

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA PARA SIMULAÇÕES DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA OS MUNICÍPIOS DO BRASIL¹

ANA LUÍZA GIACON DE MIRANDA², CAROLINE ANTONELLI SANTESSO²,
MARCELO LOUREIRO GARCIA² & CLAUCIANA SCHMIDT BUENO DE MORAES²

¹Publicado no Ano de 2019;

²Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista- UNESP, mirandaanalu@hotmail.com.

Resumo

Devido a crescente utilização de eletricidade pela sociedade moderna, faz-se necessário aumentar a sua produção para atender toda a demanda populacional. Considerando-se a redução da emissão dos gases causadores de efeito estufa e da dependência de combustíveis fósseis, fontes de energia renováveis, menos poluentes, têm sido cada vez mais investigadas e aplicadas. Os módulos fotovoltaicos têm se destacado em razão da natureza da energia solar, abundante, ubíqua, renovável e gratuita. Neste trabalho foi desenvolvido um programa no Excel[®] utilizando a linguagem de programação Visual Basic for Application (VBA) denominado *Energia Solar*, cujo modelo considera a insolação local e consumo energético específico para simular a implantação de sistemas fotovoltaicos em diferentes cenários, sendo os dados de saída a quantidade de módulos solares necessários, a área requerida, a economia anual, a redução de dióxido de carbono e tempo de retorno do investimento. Uma simulação foi realizada para o município de Rio Claro (SP, Brasil), na qual toda a demanda energética da cidade seria suprida pela instalação de sistemas fotovoltaicos. Menores percentuais oriundos da energia solar e análises pontuais com base em residências e bairros podem ser considerados para a simulação. Os resultados para o estudo de uma residência unifamiliar, no mesmo município, indicaram um

investimento de R\$ 29.538,50, economia anual de R\$ 5282,30, tempo de retorno de 5,6 anos e redução de emissão de CO₂ de 0,00263 toneladas por dia. Dessa forma, esta ferramenta permite uma avaliação rápida e simplificada, auxiliando as tomadas de decisões pelos proprietários de imóveis e gestores de municípios que visam à ampliação de fontes renováveis em matrizes energéticas.

Palavras-chave: energia solar, sistema fotovoltaico, ferramenta computacional.

DEVELOPMENT OF PROGRAM FOR SIMULATIONS OF THE SIZE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS FOR THE CITIES IN BRAZIL

Abstract

Due to the increasing use of electricity by modern society, it is necessary to rise its production in order to meet the entire population demand. Considering the reduction of emissions of greenhouse gases and the dependence on fossil fuels, renewable and less polluting sources of energy have been deeply investigated and applied. The relevance of the photovoltaic modules is related to the nature of solar energy, which is abundant, ubiquitous, renewable and free. In this work, a program called *Solar Energy* was developed in Excel[®] software with Visual Basic for Application (VBA) program language. This model considers the local insolation and specific energy consumption to simulate the implantation of photovoltaic systems in different scenarios, the output data being the quantity of solar modules required, the area required, annual savings, the reduction of carbon dioxide and the returning time of investment. A simulation was carried out for the city of Rio Claro (SP, Brazil), in which the city energy demand would be supplied by the installation of photovoltaic systems. Lower percentages derived from solar energy and specific analyzes based on residences and neighborhoods may be considered for a simulation. The results of the one-family residence study, in the same city, indicated an investment of R\$ 29,538.50, annual savings of R\$ 5,282.30, returning time of 5.6 years and reduction of CO₂ emission of 0.00263 tons per day. In this way, this tool allows a quick and simplified evaluation, helping real estate owners and city authorities to make decisions, aiming at the expansion of renewable sources in energy matrices.

Keywords: solar energy, photovoltaic systems, computer tool.

Introdução

A matriz energética elétrica brasileira apresenta uma alta dependência em relação à energia gerada pelas usinas hidrelétricas (68%), a qual alimenta maior parte da demanda do país (EPE, 2017). Apesar de ser considerada uma fonte de energia renovável, essas usinas acarretam no armazenamento de um grande volume de água para seu funcionamento, gerando mudanças ambientais e sociais (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Além disso, segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT, 2016), em 2014 o FE¹ brasileiro aumentou substancialmente em função da escassez hídrica e da utilização de usinas termelétricas, atingindo o valor máximo de 0,1355 toneladas de CO₂ por cada megawatt-hora gerado. Uma das possíveis soluções envolve a geração descentralizada de energia no país, através da expansão do uso da radiação solar. Apesar da geração de energia utilizando módulos fotovoltaicos no Brasil ainda ser pequena, representando 0,01% da matriz energética (EPE, 2017), esse sistema possui inúmeras vantagens, principalmente no território brasileiro, sendo necessário maiores incentivos e investimentos para ultrapassar a dificuldade do elevado custo desta tecnologia no país.

A utilização da energia solar possui inúmeras vantagens sociais, ambientais e econômicas como: (1) provir de uma fonte de energia inesgotável; (2) contribui para a redução da emissão de poluentes atmosféricos, melhorando a saúde pública e o ecossistema; (3) não gera resíduo durante a operação; (4) é uma forma de produção silenciosa; (5) não consome combustível; (6) auxilia na recuperação de terras degradadas; (7) gera economia durante a longa vida útil do sistema fotovoltaico; (8) valorização do imóvel que sistema fotovoltaico próprio; (9) independência na geração de energia elétrica, o que gera estabilidade e segurança com relação às oscilações do mercado de energia; (10) possibilidade de utilização em áreas afastadas, reduzindo a necessidade de desenvolver novas linhas de transmissão e; (11) diversificação e expansão da matriz energética do país (TSOUTSOSA; FRANTZESKAKIB; GEKAS, 2005; SHAYANI; DE OLIVEIRA; CAMARGO, 2006; ZILLES, 2004).

¹ O fator de emissão (FE) aponta a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitida decorrente da produção de uma determinada quantia de energia, de acordo com a matriz energética de cada país (TIAGO FILHO; ROSA, 2013).

É possível utilizar esse valor para calcular a redução da emissão de CO₂ quando utilizamos fontes de geração de energia alternativas e renováveis.

Contudo, apesar de ser uma fonte de energia renovável a sua geração, construção e distribuição não é isenta de impactos negativos. Estes incluem: (1) possível impacto visual ou estético sobre prédios e terras; (2) aumento no uso da terra devido à necessidade de grandes áreas para a instalação e; (3) uso de materiais tóxicos para construir os módulos fotovoltaicos; (4) ao alto investimento inicial; (5) preço mais elevado quando comparado com formas convencionais de energia; (6) falta política públicas para tornar sistemas fotovoltaicos acessíveis à população e; (7) dificuldades para armazenar a eletricidade e o calor produzido. Esses impactos negativos listados podem ser minimizados por meio da determinação do local adequado para a instalação dos módulos fotovoltaico, correta gestão do sistema, adoção das normas de segurança, seleção da melhor tecnologia para cada caso estudado, planejamento de projeto completo, restabelecimento do ambiente regional e realização de estudo sobre os impactos que este sistema poderia gerar (TSOUTSOSA; FRANTZESKAKIB; GEKAS, 2005; SILVA; DO CARMO, 2017).

No caso brasileiro, um dos fatores que contribuem para a baixa utilização da energia fotovoltaica também é a falta de indústrias nacionais para a fabricação dos módulos fotovoltaicos (CALDAS; MOISÉS, 2016). Porém, nas capitais dos estados, os valores de insolação ($\text{Wh/m}^2.\text{dia}$) são relativamente altos e uniformes de acordo com o mapa solarimétrico (ANEEL, 2005), o que possibilita uma maior geração de energia utilizando módulos solares e indica um grande potencial de investimento. Dados mais precisos e detalhados dos valores de radiação solar estão disponíveis no programa SunData desenvolvido pelo “CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito”. Este programa calcula a radiação solar mensal e a média anual ($\text{kWh/m}^2.\text{dia}$) para diferentes locais do Brasil. Além disso, o Brasil apresenta duas resoluções que definem as diretrizes para a instalação de sistemas fotovoltaicos. A Resolução Normativa da ANEEL nº 482, de abril de 2012, regulamenta a mini e microgeração independente de energia no país permitindo a conversão do excedente de energia produzido pelos módulos fotovoltaicos em créditos de energia para serem consumidos posteriormente. Enquanto que a Resolução Normativa da ANEEL nº 687, de novembro de 2015, altera a resolução normativa nº 482. As normas esclarecem que a energia excedente produzida pode ser injetada na rede distribuidora de energia elétrica, gerando créditos equivalentes que podem ser consumidos em um período de até 60 meses (5 anos). Dessa forma, a energia produzida durante

picos de insolação que ocorrem em determinados horários do dia geram créditos em kWh que serão subtraídos do consumo energético noturno ou em dias nublados (ANEEL, 2012, 2015).

Para a produção, portanto, da eletricidade pelos sistemas fotovoltaicos é necessário que ocorra a transformação da radiação solar, que é realizada a partir de células fotovoltaicas². A eficiência do módulo solar, isto é a porcentagem da energia solar que é transformada em energia elétrica por metro quadrado, varia dependendo do material da célula fotovoltaica e é medida em condições de laboratório. Já a produção de energia elétrica depende da área disponível para instalação dos módulos solares e da quantidade de radiação que incide na região. Existem dois módulos solares mais utilizados, disponíveis no mercado brasileiro: de silício monocristalino ou policristalino. Estes módulos solares geralmente apresentam vida útil superior a 25 anos, são resistentes a condições climáticas extremas e requerem pouca manutenção (PORTAL SOLAR, 2017a, 2017b).

Dessa maneira, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um programa para o planejamento de módulos solares, analisando a possibilidade da substituição da demanda energética de um determinado local do país ou de uma edificação pela geração de energia por módulos solares, com base nos dados de insolação e população e em tecnologias solares disponíveis no mercado. Com isso, essa ferramenta com importância acadêmica e prática pode auxiliar usuários de interesse a verificarem o dimensionamento, a possibilidade e vantagens em se utilizar um sistema fotovoltaico.

Materiais e métodos

A primeira parte da metodologia consistiu na pesquisa de literatura recente e publicada a respeito dos temas referentes à energia solar: implantação dessa solução energética no Brasil; panorama energético brasileiro; processo de geração de energia fotovoltaica; características das tecnologias solares e; módulos solares disponíveis atualmente. Esse processo foi realizado através da leitura de livros e artigos nas principais bases de buscas. As principais palavras-chave utilizadas para a busca, tanto em português, como em inglês, foram "sistemas fotovoltaicos", "módulos solares", "geração energia distribuída" e "energia fotovoltaica brasil". Além disso, a partir de uma pesquisa de mercado com consulta em empresas do estado de São Paulo que

² Células fotovoltaicas são responsáveis pela transformação da radiação solar em eletricidade e são a base do sistema fotovoltaico. Estas são associadas em grupos para formarem um módulo fotovoltaico.

trabalham no setor de energia solar foram coletados dados relativos aos tipos de módulos fotovoltaicos comercializados, tamanhos, eficiência e valores de um projeto de sistema fotovoltaico. Com essas informações na segunda etapa desenvolveu-se o programa denominado “Energia Solar” utilizando para isso os programas Excel³ e Visual Basic for Applications⁴ (VBA), incluindo códigos de automatização e uma interface amigável para os usuários.

Para o desenvolvimento do modelo observou-se que os sistemas fotovoltaicos são compostos por três elementos básicos: uma estrutura, módulos solares e inversor⁵. O custo total do sistema pode variar dependendo da tecnologia solar escolhida e deve englobar todos os elementos listados. Segundo informações disponibilizadas pela empresa A, com sede em Limeira, pela empresa B com sede em São Paulo e pela empresa C com sede em Rio Claro, o valor dos módulos solares corresponde, em média, de 60 a 70% do valor total de um projeto residencial e 50% de um projeto industrial ou de grande escala. Essa informação foi utilizada no modelo para simular um valor final aproximado. Em relação à manutenção, o custo é praticamente nulo já que na maioria dos casos a chuva é suficiente para a limpeza dos módulos, ou em caso de seca, apenas uma limpeza simples com detergente neutro é suficiente para a conservação do equipamento (PORTAL SOLAR, 2017c).

Os cálculos realizados pela ferramenta possuem embasamento nas informações da localização escolhida para ser analisada. Para isso foram considerados os parâmetros: população; carga per capita (kWh/hab/dia); fator econômico – valor da tarifa de fornecimento de energia do local e; insolação por dia (kWh/m²/dia) para cada mês e sua média anual. Na ferramenta incluiu-se um banco de dados com informações completas de todas as capitais brasileiras e mais quatro cidades do interior paulista: Rio Claro, Campinas, Limeira e Piracicaba no Excel[®] (Tabela 1).

³ Disponível em: <https://products.office.com/pt-br/excel>

⁴ Disponível em: <https://docs.microsoft.com/pt-br/dotnet/visual-basic/>

⁵ O inversor é responsável por transformar a energia gerada em forma de corrente contínua para corrente alternada, a ser utilizada no local

Tabela 1. Banco de Dados - Informações Relativas a Localização. Fonte: Os Autores.

Local	População (2015) (IBGE)	Consumo per capita (kWh/hab/ano - 2015)	Consumo per capita (kWh/hab/dia-2015)	Média Insolação
Aracajú (SE)	632744	1706	4,673973	5,51
Belém (PA)	1439561	2318	6,350685	5,05
Belo Horizonte (MG)	2502557	2475	6,780822	4,55
Boa Vista (RR)	320714	1732	4,745205	4,93
Brasília (DF)	2914830	2257	6,183562	5,13
Campinas (SP)	1164098	2935	8,041096	5,16
Campo Grande (MS)	853622	2002	5,484932	5,13
Cuiabá (MT)	580489	2470	6,767123	5,19
Curitiba (PR)	1879355	2665	7,30137	3,87
Florianópolis (SC)	469690	3357	9,19726	4,49
Fortaleza (CE)	2591188	1268	3,473973	5,57
Goiânia (GO)	1430697	2218	6,076712	5,2
João Pessoa (PB)	791438	1301	3,564384	5,51
Limeira (SP)	296440	2935	8,041096	5,04
Macapá (AP)	456171	1367	3,745205	5,05
Maceió (AL)	1013773	1466	4,016438	5,39
Manaus (AM)	2057711	1601	4,386301	4,93
Natal (RN)	869954	1595	4,369863	5,66
Palmas (TO)	272726	1361	3,728767	5,12
Piracicaba (SP)	391449	2935	8,041096	5,04
Porto Alegre (RS)	1476867	2593	7,10411	4,72
Porto Velho (RO)	502748	1686	4,619178	4,62
Recife (PE)	1617183	1455	3,986301	5,71
Rio Branco (AC)	370550	1356	3,715068	4,52
Rio Claro (SP)	199961	2935	8,041096	5,04
Rio de Janeiro (RJ)	6476631	2481	6,79726	4,89
Salvador (BA)	2921087	1655	4,534247	5,29
São Luís (MA)	1073893	1016	2,783562	4,92
São Paulo (SP)	11967825	2935	8,041096	4,14
Teresina (PI)	844245	1027	2,813699	5,52
Vitória (ES)	355875	2787	7,635616	5,07

O número de habitantes, a carga per capita e a insolação por dia para qualquer local podem ser encontrados por meio de uma pesquisa em sites de buscas, dessa forma, pode ser complementado o banco de dados realizado para o programa. A estimativa da população em 2015 para cada cidade é fornecida pela ferramenta “cidades”⁶ (IBGE, 2016), o consumo per capita por ano de energia em cada estado brasileiro no ano de 2015 está disponível no capítulo

⁶ Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>

“Consumo (kWh/mês) e per Capita (kWh/hab)” do “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016” (EPE; MME, 2016, Tabela 3.54, p. 166). A média mensal de insolação por dia (kWh/m²/dia) foi retirada do programa SunData disponível no site “CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito” (CRESESB; CEPEL, 2017).

O simulador SunData utiliza os valores de insolação do banco de dados “Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal do Centro de Estudios de la Energia Solar” para calcular a irradiação solar média mensal no plano horizontal em qualquer ponto do território nacional. Os dados solares do programa são apresentados em quilowatt-hora por metro quadrado por dia. São também fornecidos os valores de irradiação solar para o plano inclinado que apresenta o ângulo de inclinação igual à latitude (CRESESB; CEPEL, 2017).

Os valores das tarifas de fornecimento de energia de cada capital brasileira foram retirados do ranking de tarifas residenciais desenvolvido pela ANEEL presente no Informativo Tarifário do MME referente ao primeiro quadrimestre de 2016 (ANEEL, 2016). Este ranking apresenta as tarifas de fornecimento de energia homologadas e sem ICMS em R\$/MWh para todas as concessionárias de energia do Brasil. No caso dos estados que são abastecidos por diferentes concessionárias de energia, a média dos valores foi calculada para obter um valor geral coerente para toda a região. Após a coleta desses dados, foram adicionados ao valor os impostos ICMS - Imposto sobre a Circulação de Mercadoria e Serviços, o PIS - Programa de Integração Social e o COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social, calculados a partir de uma porcentagem estabelecida nacionalmente. Esse ainda não é um resultado exato pois o CIP – Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública foi desconsiderado.

As informações técnicas dos módulos solares requeridas pela ferramenta “Energia Solar” são eficiência, em porcentagem, área (m²) e custo da tecnologia. É possível selecionar as características gerais dos módulos fotovoltaicos listadas no banco de dados ou calcular os resultados inserindo manualmente os dados necessários.

O “*Userform*” desenvolvido no VBA é a interface na qual o usuário interage com o modelo. É possível selecionar locais e módulos dentre as opções disponíveis no banco de dados, inserir valores específicos das características do local, analisar as tecnologias de módulos

solares e comparar diferentes cenários resultantes. Todos os cálculos do modelo são realizados na planilha conectada ao “Userform”, a qual contém as fórmulas e o banco de dados do modelo.

As tecnologias solares disponíveis no modelo desenvolvido e os parâmetros selecionados para o seu dimensionamento foram fornecidos pelo website da empresa B, empresa D, e um site de e-commerce.

Portanto, depois de coletadas as informações necessárias e desenvolvido o banco de dados, as equações utilizadas na ferramenta foram:

- Geração de energia baseada no valor médio anual da insolação diária para o plano inclinado que apresenta ângulo de inclinação igual à latitude, na eficiência e tamanho do módulo solar. Sendo assim a primeira equação (Eq. 1) gera o resultado em kWh por m² por dia e a segunda equação (Eq. 2) converte o valor para kWh por módulo por dia.

$$Energia \left(\frac{kWh}{\frac{m^2}{dia}} \right) = Média \text{ dos Valores de Insolação} \times \left(\frac{Eficiência(\%)}{100} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

$$Energia \left(\frac{kWh}{\frac{módulo}{dia}} \right) = Energia \left(\frac{kWh}{\frac{m^2}{dia}} \right) \times Área \text{ Painel Solar} (m^2) \quad \text{Eq. 2}$$

- Consumo (Eq. 3) envolvendo os parâmetros população, consumo per capita do local escolhido e porcentagem de energia que será produzida pelo módulo solar. Por exemplo, se a simulação considerar que toda a energia requerida será produzida pelo sistema fotovoltaico, a porcentagem de energia nessa equação será 100%, se for considerado que só metade da energia será gerada por essa tecnologia, 50%, e assim por diante.

$$Consumo \left(\frac{kWh}{dia} \right) = Pop. \times \frac{Consumo}{capita} \left(\frac{kWh}{capita} \right) \times \% \text{ de energia}$$

Eq. 3

- Número de módulos solares necessários calculado pela divisão do consumo total pela energia gerada por um módulo solar (Eq. 4).

$$\text{Número de Módulos} = \frac{\text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right)}{\text{Energia gerada por 1 módulo solar} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right)} \quad \text{Eq. 4}$$

- Área superficial total de módulos solares realizada pela multiplicação do número total de módulos pela área de um módulo solar (Eq. 5).

$$\text{Área Total} (m^2) = \text{Número de Módulos} \times \text{Área de 1 Módulo Solar} (m^2) \quad \text{Eq. 5}$$

- Custo dos módulos solares é realizado a partir do número total de módulos solares necessários multiplicado pelo preço de cada módulo solar (Eq. 6).

$$\text{Custo} (R\$) = \text{Número de Módulos} \times \text{Custo de 1 Módulo Solar} (R\$) \quad \text{Eq. 6}$$

- Custo final do investimento estimado a partir da adição do custo dos módulos ao valor da estrutura necessária para instalação e o valor do inversor (Eq. 7). O custo do projeto aproximado é calculado baseado no valor dos módulos solares, sendo que este corresponde a aproximadamente 65% do valor final (Eq. 8).

$$\text{Custo} (R\$) = \text{Custo Módulos Solares} + \text{Estrutura} + \text{Inversor} \quad \text{Eq. 7}$$

$$\text{Custo} (R\$) = \frac{\text{Custo Módulos Solares}}{0,65} \quad \text{Eq. 8}$$

- Economia anual proporcionada pelo sistema de energia solar simulado no modelo a partir da multiplicação da quantia de energia produzida no sistema fotovoltaico instalado pelo valor tarifa da energia comprada da rede de distribuição comum naquela região (Eq. 9).

$$\text{Economia} \left(\frac{R\$}{\text{ano}} \right) = \text{Energia Produzida} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) \times \text{Valor Energia} \left(\frac{R\$}{\text{MWh}} \right) \times 365 \text{ dias} \times \left(\frac{\text{MWh}}{1000 \text{ kWh}} \right) \quad \text{Eq. 9}$$

- Tempo de retorno a partir da divisão do custo total pela economia anual, sendo que esse valor representa em quanto tempo o investimento inicial será recompensado (Eq. 10).

$$\text{Tempo de Payback}(\text{anos}) = \frac{\text{Custo total}(\text{R\$})}{\text{Economia Anual} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{ano}} \right)} \quad \text{Eq. 10}$$

- Redução da emissão de CO₂ (Eq. 11) utilizando quantia de energia produzida pelo sistema fotovoltaico instalado e o fator de emissão de dióxido de carbono (CO₂) brasileiro de 2016 - 0,0817 tCO₂/MWh (MCT, 2016).

$$\text{Redução da emissão de CO}_2 \left(\frac{\text{t CO}_2}{\text{dia}} \right) = \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) \times 0,0817 \frac{\text{t CO}_2}{\text{MWh}} \times \left(\frac{\text{MWh}}{1000 \text{ kWh}} \right) \quad \text{Eq. 11}$$

Observa-se que apesar de simplificada, a ferramenta “Energia Solar” traz o diferencial de realizar um cálculo aproximado e geral de um projeto de geração de energia solar baseado na insolação do local e no consumo médio de energia per capita da região. Isso porque, outros simuladores de geração de energia solar já disponíveis atualmente no mercado têm como input o consumo energético do cliente para realizar o projeto e apresentam como resultado a potência que deve ser gerada pelos módulos fotovoltaicos para suprir a necessidade do local (ENGIE, 2017; NEOSOLAR, 2017; PORTAL SOLAR, 2017d).

Resultados e discussão

O programa “Energia Solar” encontra-se disponibilizado no sítio eletrônico da UNESP – Câmpus de Rio Claro (<http://igce.rc.unesp.br/#!/departamentos/planejamento-territorial-e-geoprocessamento/laboratorios/>). Para utilizar o mesmo é necessário realizar o download a partir do diretório ACERT - Auditoria, Certificação e Gerenciamento Socioambiental e tópico “Programa Energia Solar”. A Figura 1 ilustra o programa.

Figura 1. Interface/“Userform” do Modelo “Energia Solar”

Fonte: Os autores

A execução do programa ocorre de acordo com as seguintes etapas: (1) na categoria “Dados do Local e Módulo Solar” é necessário selecionar uma das localizações presentes na lista (originadas pela base de dados) e selecionar o botão “Importar Informações do Local”; ou então completar os campos “população”, “consumo (kWh/hab/dia)” e “média insolação por dia (kWh/m²/dia)” com base na localização desejada⁷; (2) na categoria “Informações do Módulo Solar”, seleciona-se um tipo de módulo solar disponível na lista “tipo de módulo solar” e pressiona-se o botão “Importar Informações do Módulo Solar”; ainda na mesma categoria, é preciso selecionar a porcentagem de energia que será produzida pelos módulos solares; (3) por fim na categoria “Resultados” o usuário deve pressionar o botão “Calcular Resultados” para obter os resultados fornecidos pelo programa.

⁷ Os dados mensais de insolação por dia são apenas para conhecimento, o cálculo é feito com a média simples dos valores

Os resultados calculados pelo modelo são: o número de módulos solares necessários para substituir a percentagem de energia selecionada em um local específico; a área superficial total de módulos solares; o valor total dos módulos solares; custo final do investimento; economia anual gerada pelo sistema; tempo de retorno de investimento e; redução da emissão de CO₂ em toneladas por dia. O modelo apresenta o custo final aproximado, já que a mão de obra necessária para a instalação do sistema fotovoltaico e infraestrutura necessária são calculadas por meio de porcentagens em relação ao custo dos módulos solares.

Com o intuito de exemplificar a aplicação do programa “Energia Solar”, foram desenvolvidos estudos de caso com duas situações, utilizando o módulo solar nacional de silício policristalino de 265 W. A primeira simulação foi realizada considerando a população total da cidade de Rio Claro em 2015 (IBGE, 2016) e a segunda analisando a possibilidade da instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência unifamiliar com 4 pessoas localizada no mesmo município.

A partir da inserção de dados no programa, verificam-se os resultados gerados na Figura 2. Assumindo que 100% da energia consumida na cidade de Rio Claro é gerada pelo sistema fotovoltaico a ser instalado, os resultados mostraram que seriam necessários 1.200.638 módulos solares, uma área de 1.945.033 m² (cerca de 0,4 % da área total do município) e um investimento de R\$ 1.418.599.975,40 para a compra dos módulos solares e realização do projeto. A economia anual para a cidade seria de aproximada R\$ 264.062.498,00, com o tempo de retorno de 5,4 anos e redução da emissão de 131.35 toneladas de CO₂ por dia (Figura 3a). Por outro lado, considerando a simulação da residência unifamiliar, e novamente, 100% da energia consumida com geração de energia solar, seriam necessários 25 módulos solares, uma área de 38,9 m² e o investimento de R\$ 29.538,50 para a compra e instalação do sistema fotovoltaico. Nesta última simulação, a economia anual da família seria R\$ 5282,30 com o tempo de retorno de 5,6 anos e redução da emissão de 0,00263 toneladas de CO₂ por dia (Figura 3b).

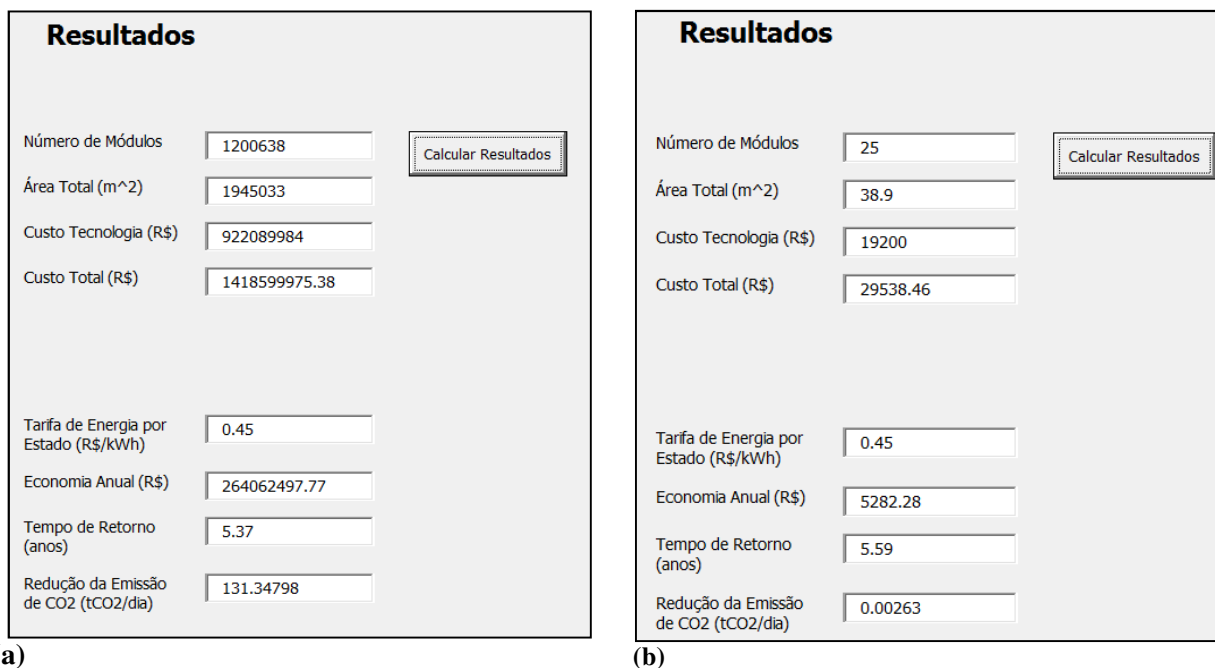


Figura 2. (a) Resultados do modelo para a cidade, assumindo que 100% da energia é gerada pelos módulos solares e (b) Resultados do modelo para uma residência com 4 pessoas assumindo que 100% da energia é gerada pelos módulos solares.

Fonte: Os autores

Observa-se que a simulação com a instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência apresentou valores coerentes. Contudo, ao simular a geração 100 % da energia da cidade de Rio Claro, utilizando módulos solares, os valores foram elevados. Apesar deste fato, ao analisarmos a área requerida na simulação, esta não atinge 1% da área total do município. Desta forma, acredita-se que o maior empecilho para a instalação dessa tecnologia em larga escala seja a questão econômica, já que o investimento inicial é realmente alto de maneira que seriam necessários incentivos governamentais e melhores condições de financiamento.

Ressalta-se também que para um melhor aproveitamento do sistema desenvolvido é ideal a utilização de parâmetros particulares de cada local estudado no modelo, como neste modelo simulado para a cidade de Rio Claro. Devem ser definidos dados específicos de cada região da radiação solar para determinada inclinação, o preço atual do fornecimento de energia elétrica, a energia consumida pelos habitantes da cidade ou pelos moradores de uma residência e valores de mercado coerentes com a oferta local. A utilização desse modelo por empresas responsáveis por projetos de energia solar acrescentaria na questão de uso de dados locais mais precisos, com informações específicas do cliente disponíveis e dados relativos aos módulos

solares comercializados por elas, como: tamanho do módulo, custo da tecnologia e de instalação, eficiência e potência de geração de energia por cada módulo.

Conclusões

Considerando os aspectos discorridos, ressalta-se que existe a crescente busca por fontes renováveis de energia por parte dos governos mundiais, visto o maior potencial de redução de custos e impactos ambientais negativos (ALBUQUERQUE; MALDONADO; VAZ, 2017). Desta forma, o uso da radiação solar representa uma fonte alternativa de energia importante, sendo considerada renovável, limpa e sem poluição ambiental durante o período de geração. No entanto, algumas barreiras devem ser superadas para permitir o crescimento da utilização desta fonte de energia. É necessário melhorar a eficiência de conversão energética, expandir a pesquisa em torno das dificuldades relativas à capacidade de armazenamento, à perda de energia e incentivar os investimentos em medidas de mitigação sobre os impactos negativos. Além disso, apesar de nos últimos anos a geração de energia solar fotovoltaica estar apresentando menores custos de implantação (BICALHO; ARAÚJO; CARDOSO, 2018), é importante que o custo de produção se torne mais competitivo, de modo a aumentar a busca por esse sistema.

O programa “Energia Solar” foi desenvolvido com cálculos básicos e alcançou os objetivos desejados. Os resultados permitem uma indicação do número de módulos solares necessários para o dimensionamento de determinado sistema fotovoltaico, a área para instalação e o investimento para a compra desta tecnologia, além de também calcular a economia anual, o tempo de retorno e a redução da emissão de gás carbônico. Apesar de simplificado, o modelo “Energia Solar” traz o diferencial de realizar um cálculo aproximado e geral de um projeto de geração de energia solar baseado na insolação do local e no consumo médio de energia per capita da região, enquanto que outros simuladores disponíveis no mercado apresentam somente como resultado a potência que deve ser gerada pelos módulos fotovoltaicos. Além disso, com o modelo desenvolvido neste trabalho é possível realizar considerações tanto para uma residência, quanto para uma empresa ou até mesmo para uma cidade inteira. Os resultados ainda apresentam o número de módulos solares necessários, dependendo da tecnologia escolhida, e o custo aproximado do projeto ao invés de somente a

potência a ser instalada. Dessa forma é possível ilustrar rapidamente os prováveis resultados de um projeto e supor de forma eficaz a economia energética e monetária que poderia ser obtida.

Acredita-se que esta ferramenta desenvolvida possa simplificar o dimensionamento de um sistema de produção de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos, com o intuito e contribuindo para uma maior utilização dessa importante fonte energética.

Agradecimentos

Os autores agradecem as empresas, consultorias e organizações que apoiaram e dispuseram de informações imprescindíveis para este trabalho.

Referências

ALBUQUERQUE, T. C.; MALDONADO; M. U.; VAZ, C. R. Um levantamento da produção intelectual sobre energia solar fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, vol. 6, no.5, 2017, pag. 915-939.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Energia Solar. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2. ed. Brasília, 2005.** p 29-42. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 30 mai. 2016.

_____. Ranking Nacional das Tarifas Residenciais (Grupo B1), 2016. In: MME – Ministério de Minas e Energia. **Informativo Tarifário Energia Elétrica.** 21ª ed, 1º quadrimestre, 2016.

_____. **Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015.** 2015.

_____. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012.** 2012.

BICALHO, M. S.; ARAUJO, T. P; CARDOSO, R. B. Análise de desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede da Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, vol. 7, no.1, 2018, pag. 95-105.

CALDAS, H. H. S.; MOISÉS, A. L. S. Geração Fotovoltaica Distribuída: Estudo de Caso para Consumidores Residenciais de Salvador – Ba. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, vol. 5, 2016, pag. 164-180.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito; CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **SunData**, 2017. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 01 mar. 2017.

ENGIE – Minha Energia Solar. **Simulador de Economia**. Disponível em: <http://minhaenergiasolar.com.br/simulador-de-economia/?gclid=EAiaIQobChMIka764bij1gIVSwaRCh3sVAXJEAAYAAEgKYTvD_BwE#utm_source=google_adwords>. Acesso em: 13 set. 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2016 - Tabela 3.54 - População, consumo e consumo per capita (kWh/hab). In: EPE - Empresa de Pesquisa Energética; MME - Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016**. Rio de Janeiro – RJ, 2016, pag. 166.

_____ **Balanço Energético Nacional 2017**: ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). **Cidades**. 2016. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. São Paulo: Ed. PW Brasil, 2014.

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. **Arquivo dos Fatores de Emissão**. 2016. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>>. Acesso em: 02 jan. 2017.

NEOSOLAR – **Simulador Solar** - Calculadora Solar Fotovoltaica. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/simulador-solar-calculadora-fotovoltaica>>. Acesso em: 13 set. 2017

PORTAL SOLAR. Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica. **Quanto Tempo Duram os Painéis Solares?** Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/quanto-tempo-duram-os-paineis-solares-.html>>. Acesso em: 13 set. 2017b.

_____ **Simulador Solar**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>>. Acesso em: 13 set. 2017d.

_____ **Tudo Sobre a Manutenção do Pannel Solar**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/tudo-sobre-a-manutencao-do-pannel-solar.html>>. Acesso em: 13 set. 2017c.

_____ **Tudo sobre a eficiência do Pannel Solar**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-pannel-solar.html>>. Acesso em 13: set. 2017a.

SHAYANI, R. A.; DE OLIVEIRA, M. A. G.; CAMARGO, I. M. T. Comparação do Custo entre Energia Solar Fotovoltaica e Fontes Convencionais. V **CBPE – Congresso Brasileiro de**

Planejamento Energético - Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio. Brasília, 2006.

SILVA, R. G.; DO CARMO, M. J. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Proposta para Melhoria da Gestão Energética. **InterSciencePlace – International Scientific Journal**, vol. 12, nº. 2. 2017, pag. 129-173.

TIAGO FILHO, G. L.; ROSA, C. A. Análise da Capacidade de Amortização dos Passivos Energéticos e Ambientais dos Módulos Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia**, vol. 19, nº. 1, 1o Sem. 2013, pag. 171-194.

TSOUTSOSA, T., FRANTZESKAKIB, N.; GEKAS, V. Environmental Impacts from the Solar Energy Technologies. **Energy Policy**, vol. 33, 2005, pag. 289-296.

ZILLES, R. Geração de Eletricidade A Partir da Energia Solar Sistemas Fotovoltaico. In **Energia Positiva para o Brasil**. Brasília, 2004.