

## **Avaliação da produção de energia de um sistema fotovoltaico instalado na Universidade Presbiteriana Mackenzie – Campus Higienópolis**

### **Evaluation of energy production from a photovoltaic system installed at Mackenzie Presbyterian University – Campus Higienópolis**

DOI:10.34117/bjdv7n7-186

Recebimento dos originais: 05/06/2021

Aceitação para publicação: 07/07/2021

#### **G. T. Cozaciuc**

Engenheiro

Universidade Presbiteriana Mackenzie - EE

E-mail: gtozaciuc@gmail.com

#### **T.M. M Passos**

Engenheiro

Universidade Presbiteriana Mackenzie - EE

E-mail: thiagommpassos@hotmail.com

#### **P.F.M. Sampaio**

Engenheiro

Universidade Presbiteriana Mackenzie - EE

E-mail: pedrosampaio@hotmail.com

#### **José Pucci Caly**

Professor Doutor

Universidade Santa Cecília

E-mail: josecaly@unisanta.br

#### **Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa**

Professora Doutora

Universidade Presbiteriana Mackenzie - CCT

E-mail: gomes.mtms@gmail.com

#### **Daniela Helena Pelegrine Guimarães**

Professora Doutora

Universidade de São Paulo - USP

E-mail: dhguima@usp.br

#### **Míriam Tvrzská de Gouvêa**

Professora Doutora

Universidade Presbiteriana Mackenzie - EE

E-mail: miriam.gouvea@mackenzie.br

## **RESUMO**

Embora, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), desde 2016 mais de 40% da energia produzida no Brasil seja de fontes renováveis, e apesar do fluxo de irradiação solar sobre o Brasil ser elevado, menos de 0,04% da energia produzida no

Brasil vinha da energia solar em 2016 e atualmente este percentual ainda é baixo, sendo da ordem de 2%. Contribui para isto, não apenas a abundância de recursos hídricos, mas o fato de que a obtenção de energia de placas fotovoltaicas ser tida como cara e complexa. Visando a melhor compreender as barreiras na implementação de painéis fotovoltaicos para a produção de energia elétrica e de modo a promover a ampliação de seu uso, a Universidade Presbiteriana Mackenzie instalou na laje dos prédios 31 e 33 do campus de Higienópolis em São Paulo, 82 módulos de painéis solares do fabricante Canadian Solar, os quais foram instalados em 4 diferentes arranjos, ocupando uma área de 132 m<sup>2</sup> da laje. Cada arranjo é composto ou de placas de diferentes tipos ou é formado por placas instaladas com diferentes inclinações, ou seja, com diferentes ângulos de azimute. Neste trabalho, comparam-se os dados medidos de produção de energia elétrica durante os meses de setembro a novembro de 2016 com os valores preditos pelo simulador *BlueSol* 3.0. A irradiação solar sobre a laje também foi medida. A diferença entre os valores simulados e medidos para a produção de energia nos meses de setembro e outubro foi compatível com a diferença de irradiação solar real e considerada pelo *software* e também com a limpeza da superfície das placas efetuada no mês de outubro. Observou-se uma maior discrepância entre os valores simulados e preditos no mês de novembro, evidenciando de que há outros fatores, como possivelmente a temperatura das placas e hipóteses de modelagem que causam a divergência entre valores simulados e medidos. Contudo, os desvios não foram elevados, sendo da ordem de no máximo 5%. Neste trabalho, usou-se o *software* para mostrar como a produção de energia elétrica poderia ser aumentada, obtendo-se um aumento de 6% na produção alterando-se apenas o arranjo dos painéis.

**Palavras-chave:** Células fotovoltaicas, simulação, medição da produção de energia.

#### ABSTRACT

Although since 2016 more than 40% of the energy produced in Brazil comes from renewable sources and in spite of the fact that Brazil has a large solar insulation, less than 0,04% of the energy produced came from solar energy in 2016. Today this percentage increased to about 2%, which is still not much. One fact that contributes to this scenario is the abundance of hydric resources in Brazil. In general, energy produced from photovoltaic cells is regarded as being expensive or complex. In order to better understand the drawbacks of implementing solar photovoltaic panels for electricity production and to promote their usage, University of Mackenzie installed on top of the buildings 31 and 33 at campus Higienópolis in São Paulo, 82 modules of solar panels from Canadian Solar company, installed in 4 different arrangements and occupying 132 m<sup>2</sup> of the roof. Each arrangement has either a collection of different panel types or is installed with different azimuth angles. In this work the measured electricity produced during the months of September, October and November of 2016 is compared with the expected values obtained from simulation, using the commercial simulator *BlueSol*3.0. The solar irradiation on the roof was also measured during this period of time. Difference between the measured and simulated electricity production was compatible with the deviations between the real solar irradiance and the solar irradiance considered in the databank of the simulator for the months of September and October. In October the surface of the solar cells was cleaned, which also contributed to an increase in energy production. The discrepancy observed in November between the measured and predicted energy production showed that there are more factors, like possibly the temperature of the solar panels that affect the prediction of electricity production by a mathematical model. It is noteworthy that deviations were less than 6%. Furthermore, in this paper, it is shown that

simulation can be used to improve the panel arrangement and an increase in energy production of about 6% is shown to be possible.

**Keywords:** Photovoltaic cells, simulation, energy production measurement.

## 1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia elétrica é indispensável ao desenvolvimento de uma nação. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica, o Brasil atingiu em 2014 um consumo de energia equivalente a 345.188.298 MWh, correspondendo a um crescimento médio anual de 2%, sendo que a previsão é que o consumo triplique até 2050 no país [1]. O crescimento da demanda implica na necessidade de maior oferta e, conseqüentemente, a exploração de novas fontes para geração de energia elétrica. Na busca por maior segurança e sustentabilidade e visando reduzir a dependência de condições climáticas e recursos não renováveis, diversas políticas públicas de incentivo à diversificação das matrizes energéticas vêm sendo adotadas ao redor do mundo [2]. A matriz energética brasileira atual é composta por 48,4% de fontes renováveis, colocando-se entre as mais elevadas do mundo, tendo a participação das fontes renováveis aumentado de 7,2% desde 2015 [3, 4].

No Brasil, as usinas hidrelétricas constituem a fonte de energia elétrica mais comum [5]. Entretanto, devido às condições hidrológicas desfavoráveis, a oferta de energia hidráulica vem diminuindo. Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL, a geração de energia a partir de centrais solares fotovoltaicas em novembro de 2015 no Brasil totalizou 25.233 kW, correspondendo a 0,02% da capacidade nacional de geração de energia. Atualmente, a geração de energia elétrica fotovoltaica anual é da ordem de 10,7 TWh [4]. Ou seja, o Brasil ainda pouco produz energia elétrica a partir da energia solar, se comparado à Alemanha, a qual em 2015 produziu 34,95 TWh de energia a partir da energia solar, o que correspondia a cerca de 18,8% da energia elétrica solar fotovoltaica produzida no planeta. A produção citada correspondia a 10% da energia elétrica consumida no país, o qual possui irradiação solar máxima média anual de 1250 kWh/m<sup>2</sup>, valor, este, inferior à irradiação de 1642 kWh/m<sup>2</sup> registrada na área brasileira considerada de menor potencial [1]. O potencial para produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos no Brasil é subutilizado e apresenta dificuldades em concorrer com os métodos de produção de energia convencionais, principalmente pelo seu alto custo de implantação, sua baixa eficiência e problemas durante a concepção do projeto, instalação e manutenção do sistema [6]. Nesse panorama, torna-se evidente a necessidade

de se entender os processos [7] que influenciam no rendimento da transformação da radiação solar em energia elétrica de modo que se assegure que a tecnologia fotovoltaica se torne uma alternativa viável tanto do ponto de vista técnico como do ponto de vista econômico. Neste contexto, insere-se o presente trabalho, em que se acompanhou no ano de 2016 a implementação de um projeto de geração de energia elétrica por células fotovoltaicas no campus Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie, avaliando-se a produtividade do sistema, comparando-se os valores de energia produzidos com os preditos e propondo-se uma otimização para o sistema.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é comparar os dados medidos de produção de energia elétrica por células fotovoltaicas no campus Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie durante os meses de setembro a novembro de 2016 com os valores preditos pelo simulador *BlueSol* 3.0.

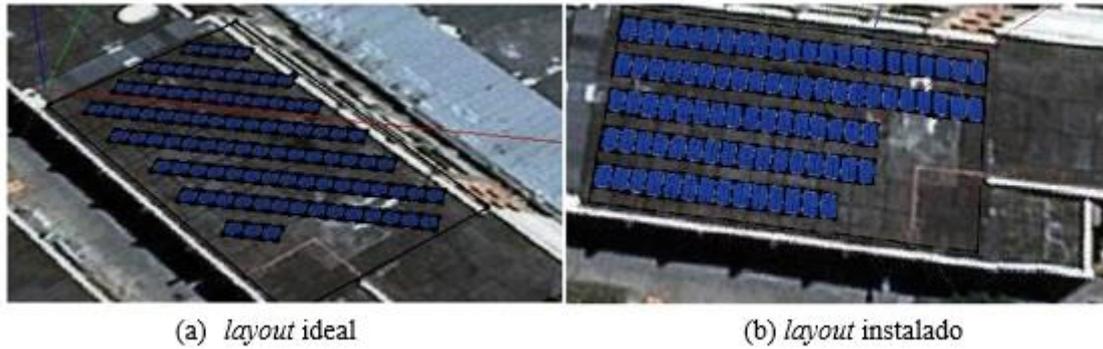
## 3 METODOLOGIA

No campus Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie foi implantado um projeto de geração de energia elétrica fotovoltaica na laje de cobertura dos prédios 31 e 33 visando entender o funcionamento de sistemas de geração de energia por células fotovoltaicas, à divulgação do uso de energia solar e a possibilitar a implementação de variações no sistema para um aumento de produtividade.

A escolha do local para a instalação das células fotovoltaicas se deveu à disponibilidade de espaço para a implantação do sistema. O local escolhido para a instalação das placas fotovoltaicas não é ideal para a instalação de um sistema de geração de energia a partir da energia solar porque existem sombreamentos de prédios adjacentes e, adicionalmente, a disposição do *layout* ideal dos painéis impossibilitaria a livre passagem, perdendo-se o efeito didático de apresentar o sistema aos alunos do Mackenzie.

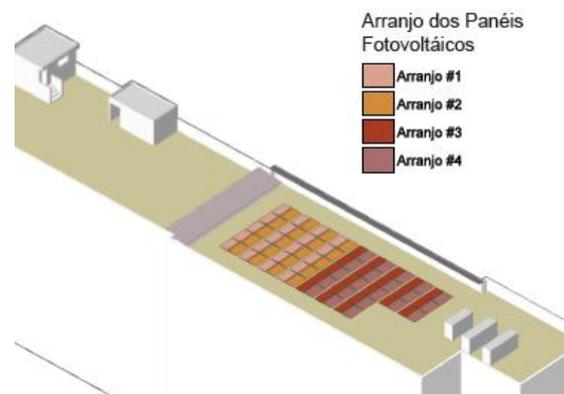
O projeto do sistema de geração de energia foi primeiramente idealizado com ângulo de azimute de  $0^\circ$  para a obtenção de maior radiação incidente nas placas. Contudo, a instalação com tal ângulo propicia um difícil cabeamento, efeitos de sombreamento devido à proximidade das bordas do terraço e da existência de prédios próximos, dificuldade na circulação de pessoas, e conseqüentemente dificultaria a visualização e limitaria a segurança de visitantes. Sendo assim, o sistema foi instalado com ângulo de azimute de  $40^\circ$  conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Desenho dos *layouts* ideal e instalado.



A usina de geração de energia fotovoltaica instalada no campus de Higienópolis do Mackenzie, possui uma área total de 132 m<sup>2</sup> e uma capacidade nominal de 20,8 kWp. Para isso, conta com 82 módulos dispostos em 4 arranjos diferentes, sendo 40 módulos nos arranjos denominados 1 e 2 e 42 módulos nos arranjos 3 e 4. Os arranjos se diferenciam pelos modelos de painéis, ângulo de azimute e por serem coletados em cabeamentos independentes, sendo os arranjos 1 e 2 ligados a um mesmo inversor e os arranjos 3 e 4 ligados a inversores próprios. O sistema de arranjos pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Disposição dos arranjos nos prédios 31 e 33.



Nos arranjos 1, 2 e 3, foram usados módulos da marca Canadian Solar, modelo CS6P-255P policristalino. Já no arranjo 4, foi usado o modelo CS6P-250P, também da marca Canadian Solar. Em cada arranjo 1 e 2, foram instalados 20 módulos fotovoltaicos, em série, todos com uma inclinação de 10° em relação à horizontal, e um ângulo de azimute igual a 40° para os arranjos 1 e 3, e 220° para os arranjos 2 e 4 e, desta forma, em cada um destes arranjos obtêm-se tensões em máxima potência e de circuito aberto nos valores nominais dados,

respectivamente, por 604 V e 748V. O arranjo 3 tem exatamente as mesmas características do arranjo 1, porém conta com um número maior de módulos. São 21 módulos, o que proporciona uma tensão de operação de máxima potência um pouco maior, de 634 V, e tensão de circuito aberto de 785 V. O quarto arranjo possui 21 módulos instalados em série e na mesma posição do arranjo 2. O inversor utilizado para os arranjos 1 e 2 é da marca ABB de modelo PVI-10.0-TL-OUTD-FS. Já os inversores dos arranjos 3 e 4 são do modelo TRIO-5.8-TL-OUTD-S, também da marca ABB.

Como, durante o ano de 2016, o sistema de aquisição de dados encontrava-se inoperante, os dados de produção foram anotados manualmente dos *displays* dos inversores e entre os dias 31/08/2016 e 01/12/2016 foram coletados dados de produção de energia três vezes ao dia, nos horários 12h, 15h e 17h.

No local onde estão instalados os painéis solares existe uma estação meteorológica da Universidade Presbiteriana Mackenzie, com um pirômetro CM3 da marca Adolf Thies GmbH & Co. KG. Assim, a fim de verificar a influência da irradiação solar na produção de energia elétrica, foram obtidos do programa supervisor da estação meteorológica dados de irradiação solar. A integração numérica das medidas de fluxo de irradiação permite auferir a irradiação solar média.

#### 4 RESULTADOS

A Tabela 1 mostra as medidas de produção mensal total obtidas a partir dos dados disponibilizados pelo display para os 3 inversores nos meses de setembro a novembro de 2016. Nesta tabela, documentam-se também as produções estimadas pelo programa *BlueSol* 3.0. O programa *BlueSol* 3.0 não fornece a produção diária, e sim produções médias mensais diárias. Os dados coletados dependem de condições climáticas instantâneas. Já o *software BlueSol* 3.0 considera uma média histórica de irradiação solar mensal. Assim, discrepâncias entre as medições e os valores simulados por este software são esperadas.

Tabela 1: Comparação dos valores médios diários mensais de produção medidos e simulados.

Mês	Produção medida (kWh)	Produção estimada (kWh)	Desvio percentual (%)
Setembro	72,7	78,1	7
Outubro	83,9	89,7	6,5
Novembro	80,5	97,8	17,7

A fim de verificar a influência de erros na predição da irradiação solar na produção de energia elétrica pelo programa *BlueSol* 3.0, foram obtidos do programa supervisor

da estação meteorológica dados de irradiação solar. A Tabela 2 relaciona o valor de irradiação utilizado pelo software *BlueSol* 3.0 e a média medida de irradiação solar obtida pela estação meteorológica nos meses estudados.

Tabela 2: Comparação dos valores médios de fluxo de irradiação solar medidos e utilizados pelo software *BlueSol* 3.0.

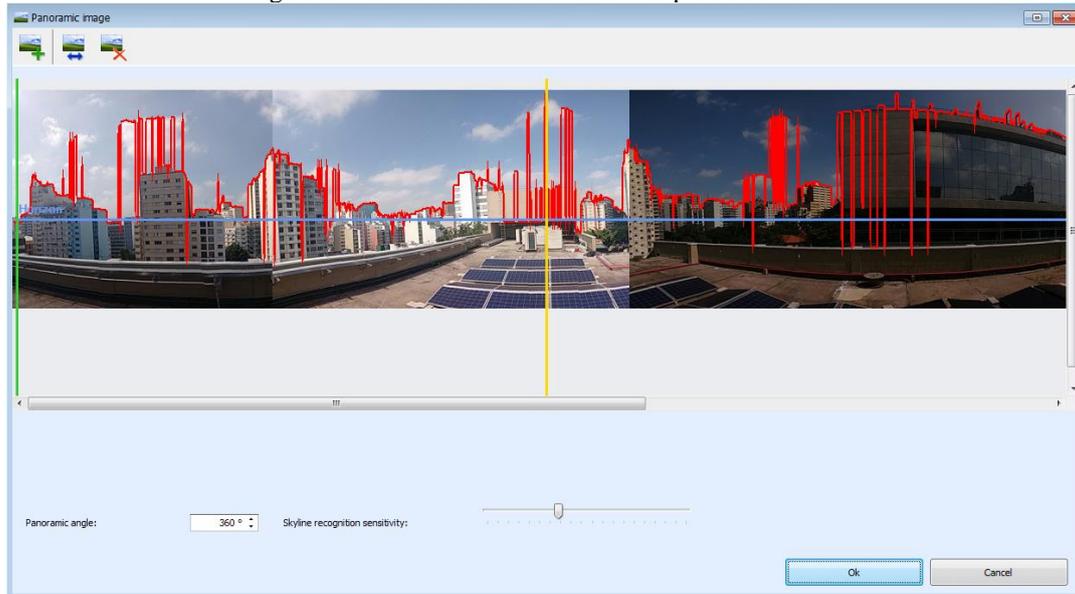
Mês	Irradiação medida (kWh/m <sup>2</sup> )	Irradiação usada pelo software (kWh/m <sup>2</sup> )	Desvio percentual (%)
Setembro	4,18	4,43	5,6
Outubro	4,62	5,09	9,2
Novembro	4,32	5,55	22,2

Dos resultados apresentados, nota-se que nos meses de setembro e outubro de 2016, a irradiação solar efetiva foi cerca de 6% e 9% menor que a média histórica utilizada pelo programa *BlueSol* 3.0. Assim, é de se esperar que a produção medida das placas seja inferior à prevista pelo *software*, como observado. A discrepância entre os valores simulados e medidos pode estar relacionada com hipóteses simplificadoras no modelo matemático usado pelo programa *BlueSol* 3.0, como, também, pode estar relacionada com a especificação dos parâmetros do modelo, como o sombreamento ou até quedas de desempenho no sistema real, por exemplo, devidas à existência de poeira depositada sobre as placas. No mês de setembro, a diferença entre os valores simulados e medidos é diminuta descontando-se o efeito da irradiação solar, sendo um pouco maior no mês de outubro. Contudo, no mês de outubro foi realizada lavagem da superfície das placas, contribuindo para um aumento na eficiência da produção de energia. No mês de novembro o desvio foi mais acentuado. Assim, conclui-se que há mais parâmetros que são responsáveis pela diferença entre os valores medidos de produção e simulados, além da limpeza e irradiação solar. Efeitos de sombreamento distintos sobre as placas e a estação meteorológica podem também contribuir para a discrepância. Outro fator que precisaria ser levado em conta para a análise dos desvios, seria o efeito da temperatura das placas. Contudo, essas medidas não se encontraram disponíveis no período analisado.

Observando-se os resultados das Tabelas 1 e 2, percebe-se que descontado o efeito da diferença da irradiação solar, os erros de previsão da produção de energia pelo software *BlueSol* 3.0 são inferiores a 6%. Assim, a relativa boa concordância dos valores mostra que simuladores, como o programa *BlueSol* 3.0, podem ser efetivamente usados em estudos de dimensionamento e otimização de sistemas de geração de energia elétrica de placas fotovoltaicas.

Visando otimizar o potencial de geração de energia do sistema instalado nos prédios 31 e 33 da Universidade Presbiteriana Mackenzie, campus Higienópolis, decidiu-se fazer simulações distintas no software *Blue Sol 3.0* usando o mesmo sistema hoje instalado como base e alterando o posicionamento dos painéis. Quatro cenários foram contemplados neste estudo. Na Simulação A, os ângulos de azimute foram alterados para  $40^\circ$  em duas fileiras e  $130^\circ$  nas quatro restantes, a inclinação em relação ao plano horizontal alterada para  $15^\circ$  exceto por duas fileiras de painéis que foram alteradas para uma inclinação de  $23^\circ$ . Este posicionamento foi proposto pela empresa VENTO GROUP, projetista do sistema instalado, levando em conta a facilidade na instalação e circulação entre as placas, utilizando ainda como base a cobertura do prédio 31 e 33. Na Simulação B foi proposta a alteração do sistema para o prédio 45 do campus Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie usando os mesmos parâmetros de posicionamento utilizados na simulação A recomendada pelo VENTO GROUP. Na simulação C foi simulada a posição ótima considerada pelo *software* BlueSol 3.0, que utiliza o ângulo de azimute a  $0^\circ$  e inclinação em relação ao plano horizontal calculada levando em conta a latitude e a altitude do local, para esse projeto o ângulo recomendado foi o de  $17,1^\circ$ . Por último, na simulação D foi simulada a posição ótima calculada pelo *software* do mesmo modo da simulação C, mas para o prédio 45. Obteve-se o mesmo resultado de posicionamento da simulação C, ângulo de azimute  $0^\circ$  e ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal  $17,1^\circ$ . Salienta-se que foi configurado no simulador um padrão de sombreamento obtido de fotos panorâmicas do local, como pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3: Padrão de sombreamento nos prédios 31 e 33.



Os dados da produção média diária em kWh dos diferentes sistemas simulados, podem ser vistos na tabela 3. Salienta-se que diferentemente do que foi apresentado anteriormente, a Tabela 3 apresenta dados médios anuais e não médias mensais.

Tabela 3: Comparação da produção atual com a obtida para os diferentes casos de estudo

Caso Simulado	Produção Média Anual (kWh/dia)	Variação para o Sistema Atual (%)
A	85,72	5
B	79,15	-3
C	86,70	6
D	85,12	4

As simulações mostraram que o prédio 31 apresenta um melhor rendimento do que o prédio 45, apesar do prédio 45 apresentar uma maior altitude do que o prédio 31. Pode-se assumir que os padrões de sombreamento no prédio 45 propiciados pelas construções existentes na laje foram mais prejudiciais para a produção de energia do que os padrões do prédio 31, uma vez que pela proximidade geográfica dos prédios, os padrões de radiação utilizados pelo software foram os mesmos. Comparando as diferentes possibilidades, percebe-se da simulação C, que apresenta a simulação ótima do *software*, poder-se-ia ter um ganho de até 6% na produção de energia em relação aos dados obtidos da simulação do sistema atual. A diferença apesar de parecer pequena, a longo prazo pode reduzir sensivelmente o retorno de investimento do sistema. A simulação dos diferentes tipos de posicionamento mostra o significativo ganho que se pode obter mudando-se apenas o *layout* do sistema, demonstrando a utilidade e importância do estudo de simulação dos sistemas antes da sua instalação.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, avaliou-se a produção de energia elétrica no sistema de geração de energia por placas fotovoltaicas implantado nos prédios 31 e 33 da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Foram coletados dados de produção ao longo dos meses de setembro a novembro de 2016 e, neste período, obtiveram-se, também, medidas da irradiação solar efetivamente incidente junto às placas.

Os dados apresentados pelo *software BlueSol 3.0* para a simulação do sistema hoje instalado apresentaram grande proximidade com os dados reais coletados, dando base para a utilização dessa ferramenta como apoio para execução de melhorias no projeto. A diferença entre os valores simulados e medidos situou-se entre 1,4 e 4,5%, descontando-se a diferença na irradiação solar real e considerada pelo *software*. Observou-se, também, a necessidade de se continuar os estudos das razões para as discrepâncias entre os valores simulados e preditos, dentre as quais se incluem a temperatura das placas e hipóteses de modelagem.

No contexto apresentado, as simulações tiveram um papel importante para evidenciar o quanto alguns parâmetros como a orientação, inclinação e o sombreamento dos painéis afetam a eficiência do sistema. Por meio da simulação, pôde-se verificar qual o cenário que propiciaria um aumento da potência média produzida e conseqüentemente da redução do tempo para recuperação do valor inicialmente investido.

No primeiro cenário de alterações proposto, a nova disposição para o sistema gerou aumento de aproximadamente 4,8% na potência anual comparando-se ao sistema instalado na área já utilizada. Empregando-se o recurso do *software* de otimizar a posição e orientação dos painéis, obteve-se aumento de 6% na produção anual de energia elétrica.

Foram realizadas ainda duas simulações para verificar a produção caso o sistema fosse instalado na cobertura do prédio 45. Contudo, apesar desse prédio estar localizado em área com menor interferência do sombreamento dos prédios próximos, o local disponível para instalação do sistema possui grande influência do sombreamento de barreiras físicas localizadas no próprio prédio, sendo que na melhor disposição e posicionamento dos painéis, o sistema alcançou potência gerada anual inferior que a otimização proposta para o sistema hoje instalado.

## REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA ANEEL. Balanço de informações de Geração. Disponível em: <[http://relatorios.aneel.gov.br/\\_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSAMPRegiaoEmp.xlsx&Source=http%3A%2F%2Frelatorios%2Eaneel%2Egov%2Ebr%2FRelatoriosSAS%2FForms%2FAllItems%2Easpx&DefaultItemOpen=1](http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSAMPRegiaoEmp.xlsx&Source=http%3A%2F%2Frelatorios%2Eaneel%2Egov%2Ebr%2FRelatoriosSAS%2FForms%2FAllItems%2Easpx&DefaultItemOpen=1)>. Acesso em: 08 nov. 2015.
- [2] NAKABAYASHI, R. K. Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Condições atuais e Perspectivas Futuras. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [3] EPE. Balanço energético nacional – Relatório síntese. 2016. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorio Sintese.aspx?anoColeta=2016&anoFimColeta=2015>>. Acesso em: 01/03/2017.
- [4] EPE. Balanço energético nacional – Relatório síntese. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>> Acesso em: 18/06/2021.
- [5] RAMOS, L.C.; OLIVEIRA, G.G.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M; AMARAL, M.A; GUIMARÃES, D.P.; ROSA, M.T.M.G. Análise da viabilidade e dimensionamento de placas fotovoltaicas para uma microempresa do setor de alimentos. Brazilian Journal of Development, v. 7, n.3, p. 29593-29614, 2021.
- [6] AZADIAN, F.; RADZI, M.A.M. A general approach toward building integrated photovoltaic systems and its implementation barriers: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 22, p. 527-538, 2013.
- [7] RAJESH, R.; MABEL, M.C. A comprehensive review of photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 51, p. 231-248, 2015.