura, nebulosidade etc.) entre vários outros (e.g. sombreamento, limpeza etc.).

O custo da energia produzida, por sua vez, tem papel estratégico para o empreendimento, uma vez que define a competitividade do SFV nos leilões de energia, bem como a rentabilidade ou o retorno financeiro para os seus investidores. Deste modo, estimar o custo da energia produzida é fundamental desde as primeiras fases de concepção do SFV.

Este artigo apresenta os resultados de um estudo visando estabelecer a influência de determinados parâmetros sobre o custo da energia produzida por um SFV instalado em território brasileiro e

conectado à rede de distribuição de uma concessionária. A partir do custo da energia produzida em um caso base, estabelecido para uma configuração e condições específicas, avaliou-se a influência de três parâmetros: albedo, ângulo de inclinação e grau de sujidade.

Os resultados obtidos mostram que os três parâmetros avaliados têm pequena influência no custo da energia produzida (i.e. inferior a 10%). Dos três parâmetros, o albedo mostrou a menor influência, pois variações de até 250% no albedo provocam variações inferiores a 1% no custo da energia produzida. Embora a influência do ângulo de inclinação e do grau de sujidade sejam da mesma ordem de grandeza, o tratamento probabilístico introduzido permitiu identificar que as perdas causadas pelo acúmulo de sujeira têm probabilidade muito maior de ocorrer. Assim, caso se decida fazer algum investimento para reduzir o custo da energia produzida, é melhor direcionar os recursos disponíveis para a manutenção da limpeza dos módulos do que para a alteração dos ângulos de inclinação.

2 O SFV e o Custo da Energia

Apresentam-se a seguir uma breve descrição do SFV, bem como dos procedimentos adotados para a determinação do custo da energia produzida de modo a comparar as configurações adotadas.

2.1 SFV – Configuração adotada

O SFV utilizado no presente estudo baseia-se no projeto preliminar elaborado para a usina Jaíba Solar, cuja construção estava prevista no projeto de pesquisa “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira – Jaíba Solar”, aprovado na Chamada P&D Estratégico nº 013/2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). A usina Jaíba Solar seria instalada na cidade de Jaíba, localizada no norte do estado de Minas Gerais. Ela contemplava a instalação de 3 MWp de potência fotovoltaica, distribuída entre as seguintes tecnologias: 1,2 MWp de painéis planos com ângulo de inclinação fixo; 1,2 MWp de painéis planos com ângulo de inclinação variável manualmente; 300 kWp de painéis planos com seguidores de sol; e 300 kWp de painéis com concentradores de diversas tecnologias (Frontin et. all., 2017).

Com o objetivo de obter resultados muito próximos de valores reais, os estudos foram realizados com base na configuração definida no projeto básico da usina fotovoltaica Jaíba Solar (Frontin et. all., 2017), considerando inclusive as condições meteorológicas do local previsto para sua instalação. No entanto, para generalizar os resultados e facilitar a sua aplicação em outros SFV, adotou-se a potência instalada como 1 MWp. Todos os módulos são de silício policristalino, com uma única

inclinação ao longo do ano. As demais tecnologias (i.e. seguidores de sol e concentradores) não foram consideradas nas simulações.

2.2 SFV – Custo da Energia Produzida

De acordo com Barbosa (2015), o custo nivelado da energia (LCOE, do inglês Levelised Cost of Electricity) é usualmente empregado para avaliar a viabilidade econômica de empreendimentos energéticos. Calculado em [R\$/kWh], o LCOE é obtido pelo quociente entre o custo total e a energia produzida. Ele indica o custo da energia ou a receita mínima a ser obtida por kWh para cobrir as despesas incorridas na construção, operação e manutenção do SFV. Branker et. all. (2011), apud Barbosa (2015), propõe a equação a seguir para o cálculo do LCOE, onde os custos e a energia devem ser considerados ao longo de toda a vida útil do SFV. Evidentemente, no cômputo do custo total, o valor temporal dos investimentos e despesas devem ser devidamente considerados. Usualmente especificado para um determinado período (e.g. dia, mês, ano), o LCOE foi calculado em valores médios diários a partir de cálculos determinísticos, correspondentes às configurações mais conservativas.

$$LCOE = \frac{\text{Custo Total}}{\text{Energia Produzida}} \quad (1)$$

Os gastos incorridos na construção, instalação, operação e manutenção de um SFV podem ser divididos em duas parcelas: CAPEX (do inglês Capital Expenditure) e OPEX (do inglês Operational Expenditure). A primeira parcela, CAPEX, corresponde a todos os gastos necessários para construção do SFV, desde a sua concepção até a entrada em operação. Esses gastos correspondem aos estudos necessários, licenças, aquisição de terreno etc. até a compra dos equipamentos principais. A segunda parcela, OPEX, corresponde aos gastos associados com a operação e manutenção do SFV. Via de regra, os SFV apresentam OPEX muito menor do que o CAPEX, pois não há gastos relativos à produção de energia (e.g. combustível) e os procedimentos de manutenção são relativamente simples.

Os custos associados aos SFV são conhecidos ou estimados com grande precisão após o projeto básico do SFV. Além disso, ao término da construção do SFV, o valor dos investimentos realizados é conhecido em detalhes. Resta apenas o valor dos custos associados à operação e manutenção, que representam uma parte bem menor das despesas associadas ao SFV. O valor desses custos pode ser estimado com grande precisão. O tempo de vida útil de um SFV depende essencialmente da durabilidade dos módulos fotovoltaicos que, por sua vez, depende das técnicas e tecnologias empregadas na construção das células e montagem dos módulos. Para os módulos de silício, é usual considerar-se a vida útil

em 25 anos, que corresponde à garantia oferecida pela maioria dos fabricantes.

Na avaliação da influência de determinados parâmetros no custo da energia produzida pelo SFV, a fim de facilitar a comparação e aplicação dos resultados, adotou-se o custo da energia produzida no caso base como valor de referência.

Assim, o custo da energia produzida em qualquer uma das configurações analisadas é fornecido como uma porcentagem do custo da energia obtido no caso base. A avaliação do custo da energia produzida é feita com base em valores diários. Considerando a natureza estocástica dos fatores que influenciam a produção de energia, definiu-se um procedimento para ordenar os valores da energia produzida e identificar a probabilidade a eles atribuída.

O objetivo principal deste trabalho é determinar a influência de alguns parâmetros de projeto sobre o custo da energia produzida [R\$/kWh]. Considerando a hipótese de que os investimentos são conhecidos e que as despesas com operação, manutenção etc. são determinadas com precisão aceitável, uma análise financeira simples permite obter uma série temporal de valores fixos, válida por todo o período de vida útil do SFV. Assim, a partir dos montantes de energia produzidos nos mesmos períodos, obtém-se o custo da energia [R\$/kWh].

Evidentemente, o custo da energia produzida tem um valor diário (valor médio) e este valor varia ao longo do ano, seguindo as variações na energia produzida pelo SFV. Em consequência, as curvas de probabilidade associadas aos montantes de energia produzida (Cf. item 3.6) transformam-se em curvas de probabilidade associadas aos custos desta energia.

Embora esse procedimento não permita determinar o custo da energia produzida sem os valores financeiros associados à construção, operação e manutenção do SFV, ele permite comparar configurações e determinar a influência de parâmetros sobre os custos da energia produzida. Evidentemente, qualquer decisão estratégica pode ser tomada com fundamento na probabilidade de a usina fornecer um determinado montante de energia diariamente, como por exemplo: o montante a ser negociado nos leilões de energia.

3 Material e Métodos

A seguir, apresentam-se os principais materiais e procedimentos adotados durante a execução dos estudos de avaliação conduzidos neste artigo. As hipóteses adotadas são apresentadas e justificadas.

3.1 Recurso Solar

De acordo com (Villalva, 2012): “A quantidade de energia recebida do Sol diariamente em uma certa localidade é diferente em cada dia do ano e naturalmente é maior no verão e menor no inverno por causa da duração dos dias. Há ainda fatores

atmosféricos que podem influenciar o trajeto dos raios solares até o solo e também contribuem para aumentar ou diminuir a energia solar disponível em cada dia do ano em uma determinada localidade.” Considerando a disponibilidade de uma vasta bibliografia sobre o tema, o artigo não apresenta detalhadamente todos os aspectos relativos ao recurso solar (Pinho et. all., 2014). Citam-se apenas os parâmetros que fazem parte das avaliações realizadas.

3.2 PVSyst – Ferramenta computacional

As simulações do SFV foram conduzidas com o PVSyst®, versão 6.62. O PVSyst® é uma ferramenta computacional dedicada ao estudo, dimensionamento e análise de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados, bem como dos sistemas para bombeamento e para redes em corrente contínua.

Modelou-se um sistema de aproximadamente 1 MWp (Cf. item 2.1), com 2 inversores e um total de 3.927 módulos arranjados em 231 strings em paralelo com 17 módulos em série em cada string, conectados a dois inversores (Tab. 1.).

3.3 Azimute ou Ângulo Azimutal

É o ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico (Iqbal, 1983). De um modo geral, para SFV instalados no hemisfério sul, adota-se o valor zero para o ângulo azimutal. Este foi o valor adotado em todas as simulações.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para modelar a GDFV.

Parâmetro	Valor Utilizado
Latitude	-15.34° S
Longitude	-43.68° W
Altitude	482 m
Albedo	0.15
Dados meteorológicos	Meteonorm 7.1
Ângulo de inclinação	20°
Azimute	0°
Módulo	Silício policristalino 255 W
Modelo	Modelo YL255P-29b
Quantidade total	3.927
Quantidade de strings	231 (em paralelo)
Quantidade por string	17 (em série)
Potência nominal	1001 kWp
Modelo do inversor	570 TL M300 - 574 kWac
Inversores	2 (total)

3.4 Ângulo de inclinação dos módulos

A captação de energia pelos módulos fotovoltaicos está estreitamente relacionada com o seu posicionamento em relação ao sol, definida pelos ângulos de inclinação e azimute. Considerando que a trajetória do sol vista de um ponto fixo na superfície da Terra varia ao longo do ano, a escolha dos ângulos de inclinação e azimute influencia na produção de energia do SFV. A adoção de um ângulo de inclinação fixo para os módulos implica em um compromisso entre os diferentes valores mensais da capacidade de captação dos raios solares e da energia produzida. Assim, de um modo geral, o ângulo de inclinação dos módulos é determinado buscando-se

maximizar a produção média de energia ao longo do ano.

Com o objetivo de melhorar o desempenho do SFV, podem-se adotar dois ou mais valores diferentes para o ângulo de inclinação dos módulos, seguindo-se sempre o objetivo de maximizar a produção de energia no período correspondente (e.g. inverno e verão). As tecnologias desenvolvidas atualmente já permitem oferecer SFV com ajuste contínuo e automático desses dois ângulos ao longo de todos os dias do ano.

Para o SFV em estudo, considerou-se que os ângulos de inclinação e azimute são fixos. No entanto, é possível ajustá-los manualmente para diferentes posições ao longo do ano. A cidade de Jaíba situa-se a uma altitude de 482 m, nas seguintes coordenadas: latitude -15,34o (sul) e -43,86o (oeste).

De um modo geral, a literatura recomenda adotar o ângulo de inclinação dos módulos igual ao valor da latitude para latitudes inferiores a 20o, e igual à latitude mais 5o, para latitudes superiores a 20o. A ferramenta computacional PVsyst® tem uma função que permite determinar o ângulo de inclinação ótimo para os módulos, considerando um único valor fixo ou vários valores fixos ao longo do ano. Essa função foi utilizada para determinar os valores de ângulo de inclinação dos módulos nas simulações realizadas. Os resultados indicaram que o melhor valor para o ângulo de inclinação dos módulos é 20°.

3.5 Albedo

O albedo está associado à capacidade de reflexão de uma superfície determinada. A literatura apresenta valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfície (Tab. 1) (Pinho et. all., 2014). De acordo com o seu projeto básico, a usina Jaíba Solar seria instalada em um terreno desmatado, sem qualquer tipo de tratamento para a sua superfície. No entanto, pode-se considerar a possibilidade de que todo o terreno seja plantado com grama ou ainda coberto com asfalto ou concreto. Esses tratamentos aplicados ao solo alterariam de modo significativo o coeficiente de albedo.

Tabela 2 – Albedo para determinados tipos de superfície.

Superfície	Albedo
Gramado	0,18 – 0,23
Gramma seca	0,28 – 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo	0,55
Concreto (construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 – 0,9

3.6 Grau de sujidade

O acúmulo de sujidades (e.g. poeira, dejetos etc.) sobre a superfície dos módulos influencia diretamente a produção de energia, uma vez que bloqueia parcialmente a luz solar incidente sobre as células fotovoltaicas. A incidência de chuvas, associada à adoção de uma inclinação mínima para os módulos (Cf. item 3.3) promovem a remoção de

grande parte dos materiais acumulados (e.g. principalmente poeira).

No entanto, em função das características do local de instalação do SFV, pode ser necessária a criação de rotinas e procedimentos de limpeza para garantir a produção de energia nos níveis previstos no projeto. Considerando que as rotinas e procedimentos de limpeza ocorrerão em períodos específicos ao longo do ano, a influência do acúmulo de sujidades sobre o custo da energia produzida foi avaliada para dois graus distintos: 5% e 7,5%.

3.7 Determinação da probabilidade

Em todas as simulações, determinaram-se 365 valores, correspondentes ao valor médio diário da grandeza analisada. Determina-se a probabilidade associada à ocorrência de um determinado valor colocando-se todos os resultados da simulação em ordem crescente.

Em seguida, calcula-se a porcentagem do número de resultados em relação ao total (i.e. 365 valores). Por exemplo, para se determinar o valor correspondente a P95 (i.e. valor que abrange 95% de todos os resultados), basta identificar o valor correspondente à abscissa de número 347 (i.e. $0,95 \times 365 = 346,75$) no conjunto ordenado de valores. De modo similar, se 83 valores são superiores a um valor determinado, pode-se afirmar que a probabilidade associada a este valor é 22,7% (i.e. $83 \div 365 = 0,227$).

4 Resultados e Discussão

Considerando-se o local e as condições de instalação do SFV, bem como os parâmetros definidos para a sua operação, obtém-se a curva diária de produção de energia em kWh (Fig. 1). Considerando, ainda, que a média diária da energia produzida varia muito ao longo do ano, torna-se difícil trabalhar com esses valores, principalmente quando se deseja fazer estudos comparativos entre várias configurações.

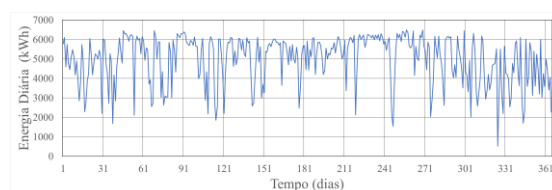


Figura 1 – Produção diária de energia – Valores Médios.

Uma solução simples seria trabalhar com o valor médio da energia produzida diariamente ao longo de um ano. Por exemplo, para o sistema em estudo, a média dos valores diários corresponde a aproximadamente 4.967 kWh. Mas este valor médio também não é de grande utilidade para os estudos, uma vez que a sua representatividade é bastante limitada, mesmo se acrescentando a informação referente ao desvio padrão, que no caso em questão

vale aproximadamente 1.234 kWh. De fato, o desvio padrão elevado demonstra que a dispersão dos valores entorno da média é realmente bastante elevada.

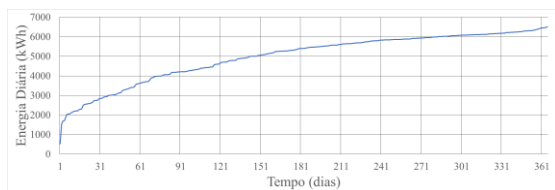


Figura 2 – Produção diária de energia
Valores Médios Ordenados.

4.1 Influência do albedo

A influência do albedo sobre o custo da energia produzida foi avaliada para três valores distintos: 0,15 (solo descampado), 0,30 (grama seca) e 0,55 (concreto novo). Simulações realizadas mostram que o valor do custo da energia produzida praticamente não se altera em função da variação do albedo (Fig. 3). De fato, os valores são tão próximos que as curvas se confundem.

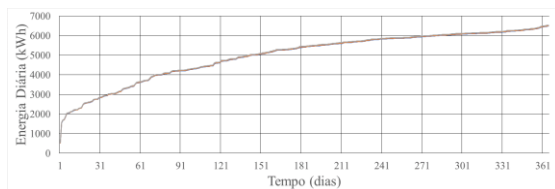


Figura 3 – Produção diária de energia em função do albedo
Valores Médios Ordenados.

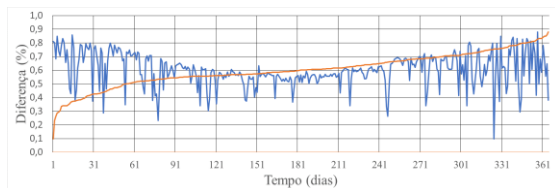


Figura 4 – Produção diária de energia.
Diferenças considerando albedo de 0,15 e 0,55. Valores diários (curva azul) e diários ordenados (curva laranja) em por cento do maior valor de energia produzida.

Para melhor demonstrar a pequena influência do albedo (Fig. 4), calculou-se a diferença entre a curva de produção diária de energia correspondente ao maior albedo (i.e. 0,55 para concreto novo) e a curva de produção diária de energia do caso base (i.e. 0,15 para solo descampado).

Os resultados mostram que variações do albedo entre 0,15 e 0,55 (i.e. de mais de 250%) afetariam em menos de 1% o custo da energia produzida, como também não teriam qualquer efeito sobre a distribuição das probabilidades dos diferentes custos diários ao longo do ano.

4.2 Influência da inclinação

Considerando que o ajuste de milhares de painéis várias vezes ao longo do ano não seria

prático, a influência desse parâmetro sobre o custo da energia produzida foi avaliada para dois valores distintos de inclinação: 10° no verão e 40° no inverno, mantendo-se o azimuth fixo e igual a zero graus (Cf. item 3.3). Simulações realizadas mostram que o valor da energia produzida (e consequentemente o seu custo) se altera muito pouco em função da variação do ângulo de inclinação (Fig. 5). De fato, os valores são tão próximos que as curvas praticamente se confundem.

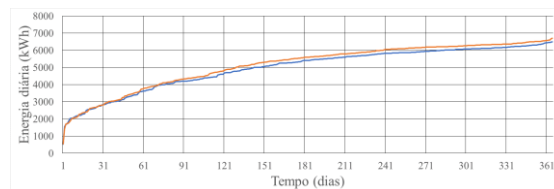


Figura 5 – Produção diária de energia para diferentes inclinações.
Valores Médios Ordenados. Energia produzida com um ângulo (curva azul) e dois ângulos (curva laranja).

Para melhor demonstrar a pequena influência do ângulo de inclinação, calculou-se a diferença entre a curva de produção diária de energia correspondente a duas inclinações diferentes ao longo do ano e a curva de produção diária de energia do caso base (i.e. 20° o ano todo). Os valores são apresentados em porcentagem do maior valor de energia produzida (Fig. 6).

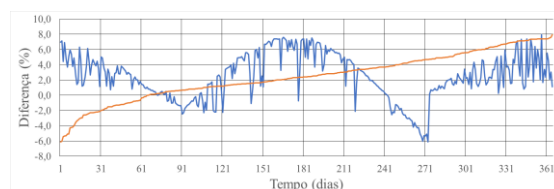


Figura 6 – Produção diária de energia.
Diferenças considerando uma e duas inclinações fixas. Valores diários (curva azul) e diários ordenados (curva laranja) em por cento do maior valor de energia produzida.

Observa-se que o montante anual de energia produzida é maior quando se adota inclinações diferentes para os meses de inverno e de verão do que quando se mantém uma única inclinação ao longo de todos os meses do ano (Fig. 6). No entanto, deve-se destacar que, para alguns períodos do ano, o SFV com inclinação única produz mais energia do que o SFV com duas inclinações.

De fato, a probabilidade de isso acontecer é menor do que 20%. Por outro lado, observa-se que, para a grande maioria dos casos, o ganho na produção de energia é inferior a 5%. Assim, a probabilidade de se obter ganhos superiores a 5% no custo da energia produzida é da ordem de 20%. E, para se obter ganhos superiores a 7% no custo da energia produzida, a probabilidade é inferior a 5%. Portanto, há que se considerar os custos envolvidos na tarefa de fazer dois ajustes por ano no ângulo de inclinação dos módulos, a saber: equipe treinada, logística etc. para compará-los com os ganhos no custo da energia produzida, considerando

adequadamente as probabilidades associadas a cada caso.

4.3 Influência do grau de sujidade

Conforme estabelecido, a influência do acúmulo de sujidades sobre o custo da energia produzida foi avaliada para dois graus distintos: 5% e 7,5% (Cf. item 3.5). Simulações realizadas comprovam o que se pode inferir facilmente, ou seja quanto maior o grau de sujidade, menor o montante de energia produzida (Fig. 7) e, portanto, maior o custo dessa energia. Porém, mais uma vez, o custo da energia produzida se altera muito pouco em função do grau de sujidade. De fato, os valores são tão próximos que as curvas praticamente se confundem.

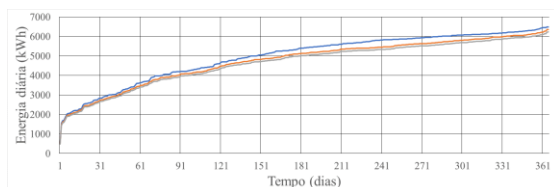


Figura 7 – Produção diária de energia para diferentes graus de sujidade. Valores Médios Ordenados. Graus de sujidade 0° (curva azul); 5% (curva laranja) e 7,5% (curva cinza).

A exemplo do que foi feito para as outras análises, para melhor demonstrar a pequena influência do grau de sujidade, calculou-se a diferença entre a curva de produção diária de energia correspondente à configuração com o maior grau de sujidade e curva de produção diária de energia do caso base (i.e. sem sujidade). Os valores são apresentados em porcentagem do maior valor de energia produzida (Fig. 8).

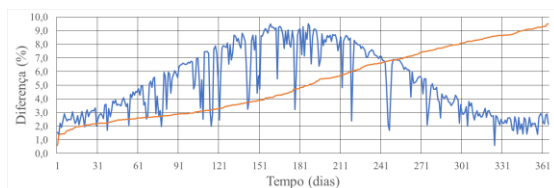


Figura 8 – Produção diária de energia. Diferenças considerando dois graus de sujidade. Valores diários (curva azul) e diários ordenados (curva laranja) em por cento do maior valor de energia produzida.

Observa-se que a redução na produção de energia atinge 5% (cinco por cento) para muitos casos. Assim, a probabilidade de ocorrerem aumentos superiores a 5% (cinco por cento) no custo da energia produzida é da ordem de 50%. E, para que ocorram aumentos superiores a 7% no custo da energia produzida, a probabilidade é superior a 30%. Portanto, o grau de sujidade dos módulos tem influência maior sobre o custo da energia produzida. Do mesmo modo, há que se considerar os custos envolvidos na tarefa de limpeza dos módulos, a saber: equipe treinada, logística etc. para compará-los com as perdas no custo da energia produzida, considerando adequadamente as probabilidades associadas a cada caso.

5 Conclusões

Este artigo apresentou uma avaliação da influência de determinados parâmetros sobre o custo da energia produzida por um SFV conectado à rede. Embora os gastos com investimento, operação e manutenção não estejam especificados, a influência desses parâmetros sobre o custo da energia foi avaliada por meio da comparação com a configuração adotada como caso base.

A comparação dos custos foi possível ao se assumir a hipótese de que as despesas com a construção, operação e manutenção permanecem praticamente constantes ao serem transformadas em uma série uniforme ao longo da vida útil do SFV. Foram avaliados três parâmetros do SFV, a saber: albedo, ângulo de inclinação e grau de sujidade.

Os resultados mostraram que todos os três parâmetros têm pouca influência sobre o montante de energia produzida e, consequentemente, sobre o custo desta energia. Em todas as simulações realizadas, as variações sobre o custo da energia produzida são inferiores a 10%.

Toda a análise foi apresentada em bases probabilísticas. Assim, além da influência desses parâmetros sobre o custo da energia produzida, atribuiu-se a esta variação uma probabilidade para sua ocorrência. Embora a adoção de duas inclinações diferentes ao longo do ano possa produzir ganhos da ordem de 7% no custo da energia produzida, demonstrou-se que a probabilidade de esses ganhos ocorrerem é inferior a 5%.

Por outro lado, graus de sujidade de 7,5% podem produzir perdas da mesma ordem de grandeza no custo da energia produzida (i.e. 7%), porém com uma probabilidade de ocorrerem superior a 30%. Esses resultados podem subsidiar decisões importantes, referentes à adoção de procedimentos visando reduzir o custo da energia produzida. É importante realizar mais simulações a fim de avaliar a influência de outros fatores ou parâmetros sobre o custo da energia produzida e determinar a probabilidade a eles associada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) pelo apoio dado à realização das pesquisas.

Referências Bibliográficas

Barbosa, L.K.P., 2015. Análise técnico-econômica acerca de diferentes sistemas de geração de energia solar fotovoltaica com base no projeto Jaíba Solar. Trabalho de conclusão de Curso. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica, pp. 139.

- Branker, K., Pathak, M.J.M., Pearce, J.M., 2011. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 4470–4482.
- Frontin, S.O. *et al.*, 2017 (organizadores). *Usina fotovoltaica Jaíba Solar – Planejamento e Engenharia*. Brasília, Teixeira Gráfica e Editora Ltda. pp. 532.
- Pinho, J.T., Galdino, M.A., 2014 (organizadores). *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. CEPEL-CRESESB, pp. 530.
- Villalva, M. G.; Gazoli, J. R., 2012. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. São Paulo, Érica, pp. 224.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction To Solar Radiation*. Amsterdã, Academic Press, pp. 408.