

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MODELO DE UMA ÁRVORE NA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Barbara de Luca De Franciscis Gouveia – barbara.defranciscis@gmail.com
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Este trabalho tem por objetivo apresentar um modelo arquitetônico diferenciado para um sistema fotovoltaico, na forma de uma árvore solar a ser instalada na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Espera-se também realizar uma avaliação do projeto a partir dos resultados de uma análise técnica e uma análise econômica. Na metodologia adotada para a análise técnica serão realizadas as seguintes etapas: a) avaliação do recurso solar; b) determinação da localização; c) modelagem 3D; d) estudo de sombreamento; f) definição da configuração; g) dimensionamento do sistema; h) simulação de operação. Ainda para a análise técnica, as principais ferramentas computacionais utilizadas são SketchUp e PVSyst. A metodologia utilizada para a análise econômica foi elaborada visando o registro dos recursos nela empregados e objetivando também servir de base para os gastos de projetos futuros. O primeiro passo dessa análise econômica foi calcular os custos com os componentes do SFV. Foi levado em conta não só do peso que as principais partes (módulos, inversores e baterias, quando for o caso) têm no custo total, como também o gasto com o Balanço do Sistema (BOS). O custo final da instalação foi então estimado com o somatório dos recursos empregados na aquisição de material e na mão de obra (de serralheria e instalações elétricas).

Palavras-chave: Árvore solar fotovoltaica, Arquitetura, Análise técnica e econômica.

1. INTRODUÇÃO

Árvores solares são sistemas de geração fotovoltaica, isolados ou conectados à rede, que apresentam um design diferenciado, com o intuito de imitar o design de uma árvore: postes normalmente altos, com painéis dispostos de forma que, além de funcionar como gerador fotovoltaico, fazem o papel de “copa”. Normalmente são sistemas menores, que se enquadram em microgeração devido à sua capacidade.

O principal objetivo por trás da construção de árvores solares fotovoltaicas é dar visibilidade ao uso de energia solar, além de desenvolver cada vez mais a tecnologia e as formas de integração de sistemas de geração fotovoltaica à paisagem urbana. Com a proposta de um design em formato de árvore, os sistemas, além de serem mais facilmente integrados à área urbana, podem utilizar uma área menor se comparados com instalações tradicionais (em telhados ou faixadas de prédios) de mesma capacidade de geração.

A geração fotovoltaica através de árvores solares não é algo tão recente. Um projeto pioneiro foi instalado na cidade de Gleisdorf na Áustria em 1998, uma época em que a energia solar não era minimamente viável e a tecnologia era menos desenvolvida. Nos anos seguintes, surgiram outras propostas sobre o tema, novas ideias de design, construíram-se protótipos até que as árvores solares se tornaram um produto de mercado. Atualmente, uma maior difusão dessa tecnologia vem trazendo, não apenas uma maior viabilidade para sistemas desse tipo, visibilidade para o uso de energia fotovoltaica e integração arquitetônica, mas também possibilidade de usos que atendem demandas da sociedade moderna. Muitos dos projetos de árvores solares buscam utilidades imediatas para a energia gerada, seja através da instalação de tomadas ou entradas *usb* para carregar aparelhos eletrônicos móveis, do oferecimento de sinal wi-fi, ou mesmo da iluminação de vias públicas.

A sugestão de um modelo arquitetônico que seja capaz de alinhar design e eficiência e que possa ser produzido e implementado em um prédio público de uma universidade federal torna possível uma maior visibilidade para esse tipo de projeto e um desenvolvimento cada vez maior da tecnologia que ele emprega. Assim, espera-se que em um futuro próximo surjam novos protótipos para estudo e que os produtos feitos a partir deles sejam mais acessíveis.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais utilizados

SketchUp. É uma ferramenta computacional de modelagem 3D para projetos de arquitetura, *design* e engenharia que necessitem do desenho de uma estrutura ou peça de forma detalhada e que possibilite visualização de diferentes ângulos. Atualmente a licença de uso do programa pertence à Google e ele conta com recursos comuns a outros programas da empresa como, por exemplo, a função de georreferenciamento do modelo 3D a partir de dados do Google Earth Pro, que será mencionada em maiores detalhes mais à frente.

No caso específico deste trabalho, o SketchUp possibilitou a criação de um modelo da estrutura da árvore solar durante a etapa da sua concepção e, posteriormente, a análise do local onde ela seria instalada. Para isso, foi realizado

um estudo de sombreamento no jardim interno da Faculdade de Tecnologia, local previsto para a instalação. Com o georreferenciamento do modelo e com o auxílio da ferramenta 'Shadows' do SketchUp, é possível visualizar a projeção de sombras em um determinado lugar para qualquer horário e dia do ano.

PVSyst. Para a avaliação computacional do sistema da árvore solar, foi usado o PVSyst, uma ferramenta computacional que permite estudar, dimensionar e analisar dados de sistemas fotovoltaicos. Dentre suas funcionalidades, o PVSyst possui uma ampla base de dados de equipamentos (modelos de módulos e de inversores) e das condições meteorológicas de várias localidades no mundo. O *software* pode ser utilizado para realização de qualquer tipo de projeto de sistema fotovoltaico: conectado à rede, isolado, de bombeamento de água, etc. Ele possui ainda níveis de *design* do projeto que correspondem aos diferentes estágios de desenvolvimento de um projeto real de um SFV. Para um sistema conectado à rede, como é o caso da árvore solar neste trabalho, com o '*design* preliminar' (ferramenta '*preliminary design*' no programa) obtém-se uma estimativa para algumas características e alguns parâmetros gerais do projeto. Trata-se de uma etapa mais voltada ao estudo de viabilidade do sistema, relacionando dados sobre a sua arquitetura (área disponível), a potência desejada e os investimentos financeiros necessários.

Com a ferramenta '*design* de projeto', por sua vez, é possível simular mais detalhadamente e com parâmetros obtidos de hora em hora todo o funcionamento do sistema. Nessa etapa, determinam-se aspectos específicos do projeto como a orientação dos módulos, o modelo de painel e de inversor, além do arranjo do gerador fotovoltaico. Para um mesmo projeto, o PVSyst também permite criar diferentes variantes ('*variants*') e mudar alguns aspectos do *design*. Dessa forma, pode-se fazer diversas simulações e buscar o arranjo otimizado do sistema.

Como uma segunda etapa do dimensionamento do projeto, especifica-se, caso necessário, parâmetros mais detalhados como as perdas térmicas e ôhmicas, a qualidade do módulo, *mismatch*, perdas por efeito do ângulo de incidência e resistência dos fios. Para todos esses parâmetros, contudo, o PVSyst apresenta valores '*default*' que, mesmo que não sejam exatamente os valores reais, representam o sistema em questão de forma bastante coerente.

Os resultados obtidos com o PVSyst apresentam valores simulados para cada mês, dia ou hora de diversas variáveis como a irradiação global, a energia na saída do inversor, energia injetada na rede, corrente e tensão do arranjo, perdas e eficiência do sistema, apenas para citar algumas. Finalmente, gera-se um relatório para cada simulação realizada que inclui todos os parâmetros usados no projeto e todos os resultados mais relevantes.

2.2 Método utilizado

Na definição do método a ser aplicado na realização deste trabalho, deve-se considerar que objetivo final pode ser resumido em duas etapas: a primeira referente à análise técnica do projeto para sua implementação – a partir de um modelo arquitetônico sugerido – e, a segunda, referente à avaliação econômica da árvore solar a partir da definição do custo da energia por ela produzida. A metodologia seguida para cada uma das etapas será descrita mais detalhadamente a seguir.

Metodologia da análise técnica. O presente trabalho considerou-se um modelo arquitetônico previamente concebido de uma árvore solar que pudesse ser instalada na Faculdade de Tecnologia da UnB. Com o intuito de estudar o desempenho de um SFV na forma de uma árvore solar e validar o modelo de projeto, empregaram-se, na metodologia da análise técnica, as etapas apresentadas nos itens que seguem.

Avaliação do recurso solar. Para um melhor funcionamento do gerador fotovoltaico é importante buscar conhecer os valores de radiação solar global incidente sobre o arranjo e avaliar fatores como a influência da irradiância e a temperatura nos módulos. Sabe-se que dentre tais fatores, alterações na irradiância é o que mais causa efeitos no SFV pois pode variar de forma significativa em pequenos intervalos de tempo, como por exemplo, durante a passagem de uma nuvem.

O valor da quantidade de energia elétrica que é produzida pelo sistema em questão pode ser obtido considerando os efeitos da variação de irradiância a cada instante. A produção de energia e a irradiação horária relacionam-se de forma linear, o que pode ser traduzido em uma grandeza para representar o valor acumulado de energia em um dia, HSP ou Horas de Sol Pleno. Tal grandeza relaciona a irradiação disponibilizada pelo Sol e a irradiância permanece constante em 1 kW/m². O resultado é o número de horas em que a energia efetiva sobre o sistema foi igual à energia fornecida pelo Sol no local e ao longo do dia.

Neste trabalho avaliou-se o recurso solar através dos dados meteorológicos e solarimétricos adquiridos através da modelagem computacional do sistema. Com auxílio do software PVSyst, que conta com uma ampla base de dados para diversas localidades no mundo, foi possível selecionar os dados para a cidade de Brasília fornecidos pela ferramenta Meteororm 7.1. Esta, por sua vez reúne informações de estações meteorológicas e satélites geoestacionários, aplica modelos de interpolação e apresenta resultados bastante relevantes para aplicações em energia solar. Assim, o dimensionamento do SFV no PVSyst possibilitou a obtenção de dados de irradiação solar no local de instalação da árvore e a elaboração de gráficos que serão comparados às curvas de carga e de energia gerada pelo sistema.

Localização. Na análise técnica do projeto é fundamental decidir o local onde os painéis fotovoltaicos serão instalados, pois este fator influencia bastante o desempenho do sistema. Há que se considerar questões como a

possibilidade de objetos ou prédios nas proximidades do SFV projetarem sombras sobre ele e a integração arquitetônica do projeto com o local de instalação.

Em função das variações do recurso solar de um local para outro e influência de objetos e prédios vizinhos, com o consequente sombreamento do gerador fotovoltaico, é importante fazer uso de programas que permitam a análise da incidência da radiação solar sobre o plano considerado. Esses programas são especialmente úteis para sistemas instalados em ambiente urbano e/ou que ocupam áreas extensas (CRESESB, 2014).

A análise feita com o PVSyst na etapa anterior de avaliação do recurso solar e o posterior estudo de sombreamento com o SketchUp foram muito importantes nesse sentido.

Ainda quanto a localização do gerador, no caso deste trabalho, para o posicionamento dos painéis em si não houve muita limitação em termos de superfície disponível pois eles seriam fixados à própria estrutura da árvore que, por sua vez, apresentava uma grande liberdade de posicionamento. Os aspectos mais relevantes para a escolha do local de instalação da árvore solar foram, basicamente, o sombreamento, as dimensões da estrutura como um todo, proximidade com o quadro elétrico, a segurança e a visibilidade do projeto.

Modelagem 3D. Nesta etapa, foram usados modelos tridimensionais do protótipo da árvore e da Faculdade de Tecnologia (FT) criados no software SketchUp para uma avaliação ainda mais detalhada do local de instalação escolhido. Com os modelos em escala, foi possível posicionar a árvore no jardim interno da FT, verificar se a área designada possuía as dimensões adequadas para a implementação do projeto e determinar a distância que deveria ser respeitada em relação às construções próximas.

Estudo de sombreamento. Ainda a partir dos modelos em 3D da árvore e da FT, foi realizado um estudo de como as sombras são projetadas sobre os módulos instalados no protótipo. Para isso, o primeiro passo é georreferenciar o modelo do local inserindo as suas coordenadas geográficas no SketchUp. Isso permite observar o movimento do Sol ao longo de um dia na localidade determinada e, conseqüentemente as sombras que geradas por ele. Basta utilizar a ferramenta ‘Shadows’, que permite definir o dia e o horário para o qual se deseja verificar a posição das sombras.

No caso deste estudo, buscou-se determinar o sombreamento das construções e objetos próximos sobre os painéis no protótipo da árvore solar com foco voltado para as datas do solstício de verão e inverno. Tais datas são bastante representativas pois a primeira corresponde ao dia mais longo do ano e a segunda, ao mais curto. Para esses casos é especialmente importante avaliar a projeção e a duração das sombras sobre o modelo.

Definição da configuração. De forma geral, define-se o arranjo dos elementos do sistema a partir das características da carga e da disponibilidade de recursos energéticos (CRESESB, 2014). O caso em questão apresenta especificidades pois o sistema não foi projetado com o intuito de suprir uma determinada demanda de energia para uma carga. Avaliou-se então apenas a associação entre os painéis de forma a otimizar a geração e considerando o número de ligações de *strings* e entradas MPPT permitidas pelo modelo de inversor utilizado.

Outras considerações feitas dizem respeito às características de sistemas conectados à rede. É comum para um SFCR ter arranjos com mais de dez módulos em série para operação com tensões mais elevadas. Pode-se também aumentar a potência do sistema associando em paralelo mais de um conjunto de módulos em série.

A definição do arranjo para o modelo utilizado, auxiliada com dados do PVSyst, é simples por considerar os painéis em um mesmo plano horizontal e com orientações iguais, cujos valores de ângulos de inclinação e azimute otimizados também são dados pela ferramenta computacional.

Dimensionamento do sistema. O dimensionamento do sistema fotovoltaico permite ao projetista escolher os equipamentos mais adequados e configurá-los da forma mais eficiente possível. Ele pode ser feito com o auxílio de softwares especializados e, conforme mencionado anteriormente, o presente trabalho utilizou o programa PVSyst.

A modelagem computacional auxilia, inclusive, na comparação entre os valores de energia gerada em cada um dos casos de estudo. Por meio dela, tem-se insumos para avaliar a vantagem de ajustar a inclinação de todos os painéis duas vezes por ano.

Para realizar o dimensionamento e determinar os principais resultados do projeto da árvore solar, devem-se realizar todas as etapas da modelagem do sistema no PVSyst. Definem-se então a localização do projeto, a orientação e inclinação dos módulos, os modelos e potências dos painéis e do inversor, o arranjo e a interligação dos componentes do sistema e os parâmetros de perdas. Ainda conforme mencionado anteriormente, pode ser necessário especificar no dimensionamento parâmetros de perdas (como as perdas térmicas e ôhmicas, a qualidade do módulo, *mismatch*, perdas por efeito do ângulo de incidência e resistência dos fios) ou então realizar a simulação do sistema utilizando os valores *default* apresentados pelo PVSyst para esses parâmetros.

Simulação de operação. Com a definição do arranjo e a escolha dos equipamentos, pode-se realizar a simulação da operação do sistema, o que permite ao projetista avaliar o efeito de variações sazonais do recurso solar, por exemplo. A simulação é feita após o dimensionamento e com o auxílio de softwares especializados.

Nesses programas é possível obter uma modelagem bastante realista do projeto, já que eles costumam dispor de recursos para determinar a inclinação e a orientação dos módulos e para descrever a configuração e os equipamentos escolhidos, a partir de um banco de dados com modelos de painéis e inversores de diversos fabricantes. A simulação da operação do sistema pode ainda ser obtida para intervalos de tempo que vão de horas até meses. Assim, os resultados

observados nos parâmetros simulados no PVSyst, principalmente no que diz respeito à capacidade de geração, permitem determinar a eficiência modelo.

Metodologia da análise econômica. A metodologia adotada para a análise econômica da árvore solar foi elaborada de forma a registrar os recursos nela empregados e, eventualmente, servir de base para os gastos em projetos futuros que sejam semelhantes a este. Para isso, foi realizado o levantamento inicial do custo do projeto com uma avaliação do preço da energia gerada pela árvore solar.

Levantamento dos preços dos componentes do SFV. O investimento com um sistema fotovoltaico é determinado, basicamente, pelo seu tamanho, traduzido no valor de sua potência instalada. O primeiro passo da análise econômica é calcular os custos com os componentes do SFV. Além do peso que as principais partes (módulos, inversores e baterias, quando for o caso) têm no custo total, deve-se considerar também o gasto com o Balanço do Sistema (BOS).

Ainda na etapa de avaliação do pré-projeto da árvore solar, feito em um trabalho acadêmico anterior a este, verificou-se a realização de uma pesquisa de mercado entre diversos modelos e fabricantes, além de revendedores de componentes. Naquela ocasião, determinou-se a utilização de um modelo de painel e de inversor que tivessem um bom preço e atendessem aos requisitos pretendidos no projeto.

Segundo dados de um levantamento do Instituto Ideal, observa-se que atualmente os gastos com os módulos representam a maior parcela do custo total de um SFV, seguidos pelo gasto com o inversor, que também é bastante relevante. O restante do investimento com o projeto é relativo aos componentes necessários para a instalação como cabos, conectores, estruturas metálicas de suporte para fixação das placas e proteções elétricas.

Levantamento dos gastos com a instalação. O projeto de um sistema FV na forma de uma árvore solar apresenta algumas peculiaridades em relação a projetos ‘tradicionais’ de SFCRs, com a instalação isso também fica evidente. Neste projeto foi necessário considerar gastos com alvenaria na construção de um local mais apropriado para a instalação da árvore. Dessa forma, houve um custo adicional ao do sistema FV referente a material e trabalho dos técnicos nas etapas de preparação da base e de concretagem do piso.

O custo final da instalação foi então estimado com o somatório dos recursos empregados na aquisição de material e na mão de obra (de serralheria e instalações elétricas). Esses últimos foram calculados a partir de tabelas de precificação das atividades de pedreiro e eletricitista que prestam serviços para a Universidade de Brasília. A avaliação do investimento inicial do projeto foi realizada considerando principalmente os gastos com a aquisição dos componentes e com a instalação do sistema.

3. RESULTADOS

3.1 Avaliação do Recurso Solar

Conforme comentado anteriormente, a avaliação do recurso solar foi feita através de informações disponíveis no software PVSyst. Como o PVSyst já possui um vasto banco de dados meteorológicos e solarimétricos para diversas cidades do mundo, sendo que tais dados são obtidos por ferramentas da NASA e da Meteotest (como o Meteonorm 7.1), bastou selecionar a cidade de Brasília para o programa poder efetuar os cálculos e análises do local em que a árvore solar foi instalada. Sabe-se, no entanto, que apesar de não se ter os dados mais precisos para as coordenadas geográficas exatas do ponto de instalação da árvore na FT, foi possível considerar que os dados gerais para a cidade de Brasília são suficientes e representam de forma fiel a localização do sistema.

Dessa forma, foi possível obter os valores da média diária de irradiação solar para cada mês do ano na cidade de Brasília. Tais valores são apresentados no gráfico da Figura 2.

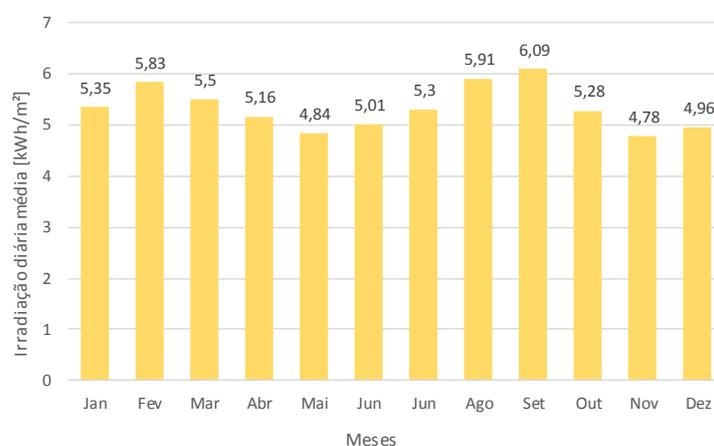


Figura 2 – Gráfico dos valores médios da irradiação solar diária para cada mês na cidade de Brasília
Fonte: Dados do software PVSyst obtidos com auxílio da ferramenta Meteonorm 7.1

Da avaliação dos resultados no gráfico, percebe-se que a cidade de Brasília realmente apresenta taxas de irradiação bastante relevantes. Dentre todos os meses, tem-se uma média total de aproximadamente 5,33 kWh/m², com desvio padrão igual a 0,43. Um desvio tão pequeno demonstra que, de fato, a maioria das médias diárias para cada mês apresentam valores bem próximos da média total.

Dados do Atlas de Irradiação Solar (1998) mostram que o Brasil possui taxas de irradiação que vão de 4,5 a 6,1 kWh/m². Relacionando os resultados obtidos pelo PVSyst para Brasília com os do resto do País, é possível ver que o valor de 5,33 kWh/m² é igual a média do Brasil (de 5,3 kWh/m²) e que o valor máximo, verificado no mês de setembro, é muito próximo do máximo total do País.

A análise do recurso solar na cidade de Brasília comprova que a localização do projeto da árvore solar é bastante adequada para se atingir bons resultados na geração fotovoltaica.

3.2 Localização

No estudo ‘Especificação Técnica para Implementação de Árvore Solar na Faculdade de Tecnologia’, que antecedeu esse trabalho, também foi feita uma avaliação preliminar de possíveis locais de instalação, mas tal estudo indicou a necessidade de verificar o sombreamento de forma mais detalhada.

Dessa forma, a localização definida para a instalação da árvore solar fotovoltaica levou em consideração, principalmente, os seguintes aspectos: o possível sombreamento causado objetos próximos, a logística do posicionamento do inversor, a chance de trazer visibilidade para o uso de energia fotovoltaica por parte da comunidade e a segurança da estrutura e dos seus componentes.

O local escolhido foi o jardim interno da Faculdade de Tecnologia por ele apresentar uma boa área descoberta livre de sombras, relativa proximidade com a guarita (onde está um dos quadros elétricos do prédio e local onde será colocado o inversor), por oferecer certa segurança e por ser um ponto com grande circulação de pessoas.

3.3 Modelo 3D

Para auxiliar na escolha do local de instalação do projeto e em sua análise técnica, principalmente no que diz respeito ao estudo de sombreamento, utilizaram-se modelos tridimensionais do protótipo da árvore e da Faculdade de Tecnologia (FT) elaborados no software SketchUp.

A seguir é possível observar algumas vistas do desenho tridimensional da árvore solar fotovoltaica e do modelo da FT mostrando o seu jardim interno, local previsto para a implementação do projeto na Figura 3.

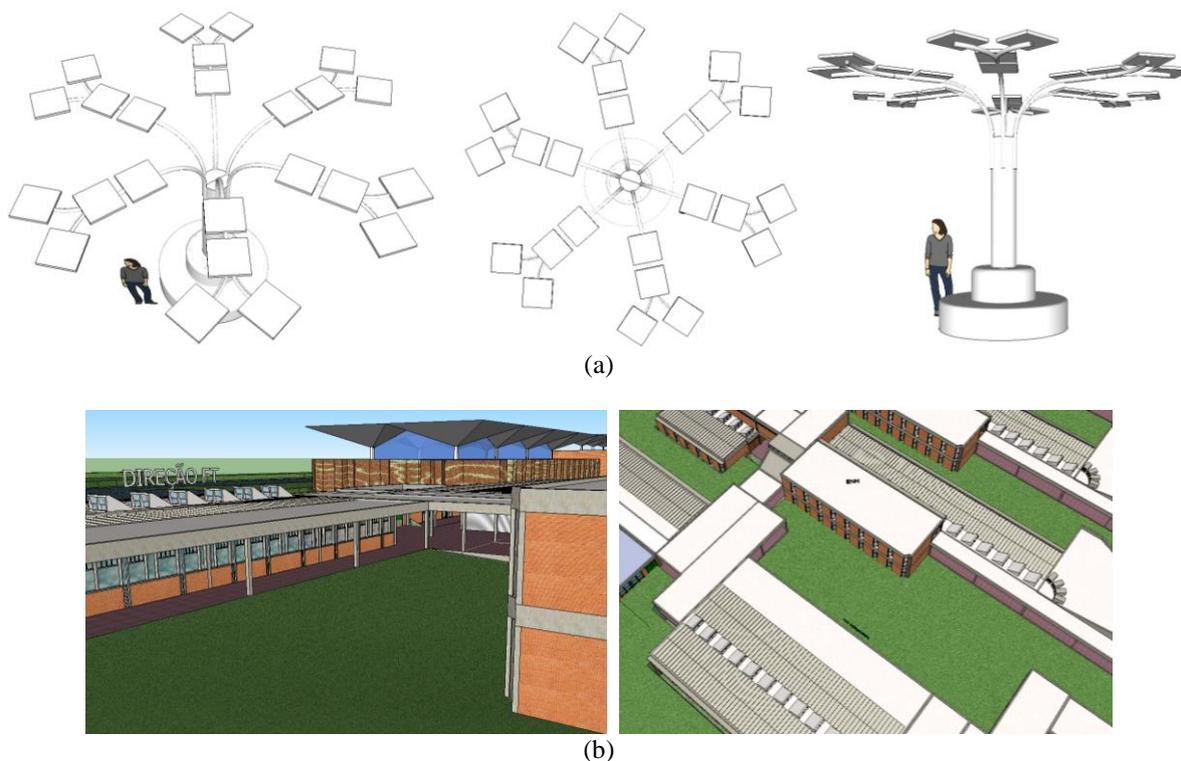


Figura 3 – Vistas dos modelos 3D da (a) árvore solar e (b) Faculdade de Tecnologia (FT)

A partir dos desenhos em escala, foi feito o posicionamento da árvore no local escolhido dentro da Faculdade de Tecnologia, para checar as dimensões do protótipo em relação à área designada e permitir a verificação das sombras projetadas sobre ele.

3.4 Estudo de sombreamento

Nesta etapa do trabalho, foi feita uma análise mais detalhada do local indicado para instalação da árvore solar. Levando-se em consideração, principalmente, o objetivo de posicionar o protótipo de modo a obter uma maior exposição ao Sol, realizou-se um estudo de sombreamento do jardim interno da FT.

Neste estudo foram utilizados o software SketchUp e modelos computacionais em 3D que representassem a árvore e a Faculdade de Tecnologia da UnB. O primeiro passo foi realizar o georreferenciamento do modelo, isto é, determinar as coordenadas geográficas do local de instalação e inseri-las no software. Esta etapa é feita para que o SketchUp possa indicar o comportamento do sol e das sombras que ele projeta no exato ponto geográfico que se deseja avaliar. As coordenadas do ponto em questão e a representação gráfica do local definido (Figura 4) foram obtidas com auxílio da ferramenta Google Earth Pro e podem ser verificadas a seguir.

Georreferência do Modelo (obtida com o Google Earth Pro):

- Latitude: 15°45'49.15" S
- Longitude: 47°52'22.30" O

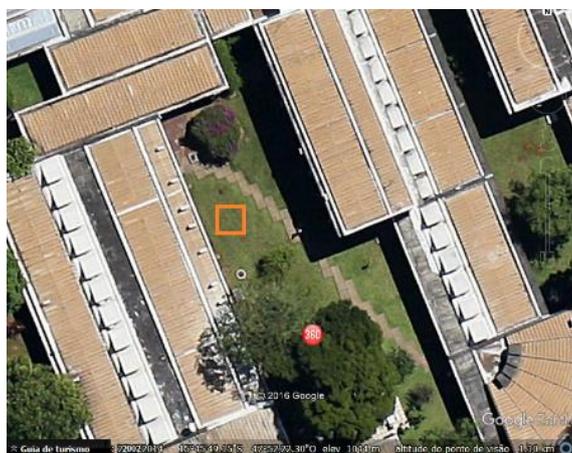


Figura 4 – Fotografia aérea da Faculdade de Tecnologia da UnB com destaque para o local de instalação da árvore solar (editada pela autora)

Fonte: Google Earth Pro

Em seguida, com o modelo georreferenciado no SketchUp, foi utilizada a ferramenta *Shadows*, que faz parte do pacote do programa e que possibilita a verificação das sombras projetadas sobre um local para qualquer data do ano e em qualquer horário.

No estudo de sombreamento, observaram-se especialmente as datas dos solstícios de verão e de inverno e em três horários distintos ao longo do dia. Sabendo que o dia mais crítico é 21 de junho (solstício de inverno), por apresentar menos tempo de luz solar, seguem as figuras referentes ao sombreamento neste dia.

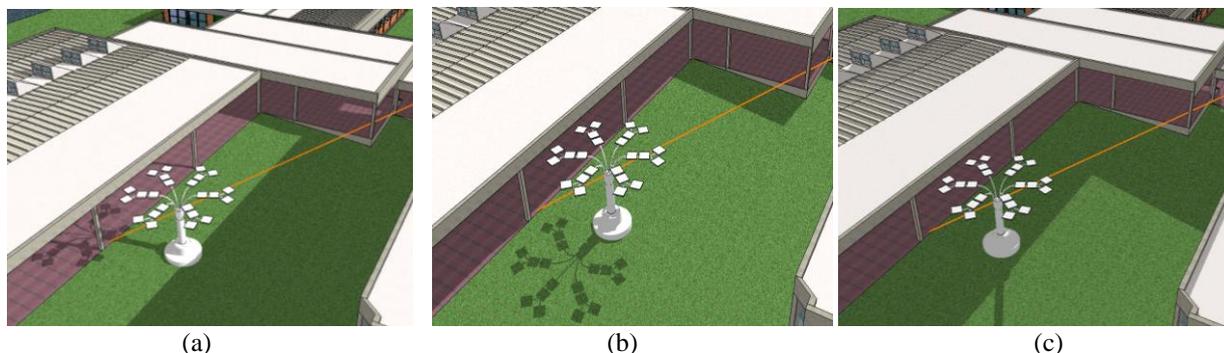


Figura 5 – Sombreamento no dia 21 de junho às (a) 9h, (b) 13h e (c) 16h

3.5 Dimensionamento

No dimensionamento da árvore solar fotovoltaica os critérios adotados foram:

- Sistema solar FV conectado à rede e sem baterias, com potência de pico de cerca de 1kW;

- Sistema de monitoramento de dados para acompanhamento do desempenho da geração de energia elétrica, para divulgação ao público e utilização em pesquisas;
- Estrutura em formato abstrato de “árvore” (com painéis simulando as folhas que formariam a copa da árvore);
- Localizado dentro da FT, em local de grande movimentação para que seja bastante visualizado e divulgado ao público;
- Escolha de fornecedores nacionais, com equipamentos disponíveis para pronta entrega (Barbosa, 2014);

Decidiu-se então que o sistema teria 24 painéis solares da marca Yinlgi Solar com potência de pico igual a 55 Wp. Dessa forma, a árvore solar apresentaria, como capacidade de geração, uma potência nominal de 1320 Wp. As principais características dos módulos podem ser verificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características técnicas dos módulos fotovoltaicos

CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS	
Potência nominal dos módulos (Wp)	55
Quantidade de módulos	24
Voc módulo (V)	22,07
Vmpp módulo (V)	17,83
Isc módulo (A)	3,28
Impp módulo (A)	3,08
Potência nominal do arranjo (kWp)	1,32

Algo comum em inversores para conexão como a rede elétrica é o fato de possuir uma ou mais entradas MPPT. Isso é feito para que haja a maximização da potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, pois assim eles são capazes de operar constantemente em seu ponto de máxima potência, independentemente das condições que afetam o desempenho e alteram a curva característica de corrente e tensão do conjunto de módulos (Villalva, 2015).

O inversor central escolhido foi o modelo 1.5-1 de 1,5 kW, da marca Fronius Galvo. Segundo suas especificações técnicas este modelo de inversor apresenta uma entrada MPPT, o que já permite um melhor desempenho do SFV. Observam-se as principais características do inversor na Tabela 2.

Tabela 2 – Características técnicas do inversor

CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR	
Potência nominal do inversor (kW)	1,5
Quantidade de inversores	1
Tensão de entrada máxima (V)	420
Corrente máxima de entrada (A)	13,3A
Quantidade de rastreadores MPPT	1
Faixa de tensão MPPT (V)	120-335

Finalmente, os parâmetros de perdas para os dois sistemas dimensionados também apresentam os mesmos valores e estão definidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de perdas utilizados na simulação

PARÂMETROS DE PERDAS	
Térmicas	$U_c=19\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (*)
Ôhmicas	1,5% (**)
Qualidade do módulo	2,5% (**)
Mismatch	1% (**)
Degradação pela Luz	2% (**)
Acúmulo de sujeira nos módulos	3% (**)

(*) painéis instalados sobre bases vazadas com livre circulação de ar / (**) valor sugerido pelo PVSyst

3.6 Definição da configuração

A definição da configuração do sistema da árvore solar foi feita de forma a buscar a eficiência do sistema e respeitando as limitações do projeto e da ferramenta computacional utilizada na análise.

Como o modelo arquitetônico sugerido apresenta os “galhos” em um mesmo plano, sem curvatura e os módulos em uma mesma orientação, foi utilizada a análise do PVSyst para a otimização dos ângulos de inclinação e azimute. Assim, foi possível definir a configuração a partir das recomendações do software para os ângulos de orientação

otimizados e para a quantidade de módulos por *string* que fosse adequada considerando as especificações técnicas dos modelos de inversor e módulos.

3.7 Simulação

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, para auxiliar com o dimensionamento, permitir a simulação do sistema e determinar seus principais resultados no PVSyst, foi necessário definir a localização do projeto, a orientação e inclinação dos módulos, os modelos e potências dos painéis e do inversor, a interligação dos componentes do sistema e os parâmetros de perdas.

A partir de tais definições e do dimensionamento do projeto, é possível realizar a simulação da operação do sistema e obter resultados que permitem avaliar o efeito de variações sazonais da irradiação, a energia gerada (e no caso deste trabalho, injetada na rede elétrica), eficiência do sistema, entre outros parâmetros, e em intervalos de tempo que vão de horas até meses. A simulação auxiliou ainda na verificação de arranjos mais eficientes para cada caso. Nela foi necessário considerar as limitações do PVSyst e do projeto. Assim, verificou-se que o arranjo mais eficiente é o que divide os módulos em 2 strings com 12 painéis cada e com a orientação otimizada de 23° de inclinação e 0° de azimute.

Dessa forma, os resultados obtidos para a simulações do sistema da árvore solar, principalmente no que diz respeito à capacidade de geração podem ser observados nas Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da simulação do sistema fotovoltaico

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA	
Potência nominal dos módulos (Wp)	55
Quantidade de módulos	24
Orientação dos módulos (inclinação/azimute)	23°/0°
Quantidade de módulos série (string)	12
Número de Strings	2
Potência nominal do arranjo (kWp)	1,32
Potência em condições de operação – 50°C (kWp)	1,188
Vmpp (V)	193
Impp (A)	6,2
Área ocupada (m2)	10
Potência nominal do inversor (kW)	1,5
Quantidade de inversores	1
Tensão de operação (V)	120-335
Performance (%)	79,95
Geração anual de energia (kWh/ano)	2168,0

Conforme observado dos resultados anteriores, o modelo proposto para implementação de uma árvore solar na Faculdade de Tecnologia é consideravelmente eficiente em termos de geração de energia durante o ano, apresentando um valor de 2168,0 kWh/ano.

3.8 Levantamento do Investimento Inicial

Com os valores dos componentes do sistema, do material utilizado na construção do protótipo e dos serviços realizados para a confecção e a implementação da árvore é possível estimar o custo inicial do projeto. A tabela a seguir representa a divisão dos custos em equipamentos do SFV e serviços realizados na construção e na instalação do projeto, bem como o preço da energia gerada pela árvore (Tabela 5).

Tabela 5 – Custos dos componentes do SFV

EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	TOTAL
Módulos	24	R\$ 6.000,00
Inversor	1	R\$ 6.500,00
Cabos (100m)	4	R\$ 440,00
BOS (Conectores, dispositivos de proteção, etc.)	-	R\$ 500,00
Serviço de construção do protótipo (serralheria)	-	R\$ 3.312,00
Serviço de instalação elétrica	-	R\$ 960,00
TOTAL		R\$ 17.712,00
Custo (R\$/kWp)		R\$ 13,42

3.9 Concepção, construção e instalação da árvore solar na FT

Diante do que foi apresentado neste trabalho com a proposta de implementação de uma árvore solar fotovoltaica na Faculdade de Tecnologia da UnB e a partir dos resultados das análises técnica e econômica do projeto, teve início a instalação de fato de um protótipo de árvore solar no local determinado no estudo no final de 2017. Trata-se de um modelo arquitetônico com design mais orgânico e estrutura construída com o reaproveitamento de antigos postes de iluminação pública. Além de reduzir os gastos com o projeto, isso ainda chama a atenção para atitudes ecologicamente sustentáveis e que diminuam os danos ao meio ambiente, o que também é o foco deste projeto.

É importante mencionar que atualmente, no entanto, apesar de última etapa, de instalação da parte elétrica estar encaminhada, com os equipamentos comprados e o projeto elétrico feito, ela ainda está pendente devido algumas questões burocráticas relativas ao andamento de processos de contratação de serviços e compra de componentes.

O arranjo final do modelo pode ser observado na Figura 6.



Figura 6 – Arranjo final da estrutura montada da árvore solar da FT visto de direções distintas.

Fonte: Fotografias feitas pela autora em visita ao local

Uma vez que a implementação for concluída, com o gerador fotovoltaico devidamente instalado e em funcionamento, será possível coletar dados de medições do protótipo da árvore solar da FT e realizar análises de desempenho e eficiência do modelo. Assim, será possível avaliar, na prática, os aspectos que foram considerados previamente nas etapas de projeto do presente sistema fotovoltaico. Os futuros resultados práticos da geração fotovoltaica deste arranjo possibilitarão, ainda, análises sobre o impacto da economia do consumo energético do prédio da FT e os valores finais dos gastos com o projeto permitirão avaliar de que formas as árvores solares podem ser mais viáveis economicamente. Todas as conclusões sobre a implementação do referido protótipo serão de grande utilidade para embasar novos modelos de árvore solar pois, estando dentro da universidade, pode também incentivar os estudos necessários para desenvolver o próprio modelo instalado, as tecnologias nele envolvidas e promover o uso de energia solar.

4. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar técnica e economicamente a realização de um projeto de um sistema fotovoltaico na forma de uma árvore solar na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

A elaboração e a execução de um projeto de aproveitamento de uma fonte de energia renovável como a solar vem ao encontro de propostas que têm tomado um espaço cada vez maior na sociedade, não apenas em termos de protótipos para estudo do emprego das tecnologias nestes projetos, mas também em termos do lançamento de produtos derivados do desenvolvimento delas. Isso quer dizer que a realização de um projeto como o SFV, proposto neste trabalho, é uma forma de incentivar que sejam feitos cada vez mais trabalhos e estudos no sentido de melhorar a tecnologia do aproveitamento das fontes renováveis, de apresentar propostas de integração de sistemas de micro e minigeração a áreas

urbanas, de tornar a energia gerada por esses sistemas mais acessível e viável, além de promover os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Com a possibilidade de projetar SFVs com arquiteturas diferentes do que é feito tradicionalmente na paisagem urbana, em que se costumam utilizar telhados e fachadas de prédios, verificam-se algumas das vantagens que se obtêm com inovações no design de um sistema de geração solar, como a riqueza estética e a economia de espaço.

A modelagem em 3D permitiu verificar com precisão o arranjo arquitetônico do modelo e o local de instalação de modo a avaliar as dimensões do protótipo em relação à área designada e permitir a verificação das sombras projetadas sobre ele. A análise do recurso solar na cidade de Brasília conclui que a localização do projeto da árvore solar é bastante adequada para se atingir bons resultados na geração fotovoltaica. Além de o Brasil possuir altas taxas de irradiação (entre 4,5 e 6,1 kWh/m²) a cidade de Brasília apresenta uma taxa de irradiação de 5,33 kWh/m², que é igual a média brasileira (dados obtidos pelo PVSyst para Brasília).

Através da análise técnica concluiu-se que o modelo proposto é consideravelmente eficiente em termos de geração de energia durante o ano, apresentando um valor de 2168,0 kWh/ano. De fato, uma das principais conclusões foi que o investimento em sistemas de geração conectados à rede elétrica, sendo o caso deste trabalho um SFV, representa uma vantagem em termos de ações para reduzir os gastos energéticos de um prédio público e também do ponto de vista ecológico, ao utilizar energia limpa e renovável de fácil exploração.

Quanto ao ponto de vista econômico, entende-se que um projeto, como o realizado neste estudo, ainda pode ser melhor desenvolvido e alguns gastos podem ser minimizados para que a energia gerada por ele se torne ainda mais competitiva.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004. 209p.

Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica. Cadernos Temáticos da Aneel: Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, 2016. 31p. Disponível em: www.aneel.gov.br.

Barbosa, L., 2014. Especificação Técnica para implementação de Árvore Solar na Faculdade de Tecnologia, Trabalho de Iniciação Científica, UnB, Brasília.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: www.cresesb.cepel.br.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos, 2006. Disponível em: <ftp.cptec.inpe.br>.

Instituto Ideal. O mercado brasileiro da geração distribuída - Edição 2017. Florianópolis, 2017. 68p. Disponível em: www.issuu.com.

ONU – Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento sustentável - Agenda 2030. 2015. Disponível em: www.nacoesunidas.org.

PV Upscale – Urban Scale Photovoltaic Systems. Solar City Gleisdorf. 2007. Disponível em: www.pvupscale.org.

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. 2000. 111p. Disponível em: www.cresesb.cepel.br.

Villalva, M. G., 2015. Energia solar fotovoltaica, Conceitos e Aplicações, Sistemas Isolados e Conectados à Rede 2a edição. Ed. Érica.

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS ON THE IMPLEMENTATION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN THE MODEL OF A TREE AT THE FACULTY OF TECHNOLOGY AT THE UNIVERSITY OF BRASÍLIA

Abstract. *This paper aims to present the idea of and to evaluate a model of solar tree to be installed in the Faculty of Technology of the University of Brasilia. The evaluation will be composed of a technical analysis and an economic analysis of the project. The methodology adopted for the technical analysis will consist of the following steps: a) evaluation of the solar resource; b) location; c) 3D modeling; d) shading study; f) array definition; g) sizing; h) simulation of operation. For the technical analysis will be used the softwares Sketchup and PVsyst. The methodology used for the economic analysis was elaborated aiming to record the resources employed in the tree and to serve as the basis for expenditures of future projects. The first step of this economic analysis was to calculate the costs with the SFV components. It was taken into account not only how much the main parts (modules, inverters and batteries, when applicable) represent in the total cost, but also the expenses with the System Balance (BOS). The final cost of the installation was estimated adding the resources used in the acquisition of material with the costs of the skilled labors (in locksmithing and electrical installations).*

Key words: *Solar tree, Architecture, Technical and economic analysis.*