



DIMENSIONAMENTO PRÁTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO - ESTUDO DE CASO UTILIZANDO O SOFTWARE PVSYS[®]

Leonardo Nery Carrijo dos Santos^{*1}, Diogo Martins Azevedo¹, Gerson Flávio Mendes de Lima¹, Milton Miranda Neto¹, Alexandre Cardoso¹, Ígor Andrade Moraes¹, Gabriel Fernandes Cyrino¹ e Ian Avelar¹

¹FEELT - Universidade Federal de Uberlândia

Resumo -Este trabalho apresenta um estudo de caso detalhado sobre a contribuição do software PVSyst[®] para a elaboração de um projeto de sistema fotovoltaico residencial na cidade de Uberlândia-MG. Nesse projeto, são apresentadas todas as principais funcionalidades do software, acerca do dimensionamento de um sistema fotovoltaico *on grid*, no qual será avaliado a irradiância solar em função do tempo, eficiência dos módulos fotovoltaicos e a associação dos módulos propostos em função do acoplamento com o inversor. Dessa forma, será possível uma visão geral da eficiência do sistema proposto e suas possibilidades práticas, de modo que o projetista e o cliente tenham uma visão completa do projeto a ser realizado e encontrem juntos uma forma para maximizar o investimento.

Palavras-Chave- Sistemas fotovoltaicos-Dimensionamento-Software-PVSyst

SIZING AND SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING THE SOFTWARE PVSYS[®]

Abstract -This presentation depicts a detailed case study on the contribution of the PVSyst[®] software towards the development of a residential photovoltaic system in the city of Uberlândia, MG. In this project, all the main uses of the software on the dimensioning of a photovoltaic system on grid are presented, in which it will be evaluated the solar radiation as a function of time, the efficiency of the photovoltaic modules, as well as the association of the proposed modules as a function of the junction with the inverter. Thus, it will be possible to have a better view of the efficiency of such system and its practical possibilities in such way that the developer and the client will have the full picture of the project being developed and find, together, a plan to maximize their investments.

Keywords - Sizing- Photovoltaic system- PVSyst

NOMENCLATURA

I_{mpp} Corrente para máxima potência

I_{sc} Corrente de curto circuito

*leonardoncsantos@ufu.br

V_{oc} Tensão de circuito aberto
V_{mpp} Tensão para máxima potência
CA Corrente alternada
CC Corrente contínua
Wp Watt-pico
kWh kilowatt hora

I. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países do mundo com o maior potencial de instalação e geração de energia fotovoltaica, uma vez que apresenta elevada incidência solar e um vasto território. Assim, essa energia sustentável apresenta o potencial de reduzir a dependência brasileira por hidrelétricas e termodinâmicas. No que tange os tipos de geração, destaca-se o crescimento da geração distribuída de energia fotovoltaica, uma vez que permite ao usuário instalar os módulos em sua residência e, assim, reduzir seu consumo. Nos anos de 2016 e 2017, por exemplo, essa geração teve sua produção energética quadruplicada, com destaques para a micro e minigeração distribuída [1].

Este trabalho visa apresentar o software de dimensionamento fotovoltaico PVSyst[®], e, a partir de um estudo de caso, demonstrar como suas funcionalidades podem tornar mais intuitivo e preciso o trabalho do engenheiro eletricista, e ainda fomentar o conhecimento, a pesquisa e a produção dessa energia limpa.

O estudo de caso será feito a partir de análises de gráficos que o PVSyst[®] fornece ao usuário, como a irradiação solar na residência em questão, o rendimento dos diversos componentes que compõem o sistema e a energia gerada pelos módulos, convertida pelo inversor e injetada na rede. Assim, será possível simular a operabilidade de um sistema com geração fotovoltaica residencial.

A. Energia Fotovoltaica

O efeito fotoelétrico é observado quando a irradiação solar incide sobre os módulos fotovoltaicos, os quais são formados, na maioria dos casos, por silício, um material semicondu-

tor e abundante na natureza. Quando a irradiação solar entra em contato com os módulos fotovoltaicos, ocorre uma excitação dos elétrons do material semicondutor, promovendo o surgimento de elétrons foto geradores, os quais serão levados à banda de condução e, assim, formarão pares de íons no material. Caso a energia proveniente dos fótons seja maior que a energia de gap do semicondutor, há a passagem de corrente elétrica no interior da célula fotovoltaica [2].

Porém, o cristal silício puro não é adequado para o efeito fotovoltaico, visto que não apresenta elétrons livres, devendo assim, ser dopado. As células fotovoltaicas são formadas por duas camadas semicondutoras, conhecidas como tipo P e tipo N, formando uma junção P-N. Acrescenta-se boro na camada do tipo P e fósforo na camada do tipo N, de modo a tornar a primeira com falta de elétrons, e a segunda com excesso. A partir do momento em que há a incidência do fóton, cria-se uma diferença de potencial entre as camadas, o que gera a passagem de corrente [3].

Ademais, destaca-se que a geração de energia fotovoltaica é dividida em duas partes. Na primeira parte, ocorre a geração de energia elétrica em corrente contínua a partir da conversão de energia luminosa em elétrica nos módulos fotovoltaicos. A segunda parte, por sua vez, está relacionada a passagem de corrente contínua para alternada, processo este que requer diversos componentes elétricos, como inversores, controladores de carga, banco de baterias, cabos, entre outros. Tais componentes constituem o BOS (*Balance of System, em português "Balanco do Sistema"*) de um sistema [4].

B. Análise acerca do software

O PVsyst[®] foi criado no início da década de 90 na Suíça por engenheiros e especialistas da área que almejavam criar uma plataforma virtual capaz de realizar o dimensionamento completo e a confecção detalhada de um sistema fotovoltaico, seja ele conectado ou não à rede [5]. Ainda que existam diversos softwares com a mesma proposta, será escolhido o PVsyst[®] devido à sua interface intuitiva e seu amplo conjunto de dados para o dimensionamento fotovoltaico, o que tornam-no extremamente condizente com a proposta do trabalho, que é propôr um estudo prático acerca do tema.

Além do projeto detalhado, o software possibilita ao usuário realizar um projeto fotovoltaico preliminar, por meio de um dimensionamento rápido e simples do sistema, como se fosse um protótipo. Tal projeto é ideal para o usuário que não apresenta os conhecimentos específicos da área, mas quer analisar o custo benefício de um sistema residencial seja ele conectado ou não à rede [6].

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A seguir, serão abordados trabalhos relacionados ao tema proposto, bem como a diferenciação do trabalho atual dos demais levantados. Para realizar uma busca acerca dos principais trabalhos científicos sobre o tema proposto, foram utilizadas palavras-chave como dimensionamento, softwares e sistemas fotovoltaicos. Ao finalizar as pesquisas, foram encontrados diversos artigos, os quais foram selecionados de acordo com a

sua conformidade diante ao tema e relevância científica, a partir da quantidade de citações realizadas. Assim sendo, serão analisados os dois artigos a seguir.

A. Dissertação: Programa Computacional para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos

Este trabalho visa a criação de um programa computacional que auxilie o engenheiro eletricitista na escolha dos elementos de um sistema fotovoltaico autônomo, determinando, por meio de modelos matemáticos, a melhor configuração do sistema. Em comparação com este projeto, esse artigo aborda sobre softwares de dimensionamento, como o PVsyst[®], por exemplo. Por outro lado, tem-se que esse artigo aborda um sistema autônomo, diferentemente do estudo de caso proposto, o qual é feito em um sistema conectado à rede [7].

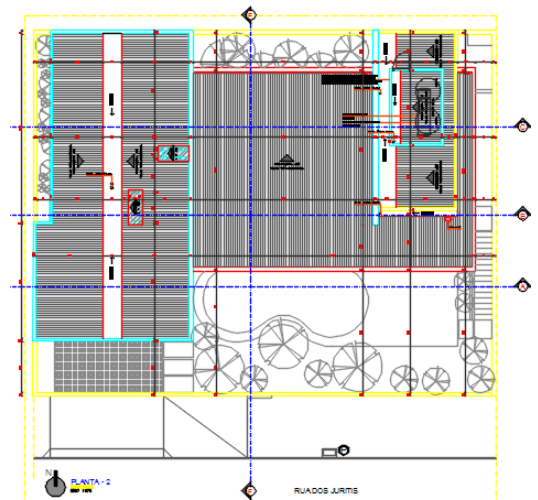
B. Dissertação: Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos

Este trabalho apresenta uma proposta análoga ao estudo de caso, uma vez que essa detalha o funcionamento de um sistema fotovoltaico e ainda apresenta a capacidade de um dimensionamento prático realizado por softwares. Porém, esse trabalho se difere do artigo presente pois não apresenta uma caso prático que represente uma possível aplicação para as diversas teorias levantadas, de modo a focar de forma mais intensiva no dimensionamento do sistema e de seus componentes [8].

III. DESENVOLVIMENTO

O presente estudo de caso será realizado com base em uma residência a ser construída na cidade de Uberlândia-MG. Inicialmente, o projetista deve analisar alguns dados da residência, como: área disponível para instalação, irradiação média anual e a possibilidade de sombras, visto que interferem diretamente na geração de energia. Ademais, outro fator a ser considerado é a questão financeira, visto que o projeto depende diretamente da quantia que o cliente está disposto a investir. Para o início do dimensionamento, analisa-se a arquitetura da casa por meio do software AutoCAD, como se pode observar na Figura 1.

Figura 1: Arquitetura da residência referente ao estudo de caso.



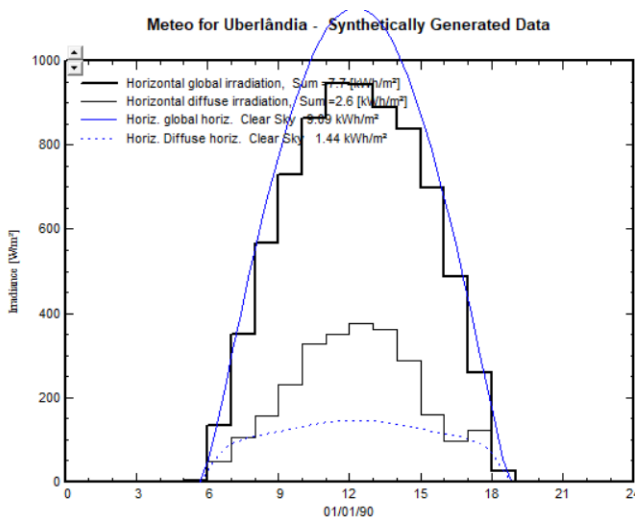
Fonte: imagem extraída do software AutoCAD.

Diante da planta baixa, observa-se o direcionamento dos telhados e a inclinação destes. A partir disso, definiu-se que o projeto seria realizado no telhado central da casa, visto que apresenta maior área e está direcionado para o Norte geográfico, o que favorece sua captação de radiação. Este telhado possui uma inclinação de 5 por cento.

A. Parâmetros geográficos

Ciente dos dados referentes à instalação, é necessário que o projetista tenha conhecimento dos dados meteorológicos referentes a residência, e, para isso, o PVsyst® é uma prática e eficiente ferramenta. Primeiramente, insere-se as coordenadas da casa no software, e este, por sua vez, apresentará dados como irradiação global e difusa, temperatura e velocidade do vento, os quais são determinantes para o geração de energia dos módulos. Pode-se analisar, portanto, os dados acerca da irradiância em função do tempo a partir da Figura 2.

Figura 2: Gráfico da irradiância em função do tempo.



Fonte: imagem retirada do software PVsyst.

O gráfico apresenta a intensidade de radiação direta e difusa em um sistema fotovoltaico. É possível concluir que em um dia claro, a radiação e, conseqüentemente, a geração de energia é maior, visto que esse não apresenta interferências à luz, como as nuvens, por exemplo. Ademais, determina-se um valor padrão para a constante de reflexão (Albedo) de 0,2, no sentido de que 20 por cento da luz que emitida pelo Sol é refletida por diferentes superfícies e emite radiação difusa no módulo [9].

B. Variáveis do sistema

Posteriormente, cabe ao projetista determinar as variáveis do sistema, como orientação dos módulos, composição do sistema fotovoltaico e as perdas durante o projeto.

1) Orientação do módulo fotovoltaico

A orientação do módulo é uma parte primordial para o dimensionamento do sistema, visto que sua posição em relação ao Sol determina a energia luminosa que incidirá sobre eles. De acordo com a figura 2 tem-se que o azimute dos painéis é 0, pois o telhado está direcionado para o Sol [10].

No que tange a inclinação dos telhados, sabe-se que essa depende diretamente da latitude do local. Para o presente projeto, utilizou-se 18 graus de inclinação para os módulos, valor esse dado pelo PVsyst® quando determinamos as coordenadas do projeto.

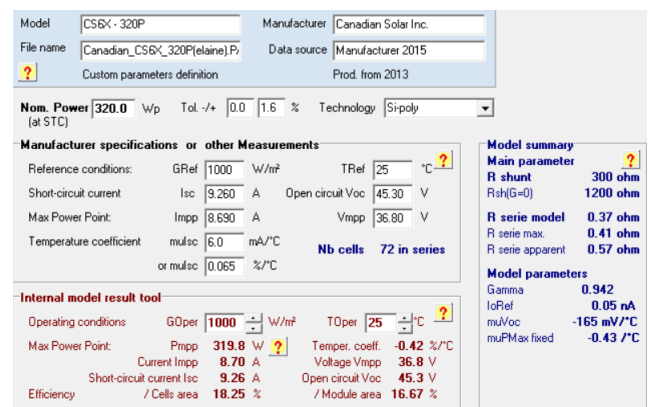
2) Determinando o módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos têm se desenvolvido de forma célere, haja visto que diversos países asiáticos e europeus, os quais objetivam diminuir a dependência em recursos não renováveis, têm investido de forma intensiva na pesquisa e desenvolvimento da tecnologia, produzindo assim, painéis com maior eficiência por área e menor preço [11].

Para o referente estudo de caso, o projetista, já ciente da área disponível nos telhados e dos dados meteorológicos da residência, dimensionou o sistema fotovoltaico. Para isso, o cliente informa a quantia que está disposta a investir, e assim, o responsável pelo projeto seleciona o módulo com melhor custo benefício e a quantidade será instalada. Para decidir o módulo mais adequado, devem ser analisados, inicialmente, dados como potência, Voc e Vmpp, visto que estes dimensionarão o inversor a ser utilizado, pois este opera em determinados valores de potência de pico e de tensão de entrada. Além disso, determina-se o módulo priorizando aquele cujos valores de corrente contínua forem elevados, que apresente uma eficiência satisfatória e um fabricante com experiência de mercado.

Para o referente estudo de caso, foi escolhido o módulo CS6X-320P da Canadian Solar, com 320Wp, área de 1.9 metros quadrados, e eficiência de 16.67 por cento. Após a escolha do painel, o projetista analisa seus dados operacionais com o auxílio do PVsyst®, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Datasheet do módulo fotovoltaico.



Fonte: imagem extraída do software PVsyst.

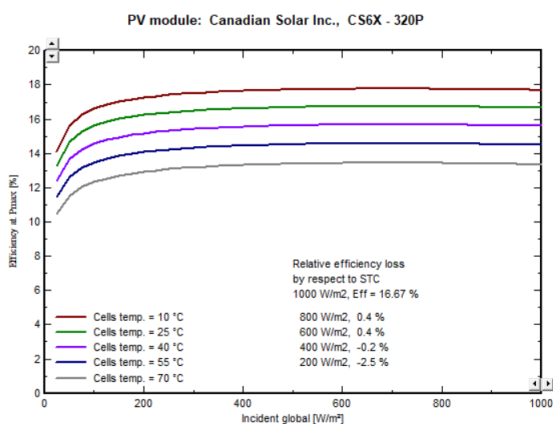
A escolha do painel vou feita devida a sua alta potência e Imp e baixa Vmpp, de modo que esse consiga oferecer alta potência em CC e baixa queda de tensão na rede. , a escolha do módulo também levou em conta a questão do fabricante, haja visto que a Canadian Solar está entre as três melhores marcas de módulos fotovoltaicos do mercado [12].

Ademais, analisa-se a questão do sombreamento nos módulos como um fator limitador à conversão de energia, uma

vez que região passa a agir como uma carga, convertendo eletricidade em calor, provocando pontos quentes (hot-spots) nos módulos e, conseqüentemente, os danifiquem. Para evitar isso, são necessários diodos de by-pass, os quais são conectados de forma inversamente polarizada em relação às células danificadas, evitando que a corrente passe por elas. Recomenda-se utilizar um diodo de by-pass a cada 20 células [13]. Logo, para o referente projeto, foi definido um quantidade de 4 diodos por módulo, visto que cada um apresenta 72 células.

Outro fator a ser analisado pelo projetista é a eficiência do módulo sob diferentes níveis de radiação, de modo que esse possa prever o rendimento do painel ao longo de diferentes períodos do ano. Para possibilitar esse tipo de previsão, analisa-se a Figura 4.

Figura 4: Gráfico eficiência x irradiação do módulo fotovoltaico.



Diante desse gráfico, nota-se que a eficiência do módulo é dependente tanto da irradiação solar quanto da temperatura das células fotovoltaicas. Na prática, a temperatura será maior que 25°C, visto que o módulo se aquece quando há passagem de corrente, logo, o projetista deve estar ciente do coeficiente de temperatura do módulo, que está relacionado ao decréscimo percentual de potência, corrente ou tensão devido ao crescimento unitário de temperatura [14]. Para o dimensionamento em questão, temos, de acordo com o data sheet, que para cada aumento de temperatura no módulo, há uma redução de 0.065 por cento para a I_{sc} .

A partir do valor proposto pelo cliente em questão, o projetista dimensionou um sistema com 10 módulos fotovoltaicos, e, a partir das dimensões do painel escolhido presentes no PVsyst®, determinou-se uma área de 20 metros quadrados para a instalação do sistema. No que tange ao software, o projetista determina essa área no sistema e esse calcula a potência de pico que seria gerada.

A partir da potência de pico do sistema, analisa-se o quanto de energia será produzido pelos módulos, e assim, verifica se essa produção conseguirá ou não suprir a demanda energética da residência. Ademais, a partir da potência de pico, o projetista define o inversor do sistema, como será analisado a seguir.

3) Determinando o inversor do sistema

O inversor é o componente mais importante do BOS, visto que realiza a conversão de CC para CA e mantém o módulo operando no MPP. Essa última é feita por meio de MPPTs (Maximum Power Point Trackers, em português "rastreadores de máximo ponto de potência"), que são códigos de comando computacional implementados em uma lógica tal que a partir do sensoriamento de variáveis do sistema seja possível encontrar um ponto que opere na máxima capacidade do sistema.

Tal capacidade dos inversores é fundamental, pois a energia entregue pelos módulos varia devido a incidência solar e temperatura da célula [15].

Acerca do dimensionamento do componente, sabe-se que o inversor deve ser escolhido de acordo com sua potência e tensão de operação. Para o referente estudo de caso, foi determinado o inversor PVI-3.8-OUTD-S-US, da marca ABB, o qual apresenta 3,3kW de potência e valores nominais de tensão de 140-530V, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Inversor PVI-3.8-OUTD-S-US .



Fonte:

<https://library.e.abb.com/public/c48f2ba36ce94746b4ba58415b6875b4/PVI-3.0-EN-Rev>

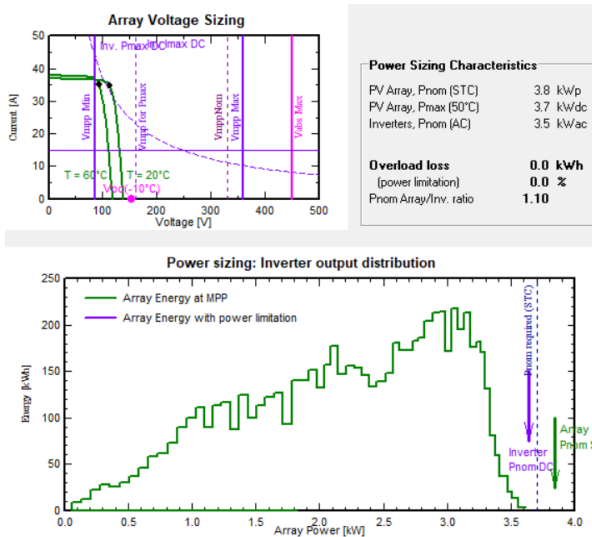
No que tange as questões operacionais do inversor, seus parâmetros de tensão permitem que os módulos sejam dispostos em uma menor quantidade de strings, aumentando a Vcc que chega no inversor. Ademais, é preferível que a Icc gerada pelos módulos não seja muito alta, uma vez que essa gera perdas de energia e que a imposição de corrente na rede não é benéfica ao sistema, pois requeriria uma ação de boost com razão cíclica de trabalho elevada [16]. Por fim, já determinados os principais componentes do BOS, foi dimensionado um sistema composto por duas strings com 5 módulos fotovoltaicos cada, gerando uma Vmpp de 154V em CC na entrada do inversor, e uma Impp contínua de apenas 17,7A. Dessa forma, foi possível proporcionar uma elevada tensão e baixa corrente contínuas, se adequando a um sistema com baixas perdas.

IV. RESULTADOS

Ao término do estudo de caso, é feito uma simulação do projeto dimensionado no PVsyst[®] no intuito de gerar gráficos e valores acerca dos resultados finais do sistema, como a energia final gerada e as respectivas perdas. Inicialmente, tem-se que o sistema gerou 5448kWh de energia por ano e que as perdas no sistema totalizaram 0.24kWh para cada kWp gerado no período de um dia, resultando assim, em um rendimento de 0,802 .

A partir da Figura 6, será possível comparar os valores de energia gerados pelo array em razão de diferentes pontos de potência de operação do sistema, e as possíveis limitações de potência geradas pelo inversor.

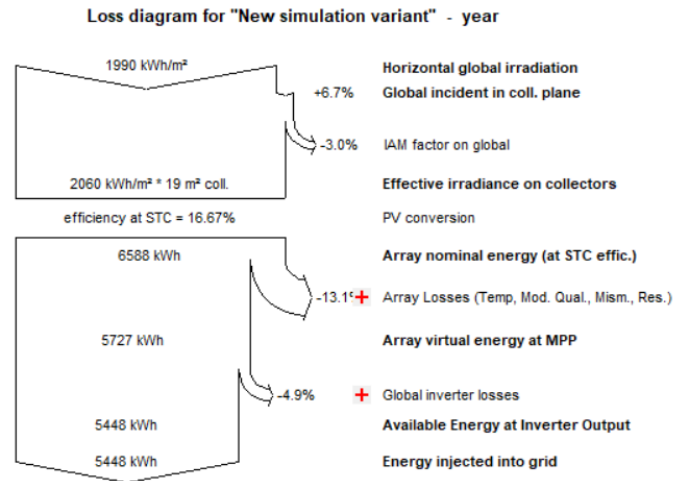
Figura 6: Gráfico energia em razão da potência gerada nos módulos.



Acerca do primeiro gráfico, nota-se a curva da corrente em função da tensão, demarcada nos parâmetros de tensão de operação do inversor, permitindo que o projetista tenha uma visão mais intuitiva a respeito da corrente gerada pelos módulos em diferentes tensões e temperaturas. No que tange o segundo gráfico, a cor verde descreve a energia gerada pelos módulos em detrimento de sua potência no MPP, e, na cor violeta, a energia limitada do módulo devido a Overload Loss. Logo, como não há curvas violetas, tem-se que não houveram perdas devido a sobrecarga, visto que a proporção PnomDC/PnomAC dada por 0.97 está entre os parâmetros aceitáveis para essa proporção de potência no inversor .

Além disso, é necessário destacar a questão das perdas do sistema, as quais são geradas por diferentes fatores, como impedâncias internas dos materiais e seus respectivos rendimentos. Para essa análise, segue-se a interpretação da Figura 7, a qual se trata de um diagrama de perdas do sistema.

Figura 7: Diagrama de perdas do sistema.



Fonte: imagem extraída do software PVsyst.

No que tange as perdas, o diagrama verifica um sistema idealizado inicialmente, ou seja, sem perdas, o qual gerou 6588kWh de energia elétrica por ano. Posteriormente, analisando variáveis de perda em etapas iniciais como irradiância e geração de energia elétrica, obtêm-se o valor de 5727kWh anual. A respeito da primeira, as perdas são relacionadas a reflexões de luz no material, enquanto na segunda, o decréscimo na produção de energia se deve à ineficiência do efeito fotovoltaico nas próprias células.

Aliado a isso, existem as perdas referentes ao funcionamento e rendimento dos componentes. As perdas no array, por exemplo, são referentes ao aumento de temperatura, à qualidade dos módulos, a descompensação de geração nos módulos, também conhecido como efeito mismatch, que delimita o valor de corrente na string para o corrente da placa com menor produção. E por último, observa-se as perdas referentes a conversão de corrente contínua para alternada, referente à eficiência do inversor, e as perdas geradas quando a energia é injetada na rede. Por fim, o sistema instalado apresenta uma geração limitada a 5448kWh por ano, como é visto na Figura 7.

V. CONCLUSÃO

Por fim, observa-se que o software PVsyst[®] tornou o dimensionamento prático mais simples, preciso, intuitivo e, principalmente, permitiu uma visão mais clara dos dados do sistema, possibilitando ao projetista em questão uma análise mais ampla acerca da geração, do rendimento e das perdas, características essas essenciais para realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico.

Ademais, vale destacar a contribuição do PVsyst[®] no que tange a ampliação de pesquisa e de instalações acerca da energia fotovoltaica, devido ao amplo banco de dados disponibilizado a respeito dessa fonte de energia e à possibilidade de um rápido e simples dimensionamento.

REFERÊNCIAS

- [1] CABRAL, Isabelle; VIEIRA, Rafael. Viabilidade econômica x viabilidade ambiental do uso de energia fotovoltaica no caso brasileiro: uma abordagem no período recente. *III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*. 2012.
- [2] VILLALVA, Marcelo Gradella. *ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: CONCEITOS E APLICAÇÕES*. Campinas: Érica, 2010. 224 p.
- [3] NASCIMENTO, Cássio Araujo do. *Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica* 2004. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- [4] ROMAN, Eduardo et al. Intelligent PV module for grid-connected PV systems. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, v. 53, n. 4, p. 1066-1073, 2006.
- [5] SA, PVsyst. About us. 2005. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com>. Acesso em: 01 ago. 2018.
- [6] MERMOUD, A. PVsyst : Software for the study and simulation of photovoltaic systems. ISE, University of Geneva, www.pvsyst.com, 2012.
- [7] VERA, Luis Horacio. Programa computacional para dimensionamento e simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. 2004.
- [8] FREITAS, Susana Sofia Alves. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. 2008. *Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão*.
- [9] A COAKLEY, J. REFLECTANCE AND ALBEDO, SURFACE. 2003. Disponível em: <http://www.curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter9/Ency_Atmos/Reflectance_Albedo_Surface.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2018
- [10] PVEDUCATION. Azimuth Angle. 2017. Disponível em: <<https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/azimuth-angle>>. Acesso em: 2 ago. 2018.
- [11] ÉPOCA. Investimento global em energia limpa. 2017.
- [12] SOLAR, Portal. "Os 10 maiores fabricantes de painel solar do mundo 2018." <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/os-10-maiores-fabricantes-de-painel-solar-em-2017.html>>. 10 ago, 2018.
- [13] COLAFERRO, L. "Os sistemas de energia solar fotovoltaica." Osasco: Érica, 2014.
- [14] SINOVOLTAICS. "What is the temperature coefficient of a solar module?" Disponível em: <<http://sinovoltaics.com/learning-center/testing/what-is-the-temperature-coefficient-of-a-solar-module/>>. Acesso em: 6 ago. 2018.
- [15] WORLD, Solar Power. "Dual Solar MPPT Defined. "2014 <<https://www.solarpowerworldonline.com/2014/02/dual-mppt-defined-understanding-mppt/>>. 12 ago, 2018.
- [16] ROSCHILD, Jônatas Matthies et al. Análise de estabilidade e síntese de controle para conversores boost com correção do fator de potência através de uma abordagem LMI. 2015.