

# Avaliação de Locais com Potencial para a Implantação de GD Fotovoltaica sob a Perspectiva do Desenvolvimento Sustentável

C. T. Malheiro\*, J. S. Lucena\*, L. S. Dantas\*, C. E. Capovilla\*, A. J. Sguarezi\*, I. R. S. Casella\*

\*UFABC, Santo André, Brasil

e- mail: c.malheiro@ufabc.edu.br

**Abstract** – *The present work is focused on the elaboration and choice of three places for the implementation of Distributed Generation among 12 localities that count on measurement of solar irradiation in Brazil for System of National Organization of Environmental Data. These locations are willing in five geographic regions of the country: North, Northeast, Center-West, Southeast and South. A choice of three locations obeyed the criterion of sustainability based on three dimensions: political-economic, social and environmental, which used the index and indicators for weighting the dimensions of sustainability such as Human Development Index, Gross Domestic Product, Solar Irradiation and demographic density (with environmental deficit bias). Finally, it was used the geoprocessing software for verification of solar irradiation of 2014 and 2015, whereas seasons, location of transmission lines and nearby photovoltaic power plants.*

**Keywords:** *Distributed generation, sustainability, solar irradiation.*

## Introdução

A Geração Distribuída (GD) é definida como uma composição de centrais geradoras de energia elétrica, conectadas ao sistema de distribuição de forma direta ou através de instalações de consumidores [1].

A GD surgiu nos Estados Unidos por meio do marco Public Utilities Regulatory Policies Act (PURPA) em 1978, cuja geração fosse proveniente de fontes renováveis, com o intuito de reduzir a dependência do petróleo devido à crise econômica mundial na época. Depois desse fato, outros países também passaram a alterar sua legislação e a desenvolver programas de incentivo à geração distribuída [2, 3].

Contudo, percebeu-se recentemente uma evolução em torno da GD, como é possível notar através da homologação da Resolução Normativa nº. 687, de 24 de novembro de 2015, que estabelece condições gerais para o acesso de microgeração (potência instalada menor ou igual a 100 kW) e minigeração distribuída (superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW) aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e para o sistema de créditos de energia ativa gerada e

introduzida na rede, por meio do sistema de compensação de energia elétrica [4].

Dentro deste contexto, é proposta neste artigo uma nova metodologia de identificação de 3 cidades dentre 12 localidades espalhadas pelas 5 regiões brasileiras, que poderão implementar unidades de geração fotovoltaicas distribuídas a partir do conceito de sustentabilidade. Como essas localidades contam com o monitoramento do Sistema de Organização de Dados Ambientais (SONDA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a metodologia proposta emprega análises do tipo multicritérios, compreendendo as dimensões político-econômica, ambiental e social, bem como o uso de sistemas de informação geográfica para o tratamento de variáveis espaciais [5], [6] e [7].

A GD conta com sistemas fotovoltaicos conectados à rede, instalados para fornecer energia ao consumidor, o qual pode também usar a energia provida pela rede elétrica convencional para complementar a quantidade de energia demandada, caso haja necessidade [8].

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado da configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Os principais equipamentos do sistema são o gerador fotovoltaico e o inversor que, ao converter tensão contínua em alternada, possibilita a conexão do sistema à rede de distribuição de energia [8].

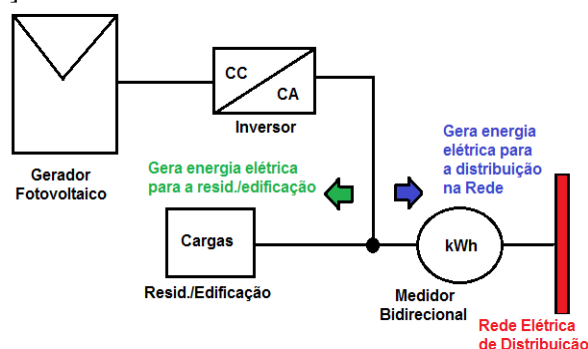


Figura 1. Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Para o estudo realizado, foram utilizados 3 indicadores (produto interno bruto per capita, densidade demográfica e irradiação solar) que caracterizaram quantitativamente o sistema e 1 índice (no caso, o índice de desenvolvimento humano), que

caracterizou um conjunto de indicadores [9], para a escolha das 3 melhores localidades e possível implementação do sistema GD para desenvolvimento dessas localidades sem impactos ambientais, conforme prevê o conceito de sustentabilidade. Dessa forma, o índice e três indicadores utilizados foram:

- Índice de Desenvolvimento Humano (IDH): é um índice que mede saneamento básico, educação e saúde permitindo classificar municípios, estados e países para políticas públicas;
- Produto Interno Bruto (PIB): é uma medida do valor dos bens e serviços que o país produz num período, na agropecuária, indústria e serviços. PIB per capita é o produto interno bruto, dividido pela quantidade de habitantes de um país;
- Irradiação Solar: é medida em (Wh/m<sup>2</sup>), normalmente apresentado no caso do Brasil pela referência [10];
- Déficit Ambiental: Segundo [11], é a correlação direta entre densidade demográfica e déficit ambiental, pois quanto maior a quantidade de população/ km<sup>2</sup>, maior é o déficit ambiental.

A partir do uso da abordagem sistêmica, com foco nos três indicadores (PIB per capita, irradiação solar e densidade demográfica) e no índice (IDH), adotou-se uma ponderação para classificar os locais de implementação, baseados em [12]. Para tornar possível a comparação justa entre eles, fez-se necessário uma normalização para uma mesma escala. Para isso, utilizou-se a variação linear das equações 1 e 2 para critérios fatores, sendo de 0 a 1, o intervalo normalizado determinado conforme [13], [14] e [15].

$$u_1 = \left( \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \quad (1)$$

$$u_2 = \left( \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \quad (2)$$

Onde:  $x_i$  é o valor a ser normalizado;  $x_{\min}$  é o valor mínimo e  $x_{\max}$  é o valor máximo utilizado para o critério utilizado na tabela 1

## Materiais e métodos

Os três indicadores e índice apresentados anteriormente serviram de base para carregar as dimensões de sustentabilidade para ponderação e concluir o critério de avaliação dos três melhores locais para a implementação da GD. Para a implementação da metodologia proposta foi empregada a ferramenta de geoprocessamento QGIS,

que é um *software* utilizado para uso cartográfico adicionando uma série de banco de dados correlacionais que, no caso do presente trabalho, correspondem às variáveis ambientais, sociais e políticas para análise global de uma dada região [16]. A metodologia desenvolvida levou em consideração, os dados de irradiação solar de 2014 e 2015 das 12 localidades monitoradas.

Para classificar os graus de sustentabilidade de cada dimensão e para a seleção final das melhores localidades para implantação do sistema de GD. Feito isso, com a normalização, notou-se um impacto maior no uso do déficit ambiental e do em comparação com o PIB e a irradiação solar, por apresentarem variações aleatórias durante os períodos 2014 e 2015.

A equação 1 foi aplicada para a irradiação solar por apresentar a característica linear de quanto maior a irradiação solar (Wh/m<sup>2</sup>) melhor para a região [17]. E a equação 2 foi utilizada, para os demais dados do IBGE, de acordo com as seguintes análises: quanto maior o PIB per capita do município, menos interessante ele se torna para a instalação do GD fotovoltaico, quanto menor o IDH, maior a sua prioridade para a região e quanto maior a densidade demográfica, maior o déficit ambiental. Os valores de máximos e mínimos são apresentados na tabela 1.

**Tabela 1** – Valores de Máximo e Mínimos do IDH e de cada indicador.

Dimensões	Política- Econômica		Social	Ambiental	
	Índice e Indicadores	Irrad. Solar (Wh/m <sup>2</sup> )	PIB per capita R\$	IDH	Densidade demográfica (hab./ km <sup>2</sup> )
Mínimo		304,6	10000,00	0,5	1
Máximo		1424,0	80000,00	1,0	50000

**Tabela 2** – Ponderação do Índice e dos três Indicadores de cada dimensão da sustentabilidade.

Dimensões	Política- Econômica		Social	Ambiental	
	Índice e Indicadores	Irrad. Solar (Wh/m <sup>2</sup> )	PIB per capita	IDH	Densidade demográfica
peso		1,5	2,0	2,5	3,0

Na tabela 2 foram discriminados os pesos do índice e dos três indicadores, baseados em [12] e na tabela 3, estão situadas as posições georreferenciadas

das estações de medição que foram utilizadas no estudo.

**Tabela 3**– Relação das 12 localidades estudadas.

Estação (Sigla)	UF	Latitude	Longitude
Brasília (BRB)	DF	15° 36' 03" S	47° 42' 47" O
Cachoeira Paulista (CPA)	SP	22° 41' 22,65" S	45° 00' 22,28" O
Campo Grande (CGR)	MS	20° 26' 18" S	54° 32' 18" O
Palmas (PMA)	TO	10° 10' 40" S	48° 21' 43" O
Petrolina (PTR)	PE	09° 04' 08" S	40° 19' 11" O
São Luiz (SLZ)	MA	02° 35' 36" S	44° 12' 44" O
São Martinho da Serra (SMS)	RS	29° 26' 34" S	53° 49' 23" O
Curitiba (CTB)	PR	25° 29' 43,6" S	49° 19' 52,35" O
Florianópolis (FLN)	SC	27° 36' 6,1" S	48° 31' 4,2" O
Joinville (JOI)	SC	26° 15' 09" S	48° 51' 28" O
Natal (NAT)	RN	05° 50' 12" S	35° 12' 23" O
Sombrio (SBR)	SC	29° 05' 44" S	49° 48' 48" O

## Resultados

Para a coleta dos dados do INPE, o método de extração consistiu em obter a irradiação solar das 12 localidades do SONDA (rede de coleta de dados que conta com estações de medição distribuídas por todo o território brasileiro), que monitora de 1 em 1 minuto 24 horas por dia, 365 dias por semana dos anos de 2014 e 2015, por disporem de ter mais dados e cidades nesses períodos.

Na figura 2, é possível observar pelo arquivo *shapefile* cedido pelo INPE [18], a posição das 12 localidades de medição que estão sendo o objeto de estudo deste trabalho. E, além da irradiação solar, foi possível obter com o apoio da ANEEL [19], um panorama das usinas fotovoltaicas (círculos azuis) já existentes e das linhas de transmissão (linhas azuis), o que trouxe conforto para o projeto, pois existem linhas de transmissão em todas as regiões e municípios escolhidos, bem como usinas próximas facilitando o conceito de GD que é principal deste projeto.

Com base nos estudos realizados, foi possível observar que de acordo com os meses do ano e as estações do ano, a irradiação solar muda em função de diversos fatores e de ano para ano. Com isso, foram inseridas as imagens apresentadas na figura 3, composta por uma irradiação solar difusa [17] em função das estações do ano de 2009, para que se pudesse concluir que apenas na primavera e no verão, existe uma influência maior na escolha das 3 localidades no viés da sustentabilidade). Diante das figuras obtidas por meio da metodologia de coleta de

dados apresentadas anteriormente e com o uso da ferramenta QGIS, não se pode inserir na matriz um peso elevado para a irradiação solar, visto que ele é variável ao longo dos anos e das estações, portanto seu peso permanecerá de 1,5 em relação ao maior peso (densidade demográfica [20]) estabelecido em 3.

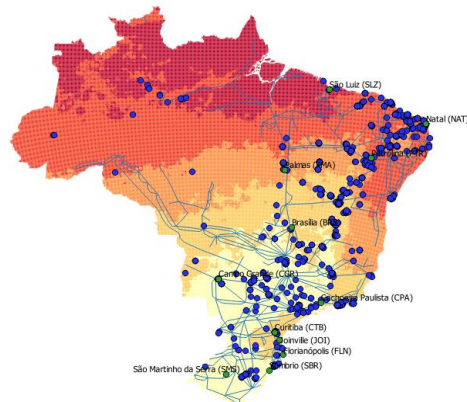


Figura 2. Linhas de transmissão e usinas fotovoltaicas concentradas ao longo das localidades de medição do SONDA.

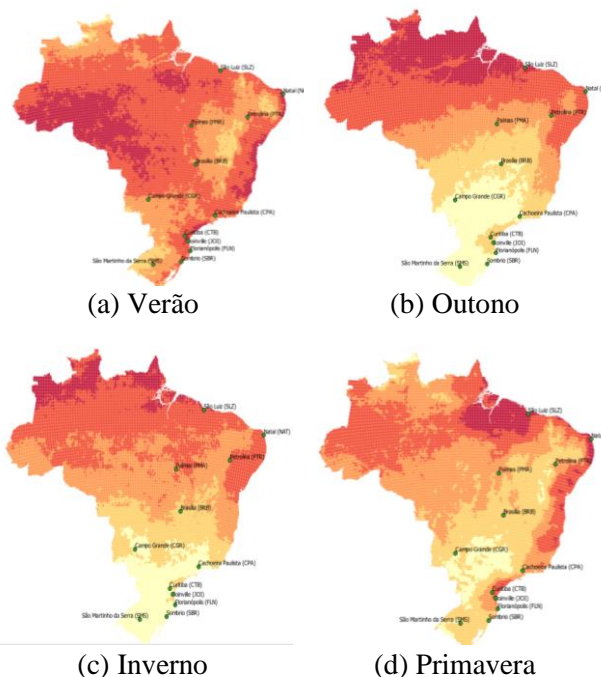


Figura 3. Panorama da irradiação solar nas regiões do Brasil em função das estações do ano.

Com os valores normalizados e inseridos com pesos das dimensões, obteve-se as 3 cidades (conforme Tabela 4), que possuem melhores condições para a implementação de GD fotovoltaica.

É importante ressaltar também, que a figura 4 foi obtida através da análise dos dados inseridos no QGIS, possibilitando evidenciar os níveis de irradiação solar caracterizados nas estações de verão e primavera, e apontando que o presente trabalho não considerou essa dimensão política- econômica como

a de maior peso dentre as outras dimensões, por apresentar valores diferentes a cada período do ano.

**Tabela 4** – Normalização do Índice e dos 3 Indicadores para as 3 localidades.

Município (UF)	Dimensão Política-Econômica		Social	Ambiental	Total	Locais
	Irradiação Solar	PIB	IDH	Densidade Demográfica		
Cachoeira Paulista (SP)	0,795	1,834	1,765	2,937	7,331	1
Petrolina (PE)	0,917	1,828	1,515	2,961	7,221	2
São Martinho da Serra (RS)	0,736	1,464	1,875	2,997	7,072	3

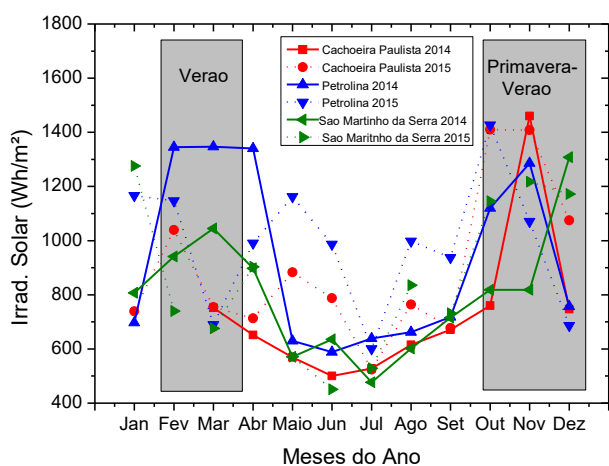


Figura 4. Irradiação solar versus meses do ano para 2014 e 2015 das 3 localidades obtidas.

## Conclusões

O presente trabalho apresentou a abordagem sistêmica da sustentabilidade, utilizando um índice e três indicadores para a escolha dos 3 melhores locais para implementação de geração distribuída fotovoltaica. A aplicação do software foi importante para a verificação nas regiões, do aproveitamento da irradiação solar, por apresentar variações ao longo dos meses, anos e estações. Além disso, a densidade demográfica e o IDH, acabaram causando maior impacto na definição das 3 regiões para o desenvolvimento e beneficiamento da GD fotovoltaica. Dessa forma, o estudo classificou 1 cidade no Sudeste, 1 no Nordeste e 1 no Sul do Brasil, utilizando o geoprocessamento pelo software QGIS, para o estudo da irradiação solar no país e o uso de

dados do IBGE. Portanto, foram estabelecidas importantes relações para que essa metodologia possa ser utilizada por tomadores de decisão e que possam definir junto às políticas públicas no Brasil, quais as melhores regiões para o autodesenvolvimento social.

## Referências

- [1] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: PRODIST. Módulo 1 – Introdução. Revisão 6. Data de Vigência: 15 abr. 2015(a).
- [2] GONÇALVES, L. F. Contribuição Para o Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.
- [3] ROMAGNOLI, H C. Identificação de Barreiras à Geração Distribuída no Marco Regulatório Atual do Setor Elétrico Brasileiro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
- [4] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Normativa n. 687, de 25 de novembro de 2015.
- [5] CARDOSO, G. S.; LEITE, P. T.; ROMERO, J. F. A. Indicadores de Sustentabilidade para Empreendimentos de Geração Distribuída. In: 9º Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2011.
- [6] CARDOSO, G. S. et. al. Location of 106 Distributed Generation by the Perspective of Sustainable Development. In: 10º Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica. Viña del Mar, 2013(a).
- [7] CARDOSO, G. S.; LEITE, P. T.; ROMERO, J. F. A.; ZAMBON, K. L. Localização de Geradores Eólicos sob a Ótica do Desenvolvimento Sustentável. In: XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Brasília, 2013(b).
- [8] JANUZZI, G. M; VARELLA, F. K. O. M.; GOMES, R. D. M. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação. International Energy Initiative. Unicamp, 2009.
- [9] SICHE, R. et. al. A. Índices versus Indicadores: Precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. Ambiente & Sociedade, v. 10, n. 2, p. 137-148, 2007.
- [10] ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL. Banco de Dados Solarimétricos. Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.
- [11] ALVES, J. E. D. Densidade demográfica e déficit ambiental, 2014.
- [12] CARDOSO, G. S. Avaliação de locais com potencial para implantação de geração distribuída sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável. Tese de Doutorado. Universidade Federal do ABC. Santo André, 2015.
- [13] PACHECO, J. F.; CONTRERAS, E. Manual metodológico de evaluación para programas y proyectos. CEPAL – Serie Manuales N. 58. Santiago de Chile, jul. 2008.
- [14] SILVA, A. N. R.; RAMOS, R.A. R.; SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S.; MENDES, J. F. G. SIG – Uma Plataforma para Introdução de Técnicas Emergentes no Planejamento Urbano, Regional e de Transportes. 1. Ed. São Carlos: EdUFSCar, 2008. 227p.
- [15] ZAMBON, K. L. Localização de Usinas Termoelétricas Utilizando Sistema de Informação Geográfica e Métodos de Decisão Multicritério. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.
- [16] LESLIE, I. S. C.; CAMPOS, S.; ZIMBACK, C. R. L.; KAISER, I. M. Sistema de Informação Geográfica na Formulação de Indicadores Ambientais para Sustentabilidade dos Recursos Hídricos. Irriga, Botucatu, v. 19, n.4, p. 655-674, 2014.
- [17] INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Sonda- Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. 2016. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/index.html>. Acesso em 11 jul. 2017.
- [18] INPE .Atlas Solar. 2009. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas\_solar.html>. Acesso em 12 ago. 2017.
- [19] ANEEL. SIGEL- Sistemas de Informações Geográficas do Setor Elétrico. Mapas Básicos e Downloads. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/Down/>. Acesso em 20 ago. 2017.
- [20] IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades@. 2017. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=>. Acesso em 19 ago. 2017.