

Mapeamento do potencial solar para microgeração de energia elétrica: O caso da cidade de Ilhéus

Mapping of solar potential for electric micro-generation: The case of Ilhéus city

Ronaldo Lima Gomes¹ 

Adriano Hoth Cerqueira² 

Gil Marcelo Reuss Strenzel³ 

Ykaro da Cruz Pereira⁴ 

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de mapear o potencial solar para microgeração de energia elétrica do centro urbano de uma cidade média brasileira localizada na região sul do Estado da Bahia. O método se embasa na manipulação, em ambiente de sistemas de informações geográficas, de planos de informações que representam as características das áreas de cobertura dos telhados, da irradiância solar global e de microgeração de energia solar. Os resultados encontrados indicam valores de irradiância solar global da ordem de 4,2 kWh/m²/dia que quando coletados por painéis solares distribuídos nas coberturas da cidade produzirão, em média, 520,5 kWh/mês de energia elétrica por logradouro. Neste cenário, a cidade de Ilhéus tem o potencial de produzir 19,76 GWh/mês de energia comportando-se como uma usina de geração de energia elétrica de 27,44 MW de potencia, equivalente ao potencial de usinas hidrelétricas médias e dos modernos parques eólicos ocorrentes no país.

Palavras-chave: Energia solar, microgeração de energia, área urbana, Ilhéus.

Abstract

This work has the objective of mapping the solar potential for electric energy micro-generation of the Brazilian medium city urban center located in the southern region of the Bahia State, Brazil. The method is based on the manipulation, in a geographic information systems, of information plans that represent the characteristics of roofing areas, global solar irradiance and micro-generation of solar energy. The results indicate global solar irradiance values of the order of 4.2 kWh/m²/day which when

¹ State University of Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brazil. E-mail: rlgomes@uesc.br

² State University of Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brazil. E-mail: hoth@uesc.br

³ State University of Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brazil. E-mail: gmreuss@uesc.br

⁴ Professor Jairo Alves Pereira State School, Eunápolis, Bahia, Brazil. ykarodacruz@gmail.com

Article received in: 15/05/2018. Accepted for publication in: 14/02/2019.

collected by solar panels distributed in the roofs of the city will produce, on average, 520.5 kWh / month of electric energy per residence. In this scenario, the city of Ilhéus has the potential to produce 19.76 GWh/month of energy, behaving like a 27.44MW power plant, equivalent to the potential of medium-sized hydroelectric plants and modern wind farms occurring in the country.

Keywords: Solar energy, micro-generation, urban center, Ilhéus city

Introdução

Em virtude da crescente preocupação sobre as modificações climáticas globais ocasionadas pela emissão de gases de efeito estufa, principalmente os provenientes da queima de combustíveis fósseis, aliada à insegurança sobre a ocorrência de tragédias ambientais ligadas à produção energética nuclear, que fontes de energia renováveis sustentáveis como a hidráulica, eólica, geotérmica, biomassa e solar estão se tornando atualmente cada vez mais importantes e recebendo uma maior atenção política em inúmeros países (Choi, *et al.*, 2011). Aliado a estas preocupações destaca-se o aumento da demanda energética mundial, provocada pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento tecnológico e industrial (Torres, 2012).

Dentre os denominados “recursos verdes”, a energia solar destaca-se como uma das mais promissoras fontes alternativas de energia. De forma geral, o emprego de radiações solares tem uma ampla gama de aplicações, no entanto, o interesse de utilização de energia solar está voltado principalmente para uso em processos térmicos e aplicações fotovoltaicas (Bergamasco *et al.*, 2011).

Na Europa, o exemplo da Alemanha demonstra a crescente aplicação de políticas públicas no estímulo à implantação de geração de energia solar, mesmo em regiões com moderado potencial de insolação. Embora nos últimos anos outros países europeus tenham adotado políticas semelhantes, a exemplo da Espanha, Itália, Grécia e República Checa, a tecnologia de geração de energia solar ainda não está difundida em outros cantos do

munho, tendo como uma das principais razões a falta de conhecimento do seu potencial (Súri *et al.*, 2007).

A utilização da energia solar para geração de energia elétrica pode ocorrer a partir da implantação de parques solares, de maior capacidade geradora, ou de maneira descentralizada, denominada de mini ou microgeração. Esta última tem como fundamento a disseminação de produção elétrica solar associada a unidades prediais residenciais, comerciais ou industriais, tendo em vista o abastecimento da própria demanda de consumo ou ainda com a possibilidade de injeção de energia na rede pública de abastecimento.

No Brasil, de acordo com Torres (2012), o aumento de consumo de energia elétrica, fruto do crescimento demográfico e do aumento da atividade econômica, vem ocasionando o surgimento de debates acerca do atual modelo de geração de energia, no sentido de que é preciso se pensar em alternativas que respondam à necessidade de expansão e diversificação do parque gerador elétrico do país, sendo que é nesse contexto que estão inseridas as pequenas centrais geradoras.

Nesse cenário, em 2010 e 2011 a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) realizou consultas públicas no sentido de debater os dispositivos legais que tratam da conexão de microgeradores na rede de distribuição pública, o que levou em 2012 à publicação da Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2016), que atualmente estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração aos sistemas de distribuição de energia elétrica públicos, bem como descreve as regras do sistema de compensação de energia elétrica, ou seja, a compensação dada ao microgerador pela energia por ele produzida e injetada na rede pública.

De acordo com Resolução Normativa nº 482 da ANEEL, a microgeração consiste na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras (capacidade instalada menor que 100kW) que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração,

conectadas à rede de distribuição pública por meio de instalações em unidades consumidoras. No contexto do presente trabalho a abordagem se concentrará apenas na microgeração de energia elétrica proveniente da radiação solar.

Nesse cenário, por se tratar de recurso energético gerado a partir da intensidade de radiação solar incidente, variável de acordo com o posicionamento geográfico, o potencial de geração do território brasileiro é superior em quase o dobro ao de países europeus como a Alemanha (Torres, 2012). Por outro lado, esta fonte de energia ainda é pouco utilizada na matriz energética brasileira. De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2016) as fontes de energia renováveis representam cerca de 43,5% do balanço energético brasileiro, sendo a geração solar ainda incipiente com participação inferior a 1%. Porém, estudos para o planejamento do setor elétrico em 2050 (BRASIL, 2017) estimam que 18% dos domicílios no Brasil contarão com geração fotovoltaica com potencial total de 8,6 TWh, ou 13% da demanda total de eletricidade residencial. Para tanto, serão necessários estímulos à geração de energia pelos próprios consumidores (residencial, comercial, industrial e rural) com base em fontes renováveis, em especial a fotovoltaica. Atualmente, o cadastro de microgeradores de energia solar disponível no sítio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2017) indica a existência de 16.209 microgeradores distribuídos nos diferentes estados brasileiros, com capacidade instalada de geração de 180.276 KW.

Em cada local de microgeração, os painéis solares possuem o seu posicionamento disposto de acordo com as características geométricas de incidência da radiação solar no local. De forma geral, no Brasil, os painéis devem ser orientados para o norte com ângulos de inclinação que variam com a latitude do local a ser instalado. No caso do município de Ilhéus, localizado na latitude 14°47'26"S, o ângulo de inclinação dos painéis deve ser de, aproximadamente, 15°. Tal configuração faz com que os painéis

solares possam repousar nos telhados das residências na face voltada, preferencialmente, para o norte. Dessa forma, a geometria de incidência da radiação solar e da disposição das placas nos telhados são fatores que influenciam no potencial de energia a ser gerado. Outros fatores a serem considerados são aspectos de relevo e de uso e ocupação do solo. Com relação ao relevo, de forma geral, em áreas planas obstáculos de sombreamento como morros e serras não estão presentes. Por outro lado em locais de relevo acidentado a ocorrência de zonas de sombra é mais pronunciada. Com relação a aspectos de uso e ocupação do solo, a tipologia habitacional, as características do telhado, o posicionamento dos lotes e o perfil socioeconômico implicam na configuração e potencial da geração.

O perfil socioeconômico do microgerador, mais precisamente as suas características de consumo anual de energia elétrica, refletirá no dimensionamento do sistema, ou seja, na sua capacidade de produção de energia solar. De forma geral, a capacidade/potência de painéis solares instalados é diretamente proporcional à produção de energia elétrica solar que se quer atingir. Dessa forma, pequenos consumidores de energia elétrica terão seus sistemas de microgeração solar de potencia instalada compatível com a sua demanda de consumo. Por outro lado, para microgeradores de maior consumo, um sistema de maior potencia é requerido. Esse cenário pode ser balanceado de acordo com a taxa que o usuário microgerador desejar atingir. Por exemplo, poderá dimensionar o seu sistema de geração solar para abastecer 100% de seu consumo elétrico, ou 50%, 25%, etc.

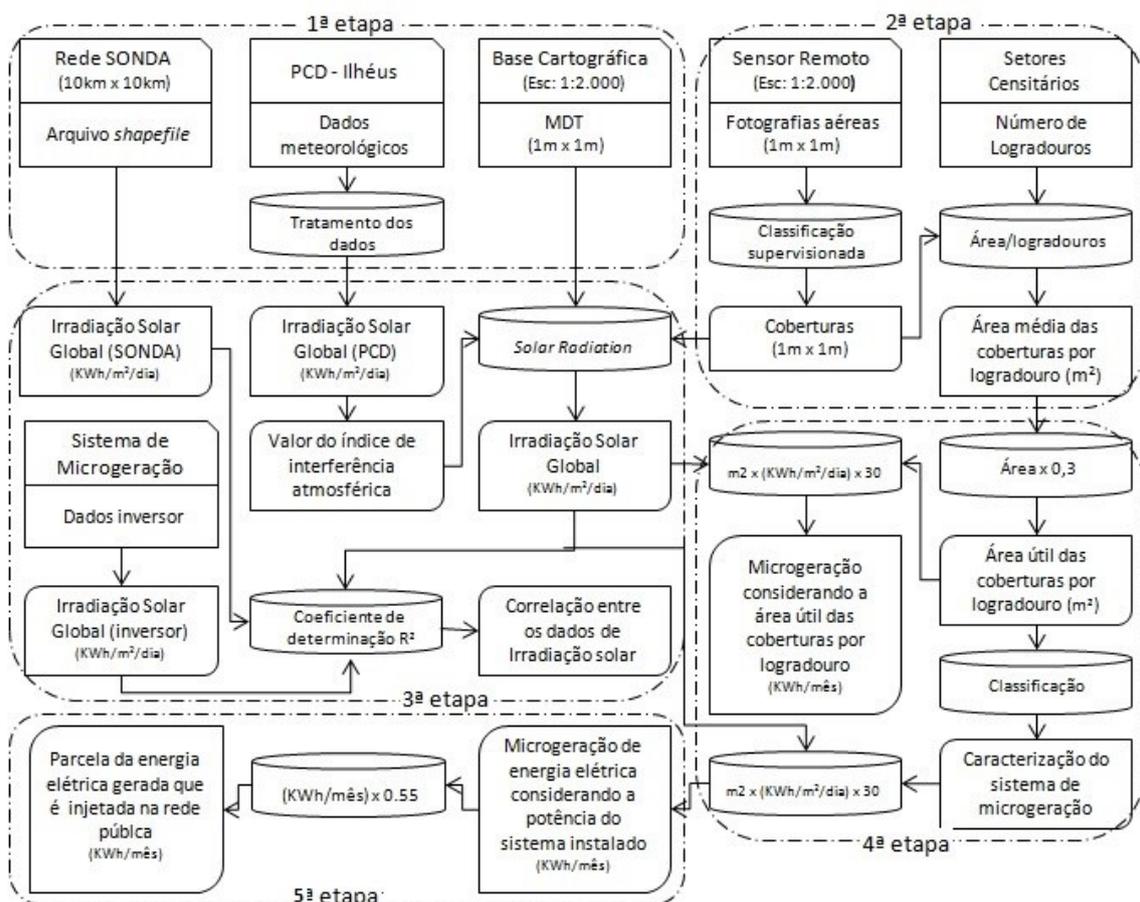
Em resumo, no sentido de entender o potencial de geração solar de um determinado local, torna-se necessário o entendimento das seguintes características: localização geográfica (latitude); radiação solar incidente no local; posicionamento no relevo; características da cobertura da tipologia habitacional e características de consumo. Atualmente, esses planos de informações podem ser manipulados em ambiente de sistemas de informações geográficas tendo em vista a realização de cruzamentos que

tenham como produto final a representação do potencial de geração elétrica solar de um determinado espaço, que no caso da presente pesquisa representado pela área urbana do município de Ilhéus, localizado na região sul do estado da Bahia.

O método adotado

Para se atingir os objetivos traçados o método adotado divide-se em 5 etapas, tal como ilustrado no fluxograma da Figura 1 e descritos a seguir.

Figura 1 - Fluxograma metodológico apresentando as 5 etapas da pesquisa.



Fonte: dos Autores, 2018.

A primeira etapa possui o objetivo de organizar em ambiente de sistemas de informações geográficas a base cartográfica plani-altimétrica com a conseqüente elaboração do modelo digital do terreno da área em estudo.

Em função da dimensão da área do centro urbano de Ilhéus e da base plani-altimétrica existente, os trabalhos de cartografia foram desenvolvidos na escala 1:2.000 com a utilização de folhas topográficas digitais. Além dos dados planimétricos, como arruamento, quadras e drenagem, esta base de dados possui informações altimétricas representadas por curvas de nível com equidistância de 1m, o que proporciona o nível de escala de detalhe para a base cartográfica produzida.

Para a elaboração do modelo digital do terreno (MDT), os dados altimétricos da carta topográfica foram manipulados em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas, mais precisamente com a utilização do módulo *Spatial Analyst* do ARCGIS 10, onde a estrutura vetorial das curvas de nível foi convertida em *grids* representativos da hipsometria do relevo da área. A resolução de *pixel* obtida na elaboração do MDT foi a de 1m x 1m, compatível com a escala original de 1:2.000.

Em seguida, na segunda etapa, foi executado o mapeamento da cobertura de telhados dos logradouros da cidade, a partir da aplicação de método de classificação supervisionada em imagens de fotografias aéreas com resolução de *pixel*, também, de 1m x 1m. Para tanto, foram utilizadas as ferramentas *Create signatures* e *Maximum Likelihood Classification* do módulo *Spatial Analyst* do *software* ARCGIS 10.

Os telhados foram classificados em cobertura por telhas cerâmicas e cobertura por telhas de fibrocimento e/ou cobertura por laje exposta. Ressalta-se que, em virtude da impossibilidade de discretizar as coberturas por unidade domiciliar, principalmente em bairros densamente ocupados, optou-se por dividir a área total de cobertura de telhados de uma determinada área pelo número de residências nela contida. Para tanto,

foram utilizados os dados de número de domicílios obtidos dos setores censitários do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (BRASIL, 2015). Dessa forma, cada setor censitário terá uma área média de cobertura por domicílio. Com relação à geometria das coberturas assume-se que estas são planas, tendo em vista que, em caso real, as estruturas de suporte das placas solares poderão promover a inclinação do dispositivo tendo em vista a otimização da captação da radiação solar.

A terceira etapa objetiva mapear a distribuição da irradiância solar global incidente na área em estudo, obtida através do acesso aos dados provenientes de duas redes de monitoramento climático: a Plataforma de Coleta de Dados – PCD (INPE, 2017) e a rede SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (INPE, 2016).

Os dados de irradiação solar global coletados pela PCD de Ilhéus, referentes aos anos de 2001 a 2015, foram obtidos e tratados a partir dos valores médios diários para cada mês do período estudado, conforme pode ser visto em detalhe em Pereira *et al* (2017). Já a rede SONDA forneceu seus dados de irradiância solar global sob a forma de arquivos *shapefiles*, tal como disponíveis e interpretados em Pereira *et al.* (2006).

No contexto descrito até aqui, tendo em vista o conhecimento da irradiação solar global incidente na área em estudo, os fatores de representatividade e escala da informação coletada esbarram na acurácia do mapeamento a ser desenvolvido. No caso da irradiância solar global calculada pela rede SONDA o *pixel* do *grid* de dados gerado possui dimensões da ordem de 10km x10km. Por outro lado, os dados da PCD de Ilhéus exprimem representatividade pontual para as coordenadas do ponto de coleta e consequentemente da PCD. Dessa forma, tendo em vista o mapeamento proposto por este trabalho, torna-se necessário o cálculo da irradiância solar global na escala adotada por este mapeamento, que é a escala de detalhe de 1:2.000, com o *grid* de *pixel* de 1m x 1m. Nesse cenário, a forma do relevo local, representado no sistema de informações geográficas

pelo MDT será uma das variáveis de influência da incidência de irradiação solar global. Para tanto, será utilizado o módulo *Solar Radiation* do ARCGIS 10.

O módulo *Solar Radiation*, é uma ferramenta de análise da radiação solar incidente em uma paisagem, com base em métodos de algoritmos desenvolvidos por Fu & Rich (2000). Por este método, é possível o cálculo da irradiância direta, difusa, e global para cada local em função de sua localização na superfície topográfica, produzindo mapas de insolação para toda área estudada. Para tanto, por este procedimento o dado de entrada no módulo *Solar Radiation* se restringe ao *grid* do modelo digital do terreno gerado na primeira etapa, aliado ao valor do índice de claridade, que refletirá a influência atmosférica e climática atuante na área em estudo, a ser calculado a partir do conhecimento da relação entre a irradiância solar que chega ao topo da atmosfera com a que é coletada pela Plataforma de Coleta de Dados localizada em superfície (Myers, 2013). Os dados coletados na PCD de Ilhéus serão confrontados com os modelados pelo *Solar Radiation* tendo em vista a validação do mapeamento executado.

Já a quarta etapa tem o objetivo de quantificar o potencial de microgeração solar dos domicílios, a partir da aplicação de álgebra de mapas no software ARCGIS 10. Sendo assim, cada polígono de telhado mapeado, aliado ao valor da irradiação solar global calculado na etapa anterior, refletirá no potencial de geração instalado. Ressalta-se que nem toda a área de uma cobertura de um domicílio pode ser utilizada para instalação de painéis solares. Dessa forma, utilizou-se como área útil da cobertura o valor de 30% da área total calculada na segunda etapa. Ressalta-se ainda que, a tecnologia atual de fabricação dos painéis fotovoltaicos consegue capturar apenas 15% da irradiância recebida. Porém, para que essa irradiação solar seja captada e transformada em energia elétrica torna-se necessária a instalação, em cada um dos logradouros estudados, de uma usina de microgeração de energia composta basicamente por painéis solares e

inversores, além de seus acessórios como estruturas de fixação e fiação apropriada. Dessa forma, atualmente encontram-se disponíveis no mercado uma gama de tipos de painéis solares e inversores com diferentes potências. Nesse contexto, tendo em vista diagnosticar a quantidade de energia a ser gerada pelos logradouros e, conseqüentemente, por toda a área em estudo, considerando as tecnologias e equipamentos envolvidos para a montagem dos microgeradores, criou-se o cenário apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Cenários de implantação de sistemas de microgeração de energia solar em função das áreas de cobertura dos logradouros.

Área útil da cobertura (m ²)	Potência do microgerador de energia (W)	Número de Painéis Solares de 250w	Área dos painéis solares (m ²)
Até 15m ²	1.500	6	9,6
15 - 25m ²	3.000	12	19,20
25 - 50m ²	5.000	20	32
50 - 75m ²	10.000	40	64
75 - 100m ²	15.000	60	96
> 100m ²	20.000	80	128

Org.: dos Autores, 2018.

De acordo com a Tabela 1, uma área útil de cobertura de até 15m², por exemplo, em virtude de sua própria dimensão, é capaz de receber a instalação de um kit básico de microgeração de energia solar de 1500W, composto por 6 placas de 250W cada. Visto que cada placa possui aproximadamente 1,6m² de área, configura-se, então, uma área total de painéis solares de 9,6m². Nesse cenário, quanto maior a área útil da cobertura, maior a configuração de potencia e de número de placas do kit de microgeração a ser instalado. Ressalta-se ainda, que as potencias do microgerador de energia, conforme definidas na Tabela 1, são compatíveis com as potencias de inversores disponíveis atualmente no mercado.

Do exposto, em ambiente de SIG o modelo citado acima se concretiza com a elaboração da seguinte álgebra: Potencial mensal de microgeração de energia elétrica = {[área dos painéis solares (m²) * irradiação solar (kWh/m²/dia)] * eficiência do painel (0,15)*30}.

Em seguida, na quinta etapa, será utilizada álgebra de mapas para balancear a produção de energia elétrica solar gerada, com dados de consumo tendo em vista avaliar a parcela de energia elétrica solar gerada e injetada na rede pública em sistema *grid-tie*. Nesse contexto, o potencial de geração mensal por energia solar contabilizado para área em estudo na quarta etapa, será dividido em parcelas: Uma delas será representada pela quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema de microgeração solar a ser utilizado pela unidade geradora, a outra será a quantidade de energia elétrica que será injetada na rede elétrica pública como excedente do sistema de microgeração. No caso do presente trabalho será adotado que 45% da energia gerada pelo logradouro será consumida e 55% será injetada na rede pública. Dados estes obtidos do comportamento da unidade de microgeração utilizada como elemento de monitoramento dos dados alcançados por este trabalho.

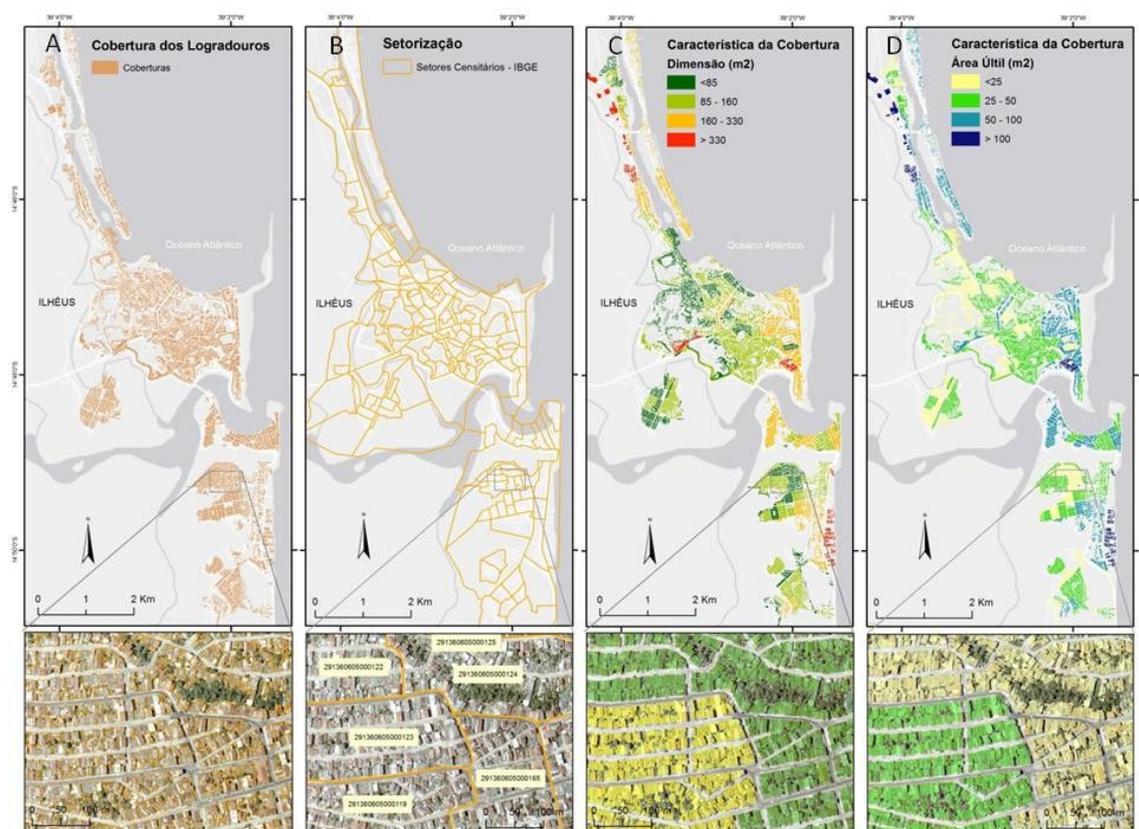
Por fim, cita-se que os dados produzidos serão confrontados com dados reais de produção de energia solar, autoconsumo da unidade microgeradora e de excedente de produção injetado na rede pública de distribuição de energia. Nesse contexto, os dados reais de funcionamento serão obtidos a partir do monitoramento de uma unidade de microgeração solar existente em uma residência localizada na cidade de Ilhéus, com potencia instalada de 1500W. O monitoramento constará do balanço entre a geração de energia produzida pelo microgerador solar (a ser medido no inversor solar) e o que é injetado para fora da unidade geradora, que será contabilizado através de medidor de energia elétrica de fluxo inverso.

Resultados

Com a aplicação do método de classificação supervisionada nas fotografias aéreas foi possível a delimitação das áreas de cobertura dos logradouros da cidade (Figura 2a). Conforme previsto na metodologia,

ocorreu o adensamento das coberturas em mais de um logradouro, em função da proximidade entre as unidades mapeadas. Dessa forma, para a obtenção da área de cobertura de cada logradouro dividiu-se a área total de cobertura presente em um setor censitário (Figura 2b) pelo número de logradouros presentes neste setor. Neste contexto, cada logradouro presente em um setor censitário terá uma área média de cobertura (Figura 2c). Estes polígonos de cobertura totalizam 4,48 Km² de área, com valores de mínimos e máximos de 23m² e 707m², respectivamente, e média de 118m². O número total de logradouros mapeados foi de cerca de 38.000.

Figura 2 – Valores de área total e útil de cobertura por logradouro em trecho da área estudada.



Fonte: dos Autores, 2018.

Tendo em vista que o cálculo da área de cobertura, no contexto do presente trabalho, possui o objetivo de servir de suporte para a instalação de placas fotovoltaicas, adotou-se a área útil de 30% da área total como propensa a receber tais equipamentos (Figura 2d). Os valores de área útil encontrados totalizam 1,34 Km² de cobertura, variáveis de 7 a 212m² e com 35m² em média.

Com relação ao conhecimento do potencial da radiação solar incidente na área em estudo, sabe-se que na superfície da Terra incide radiação não só proveniente diretamente do disco solar (radiação direta) mas, também, a radiação retida e ou espalhada pela atmosfera (radiação difusa). Estas duas componentes, quando somadas, representam a radiação solar global. Quando a superfície em que incide a radiação solar está na horizontal, ela recebe tanto a componente direta quanto a difusa. Já, quando a superfície está a um ângulo qualquer com a horizontal do lugar, há a necessidade de se considerar parte da radiação solar refletida pela superfície, associada às características do albedo terrestre local, sendo computada como uma componente da radiação difusa. No contexto do presente trabalho, será considerada apenas a radiação solar que incide em uma superfície plana sem nenhum ângulo com a horizontal do lugar, dessa forma sem considerar a parcela da radiação difusa produzida pelo reflexo da superfície.

Sabe-se, ainda, que ambas as componentes direta e difusa representam uma fração da radiação solar que chega ao topo da atmosfera. Se não houvesse atmosfera, não haveria radiação difusa e 100% da radiação do Sol chegaria à superfície de forma direta. Nesse sentido, foram calculados os valores da irradiância no topo da atmosfera em cada dia do ano, assumindo uma insolação dada pela equação 1 (ver Liou, 2002):

$$S = S_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \int_{-H}^{+H} \cos \theta \frac{dh}{2\pi} \quad (\text{eq.1})$$

Onde $S_0 = 1366,1 \text{ Wm}^{-2}$ é a constante solar, $(r_0/r)^2 = 1 + 0,033\cos(2\pi dn/365)$ é o fator de correção (assumido constante para um certo dia do ano dn) devido à excentricidade da órbita terrestre ($r_0 = 1$ unidade astronômica), e θ é o ângulo zenital solar (considerando uma superfície plana); $-H$ e $+H$ são os limites (em ângulo horário) que correspondem ao nascer e ocaso do Sol, respectivamente.

Esta integral tem solução analítica conhecida e apresentada na equação 2 (Liou, 2002):

$$S = S_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cdot \frac{1}{\pi} [H \cdot \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H] \quad (\text{eq.2})$$

Onde H é o ângulo horário correspondente ao nascer do Sol (do dia em consideração), $\phi = -14,78$ é a latitude de Ilhéus e δ a declinação do Sol. O valor médio encontrado foi de $9,75 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ e com ele torna-se possível estimar a transparência média para a atmosfera de Ilhéus ao longo do ano, ao compará-la com os dados medidos em solo para a irradiação solar global.

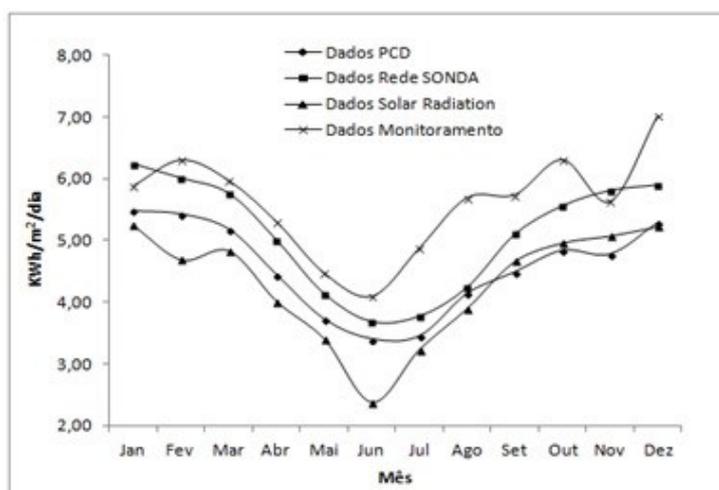
Segundo Myers (2013), pode-se definir o índice de claridade ao se dividir a irradiância solar global, incidente na superfície terrestre, pela irradiância no topo da atmosfera. Na prática este índice de claridade refletirá a influência atmosférica e climática nos valores de irradiância.

Para o conhecimento tanto da radiação direta quanto da radiação difusa torna-se necessário medi-las ou modelá-las. Quando modelados, os valores precisam ser comparados por dados de estações em solo para validação e calibração dos modelos. Na área em estudo, a partir do acesso aos dados da rede SONDA, observa-se que os valores encontrados de irradiância solar global variam de $3,68$ a $6,24 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$, com média de $5,1 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ (Figuras 3 e 4a). Dessa forma, conforme exposto

anteriormente, dividindo-se a irradiância global pela irradiância no topo da atmosfera tem-se um valor estimado do índice de claridade para a área estudada da ordem de 0,52.

Por sua vez, com relação aos dados gerados pela PCD de Ilhéus, o comportamento da irradiação solar global, em função dos meses do ano, pode ser visto na Figura 3. Com a análise destes dados tornou-se possível o conhecimento do valor de 4,6 kWh/m²/dia como média diária de irradiação solar global para a área em estudo (Figura 4b). Valor este ligeiramente inferior ao estimado anteriormente, baseado nos dados da rede SONDA de 5,1 kWh/m²/dia. Em seguida foi estimado o valor do índice de claridade para a radiação global, usando a serie histórica de medidas da PCD de Ilhéus, dividindo-se o valor de 4,6 kWh/m²/dia (irradiância global) pelo valor de irradiância no topo da atmosfera de 9,75kWh/m²/dia. Dessa forma, obtendo-se o valor de 0,47.

Figura 3 - Valor médio diário, por mês, de irradiação solar global extraído dos dados coletados da rede SONDA, da PCD de Ilhéus, da modelagem com uso do Solar Radiation e do monitoramento executado.

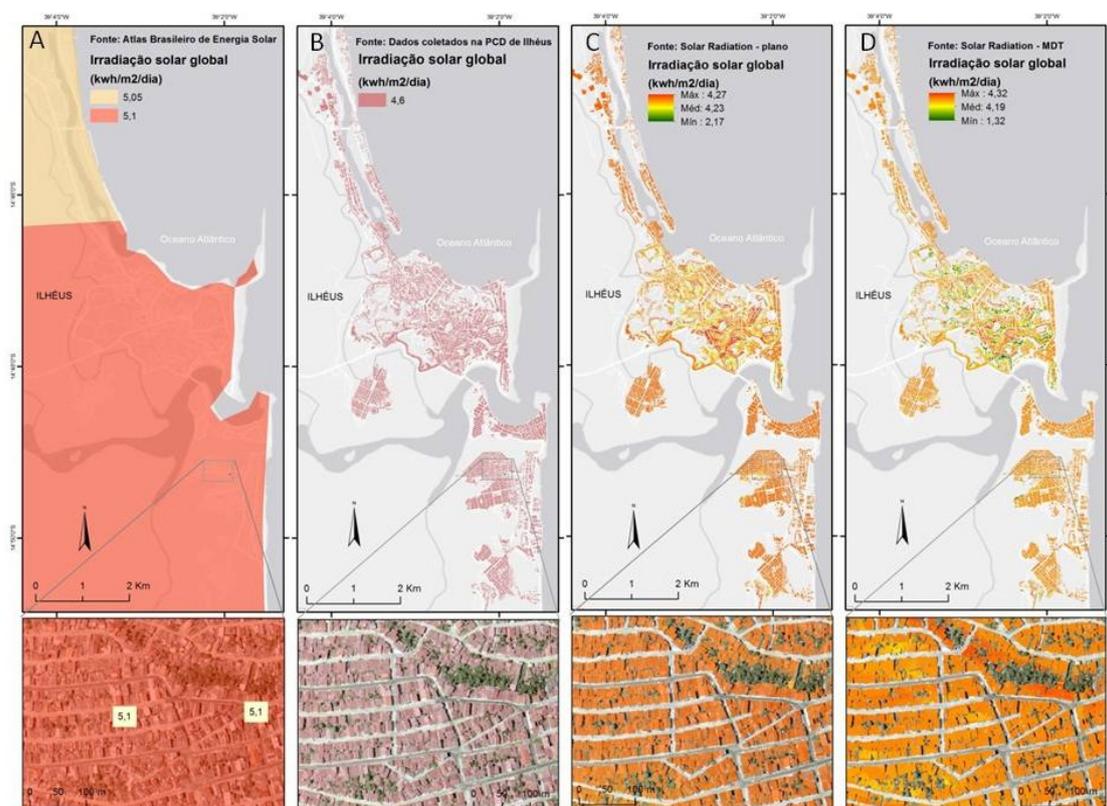


Fonte: dos Autores, 2018.

Os dados de irradiação solar global geoprocessados pelo módulo *Solar Radiation* com a adoção de 0,47 para o índice de claridade, apresentam

valores médios de 4,23 e 4,19kWh/m²/dia (Figuras 4c e 4d), associados a irradiação incidente em uma superfície plana horizontal, no primeiro caso, e na superfície de declividade e orientações variadas dada pelo relevo local, no segundo. No caso da superfície plana os diferentes valores de irradiância ocorrem em virtude, além das pequenas diferenças de latitude, principalmente a partir da ocorrência de zonas de sombra geradas pelo relevo. Por sua vez, alia-se a isso, no segundo caso, a orientação das vertentes do relevo. Ou seja, as encostas do relevo que possuem face voltada para o norte, na área em estudo, tendem a receber uma maior quantidade de radiação solar. Tal fato, de certa forma, explica a ocorrência de valores médios diários de irradiância solar global encontrados pala aplicação do módulo *Solar Radiation*.

Figura 4 – Valores de irradiância solar global obtidas por diferentes métodos na área em estudo.



Fonte: dos Autores, 2018.

Ainda como elemento de monitoramento e entendimento do valor médio de irradiância solar global incidente na área em estudo foram analisados os dados medidos pelo sistema de microgeração instalado em uma residência da cidade de Ilhéus, localizada nas coordenadas 14,86°S e 39,03°W. A distribuição dos valores de irradiância solar global foi calculada a partir dos dados registrados no inversor solar do sistema de microgeração nos diferentes meses do ano. Os valores máximos e mínimos de irradiação solar global encontrados foram, respectivamente, de 7,02 kWh/m²/dia, referente ao mês de dezembro, e de 4,10 kWh/m²/dia, referente ao mês de junho. A média anual encontrada foi de 5,61 kWh/m²/dia, associada ao valor de 0,57 para o índice de claridade, valores estes acima dos previstos pelos métodos da Rede SONDA, dos dados da PCD de Ilhéus e da simulação do *Solar Radiation*.

Tendo em vista avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelo módulo *Solar Radiation* utilizou-se o coeficiente de determinação R² como ferramenta estatística. Os resultados encontrados atestam valores de R² = 0,84 para relação entre o modelo *Solar Radiation* com os dados coletados na PCD de Ilhéus e de R² = 0,78 quando relacionados aos dados coletados pelo sistema de microgeração solar.

Os elevados valores de irradiância solar global e do índice de claridade referentes aos dados do monitoramento, podem ocorrer em virtude de que os painéis solares instalados não se apresentam dispostos na horizontal, como modelado pelos métodos aqui estudados, e sim inclinados em 15° nas direções N0° e N270°. Tal modificação na direção e inclinação destes painéis visam à otimização da coleta de irradiação para o suprimento energético da micro usina solar e uma maior captação de radiação quando comparados aos outros métodos aqui trabalhados, principalmente relacionados a uma maior parcela de radiação difusa.

Com o conhecimento do valor de Irradiância solar global que incide na área em estudo, torna-se possível o cálculo de energia que pode ser captada e

gerada pelas coberturas estudadas em função de sua área. Os resultados atestam o cenário em que o potencial de geração de energia elétrica, considerando as áreas úteis das coberturas mapeadas dos logradouros, atingem valores variáveis de 121,3 kWh/mês até 4.048,5 kWh/mês, retratando a média de 882,4 kWh/mês por logradouro. Estes valores distribuídos em classes podem ser visualizados na Figura 5a.

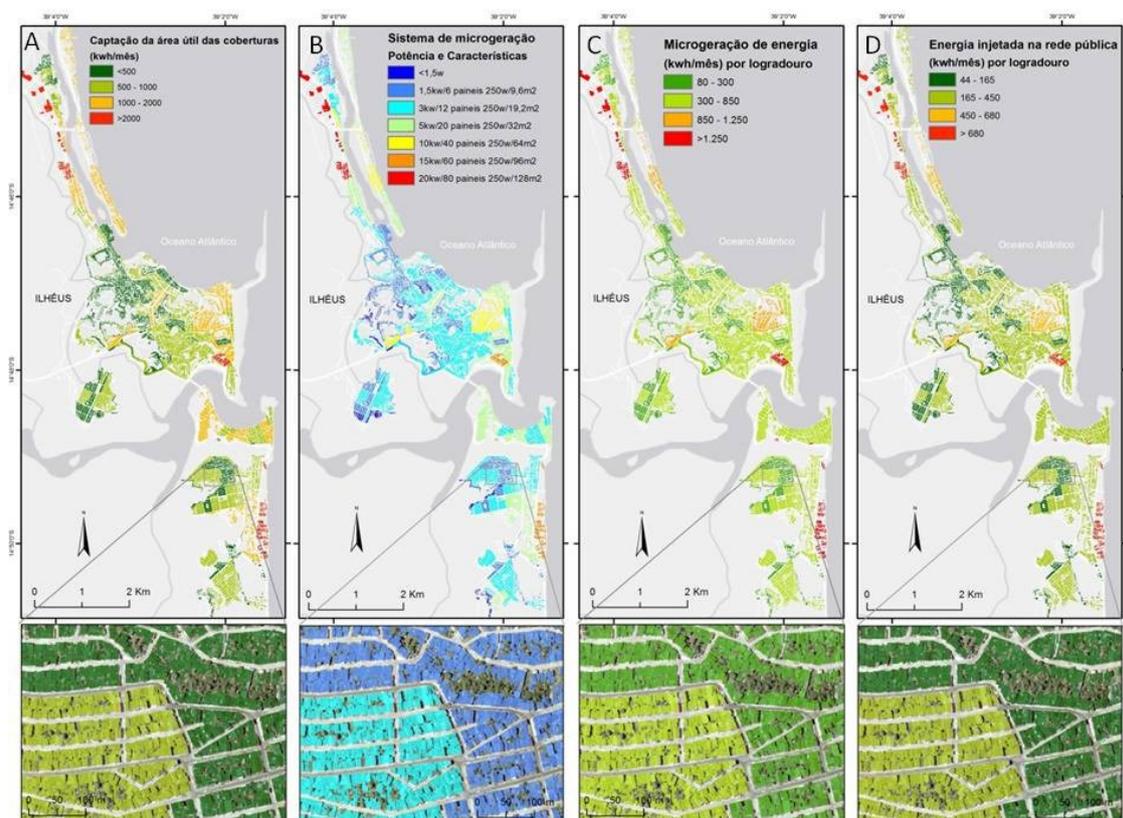
Com a adoção das tipologias de equipamentos de microgeração de energia a serem instalados (Tabela 1 e Figura 5b) tornou-se possível avaliar, de fato, a quantidade de energia a ser gerada pelos logradouros distribuídos nos diferentes setores censitários, conforme exposto na Figura 5c. Os dados encontrados apresentam valores variáveis de 73,14 a 2.442,8 kWh/mês, com média de 520,46 kWh/mês por logradouro.

Estes dados de microgeração de energia refletem a energia produzida em sua totalidade pelo inversor do sistema quando recebida a energia proveniente dos painéis solares. Porém, quando esta energia produzida entra no circuito interno do logradouro ela pode ser consumida, em parte, pelos aparelhos eletrônicos, eletrodomésticos, ou outras fonte de consumo que estejam em funcionamento. Dessa forma, apenas uma parte desta energia é injetada na rede pública. De acordo com os dados extraídos do ponto de monitoramento utilizado nesta pesquisa, a relação entre injeção e produção é de e 55%, ou seja: a cada 100 kWh produzido apenas 55% deste deverá ser injetado na rede pública. Quando aplicada esta taxa aos valores de produção de energia apresentados anteriormente, tem-se que a média de injeção na rede pública é da ordem de 286 kWh/mês por logradouro, com valores máximos e mínimos de 1.343,5 e 43,5 kWh/mês, respectivamente (Figura 5d).

Por sua vez, quando analisamos a produção média de energia de toda a área em estudo, considerando os diferentes sistemas de microgeração instalados nas coberturas, tem-se o cenário de produção de 19,76 GWh/mês de energia elétrica, sendo que destes 8,9 GWh/mês serão consumidos nos

próprios logradouros e 10,9 GWh/mês de energia a ser injetada na rede pública da cidade.

Figura 5 – Potencial de microgeração de energia elétrica e sua parcela de injeção na rede pública de energia correspondente a logradouros da cidade de Ilhéus-BA.



Fonte: dos Autores, 2018.

Considerações finais

Em ambiente de sistemas de informações geográficas a manipulação de planos de informações proporcionou o entendimento de que a situação de localização geográfica da cidade de Ilhéus propicia a incidência de irradiação solar global em um plano horizontal da ordem de 4,2 kWh/m² por dia. Tal quantidade de irradiação solar, quando captada por painéis fotovoltaicos, produzem 0,63 kWh/m² por dia de energia elétrica, que podem se transformar em 19,76 GWh/mês de energia elétrica, quando coletados em

sistemas de microgeração instalados em 38.000 logradouros contendo em média 27m² de painéis fotovoltaicos. Este potencial de geração é suficiente para suprir quase a totalidade do consumo do município de 20,3 GWh/mês (SEI, 2017).

Esta estimativa pode ser vista como conservadora, uma vez que utilizamos como parâmetro de entrada em nossos modelos um índice de claridade calculado a partir de medidas realizadas numa superfície horizontal (ou seja, a partir dos dados coletados na PCD de Ilhéus). Devemos esperar que, com a mesma condição de insolação, superfícies inclinadas e voltadas para o norte recebam maior quantidade de energia (quando comparadas às superfícies horizontais), quando consideramos o período de um ano. Por outro lado, nossas estimativas são realísticas, uma vez que implícito neste parâmetro estão as condições atmosféricas e climáticas. Em outras palavras, o índice de claridade (diário) reflete o grau de cobertura de nuvens, a existência ou não de chuvas e/ou partículas na atmosfera. Este índice varia fortemente ao longo do ano, podendo assumir valores tão baixos quanto 0,3 (dias fortemente nublados e/ou chuvosos), e tão altos quanto 0,7 (praticamente, céu claro e sem cobertura de nuvens). Em Cerqueira & Gomes (2019) nós exploramos a variabilidade temporal deste índice para a cidade de Ilhéus, sua tendência sazonal e suas implicações para a previsão do comportamento de sistemas de micro-geração de energia a partir de painéis foto-voltáicos.

A partir desta análise estima-se que a cidade de Ilhéus tenha um potencial de geração de energia elétrica compatível com uma usina de 27,44MW de potência, o que representa menos de 1% da capacidade instalada para geração de energia elétrica do estado da Bahia, de 8.016MW, ou do seu potencial de geração de 1.857,4 GWh/mês (SEI, 2017). Esta potência de geração equipara-se, por exemplo, com a potencia de usinas hidrelétricas de médio porte localizadas no estado da Bahia, como a UHE do Funil (30MW) e de Pedras (20MW), ambas operadas pela Companhia

Hidrelétrica do São Francisco (Chesf), ou com os modernos parques eólicos, a exemplo do Saraíma (30MW), Pedra Branca (30MW) e Caetité 2 (30MW).

Atualmente, de acordo com BRASIL (2017b) o preço para instalação de sistemas de geração solar giram em torno de R\$ 4.500,00/kW. Dessa forma, para o alcance da potência de 27,44MW são necessários investimentos da ordem de R\$125.000.000,00. Tal custo, quando comparado a valores utilizados na instalação de UHE, de 2.648,00/KW, são considerados superiores. Por outro lado, ressalta-se que no caso da microgeração elétrica solar não são necessários investimentos em ações de transmissão e distribuição, caso contrário ao que ocorre na geração de energia elétrica por hidrelétricas.

Do exposto, conclui-se que uma cidade média de 180.000 habitantes como a de Ilhéus é capaz de produzir energia elétrica a partir de microgeração solar suficiente para suprir a sua demanda a partir da distribuição em seus logradouros de kits de sistemas de microgeração.

Referências

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren201248_2.pdf>. Acesso em: 01 dezembro 2016.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Unidades consumidoras com geração distribuída**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp>. Acesso em: 30 outubro de 2017.
- BERGAMASCO L, ASINARI P. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy). **Solar Energy**. 2011; 85: 2741–56. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.010>
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Retrato dos novos projetos solares fotovoltaicos no brasil**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 30 maio 2017b.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sinopse do Censo Demográfico 2010. Agregados por setores censitários**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/>. Acesso em mar. 2015.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017 – Ano base 2016: Relatório Síntese**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 01 dezembro 2016.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos da demanda de energia - 2050: nota técnica DEA 13/15**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/>. Acesso em: 05 janeiro de 2017.

- CERQUEIRA, A.H., GOMES, R.L. Análise histórica da irradiação global no município de Ilhéus/BA. **Revista Brasileira de Energia Solar**. 2019; submetido.
- CHOI Y, RAYL J, TAMMINEEDI C, BROWNSON J. PV Analyst: Coupling ArcGIS with TRNSYS to assess distributed photovoltaic potential in urban areas. **Solar Energy**. 2011; 85:2924–39. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.034>
- FU P, RICH P M. **The Solar Analyst 1.0 Manual**. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA. 2000.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – **Rede SONDA, Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. Disponível em: <http://http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acesso em 01/12/2016.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – **SINDA, Sistema Integrado de Dados Espaciais**. Disponível em: <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico>. Acesso em 01/10/2017.
- LIOU, K. N. 2002, in **An introduction to Atmospheric Radiation**, 2nd Edition, (Elsevier)
- MYERS D R. Practical modeling for renewable energy applications. **Solar Radiation**; 2013; CRC Press.
- PEREIRA, E.B., MARTINS, F.R., DE ABREU, S.L. E RUTHER, R. 2006, in **Altas Brasileiro de Energia Solar**, INPE.
- PEREIRA, Y. C.; GOMES, R. L. ; CERQUEIRA, A. H. Análise de dados históricos de radiação solar acumulada coletados pela PCD de Ilhéus-BA. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA E I CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA, 2017, Anais, Campinas. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2465>
- SEL. Superintendência de estudos Econômicos e Sociais do estado da Bahia. **Sistema de Informações Municipais**. Disponível em: <http://sim.sei.ba.gov.br/sim/tabelas.wsp>. Acesso em 15/10/2017.
- SÚRI M, HULD T, DUNLOP E, OSSENBRINK A. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. **Solar Energy**. 2007; 81:1295–1305. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.007>
- TORRES, R.C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- IBGE.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.