

ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA NO CAMPUS UFRPE - UACSA

Paula de Tarsia Borba de França
Aluna de Engenharia Elétrica
paula.tarsia.borba@gmail.com

Ania Lussón Cervantes
Professora Adjunta
ania.lusson@ufrpe.br

Reinel Beltrán Aguedo
Professor Adjunto
reinel.beltran@ufrpe.br

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA)
Cabo de Santo Agostinho, PE, Brasil

Resumo— O artigo apresenta um estudo sobre a viabilidade da instalação de um sistema de geração de energia fotovoltaica (FV) nas instalações da UFRPE-UACSA. O estudo foi realizado utilizando o simulador PV*SOL *premium* 2019, para análise de sombreamento, a fim de alcançar um aumento na eficiência do sistema. Ao final do estudo, constatou-se que o prazo médio de retorno financeiro é de seis anos, mostrando a viabilidade do projeto e incentivando práticas de sustentabilidade no setor público.

Palavras-Chaves— Sombreamento, viabilidade, sistemas fotovoltaicos (FV) conectados à rede, sustentabilidade.

I. INTRODUÇÃO

Segundo [1], a geração fotovoltaica (FV) é uma fonte de energia elétrica que converte diretamente a energia do sol de maneira silenciosa, não poluente e sem utilizar partes móveis. Isto torna esta fonte de energia um importante complemento à matriz elétrica, com alta confiabilidade e robustez, com baixa necessidade de operação, manutenção e reposição (OM&R).

De acordo com [2], esse modelo de geração de energia elétrica está em expansão no mundo, de modo que cada vez mais a preocupação é justamente elevar o nível de preservação ambiental. A tendência mundial é aproveitar mais a fonte de energia solar que, ao ser largamente utilizada, terá custos de implantação cada vez mais reduzidos.

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável promissora, pois ela é capaz de ser facilmente instalada no meio rural e urbano, podendo gerar toda a energia que outrora era adquirida pela concessionária através da rede elétrica, além de ser um sistema que “não produz lixo tóxico como as usinas nucleares, não polui o meio ambiente como as termoelétricas a gás ou a carvão e não envolve nenhum impacto ambiental ou social como as hidrelétricas.” [3].

De fato, como em qualquer forma de geração de energia, deve-se ter cautela ao analisar sob quais condições o sistema

funcionará, como também realizar o dimensionamento correto da instalação.

Nesse tipo de geração de energia, é de extrema importância verificar detalhadamente as sombras que podem atingir os módulos fotovoltaicos, pois sem o estudo adequado do sombreamento, além de provocar uma diminuição na geração, também é capaz de danificar permanentemente os módulos.

Assim, o principal objetivo deste artigo é analisar a viabilidade da implementação de um sistema de geração FV conectado à rede elétrica na Universidade Federal Rural de Pernambuco da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UFRPE-UACSA), considerando a possibilidade de sombreamento. Para isto, primeiramente são tratados alguns aspectos teóricos sobre a escolha e o posicionamento de módulos fotovoltaicos, seguidamente são feitos os cálculos e considerações para a instalação de um sistema fotovoltaico nos edifícios da UFRPE-UACSA utilizando o software PV*SOL *premium* 2019. Por fim, é analisado o estudo de viabilidade acompanhado de algumas conclusões.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Conceitos Básicos

A radiação solar é composta por ondas eletromagnéticas que ao incidirem sobre certos materiais pode haver transmissão de calor ou efeitos elétricos, como o fotovoltaico e fotoelétrico.

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou tensão elétrica, sobre uma célula formada por sanduíche de materiais semicondutores.”[4].

B. Captação de Radiação

Segundo [4], os módulos fotovoltaicos captam a radiação

global, ou seja, a radiação direta somada à difusa. A radiação direta é composta por raios solares que incidem diretamente do Sol sobre o plano horizontal. A radiação difusa é composta por raios solares que chegam indiretamente ao plano, isto é, são raios solares difratados.

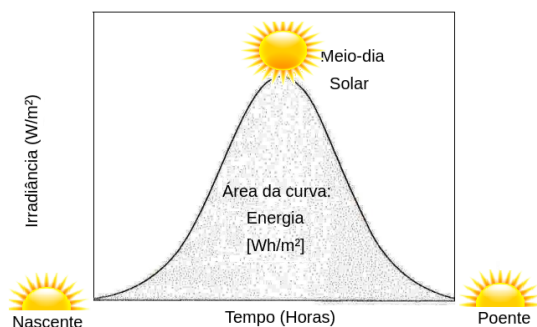
A radiação é quantificada através da irradiância, expressa em unidade de potência por área. De acordo com [4], ao medir a irradiância com um sensor e armazenando os valores obtidos ao longo de um dia, pode-se calcular a quantidade de energia recebida do Sol por uma determinada área naquele dia.

Na Figura 1 é apresentada a curva característica do perfil de irradiância ao longo do dia. De acordo com a localização, os valores de irradiância mudam. A área abaixo da curva é obtida através do cálculo da integral da curva, e é denominada insolação, que expressa a densidade de energia por área.

C. Módulos Fotovoltaicos

Existem diversas tecnologias para a fabricação de módulos fotovoltaicos, sendo a célula de silício monocristalino é a mais fabricada e utilizada comercialmente, visto que esta possui uma maior eficiência. A eficiência do módulo depende também de fatores externos, como por exemplo, sua inclinação em relação aos raios solares e o sombreamento.

Conforme mencionado em [4], quando uma célula fotovoltaica recebe pouca ou nenhuma luz, isso impede que a corrente seja transmitida para as demais células, visto que as células estão em série. Atualmente nos painéis fotovoltaicos existem diodos de *bypass* (diodos de passagem) ligados em paralelo com as células, impedindo que haja corrente reversa, a fim de minimizar o efeito causado pelo sombreamento.



a. Retirada de “Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações”, 2ed., São Paulo, 2017.

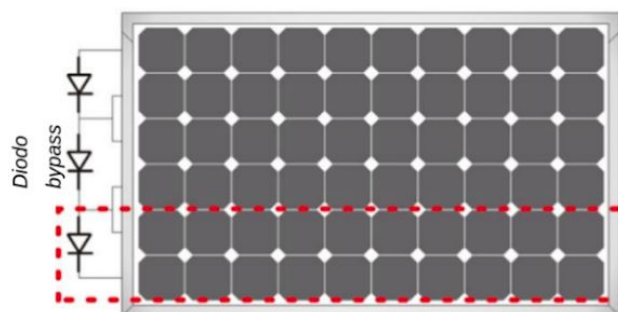
Figura 1. Curva característica do perfil de irradiância ao longo do dia.

Na Figura 2 é mostrada o arranjo das células fotovoltaicas com o diodo *bypass*. Segundo [5], se a sombra atingir apenas uma fileira do conjunto de células em série, a corrente continuará a circular nas outras duas fileiras de células em série, devido ao caminho de desvio proporcionado pelo diodo *bypass* polarizado. Como pode ser visto através da Figura 2, as fileiras de células em série estão dispostas verticalmente no módulo fotovoltaico. Devido a isso, ao instalar os painéis fotovoltaicos, é preciso levar em consideração o formato do

sombreamento do local (caso haja), para então definir se o painel deve estar na vertical ou horizontal.

D. Posição dos Módulos Fotovoltaicos

Em concordância com [4], em cada ponto do planeta a radiação direta incide sobre o solo com diferentes ângulos de inclinação, variando durante os dias e meses ao longo do ano. De fato, não há uma posição ótima para a instalação de módulos fotovoltaicos a fim de melhorar a captação de radiação indireta, visto que essa chega ao solo de modo irregular e aleatória, entretanto, os painéis podem ser posicionados de forma a otimizar a recepção de radiação direta. Assim, a posição que otimiza a conversão de radiação solar em energia elétrica é a que expõe o painel fotovoltaico de forma perpendicular à radiação direta.



b. Retirada de “Análise de Desempenho e Atuação de Diodos de *bypass* em um módulo Fotovoltaico Comercial”, Gramado, abril 2018.

Figura 2. Imagem ilustrativa de painel solar com 72 células fotovoltaicas sob sombra parcial.

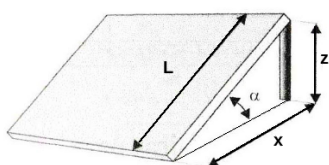
Para um módulo solar fixo, ou seja, sem um sistema de rastreamento solar, deve-se então orientá-lo com sua face voltada para o norte geográfico. Caso o local da instalação seja acima da linha do Equador, então os painéis devem estar orientados para o sul geográfico. Essa disposição dos painéis melhora o aproveitamento de luz solar durante o dia. Ao meio-dia solar, horário na qual há a maior incidência de radiação solar, o módulo fotovoltaico estará perpendicular à radiação direta, obtendo, assim, um melhor aproveitamento. Nos diversos horários, o módulo não estará perpendicular à radiação direta, mas ainda assim estará recebendo os raios solares sobre a superfície dos painéis, maximizando a produção média diária de energia.

E. Escolha de Inclinação do Módulo Solar

De acordo com [4], diversos fatores irão influenciar na determinação da escolha do ângulo de inclinação do módulo solar, como a altura solar, o ângulo incidente dos raios com relação ao plano horizontal, entre outros fatores.

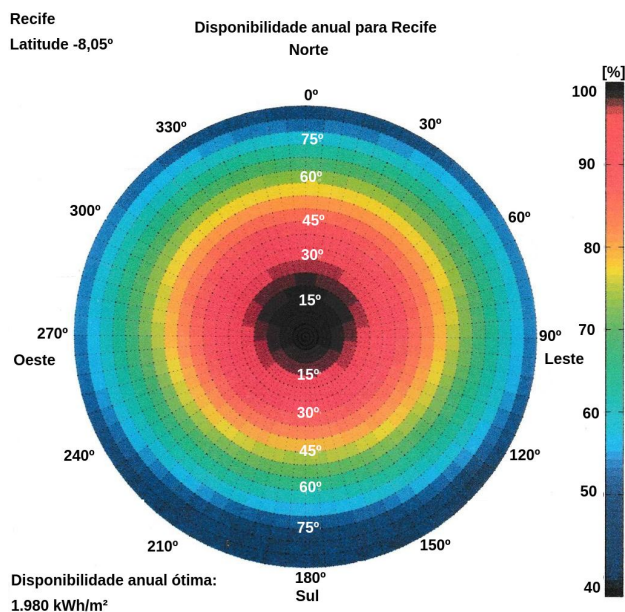
Na Figura 3 é mostrada a relação de inclinação, dado pelo ângulo α , que deve ser de valor tal que a radiação direta chegue de forma perpendicular ao módulo. Para Pernambuco, o ângulo α pode variar de 0° a 15° em relação ao plano

horizontal, conforme a Figura 4. Dessa maneira, o módulo estará na posição ótima para a captação da radiação solar.



c. Retirada de "Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações", 2ed., São Paulo, 2017.

Figura 3. A altura da haste de suporte do módulo determina o ângulo de inclinação.



d. Retirada de "Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica", São Paulo, 2012.

Figura 4. Relação de perdas segundo a orientação e inclinação do gerador fotovoltaico para a cidade de Recife.

“Para a instalação física, o instalador deve calcular a altura da haste de fixação (z) em função do ângulo calculado (α) e levando em conta o comprimento do módulo (L) ou a distância entre a borda do módulo no solo e a barra de sustentação (x)”, como é mostrada na Figura 4 [4].

A altura z da haste é calculada através da equação (1) e a distância x é calculada pela equação (2).

$$z = L \sin(\alpha) \quad (1)$$

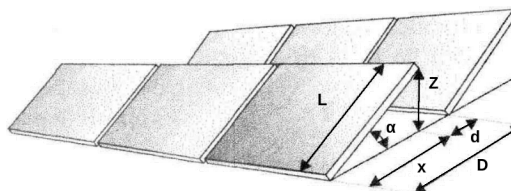
$$x = L \cos(\alpha) \quad (2)$$

Para sistemas fotovoltaicos de médio a grande porte, normalmente os painéis ficam dispostos em fileiras colocadas umas atrás das outras, isso provocará um sombreamento. Por esse motivo, a distância entre as fileiras deve ser calculada corretamente a fim de que a sombra gerada por uma fileira de módulos não atinja outra, pois a presença de sombras em módulos fotovoltaicos é extremamente prejudicial ao desempenho de sistemas fotovoltaicos.

Utilizando a estratégia de maximização de eficiência do sistema fotovoltaico, ou seja, diminuindo as perdas provocadas por sombras, a regra de espaçamento entre fileiras é dada através da equação (3).

$$d = 3.5 z \quad (3)$$

em que d é o espaçamento em metros entre as fileiras, como mostrado na Figura 5.



e. Retirada de "Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações", 2ed., São Paulo, 2017.

Figura 5. Fileiras de módulos em instalações fotovoltaicas.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo de viabilidade será feito nas instalações da UFRPE-UACSA.



f. Google Earth Pro.

Figura 6. Vista superior dos edifícios da UFRPE - UACSA.

A UACSA está localizada em dois edifícios, A e B, de área superior idêntica, porém espelhados, como pode ser visto na Figura 6. O projeto sugere que a instalação dos painéis fotovoltaicos seja realizada na cobertura dos edifícios, o qual cada um deles dispõe de 570.21 m² de área livre.

Os cálculos serão realizados para apenas um dos edifícios, mas o resultado final será dado para as duas torres. A simulação da perda percentual provocada por sombreamento será realizada para o edifício A. A disposição dos módulos no edifício B deve ser espelhada em relação ao A, visto que estes são espelhados.

A. Potência do Sistema Fotovoltaico

A média do histórico de consumo da UACSA é de 27799 kWh. A potência que deve ter um sistema fotovoltaico para suprir o consumo é determinada pela equação (4), onde o fator 120 é o produto de considerar os fatores como: horas de sol

pico (5 horas), perdas elétricas globais (0.8) e a quantidade de dias em análise (30 dias). Assim, para o caso de estudo, a potência deve ser de 231.66 kW. Esse valor pode ser encontrado através da equação (4).

$$Potência (kW) = \frac{consumo (kWh)}{120} \quad (4)$$

Para o cálculo do espaçamento entre as fileiras, faz-se necessário o conhecimento prévio das dimensões do painel fotovoltaico. O módulo selecionado possui alta eficiência e potência, cujas especificações estão discriminadas na TABELA I.

Através da equação (5) é possível conhecer a quantidade de módulos que podem ser instalados na área disponível da universidade.

$$Q_m = \frac{A}{a} \quad (5)$$

em que Q_m é a quantidade de módulos; A , a área disponível para instalação, e a , a área de cada módulo fotovoltaico.

TABELA I. MÓDULO FOTOVOLTAICO

Painel Solar Q CELLS L-G5.0.G Q PEAK	
Tipo de Célula	MONO
Quantidade de Células	72
Eficiência	19.3%
Potência	365 W
Dimensão	991 mm X 35 mm X 1960 mm (Altura X Largura X Comprimento)
Área	1.94 m ²

Realizando a operação da equação (5), em que “A” vale aproximadamente 570.21 m² e “a” vale 1.94 m², tem-se que a capacidade de módulos na área de instalação é de aproximadamente 293 painéis fotovoltaicos. A quantidade de painéis encontrada não inclui o espaçamento entre as fileiras.

B. Espaçamento entre fileiras de módulos

É sabido que é necessário um espaçamento entre as fileiras de módulos, a fim de evitar sombreamento gerado entre elas, como também necessárias para futuras manutenções nos painéis.

Para calcular o espaçamento entre as fileiras, deve ser levado em consideração o ângulo de inclinação, posição do painel (horizontal ou vertical) e o comprimento do mesmo.

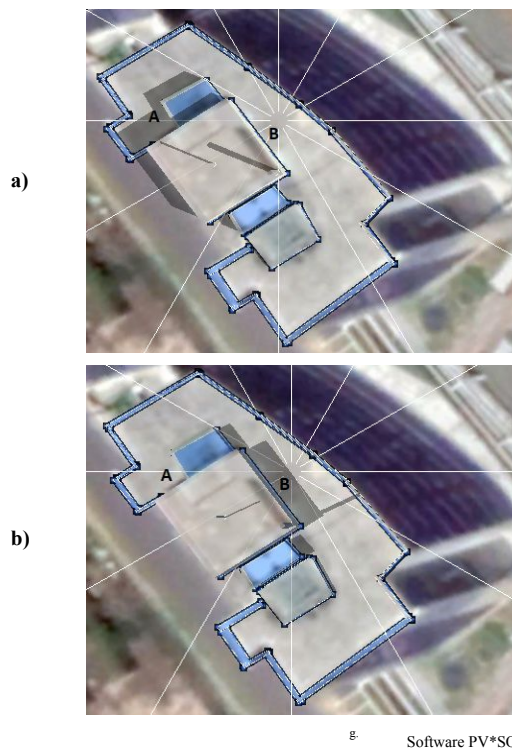
Tratando da inclinação, de acordo com a Figura 3, a disposição ideal dos painéis no estado de Pernambuco, varia de 0° a 15°. O ângulo de inclinação a ser utilizado será de 8°, para que não haja acúmulo de poeira sobre o módulo e para que a distância (d) entre as fileiras seja reduzida.

Utilizando os dados da TABELA I, admitindo que os painéis estejam na posição vertical, com inclinação de 8° e

através da equação (1) e (3), a distância entre as fileiras “d” é de 0.97 m.

C. Análise de sombreamento

A disposição dos painéis deve ser de maneira tal que, o avanço da sombra produzida pelas edificações não comprometam a geração.



Software PV*SOL premium, 2019.

Figura 7. Sombreamento produzido para o solstício de inverno, dia 21 de dezembro. (a) considerando 8:00h e (b) às 15:00h.

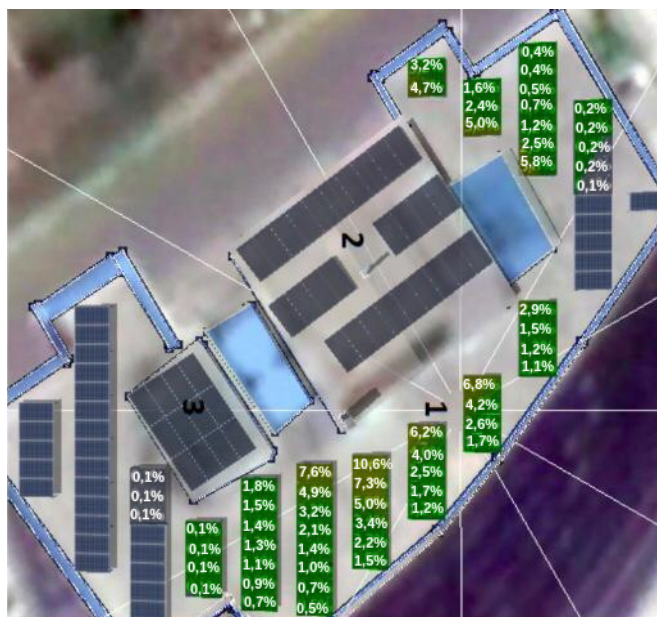
Dado que o descasamento, ou seja, quando as características elétricas de módulos interconectados não são iguais, segundo [5], não somente causa perdas, ele também pode danificar módulos, devido à conexão em série das células, pois quando todas as células recebem a mesma radiação, elas produzem a mesma corrente. No momento em que uma célula é sombreada, ela deixa de produzir e vira resistência.

Por consequência, a célula aquece (efeito *hot spot*), e sem proteção, este aquecimento poderia até derreter a célula. Por isso, os módulos contam com diodos de desvio (*bypass*), que conduzem a corrente reversa, tirando as células inoperantes do circuito, conforme é dito por [5].

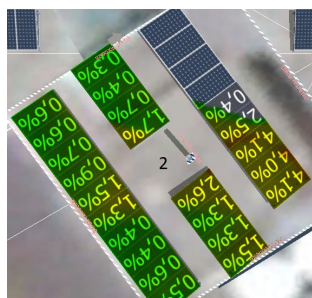
Na Figura 7 é mostrado o sombreamento para o dia de solstício de inverno, 21 de dezembro, que representa a pior condição de sombreamento nas regiões A e B. Será considerada em dois horários, 8:00h e 15:00h, para analisar o movimento da sombra. O sombreamento na região B tem uma leve variação no decorrer dos dias ao longo do ano, mas sempre avança da esquerda para a direita. Isso indica que o

módulo deve ser posicionado na posição vertical com a inclinação adequada para o norte.

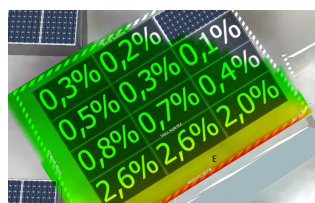
Por outro lado, como na parte superior dos edifícios há uma mureta de 1.34 m, tendo em vista diminuir as perdas por sombreamento, os painéis podem ser instalados numa estrutura de altura igual à da mureta e colocar as fileiras para a mais direita possível no edifício.



Área (1)



Área (2)



Área (3)

Figura 8. Frequência de sombreamento ao longo do ano nas respectivas áreas.

A visualização das sombras (Figura 7) “ajuda a compreender as causas do sombreamento, mas retrata apenas certos instantes. O cálculo do percentual das horas com sombra ao longo do ano é uma informação mais rica e ajuda ao projetista tomar decisões sobre a colocação dos módulos.”

[5].

Para adquirir o percentual anual de perdas dos painéis fotovoltaicos, é usado o software PV*SOL premium 2019, o qual é um dos mais utilizados para simulação de sistemas de energia solar. Ele é conhecido pela facilidade de uso, segundo

[6]. Tais perdas são apresentadas na Figura 8.

Para a Figura 8 foi levado em consideração que os módulos estarão elevados a 1.34 m do solo, que estejam na posição vertical e com inclinação de 8° para o norte. A porcentagem que aparece sobre cada painel refere-se à perda percentual anual por painel. As placas que não possuem essa porcentagem são porque não terão perdas por sombreamento. As simulações dos percentuais de perdas anuais foram realizadas por área.

As especificações da instalação estão dispostas na TABELA II. Os dados foram retirados da referência [7].

TABELA II. ESPECIFICAÇÕES DA INSTALAÇÃO

Potência da Planta (kW)	2 × 46.72
Potência do inversor (kW)	2 × 50
Tipo de inversor	SMA
Tipo de telha	Laje
Tipo de sistema	Trifásico
Quantidade de módulos	2 × 128

Conforme a TABELA II, a potência da planta fotovoltaica a ser instalada será de 46.72 kW, contendo 128 painéis de 365 W, com inversor de 50 kW, trifásico de marca SMA, juntamente com estrutura de fixação tipo laje em cada edifício.

IV. VIABILIDADE

“O número mínimo de anos necessários para recuperar o investimento inicial é chamado de período de recuperação de investimento (*Payback*). Se o período *Payback* encontrado representa um período aceitável para a empresa, o projeto será selecionado.” [8].

TABELA III. TABELA DE INVESTIMENTO

	Custo (R\$) por Kit Fotovoltaico	Custo (R\$) Mão de Obra	Custo Final (R\$)
	165189.00	24778.35	189967.35
Total (2 kits)	330378.00	49556.70	379934.70

Com o dado de capacidade de consumo devido à potência gerada, é possível realizar o estudo de *Payback*, ou seja, quando o investimento será compensado.

Considerando que a mão de obra seja em torno de 15% do preço total dos kits fotovoltaicos, o investimento total é dado pela equação (6) e é apresentado na TABELA III.

$$CT = CFV(1.15) \tag{6}$$

onde CT e CFV representam o custo total de investimento e dos kits fotovoltaicos, respectivamente.

Segundo a Aneel [9], o custo do kWh da concessionária Celpe, classificação B3 - Comercial, Serviços e Outras atividades, é R\$ 0.54933. Os dados da TABELA IV reúnem todas as informações necessárias para gerar o gráfico do *Payback*, como também o retorno financeiro, conforme a Figura 9.

TABELA IV. DADOS FINANCEIROS

Dados do Investimento	
Capital de Investimento	R\$ 379934.70
Planta FV (Wp)	2 × 46720
Produção (kWh / mês)	11212.80
Valor do kWh	0.54933000
Retorno Financeiro	
Capital de Investimento	R\$ 379934.70
Retorno do Investimento	6 anos
Economia estimada no 1º ano	R\$ 73914.33
Economia estimada em 25 anos (gráfico em verde)	R\$ 4272121.76
Economia estimada em 30 anos (gráfico em azul)	R\$ 6794358.86

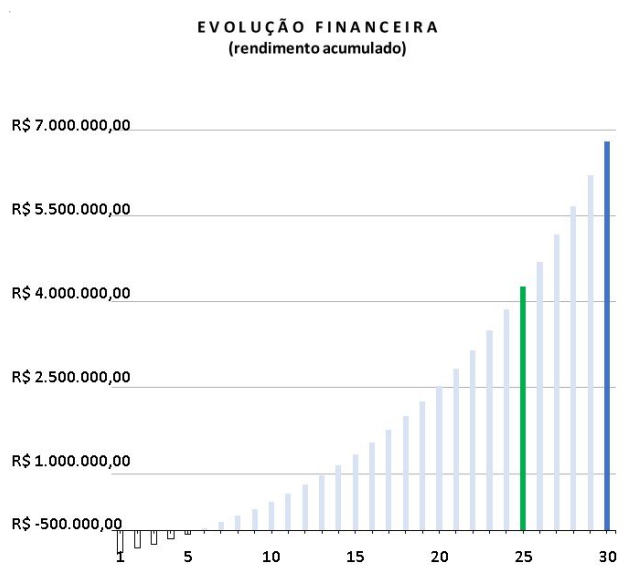


Figura 9. Gráfico de *Payback*.

Levando em consideração os dados de investimento da TABELA IV, foi realizado o cálculo de *payback* e gerada a Figura 9, em que esta representa graficamente o rendimento acumulado ao longo de trinta anos. Nos primeiros cinco anos o capital de investimento ainda está sendo compensado, através do abatimento na fatura de energia elétrica, por meio da produção de energia produzida pelo sistema fotovoltaico.

A partir do sexto ano, o rendimento acumulado inicia a compensação do valor investido, sendo crescente ao longo dos

anos. A coluna em verde representa a economia estimada em 25 anos, enquanto a azul, 30 anos.

V. CONCLUSÕES

A análise de sombreamento é essencial para uma boa produção de energia por meio de sistema fotovoltaico, visto que este é de fácil instalação e de retorno financeiro viável.

Após realizar o estudo, é percebido que devem ser seguidos alguns procedimentos para otimizar geração de energia no ambiente proposto. Uma estratégia importantíssima é elevar a estrutura dos módulos fotovoltaicos à 1.34 m, a fim de diminuir as perdas por sombreamento provocado pela mureta.

O retorno financeiro, ou seja, a relação entre o capital ganho como resultado do investimento e a quantidade de capital investido para o sistema fotovoltaico, se inicia a partir do sexto ano.

Por fim, conclui-se que a viabilidade financeira do empreendimento é praticável, uma vez que o retorno é dentro do esperado. O projeto, caso venha ser implantado na universidade, servirá de incentivo às práticas de sustentabilidade no setor público, além de estudo prático em disciplinas relacionadas.

REFERENCIAS

- [1] L. R. do Nascimento, “A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública”, Florianópolis, dezembro, 2013.
- [2] F. H. B. de L. Morais, “Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico de 5,2 Kw_p conectado à rede instalado na UECE”, Fortaleza, 2017.
- [3] M. M. Casaro, e D. C. Martins, “Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica”, Revista Controle & Automação/Vol.21 no.2, Março e Abril, 2010.
- [4] M. G. Villalva, e J. R. Gazoli, “Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações”, 2ed., São Paulo, 2017.
- [5] H. Rauschmayer, e Solarize Treinamentos profissionais LTDA, “Manual de energia solar: 6 - sombreamento e outras formas de descasamento”, março, 2019.
- [6] Solarize, “O software fotovoltaico PV*SOL”, 2019. Disponível em: <<https://www.solarize.com.br/software-pv-sol>>. Acessado em: 29 de setembro 2019.
- [7] Aldo, “Gerador de energia SMA laje Aldo solar”, 2019. Disponível em: <<http://www.aldo.com.br/Produto/?c=49142&d=gerador-de-energia-sma-laje-aldo-solar-GEF>>. Acessado em: 15 de março 2019.
- [8] R. Rabuske, L. R. Friedrich, e F. B. B. Fontoura, “Analysis of feasibility for energy deployment with photovoltaic use for parking shade”, “Análise da implementação de energia fotovoltaica com utilização para sombreamento de estacionamento”, Gramado, janeiro, 2018.
- [9] Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil) (ANEEL). “Reajuste de Tarifas de Energia Elétrica Grupo B”, 2019.
- [10] Valentin Software, PV * SOL premium 2019 R10, 2019.
- [11] Google, Google Earth website. Pode ser acessado em <<http://earth.google.com/>>, 2019.