

Artigo

Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará

Marcos Antônio Tavares Lira¹ , Marina Larisse da Silva Melo², Larissa Mendes Rodrigues²,
Tatiana Ribeiro Militão de Souza²

¹*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI, Brasil.*

²*Mestrado em Climatologia e Aplicações nos Países da CPLP, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

Recebido em: 30 de Maio de 2019 - Aceito em: 18 de Junho de 2019

Resumo

A questão energética tem um significado relevante no contexto da busca do desenvolvimento sustentável, sendo condição essencial para encontrar caminhos alternativos para substituir o uso de combustíveis fósseis. O estado do Ceará possui potencial para o uso de energias renováveis, especialmente a eólica e solar. Este artigo tem como objetivo, analisar a contribuição da geração distribuída dos sistemas fotovoltaicos, conectados à rede elétrica, que proporcionam a redução das emissões de CO₂ no estado do Ceará. Foram utilizadas informações de potência instalada da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e estimados os dados de energia gerada e as emissões de dióxido de carbono evitadas, a partir do uso de Geração Distribuída (GD) por fonte solar fotovoltaica. Esta pesquisa possibilitou o conhecimento da GD a partir de fonte solar fotovoltaica no Ceará, gerando alternativas para subsidiar as tomadas de decisões de incentivos, através de planos e programas governamentais, para a implantação de sistemas fotovoltaicos de micro e minigeração de energia, que contribuem para a redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera.

Palavras-chave: energias renováveis, geração distribuída, sistemas fotovoltaicos.

Contribution of Photovoltaic Systems Connected to the Electrical Network for Reducing CO₂ in the State of Ceará

Abstract

The energy issue has significant meaning in the context of the pursuit of sustainable development, being an essential condition to find alternative ways to replace the use of fossil fuels. The state of Ceará has potential for the use of renewable energy, especially wind and solar. The objective of this paper is to analyze the contribution of the distributed generation of photovoltaic systems, connected to the grid, which provide the reduction of CO₂ emissions in the state of Ceará. Was used installed power information by National Electric Energy Agency (NEEA) and the data of generated energy and the carbon dioxide emissions avoided were estimated from the use of Distributed Generation (DG) by solar photovoltaic source. This research made possible the knowledge of DG from solar photovoltaic source in the Ceará, generating alternatives to subsidize the decision making of incentives, through governmental plans and programs, for the implantation of photovoltaic systems of micro and mini-generation of energy, which contribute to the reduction of emissions of greenhouse gases (GG) in the atmosphere.

Keywords: renewable energies, distributed generation, photovoltaic systems.

1. Introdução

De acordo com Ferreira *et al.* (2015) o aumento da demanda e consumo de energia resultante do progresso

tecnológico e do avanço no desenvolvimento humano é visto como um dos fatores mais importantes na aceleração das mudanças climáticas observadas e descritas pela

comunidade científica. A partir das iniciativas oriundas da preocupação com as mudanças climáticas, além da crise como petróleo, verificam-se as medidas de incentivo ao uso de energias renováveis, seja através do vento, sol, maré e/ou biomassa, dessa forma essas medidas representam um cenário de mudanças rumo à necessidade do desenvolvimento sustentável.

O Brasil conta com um grande potencial de radiação solar. A utilização dessa fonte de energia é viável em praticamente todo o território. O Ceará é um dos estados brasileiros que tem apostado no desenvolvimento das energias renováveis, em especial a solar fotovoltaica na forma de geração distribuída (GD). Este processo iniciou-se logo após a publicação da Resolução Normativa n° 482/12, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que foi atualizada pela nova Resolução Normativa n° 687/15, que estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e os sistemas de compensação de energia.

A aplicação da tecnologia de geração distribuída, especialmente a solar fotovoltaica é tida por muitos como uma das soluções para a geração de energia elétrica sustentável, através de uma fonte inesgotável e a carbono neutro (não poluente na geração), proporcionando benefícios ambientais e eficiência energética na matriz de energia brasileira (Marinoski *et al.*, 2004). O estado do Ceará possui características peculiares para a implantação de novos projetos de energia elétrica a partir de fontes renováveis, e assim, destacar-se na contribuição para a expansão da matriz elétrica brasileira, localiza-se no nordeste brasileiro, representando 1,74% da extensão total da área do Brasil e tem a quarta maior extensão territorial da região, bem como, radiação solar incidente e fortes ventos em ótimas condições o ano todo.

A escassez de recursos hídricos no Ceará chama a atenção para a necessidade de diversificação da matriz elétrica para garantir a segurança de continuidade do suprimento energético, de forma sustentável e que reduza os impactos ambientais, pois até o momento a principal fonte de energia é proveniente de usinas termelétricas, que causam impactos ambientais como o agravamento do efeito estufa, além de impactos para a saúde devido à poluição do ar. A GD traz inúmeros benefícios em relação a geração centralizada que é constituída por centrais de produção de energia elétrica, que no Brasil, majoritariamente, são usinas hidrelétricas ou termoelétricas com grandes capacidades instaladas.

O uso da energia solar fotovoltaica possui a vantagem de não emitir GEE, no processo de geração e, conseqüentemente, as perdas de energia elétrica também são reduzidas, possibilitando também a redução da participação das usinas térmicas, tornando-se uma alternativa de tecnologia no Estado, que pode contribuir para a diversificação da matriz elétrica, buscando-se então um maior estímulo das políticas públicas cearenses em aumentar a

capacidade instalada no Ceará numa perspectiva também de redução das emissões de CO₂. O aumento do consumo de energia elétrica cresce proporcionalmente ao aumento populacional e com o avanço tecnológico, essa demanda energética é fortemente marcada pelo uso de recursos fósseis, os quais contribuem significativamente para a emissão de GEE. O uso das fontes fósseis para produção de energia tem como consequência produção de CO₂, o qual contribui para o aquecimento global e retém oxigênio da atmosfera o que conseqüentemente irá prejudicar a disponibilidade de O₂ para as próximas gerações.

Se a população continuar consumindo energia como faz atualmente, em um século, vai ocorrer dificuldades de explorar tais recursos, e que as conseqüências já são e serão ainda mais prejudiciais ao meio ambiente e à saúde dos indivíduos desta e das próximas gerações. No entanto, a Agência Internacional de Energia faz uma análise mais técnica, mostrando que as reservas produtoras de petróleo atualmente sendo exploradas estarão cerca de 60% menos produtivas em 2035 em relação a 2000 (IEA, 2012).

A energia elétrica vinda de fontes renováveis como a biomassa, a hídrica e a eólica já é mais barata que a vinda de combustíveis fósseis em alguns lugares do mundo, dependendo do tamanho (em MW) e localização do projeto. A energia geotérmica e a solar fotovoltaica também apresentam custos comparáveis e são fontes alternativas e duradouras de geração de energia, pois estas são favoráveis ao meio ambiente, com menor produção de poluição e riscos para a saúde humana (Nayyar *et al.*, 2014).

O início do desenvolvimento das energias renováveis no Ceará iniciou-se na década de noventa, com a instalação de 03 parques eólicos, localizados nos municípios de São Gonçalo do Amarante (litoral oeste), Aquiraz (litoral leste) e em Fortaleza (Barroso Neto, 2010). Com o advento da lei de incentivo as energias renováveis, através do PROINFA em 2002, houve um aumento significativo de geração de energia eólica na matriz energética brasileira, colocando o Ceará em destaque até o ano de 2012, liderando com 292 MW de potência instalada e colocando o estado do Rio Grande do Sul em segundo lugar. Jong *et al.* (2013) afirma que se comparando os estados do nordeste brasileiro, em particular, os estados da Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte, estes experimentaram um rápido crescimento no desenvolvimento de parques eólicos devido às condições favoráveis em termos de velocidade, frequência, distribuição e turbulência do vento.

A questão climática configura-se como um dos grandes desafios científicos e políticos deste século (Giddens, 2010), produzindo a percepção de que os limites ecossistêmicos estariam sendo ultrapassados pelas sociedades modernas ao utilizar cada vez mais intensamente recursos naturais limitados e pela contínua degradação socioambiental, que se manifesta, entre outros, nas emissões de GEE e nas vulnerabilidades sociais e ambientais (Vitousek *et al.*, 1997). A intensificação do efeito estufa é

provocada pela emissão de gases poluentes decorrentes de várias atividades humanas, ocasionando um conjunto de mudanças no clima relacionado ao aquecimento global (Czapela e Rosa, 2013), em que o aumento das atividades humanas sobre a natureza tem contribuído para intensificá-lo e a crescente elevação das emissões dos gases de efeito estufa provenientes dessas atividades tem alterado a temperatura atmosférica e oceânica, representando uma ameaça para o clima do planeta (Flannery, 2007). O crescente uso e produção da energia faz com que o homem agrida cada vez mais a natureza a fim de explorá-la e dela conseguir matéria prima para geração de energia elétrica. De fato, a forma como a energia é produzida está na origem de muitos problemas ambientais atuais (Tester *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014). Com base nisso, as fontes de energia são a principal estratégia de como mitigar os GEE, devido a importante participação do setor energético nas emissões globais (Carvalho, 2005; Sims *et al.*, 2007).

2. Metodologia

A pesquisa foi realizada no Estado do Ceará, localizado na região do Nordeste brasileiro e está dividido em 7 mesorregionais, de acordo com a Secretaria do Planejamento e Gestão (SEPLAG), sendo às mesmas: Centro-Sul Cearense, Jaguaribe, Metropolitana de Fortaleza, Noroeste Cearense, Norte Cearense, Sertões Cearenses e Sul Cearense. Estas mesorregiões foram criadas a partir de aspectos semelhantes vinculados as características geoambientais, socioeconômicas, culturais e de rede de fluxos dos municípios (IPECE, 2007). Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a região Nordeste apresenta o maior potencial solar, com valor médio do total diário da irradiação global horizontal de 5,49 kWh/m² (Pereira *et al.*, 2017). A média de radiação solar em um metro quadrado no Ceará, atinge cerca de 5,5 kWh por dia, uma das mais altas do território brasileiro (Lima, 2017; Sacramento, 2008).

Para a obtenção e análise dos dados utilizados para mapear a geração distribuída de energia elétrica a partir de fonte solar fotovoltaica no Estado do Ceará, foram coletados a partir do Banco de Geração de Informação (BIG) da ANEEL, ou seja, as unidades consumidoras com geração distribuída e as usinas regularizadas em operação, em construção e planejadas (ANEEL, 2016). Foram realizados os seguintes levantamentos: quantificação e localização dos empreendimentos de geração distribuída no estado do Ceará. Após este procedimento foram traçadas a caracterização do perfil das unidades consumidoras de geração distribuída, considerando o ano de instalação, a potência instalada, a classe e a quantidade de unidades consumidoras que recebem os créditos, conforme a Resolução nº 482/2012. Para mapear a distribuição espacial dos empreendimentos em estudo foram utilizados os dados do BIG. Os dados foram processados pelo *software* ArcGis

10.1. Desta forma, foi possível a identificação espacial dos sistemas de geração distribuída por fonte solar fotovoltaica, no Estado do Ceará.

Para estimar a energia gerada foi realizado uma caracterização do dado de potência instalada em cada unidade consumidora (residência) de geração distribuída por fonte solar no Estado do Ceará obtido pela ANEEL, para posterior cálculo referente à estimativa de energia gerada num período de 2013 à 2017. Este cálculo mostra, de forma aproximada, a capacidade da edificação de manter-se autônoma, apenas fazendo uso energia solar, ou seja, independente da energia da rede elétrica pública (Marinoski *et al.*, 2004). No cálculo da estimativa de geração de energia serão adotadas as metodologias utilizadas por Marinoski *et al.* (2004) e Masutti *et al.* (2016), a partir da Eq. (1):

$$E = Pot * N * Gpoa * R \quad (1)$$

em que E = consumo médio durante o ano (kWh/ano); Pot = potência instalada (kW); N = número de dias (anual/mensal); $Gpoa$ = média anual de radiação solar do estado do Ceará (kWh/m²/dia); R = rendimento do sistema (%).

Essa equação foi utilizada para estimar os valores de consumo mensal e anual, respectivamente, de energia gerada por sistema solar fotovoltaico nas 7 mesorregiões do Ceará, utilizando-se rendimentos do sistema de 80% e as médias de radiação solar foram fornecidas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). O cálculo para quantificação das emissões CO₂ bem como os demais gases que compõem os gases do efeito estufa (GEE), foram previstas nos projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que é parte integrante do Protocolo de Quioto (UNFCC, 2016).

O MDL estimula a substituição de energia de origem fóssil por outra de energia renovável, a racionalização do uso de energia, serviços urbanos e outras atividades, devendo promover o desenvolvimento sustentável e as reduções de emissões, que incluem investimento em projetos de mitigação de mudança climática em países em desenvolvimento, transferência ou difusão de tecnologia nos países anfitriões, além de melhoria no sustento das comunidades através da criação de emprego ou aumento da atividade econômica (UNFCC, 2016). Neste trabalho, uma das categorias dos projetos de MDL utilizado foi a energia solar fotovoltaica, onde foi possível calcular a quantidade de CO₂ evitadas, tal procedimento foi baseado pela avaliação dos projetos de MDL e pela Comissão Interministerial de Mudanças Globais de Clima (CIMGC), pertencente ao Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). A partir do cálculo da emissão evitada foi verificado segundo as metodologias adaptadas por Buiatti *et al.* (2016), Sanquetta (2017), Campos (2015), descritas na Eq. (2).

$$ECO_2 = E * Fe \tag{2}$$

em que ECO_2 = emissões anuais de dióxido de carbono evitadas (tCO_2); E = energia gerada durante o ano (GWh. ano⁻¹); Fe = fator de emissão (tCO_2) da energia elétrica do Sistema Interligado Nacional - SIN.

A partir da equação mostrada acima, o fator de emissão de CO₂ foi calculado a partir dos registros de geração das usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e do Sistema Interligado Nacional (SIN), utilizando-se a metodologia usada em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), pois esse tipo de método considera a combinação do fator de emissão da margem de operação, que quantifica as emissões associadas à energia despachada no SIN, além do fator da margem de construção, que traz as emissões associadas às últimas usinas construídas (Campos, 2015).

A sistemática de cálculo dos fatores de emissão de CO₂ foi desenvolvida em cooperação entre o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e o Ministério de Minas e Energia (MME), tendo como base as diretrizes da metodologia ACM0002 (Metodologia consolidada de linha de base para a geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis) aprovada pelo Conselho Executivo do MDL, em Bonn, Alemanha (UNFCC, 2006). Este estudo tratou das emissões de CO₂ equivalente evitadas na geração fotovoltaica, correspondente ao fator de emissão da linha de base (quantos kg de CO₂ seriam emitidos caso o sistema fotovoltaico não estivesse gerando energia elétrica) que deve ser adotada uma margem combinada, considerando a seguinte equação: [Fator de emissão da linha

Tabela 1 - Valores dos fatores médios de emissões (tCO_2 /MWh) nos anos de 2013 à 2017.

Ano	Fator médio de emissão anual (tCO_2 /MWh)		
	Margem de construção	Margem de operação	Margem combinada
2013	0,2713	0,5932	0,513
2014	0,2963	0,5837	0,512
2015	0,2553	0,5597	0,482
2016	0,1581	0,6228	0,507
2017	0,0028	0,5882	0,442

de base = (0,75 x margem de operação) + (0,25 x margem de construção)] (Buiatti *et al.*, 2016). Em seguida foi feita uma média aritmética dos fatores de emissão da margem combinada, obtidos de 2013 até 2017, em que os fatores de emissão da margem de operação e margem de construção são fornecidos pelo Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, conforme a Tabela 1.

3. Resultados e Discussões

De acordo com as coordenadas coletadas a partir dos dados da ANEEL foi possível gerar o mapa (Fig. 1) de distribuição dos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída no estado do Ceará no ano de 2013 à 2017. A partir deste mapa, observou-se que o estado do Ceará possui um total de 717 unidades consumidoras de geração distribuída a partir de fonte solar fotovoltaica, entre os anos de 2013 a 2017. Tal período escolhido se deu devido aos dados fornecidos estarem disponíveis na ANEEL somente a partir do ano de 2013.

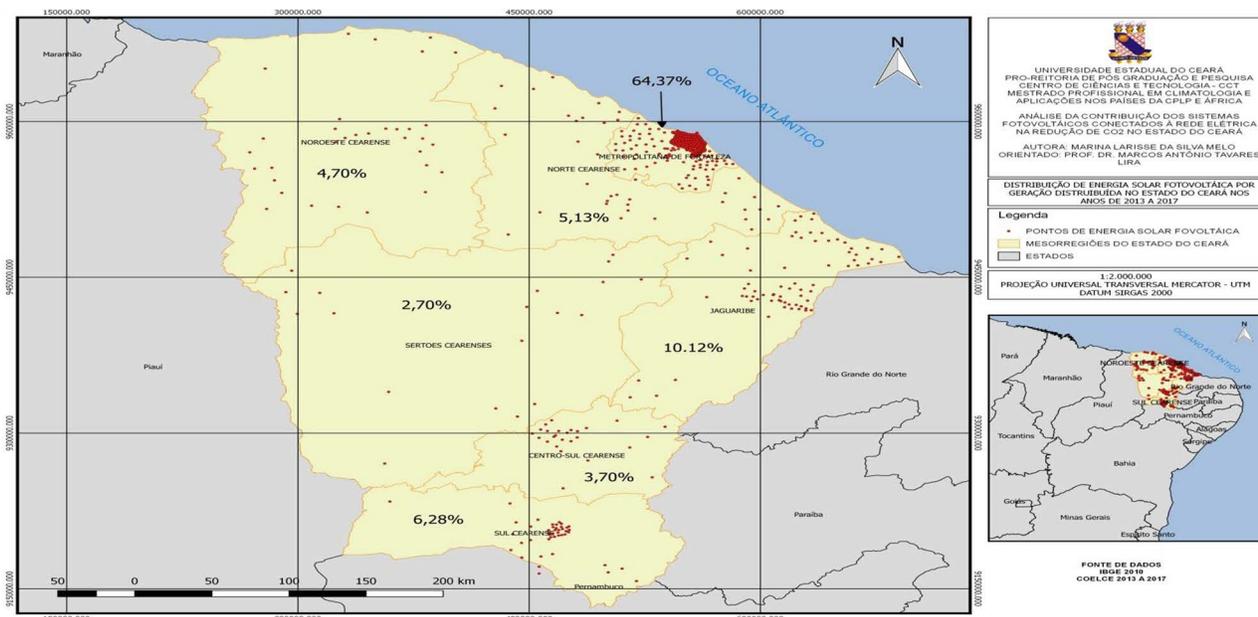


Figura 1 - Sistemas fotovoltaicos de geração distribuída no estado do Ceará (2013 à 2017).

A mesorregião de Fortaleza destaca-se por apresentar uma maior concentração de unidades consumidoras de micro e minigeração de energia solar fotovoltaica conectadas à rede, em especial nos municípios de Fortaleza (315 unidades) e Eusébio (89 unidades) totalizando 68,9%, enquanto que as outras 6 mesorregiões possuem apenas 31,1% distribuídos. Fortaleza e Eusébio possuem maiores áreas ocupadas (telhados de residências, coberturas de estacionamentos e coberturas de edifícios), bem como de um maior número de empresas atuando no setor fotovoltaico, o que justifica uma maior representatividade.

Na Fig. 2 são mostradas as quantidades de unidades consumidoras conectadas referentes aos anos de 2013 à 2017, em que percebe-se que teve um salto de 198 em 2016 para 381 em 2017, um aumento de 192,42 %.

Uma das causas desse crescimento se deve ao fato do estado do Ceará ter fomentado ações de incentivo a esta matriz energética e tais números justificam os resultados advindos das políticas públicas realizadas no Estado, em alguns benefícios para os consumidores como, isenção de impostos, financiamentos por bancos e normas que contribuem para o crescimento no mercado (Santos, 2018).

Em relação a distribuição dos sistemas fotovoltaicos no Estado em diversos setores (Fig. 3), verificou-se uma maior concentração no setor residencial (69,3%), seguido do setor comercial (23,7 %), do poder público (2,2%), industrial (2,2%) e rural (2,6%) de unidades consumidoras de energia solar fotovoltaica, respectivamente. Quando comparado a Alemanha, a maioria das unidades instaladas em operação naquele país encontram-se em residências, com potências entre 10 e 100 kW (IDEAL, 2016), faixa de potência maior que a do Brasil, devido a menores irradiações solares e a possibilidade de venda do excedente à rede, o que não é permitido no Brasil.

Esta maior representatividade no setor residencial pode ser justificado, pela maior consciência por parte dos moradores de centros urbanos em utilizar-se de fontes alternativas de energias renováveis, em especial de fontes

solares, que oferecem aos consumidores uma maior economia na conta de energia, além de estar reduzindo os impactos ambientais causados por fontes convencionais originadas por combustíveis fósseis e o possível acionamento das termelétricas que atuam na contribuição no aumento dos gases do efeito estufa, gerando impactos globais, além de provocarem impactos locais trazendo risco à população do entorno.

Torna-se necessário mais investimentos por parte dos órgãos públicos, sugerindo mais estudos e implementações acerca de novas linhas de financiamento com taxas de juros menores para pessoa física, a criação de um fundo de incentivo, a possibilidade de utilizar o FGTS para a instalação de placas, a instalação nos prédios públicos e um IPTU reduzido para os proprietários de imóveis que gerem energia, pois mesmo com o incremento nesta matriz alternativa no decorrer dos anos de 2013 à 2017 no estado do Ceará, observa-se que ainda cresce timidamente o uso de fontes solares quando comparado com outros estados do país, possuindo apenas 0,5 % desta matriz energética, portanto têm-se ainda uma enorme caminhada de oportunidades e debates para incentivar cada vez mais essa matriz, visto que os principais acordos internacionais sobre o clima incentivam as fontes alternativas de energia limpa (Alencar et al., 2018).

Na Tabela 2 são mostrados os resultados dos cálculos realizados através da Eq. (1) que estimam a energia gerada de sistemas fotovoltaicos referentes aos anos de 2013 à 2017.

De acordo com os resultados obtidos na tabela acima, pode-se constatar o crescente aumento da produção de energia gerada por esta matriz de energia solar fotovoltaica conectados à rede elétrica no Ceará, entretanto, quando se falam em aumento no decorrer dos anos de 2013 à 2017, observou-se um aumento elevado de 648,80% em 2016 e 1,02% em 2017, isto pode ser justificado devido a falta de incentivos do governo do Estado em aumentar o número de unidades consumidoras e/ou

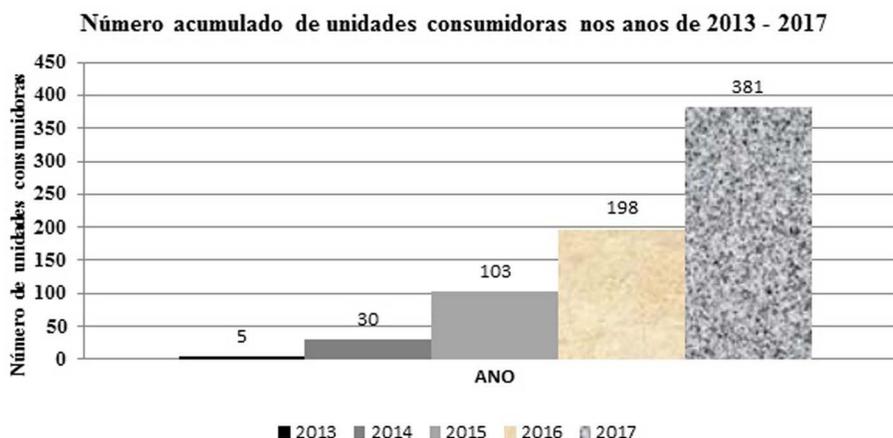


Figura 2 - Quantidade de unidades consumidoras conectadas nos anos de 2013-2017.

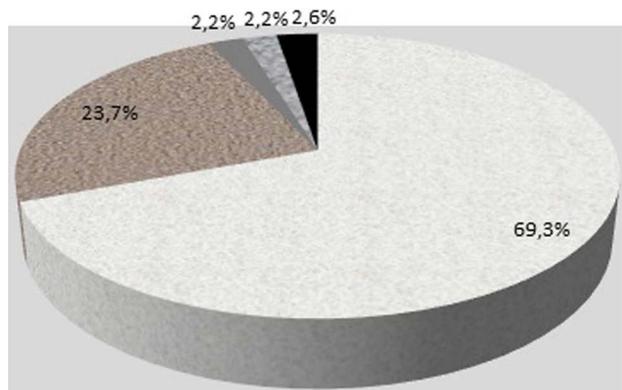


Figura 3 - Caracterização do perfil das unidades por classe.

juntamente com os elevados custo de instalação destas unidades, as limitações na disponibilidade destes sistemas no mercado e a grande dependência no desenvolvimento destas tecnologias.

Apesar destes resultados, os sistemas de geração de energia solar fotovoltaica mesmo possuindo suas limitações, permitem a instalação de unidades consumidoras em curto prazo, com a possibilidade de produzir muitos MWh em um ano, destacando-se ainda que o seu impacto ambiental é reduzido o que exclui estudos referentes a longo prazo do que seria feito com as fontes de energias oriundas de combustíveis fósseis que são altamente poluentes (Silveira *et al.*, 2013).

A reduzida necessidade de manutenção e a disponibilidades do recurso solar reforçam a necessidade de uma maior implementação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, em especial, na região Nordeste, que possui uma grande área com excelente intensidade de radiação solar em todo o ano, tornando as limitações mínimas em relação ao local de instalação considerando que a fonte de energia está no local escolhido para a instalação. Assim, a geração pode ser feita mais perto do consumidor, reduzindo custos e perdas no transporte de energia (Rendeiro, 2013).

Pesquisas recentes destacam que se 1% do território cearense fosse utilizado para instalação de painéis fotovoltaicos, a produção de energia elétrica no estado seria suficiente para atender 100% da sua demanda (Sacramento *et al.*, 2008; Menezes Neto *et al.*, 2009; Viana *et al.*, 2011; Esteves *et al.*, 2015), porém devido à falta de cooperação entre o estado e os municípios, além da falta de incentivos

fiscais atraentes para a iniciativa privada, encontra-se barreiras em alguns aspectos para o crescimento deste tipo de energia ou não são da mesma magnitude daqueles verificados em outros países desenvolvidos como citados anteriormente (Freitas *et al.*, 2017).

Apesar de em 2009, o Governo do Estado do Ceará ter criado o Fundo de Incentivo a Energia Solar e em abril de 2012, a ANEEL ter editado uma Resolução Normativa nº 482 de micro e minigeração, que permite aos consumidores um Sistema de Compensação de Energia Elétrica para fornecer subsídios e atrair investimentos para o setor de energia solar no Estado, às elevadas taxas tributárias, ou seja, créditos cobrados pelo excedente produzido que é injetado na rede são ainda existentes no Brasil tornando-se assim estas ações governamentais incipiente ou em desenvolvimento (CEARA, 2009).

Dessa forma, é necessário fazer planejamentos e investimentos no setor energético brasileiro, considerando os impactos ambientais e socioeconômicos que cada setor pode ocasionar, apresentando mudanças nas matrizes elétricas brasileiras de fontes convencionais para fontes alternativas de energias renováveis, mudando assim o quadro que se encontra hoje que apresenta um recuo na inserção destas fontes de energias limpas e isso pode ser evidenciado pelo o aumento do fator de impacto nacional para gases de efeito estufa, com 0,096 tCO₂/MWh em 2013, enquanto que em 2014 chegou a 0,1355 tCO₂/MWh (MTC, 2015), justificando assim a estagnação do crescimento de fontes solares no Estado do Ceará referente aos anos de 2016 e 2017.

Somente poderá haver maior crescimento no setor de energia fotovoltaica em países onde exista um sistema eficiente de compensação tarifária e um alto custo da eletricidade, em comparação com as taxas tributárias impostas (Dusonchet e Telaretti, 2015) reforçando assim a necessária implantação generalizada de incentivos econômicos, aliados ao aumento dos preços de “compra” da energia solar, por parte dos governos (Dinçer, 2011).

Os resultados obtidos da quantificação de emissões de CO₂ evitadas estão apresentados na Tabela 3. De acordo com os dados obtidos, verificou-se um aumento nas emissões de CO₂ evitadas e isso pode ser devido as maiores perdas energéticas associadas ao crescimento do fator médio de emissão anual do SIN que cresceu timidamente no período analisado e o crescente aumento da produção de energia oriundas de sistemas fotovoltaicos. Deve-se ressaltar também, que a atividade de geração térmica ocorre em uma conjuntura adversa e possivelmente passageira, dado o período de escassez de chuvas (Raulino *et al.*, 2013), justificando assim o aumento das emissões dos GEE no decorrer dos anos, 2013 à 2016. As termelétricas, que despacham energia na rede no País para complementar o fornecimento de hidroeletricidade à população, na maioria dos casos, empregam combustíveis fósseis intensos em emissão de GEE, embora existam algumas movidas a fontes renováveis (Sanquetta *et al.*, 2017).

Tabela 2 - Energia solar fotovoltaica gerada no Ceará (2013-2017).

Ano	Energia gerada (MWh/ano)
2013	45,57
2014	150,88
2015	1.338,56
2016	8.684,58
2017	8.851,64

Observou-se também, um aumento expressivo de 682% das emissões de CO₂ (tCO₂/ano) no período de 2015 à 2016, pelo consumo de energia gerada através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no estado do Ceará, esse aumento é reflexo da elevação absoluta da população cearense e do maior consumo per capita deste tipo de matriz energética ao longo dos anos, no entanto apesar disso, os fatores de emissão não cresceram tanto nos anos em estudo, sugerindo que a participação de fósseis na geração de energia elétrica no Ceará apresentou uma queda ou outros fatores que possam justificar as emissões de dióxido de carbono pode ser devido ao uso destes sistemas fotovoltaicos nos segmentos industrial, residencial e comercial.

Acrescenta-se ainda que nos estudos envolvendo emissões de CO₂ equivalente ao longo do ciclo de vida para a energia solar fotovoltaica, o impacto existe nas emissões indiretas, existentes nas etapas operacionais e de instalações deste tipo de fonte de energia, a China, por exemplo, país que possui elevada produção de módulos fotovoltaicos, apresenta a maior parte da sua matriz elétrica representada por combustíveis fósseis, portanto a produção chinesa possui impacto ambiental considerável associado a emissões de GEE (Campos, 2015). Entretanto, o Brasil, que possui vastas reservas de Silício, principal matéria-prima das células fotovoltaicas, além de possuir uma matriz elétrica predominantemente por fonte hídrica, para a produção de módulos fotovoltaicos possivelmente emitiria menos quantidade de CO₂ equivalente, o que resultaria em benefícios ambientais e fortalecimento da indústria nacional (Campos, 2015).

As observações dos resultados desta pesquisa demonstram o grande potencial existente para cenários de inserção de geração fotovoltaica distribuída no estado do Ceará, quando se consideram um local com fortes índices de irradiação frequentes, possibilitando assim que a geração fotovoltaica implicou em um aumento da oferta de energia, de forma a não emitir nenhum tipo de GEE durante a geração, excetuando-se na fase operacional de instalação destes sistemas, diferentemente de usinas térmicas, baseadas em combustíveis fósseis, que apresentam emissões diretas, ou seja, intrínsecas na própria geração.

Em relação ao estudo de quantificar as emissões de CO₂ equivalente, para fins de comparação, além do impacto causado pela geração de eletricidade e calor, o setor de transporte possui impacto alto, conforme o relatório

intitulado “Nossa Pegada de Carbono” (IPPUC, 2015), emite-se 2,11 kg de CO₂ equivalente para cada litro consumido de gasolina por um automóvel. Ao se aplicar este fator para a quantidade de automóveis no estado do Ceará, quantia essa estimada em 1,925 milhões de veículos (O POVO, 2017), e considerando que a totalidade seja movida a gasolina, para simplificação dos cálculos, obtém-se um fator de emissão de 4.061,75 toneladas de CO₂ equivalente por litro de gasolina consumido. As projeções de geração de energia elétrica anual mostram que a energia solar fotovoltaica é uma das estratégias para redução de emissões de CO₂.

Portanto, num cenário atual de busca por redução de emissões, tal como proposto na RIO+20, de reduzir em 1,3 bilhões de toneladas as emissões até o ano de 2030, o que significa 76,5 milhões de toneladas de GEEs ao ano que devem ser evitadas, considerando o ano de 2013 até 2030, obviamente que diversas estratégias devem ser tomadas, entre elas a utilização da energia solar fotovoltaica, pois sabe-se que como o problema do aquecimento global é um problema sistêmico, que pode estar intrinsecamente ligado às atividades antropogênicas que levam a emissões de GEEs (Campos, 2015).

Dessa forma, fica evidente que a solução adotada deve ser sistêmica, não se restringindo apenas na utilização de energias renováveis, como é o caso da energia solar fotovoltaica, mas utilizando tecnologias menos impactantes, além de soluções de eficiência energética inerentes ao seu processo produtivo para evitar desperdício de energia e ainda o comprometimento das metas firmadas em acordos internacionais, através de conferências entre as nações, como foi o caso da RIO+20 operando em conjunto para surtir o efeito necessário perante compromisso firmado entre todas as nações para a mitigação dos impactos ambientais.

4. Conclusão

A contribuição dos sistemas fotovoltaicos existentes do estado do Ceará, considerando a localização e a distribuição, além do perfil do consumidor de geração distribuída, incluindo classe, modalidade, dentre outros, possibilitou fazer uma análise através da compilação de dados obtidos pela ANEEL e MTCI para a quantificação e estimativa de energia gerada no período de 2013 à 2017.

Tabela 3 - Emissões de CO₂ evitadas em sistemas fotovoltaicos no Ceará (2013-2017).

Ano	Fator médio de emissão anual (tCO ₂ /MWh)	Energia gerada (Mwh/ano)	Emissões (tCO ₂ /ano)
2013	0,513	45,575	23,38
2014	0,512	150,878	77,25
2015	0,482	1.338,56	645,18
2016	0,507	8.683,58	4.402,57
2017	0,442	8.851,64	3.912,42

Neste trabalho, verificou-se também que foi possível alcançar o objetivo proposto, levando em consideração, a incorporação dos aspectos ambientais, nos quais a contribuição dos sistemas fotovoltaicos para a redução das emissões de CO₂ no estado do Ceará através do uso de cálculos de quantificação de emissões evitadas de CO₂ poderão servir de base para outros estudos e ocasionará um aumento significativo do número de instalações para poder quantificar os benefícios para o sistema elétrico, tais como, a ampliação da capacidade máxima da rede elétrica, através da redução do pico de demanda do sistema, além da contribuição na mitigação dos impactos ambientais.

A energia solar fotovoltaica por geração distribuída no estado do Ceará, mostra a relevância no planejamento estratégico do setor energético cearense para os próximos anos, como ampliar medidas que estimulem o desenvolvimento da geração distribuída além do que se tem atualmente que é apenas a isenção do ICMS, PIS, COFINS e processos simplificados de licenciamento ambiental. Como é o caso, por exemplo, no estado de Goiás, em que representou um firmamento em reduzir as emissões de gases do efeito estufa em pelo menos 37% até 2025 e 43% até 2030 (Decreto nº 8.892/2017) e também possui o programa IPTU Verde no município de Goiânia (Lei complementar nº 235/2012) que fomenta as ações na forma de descontos no IPTU variando de 2 a 3%.

Outra medida a ser feita no estado do Ceará para despertar a população, o governo, bem como os investidores e incentivar a ampliação das unidades consumidoras no Estado seria seguir o modelo que é feito em Palmas/Tocantins através do programa Palmas Solar (Lei complementar nº 327/2015) em conceder desconto de até 80% no IPTU, ISSQN e ITBI para as edificações que tiverem instalado um sistema de aproveitamento de energia solar. Ademais, Tocantins também conta com a Política Estadual de Incentivo a Geração e ao Uso da Energia Solar - Pró-Solar, através da instalação de indústrias produtoras de equipamentos de geração de energia solar.

Portanto através destas medidas realizadas nesses estados, faz com que o estado do Ceará possam utilizá-las como referências e subsidiar tomadas de decisões através de planos e programas que possam gerar uma maior implantação de sistemas fotovoltaicos de micro e mini geração por fontes solares. Proporcionando o crescimento do mercado de geração distribuída com ações que aprimorem as normas técnicas, ampliação das linhas específicas de financiamento para a população e fomento à capacitação da mão de obra especializada na instalação destes sistemas.

Assim espera-se que este estudo venha a gerar alternativas que possam diversificar a matriz energética brasileira, em especial do estado do Ceará por fonte solar fotovoltaica, devido as características geográficas que possibilitam o incremento desta fonte de energia renovável e inesgotável, através do seu uso para a redução dos

impactos ambientais, na busca então do controle climático.

Referências

- ALENCAR, M.P.; DE ALMEIDA NETO, J.L.; MARANHÃO, T.L.G.; TAVARES, C.V.C.C. Políticas Públicas para micro e minigeração de energia solar no estado do Ceará: um estudo levando-se em consideração o contexto nacional e municípios no semiárido cearense. Id on Line **Revista de Psicologia**, v. 12, n. 39, p. 192-223, 2018.
- BARROSO NETO, H. **Avaliação do processo de implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), no Estado do Ceará: a utilização da fonte eólica**. Dissertação de Mestrado em Avaliação de Políticas Públicas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010, 186 p.
- BUIATTI, G.M.; ANDRADE, R.L.; RYMER, J.; AMARAL, P. Metodologia para estimativa de redução de emissões de CO₂ aplicada a sistemas de microgeração fotovoltaica. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Belo Horizonte. Carvalho, r. d. (2016).
- CAMPOS, H.M.B. **Geração distribuída de energia solar fotovoltaica na matriz elétrica de Curitiba e região: um estudo de caso**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- CARVALHO, P.C.M. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2003, 146 p.
- SILVA, N.F.; ROSA, L.P.; ARAÚJO, M.R. The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, n. 3, p. 289-309, 2005.
- DINÇER, F. The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading country. **Solar Energy**, v. 15, n. 1, p. 713-720. 2011.
- DUSONCHET, L.; TELARETTI, E.; Comparative economic analysis of support policies for solar PV in the most representative EU countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, n. 1, p. 986-998, 2015.
- FERREIRA, P.G.C.; OLIVEIRA, C.F.L.; SOUZA, R.C. The stochastic effects on the Brazilian Electrical Sector. **Energy Economics**, v. 49, n. 1, p. 328-335, 2015.
- FLANNERY, T. **Os senhores do clima: como o homem está alterando as condições climáticas e o que isso significa para o futuro do planeta**. São Paulo: Record, 2007.
- FREITAS, L.S.; SOUSA, N.A.; PINHEIRO, A.N.; DE OLIVEIRA, M.L.M. Viabilidade de um sistema fotovoltaico ligado à rede em instituição pública: estudo de caso usando retscreen1 feasibility of an on-grid photovoltaic system: case study using retscreen1. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 4, p. 763-786, 2017.
- GIDDENS, A. **A política da mudança climática**. Rio de Janeiro: Zahar, 2010.
- IDEAL - Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina. **O mercado brasileiro de energia fotovoltaica**. Florianópolis: IDEAL, p. 76, 2016.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, **Key World Statistics**. Paris: IEA, 2012.
- JONG, P.; SANCHÉZ; A.S.; ESQUERRE, K.; KALID, R.A.; TORRES, E.A. Solar and wind energy production in

- relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, n. 1, p. 526-535, 2013.
- LIMA, C.C.; PINTO, J.B. M. As audiências públicas e o diálogo dos saberes: uma abordagem sobre a instalação de hidrelétricas e seus impactos ambientais. **Revista Brasileira de Direito**, v. 13, n. 2, p. 137-154, 2017.
- MARINOSKI, L.D.; SALAMONI, I.T.; RUTHER, R. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. In: **Anais 1º Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, E 10º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, São Paulo: ENTAC, 2004.
- MASUTTI, M.C.; TABARELLI, G.; SANTOS, Í.P. Potencial de implantação de um sistema fotovoltaico gerador de energia em coberturas de estacionamentos. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 4, n. 2, p. 15-23, 2016.
- NAYYAR, Z.A.; ZAIGHAM, N.A.; QADEER, A. Assessment of present conventional and non-conventional energy scenario of Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, n. 1, p. 543-553, 2014.
- RENDEIRO, G. Martifer solar: case study of Cabo Verde. In: **Portugal exportador 2011**. Lisboa: IPDAL, 2013.
- SACRAMENTO, E.M.; SALES, A.D.; LIMA, L.C.; VERIZOGLU, T.N. A solar-wind hydrogen energy system for the Ceará state -Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 5304-5311, 2008.
- SACRAMENTO, E.M.A. solar-wind hydrogen energy system for the Ceará state, Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 20, p. 5304-5311, 2008.
- SANQUETTA, C.R.; MAAS, G.C.B.; SANQUETTA, M.N.I.; SANQUETTA, F.T.I.; DALLA CORTE, A.P. 2017. Emissões de dióxido de carbono associadas ao consumo de energia elétrica no Paraná no período 2010-2014. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2015.
- SANTOS, E.P.; CONTI, T. Mercado profissional para a área de energia e eficiência energética no Brasil. **Revista Internacional de Ciências**, v. 7, n. 2, p. 142-178, 2018.
- SILVEIRA, J.L.; TUNA, C.E.; LAMAS, W. The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, n. 1, p. 133-141, 2013.
- TESTER, J.W.; DRAKE, E.M.; DRISCOLL, M.J.; GOLAY, M. W.; PETERS, W.A. **Sustainable energy: choosing among options**. Cambridge, MA: MIT Press, 2005, 870 pp.
- VITOUSEK, P.M.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MILLER, J.M. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, v. 277, n. 5325, p. 494-499, 1997.
- ZHANG, L.; ZHOU, D.Q.; ZHOU, P.; CHEN, Q. Modelling policy decision of sustainable energy strategies for Nanjing city: A fuzzy integral approach. **Renewable Energy**, v. 62, p. 197-203, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 482**. Brasília: ANEEL, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 687**. Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG: Banco de Informações de Geração**. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/big-banco-de-informacoes-de-geracao/655808?inheritRedirect=false. Acesso em: 16 mar. 2018.
- CZAPELA, F.F.; ROSA, K.K. Energia e mudanças climáticas globais: percepções e ações do cotidiano. **Geoambiente On-line**, n. 21, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i21.27913>. Acesso em: 18 fev. 2018.
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Conselho Estadual de Desenvolvimento Econômico. LEI COMPLEMENTAR Nº 81**, 2009. Institui o fundo de Incentivo a Energia Solar do Estado do Ceará. Disponível em: <http://www.canadiansolar.com/solar-panels/standard.html>. Acesso em: 18 fev. 2018.
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Electricity information: Overview**. Paris: IEA, 2017. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2017.
- INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Informações georreferenciadas e especializadas para os 184 municípios cearenses**. Fortaleza: IPECE, 2007. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/11.htm>. Acesso em: 16 mar. 2018.
- MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia) (2009) <https://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/arquivos/publicacao/clima/205947.pdf>.
- MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia) (2009) http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/mecanismo_de_desenvolvimento_limpo/Mecanismo_de_Desenvolvimento_Limpo.html.
- O POVO. **Grupo Telles inaugura usina solar e planeja expansão**, 2016. Disponível em: <https://www20.opovo.com.br/app/opovo/economia/2016/10/21/noticiasjornaleconomia,3665183/grupo-telles-inaugura-usina-solar-e-planeja-expansao.shtml>. Acesso em: 03 set. 2017.
- PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A.R.; COSTA, R.S.; LIMA, F.J.L.; RÜTHER, R.; ABREU, S.L.; TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2ª Edição, São José dos Campos. Disponível em http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf. Acessado em: 28 ago. 2017.

Endereços de Internet

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.