

XI-080 – DIAGNÓSTICO DA APLICAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL COM RELAÇÃO AO PANORÂMA DOS PAÍSES EMERGENTES

Bruno de Ávila Sbampato

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFMG.

Luís Monteiro

Engenheiro de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas. Mestre em Energia (Sistemas Fotovoltaicos) pela Universidade de São Paulo - USP. Doutorando do PPGEE/UFMG.

Felipe Ribeiro Bittencourt

Engenheiro Civil pela UFMG. Mestre e doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professor convidado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMG).

Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

Engenheiro Químico pela UFMG. Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFMG. Doutor em Ciências de Engenharia pela Universidade de Karlsruhe. Professor Associado do DESA-UFMG.

Endereço: Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte – MG - CEP 31270-901 - Brasil - Tel: (31) 3409-5000 - e-mail: bas2009@ufmg.br

RESUMO

O trabalho baseia-se na importância da diminuição da dependência dos combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica. Nessa circunstância, a energia solar fotovoltaica surge como uma possível alternativa de diversificação da matriz energética elétrica. Foi comparado o cenário brasileiro de potencialidades para a implantação de usinas fotovoltaicas com outros três países emergentes: China, Índia e África do Sul. As variáveis analisadas para cada país foram os níveis de radiação solar incidente, a matriz energética, a eficiência dos módulos produzidos em cada localidade, o custo da energia gerada pela tecnologia fotovoltaica, o potencial de redução de gases do efeito estufa (GEE) devido à implantação de usinas do tipo, os impactos ambientais, sociais e econômicos e o potencial de geração de cada localidade. De posse desses dados, foi feita uma avaliação do potencial de cada país, bem como uma análise das políticas brasileiras relacionadas ao setor. Como resultados, tem-se que a África do Sul possui o recurso solar mais abundante e sua matriz energética é a mais dependente dos combustíveis fósseis e, portanto, é onde há o mais alto fator de emissão de gases do efeito estufa da rede. No entanto, é onde há o custo mais elevado para a introdução da fonte alternativa. A China possui valores intermediários para a maioria das variáveis trabalhadas, sendo a que possui a maior eficiência dos módulos produzidos localmente. A Índia possui o preço mais baixo da nova energia, porém o recurso solar é o mais limitado. O Brasil possui o menor fator de emissão devido a sua matriz energética dominada por hidroelétricas e a eficiência dos módulos nacionais é a mais baixa. Os impactos ambientais dependem, sobretudo se a usina é implantada no meio urbano ou rural. Analisando as diversas variáveis de forma conjunta, conclui-se que na Índia encontra-se o melhor cenário para aplicação de energia fotovoltaica, seguida por China, África do Sul e, por último, Brasil. Ainda assim, considerando-se as recentes políticas de incentivo às energias renováveis, a situação brasileira pode melhorar significativamente nos próximos anos. A metodologia utilizada neste trabalho pode ser estendida para a comparação de regiões e localidades dentro de cada país, e tornar-se assim um instrumento de aperfeiçoamento do planejamento energético nacional e internacional com vistas à transição otimizada para cenários de geração elétrica com baixas emissões de carbono.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Fotovoltaica, Comparação dos Países Emergentes, Gases do Efeito Estufa, Impacto Ambiental.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico dos últimos séculos foi movido à energia proveniente de combustíveis fósseis e nucleares, de elevado potencial poluidor e alto risco para as comunidades adjacentes às usinas. De acordo

com o IPCC (2014), 67,45% da energia elétrica consumida no mundo provêm de combustíveis fósseis e 12,86% de combustíveis nucleares.

O Brasil diferencia-se deste cenário, apresentando matriz energética elétrica baseada majoritariamente em hidroelétricas, que produzem 63,74% da energia gerada (ANEEL, 2014). No entanto, a vulnerabilidade climática da geração hidrelétrica foi percebida desde a crise de energia elétrica pela qual o país passou em 2001, e a partir de então o governo começou a investir em termoeletricas movidas a combustíveis fósseis, tornando a matriz brasileira menos limpa.

Nesse cenário de vulnerabilidade climática da geração hidrelétrica, surge a oportunidade de desenvolvimento e expansão de fontes alternativas de energia, como a energia solar fotovoltaica (FV). A tecnologia surge como uma possibilidade promissora de suprir uma lacuna de diversificação da matriz energética elétrica e aumentar sua participação, hoje irrisória, no suprimento energético brasileiro (ANEEL, 2014).

Para melhor entendimento das potencialidades e limitações do uso desta tecnologia, cabe comparar a situação da energia solar fotovoltaica do Brasil com outros países emergentes tais como China, África do Sul e Índia. A partir desse estudo espera-se ampliar a visão sobre o emprego da tecnologia em território nacional consciente de suas particularidades, vantagens e desvantagens com relação a outros cenários pelo mundo. A avaliação de viabilidade da nova tecnologia deve levar em conta as condições climáticas, a tecnologia disponível, o custo, os impactos ambientais, sociais e econômicos, o potencial de redução de GEE e também a matriz energética existente em cada país que será abordado.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da situação de cada país com relação à energia solar fotovoltaica se iniciou através da coleta de dados das matrizes energéticas elétricas levantadas através das respectivas agências de energia de cada país. O recurso solar foi obtido com auxílio da ferramenta da *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA, 2014). A eficiência das tecnologias disponíveis foi obtida através Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2014) com o auxílio da listagem do site *Source Guides*, exceto para a África do Sul que, por não ter nenhum fabricante listado pelo INMETRO, foram considerados dados de catálogo de uma empresa sul africanos certificado pela TÜV Rheinland (CE TÜV). O custo da energia gerada foi levantado de maneira individualizada através de publicações oficiais de cada país. No Brasil se deu através da Empresa de Pesquisa energética (EPE, 2012), na África do Sul através de uma publicação da *PV Magazine* (ALI, 2012), na Índia através da *PV Power Plants* (2013) e na China através da *Energy Information Administration* (2010). O cálculo do potencial de geração de energia elétrica fotovoltaica desses países foi determinado através do software PVsyst e as emissões de gases do efeito estufa reduzidas foram consideradas de acordo com Documentos de Desenhos de Projetos MDL (os chamados PDDs) para projetos de geração fotovoltaica registrados na UNFCCC. Por fim, estes mesmos documentos foram utilizados para se estudar os impactos ambientais, sociais e econômicos advindos das usinas solares.

A figura 1 ilustra a metodologia do trabalho:

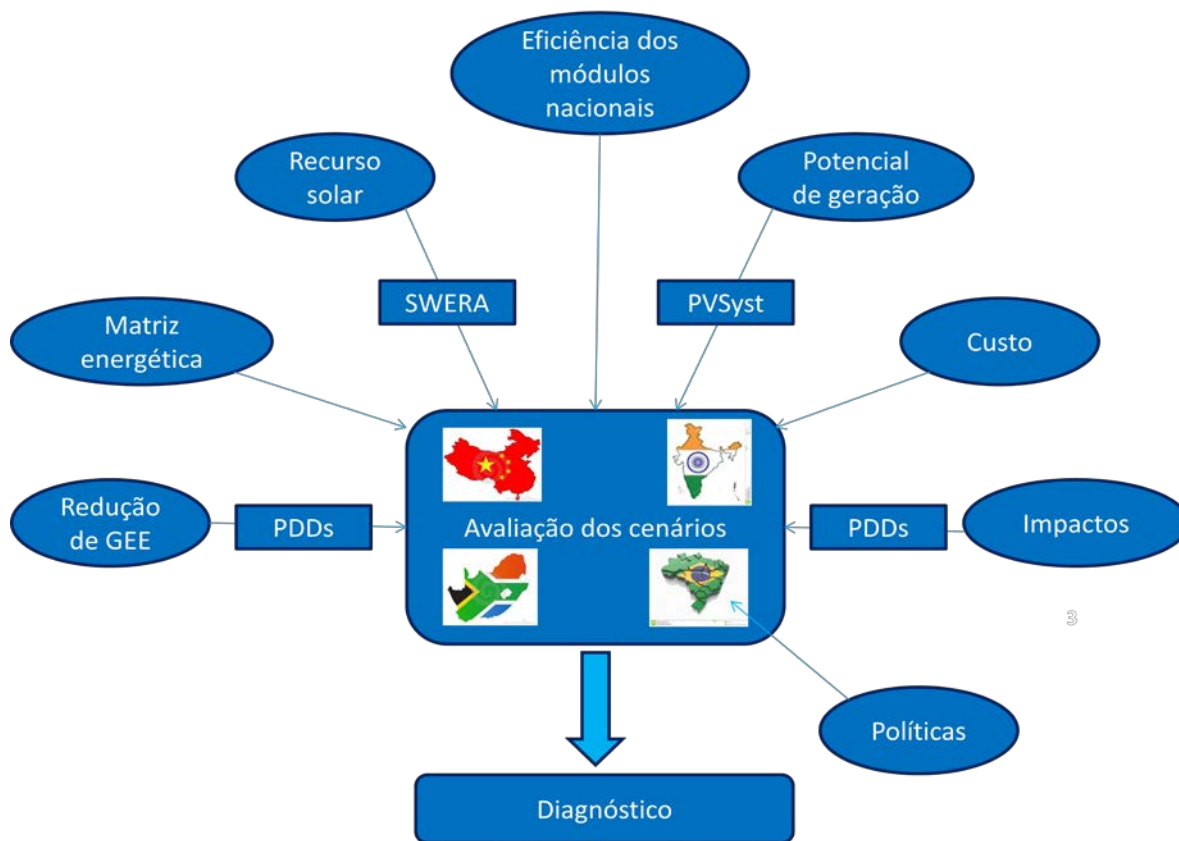


Figura 1: Desenho esquemático da metodologia utilizada no estudo.

RESULTADOS

Com relação ao recurso solar, foram criados os gráficos ilustrados nas figuras 2 e 3 a partir dos dados coletados na ferramenta do SWERA.

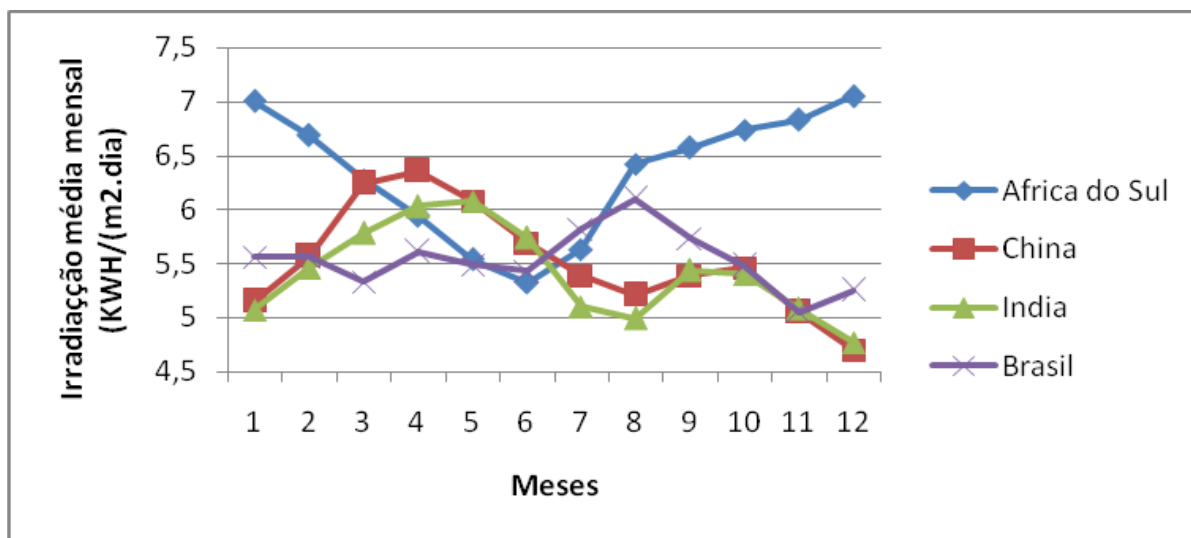


Figura 2: Irradiação média ao longo dos meses para a localidade dos quatro projetos analisados.

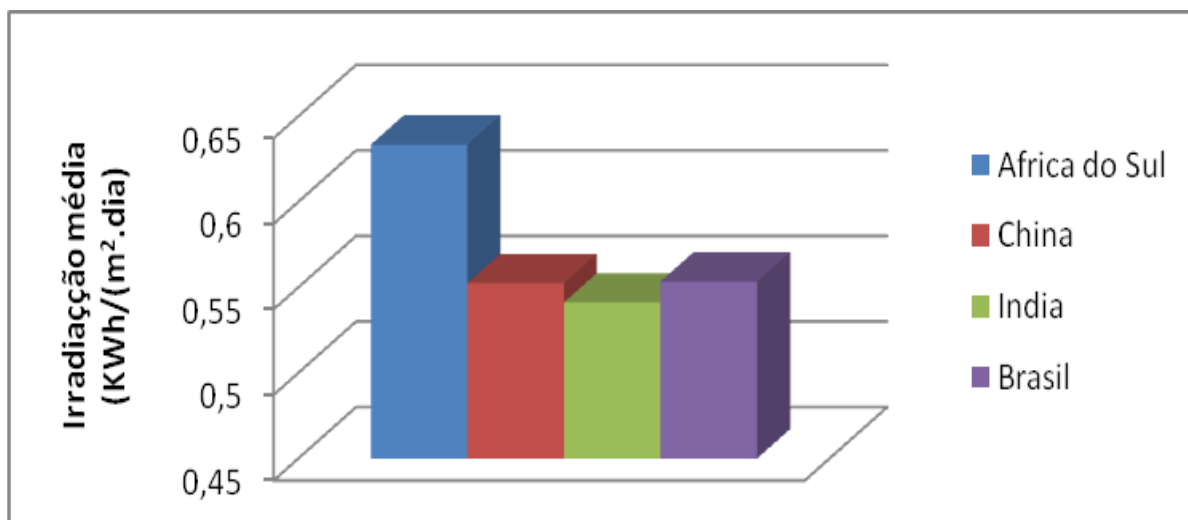


Figura 3: Irradiação média anual em cada projeto.

Conforme se vê nas figuras 2 e 3, a localidade analisada na África do Sul possui média anual em torno de 15% maior do que as demais localidades, no entanto é o país com maior variabilidade ao longo do ano. China e Índia, ambas no hemisfério norte, apresentam dados mensais semelhantes, com radiação um pouco mais intensa na primeira. O Brasil apresenta um primeiro semestre mais estável e maior variação na segunda parte do ano.

Na sequência foram utilizadas matrizes energéticas da geração elétrica para criar a Tabela 1, na qual cada fonte de energia primária foi classificada em não renovável com alta emissão de carbono, constituída pelos combustíveis fósseis; não renovável de baixo carbono, na qual se encontra exclusivamente a energia nuclear e outras energias renováveis que são as energias que se renovam numa escala temporal humanamente perceptível, exceto a solar que foi discriminada separadamente.

Tabela1: Tipos de fonte energética primária usada para geração de eletricidade em cada país.

Fonte primária	África do Sul	China	Índia	Brasil
Solar	0,09%	0,20%	0,62%	9,51E-08
Outras renováveis	5%	28%	31%	79%
Não renovável de baixo carbono	5%	1%	2%	1%
Não renovável com alta emissão de GEE	90%	71%	67%	20%

Através da observação dos dados apresentados, percebe-se que em todos os países, principalmente no Brasil, a energia solar é pouco expressiva.

No tocante aos impactos advindos da implantação de uma usina FV, observa-se através dos PDDs similaridade entre eles, apesar das usinas estarem implantadas em continentes diferentes. O fator que mais influencia é o uso e ocupação do solo prévio no local da geração da energia FV, ou seja, a implantação da mesma acontecer em uma área urbana já impactada ou menos explorada pelo homem.

Dando continuidade à comparação, foram analisados os fatores de emissão a partir dos projetos estudados através de PDDs. Através deles torna-se possível saber quantas toneladas de CO_{2e} são emitidas por MWh de energia elétrica gerada de acordo com a rede de distribuição em que a usina fotovoltaica será inserida, este parâmetro é denominado fator de emissão. Levando-se em conta ainda a energia que se pode gerar por área de coletor FV, os preços do MWh e a eficiência dos módulos produzidos localmente, foi possível a construção do gráfico apresentado na Figura 4.

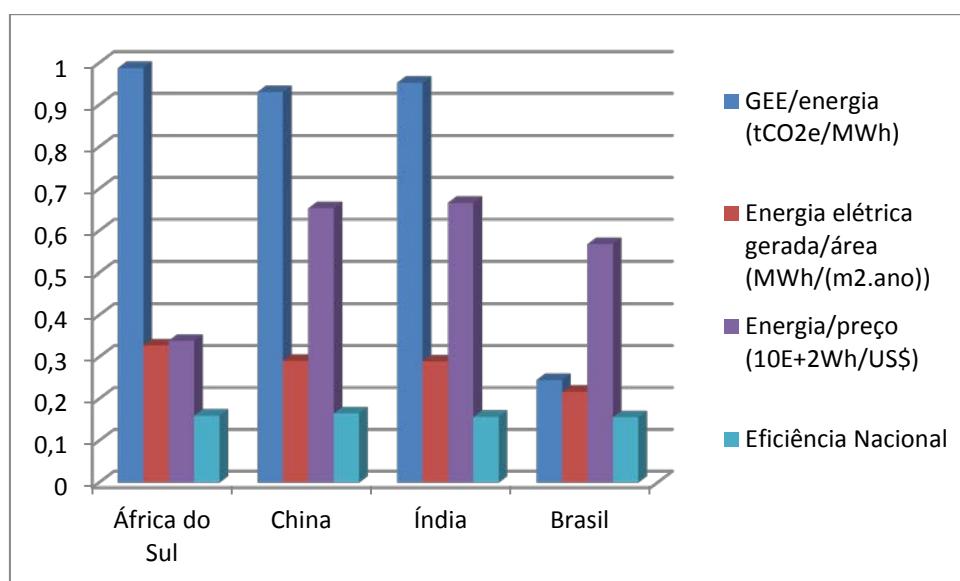


Figura 4: Índices comparados do fator de emissão da geração elétrica ($tCO_{2e} \cdot MWh^{-1}$), capacidade de geração elétrica por unidade de área de painéis FV ($MWh \cdot m^{-2} \cdot ano^{-1}$), energia FV gerada por cada unidade de investimento ($10^2 Wh \cdot US\$^{-1}$) e eficiência de conversão de energia dos painéis produzidos localmente.

O gráfico da figura 3 permite a visualização da acentuada diferença do fator de emissão brasileiro com relação aos demais, bem como uma suave inferioridade da energia gerada por área. Já o preço da energia gerada pela fonte alternativa varia bastante entre todos os países. Quanto à eficiência, há uma diferença pequena, já que o maior valor é 16,5% e o menor 15,6%, diferenciando-se por apenas 5%.

Todas as variáveis do gráfico apontam um favorecimento da implantação de uma usina fotovoltaica em localidades que tenham melhores indicadores. É fácil perceber através da Figura 3 que uma localidade com maiores índices em todas as colunas está mais apta a receber novos empreendimentos FV, no entanto essas grandezas estão em unidades diversas de tal modo que se torna interessante normalizá-las de forma que o maior valor de cada uma delas valha um valor unitário e os valores menores valham uma fração desse máximo. Assim foi gerada a tabela 2.

Tabela 2: Normalização das variáveis.

Países	GEE/energia	Energia/área	Energia/preço	Eficiência nacional
África do Sul	1	1	0,51	0,91
China	0,94	0,89	0,98	0,94
Índia	0,96	0,88	1	1
Brasil	0,25	0,66	0,85	0,88

Precedendo o cálculo de um índice final, foram atribuídos pesos de 1 até 4 para cada uma das variáveis apresentadas na tabela 2. O fator de emissão de GEE da geração elétrica recebeu peso 1, já que esta variável favorece a implantação da nova energia nos países cuja rede elétrica é menos suprida com energias renováveis, mas não se deve concluir que um país não possui um cenário propício para a utilização de energia solar fotovoltaica simplesmente por já ter uma matriz energética elétrica mais limpa. A capacidade de geração elétrica por unidade de área de painéis FV foi considerada com peso 3 por ser uma característica intrínseca da localidade, e determina a expectativa de serviços finais prestados pelas novas usinas (geração elétrica) para cada painel instalado. A energia FV gerada por cada unidade de investimento foi atribuído peso máximo 4, porque o preço da energia exerce uma grande influencia no planejamento energético de um país. Sabe-se que políticas públicas podem incentivar fontes energéticas mais caras através de leilões exclusivos ou subsídio, mas mesmo assim esses subsídios seriam tanto menores quanto mais competitiva a fonte alternativa se mostrar de antemão, para as condições locais. A eficiência de conversão de energia dos painéis produzidos localmente recebeu peso 2, pois o desenvolvimento da tecnologia nacional é uma força motriz importante na utilização da

energia fotovoltaica, no entanto, valores de eficiência mais elevados podem ser obtidos através de importação de módulos mais eficientes. Então se procedeu ao cálculo dos índices finais, apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Aplicação dos pesos e cálculo do índice final com as respectivas posições.

Países	(GEE/energia) *1	(Energia/área) *3	(Energia/preço) *4	(Eficiência nacional)*2	Total	Posição
África do Sul	1,00	3,00	2,03	1,81	7,85	3°
China	0,94	2,67	3,92	1,88	9,41	2°
Índia	0,96	2,65	4,00	2,00	9,62	1°
Brasil	0,25	1,99	3,41	1,77	7,41	4°

Observando a tabela anterior, percebe-se que a Índia possui o cenário mais favorável para a implantação de usinas FV, seguida por China, África do Sul e, por último, Brasil.

Esta aparente desvantagem do Brasil decorre do fato de ele possuir grande parte de sua geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, isso só acontece devido às hidroelétricas. As usinas desse tipo, principalmente as de grande porte, apresentam impactos ambientais e sociais de alta magnitude, como a emissão de metano devido à decomposição anaeróbia da matéria orgânica que estava presente na área inundada; alteração das características de vazão do curso d'água, grandes áreas alagadas, perda de áreas férteis, perda de biodiversidade e além da remoção de famílias.

Na produção dos módulos FV também há emissão de GEE, porém eles têm uma vida útil considerável, e essas emissões de fabricação devem ser consideradas em relação a toda a energia que o módulo irá gerar enquanto estiver em operação. De qualquer maneira, cabe ressaltar dentre suas vantagens a ausência ou menor significância dos aspectos levantados com relação às hidroelétricas e termelétricas. Em comparação com as eólicas, a PV têm menor impacto sobre a avifauna, bem como ausência de ruído durante sua operação. Cabe ainda ressaltar que os três tipos de geração de energia elétrica podem ser complementares entre si, pois ventos e irradiação solar podem ter tendências opostas em dada região, em função de condições meteorológicas: a diminuição de um pode favorecer a ocorrência do outro, e as superfícies dos reservatórios hidrelétricos podem ser usadas para instalação de painéis PV e eventualmente também eólicos.

Ainda com relação ao custo de geração, que é o principal fator de decisão, vale citar que a eólica é hoje mais barata do que a FV, mas isso se deve a sua aplicação mais disseminada e a um maior domínio da tecnologia, caminho este que começa a ser percorrido pela FV, no sentido do barateamento de sua utilização. Em 31 de outubro de 2014 houve um leilão de reserva da ANEEL que fortalece o uso da energia fotovoltaica ao passo que dos 1034 projetos cadastrados, 400 eram de energia solar (EPE, 2014).

Por último, pode-se ressaltar que a metodologia acima, de comparação dos países com base em indicadores de eficácia da nova energia, pode ser aplicada internamente dentro de cada país. Por exemplo, no Brasil, pode-se usar o método acima para comparar regiões e localidades diferentes quanto a sua aptidão para a geração fotovoltaica. Nessa regionalização, outros aspectos como, por exemplo, os requerimentos e perdas relacionadas à transmissão e distribuição da energia podem ser introduzidos, fazendo com que o planejamento energético seja otimizado para considerar todos os indicadores de custos e benefícios, e priorizar políticas de investimentos e subsídios para as novas fontes de geração elétrica.

CONCLUSÕES

Conclui-se que, de acordo com a metodologia adotada, o Brasil apresenta o cenário menos favorável dentre os locais analisados. No entanto, cabe ressaltar que os dados de capacidade de geração elétrica por unidade de área de painéis FV que são parcialmente responsáveis por esta conclusão são específicos dos projetos estudados e sua generalização para todo o território do país deve ser vista com cautela. O fator de emissão depende da rede de transmissão e distribuição à qual o projeto está conectado, que nem sempre é única para o país. Além disso, o preço da energia gerada pelas usinas FV ainda não está bem consolidado.

Ainda assim, não se pode ignorar que em parte o resultado do Brasil se deve ao fato de o país já utiliza intensamente fontes renováveis para a geração de energia elétrica, o que leva a uma menor redução de GEEs por MWh. Porém, na medida em que a geração hidrelétrica encontra seus limites por esgotarem os potenciais aproveitamentos nas diversas bacias hidrográficas, bem como em função da sua vulnerabilidade ao regime de chuvas, as demais fontes primárias tornam-se mais promissoras para suprir déficits, em especial para cenários em que a geração descentralizada seja estimulada, minimizando as perdas em sistemas de transmissão de energia elétrica.

Por último, conclui-se que a metodologia utilizada neste trabalho para comparação entre os países pode ser estendida para o planejamento energético interno em cada país, otimizando a introdução de fontes alternativas e renováveis de energia em regiões e localidades nos quais os investimentos e subsídios tenham maior eficácia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALI, HABIB. More Than Green Dreams. 2012. Disponível em: <http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/more-than-green-dreams-_100007065/86/?tx_ttnews%5BbackCat%5D=201&cHash=126233a3ec60d56643dec1b6e28d7f22#ixzz32CR7HI7I>. Acesso em: 17 de mai. 2014.
2. ANEEL. Matriz de Energia Elétrica. 2014. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacaocapacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 21 de abr. 2014.
3. COELHO, VANESSA APARECIDA DIAS. *Grid-connected electricity generation from renewable source: Sete Lagoas Solar Power Plant*. 2012. 36 p. Project Design Document, UNFCCC, Belo Horizonte.
4. COETSEE, JOHANNES. *De Aar Grid Connected 10 MW Solar Park, South Africa*. 2006. 50p. Project Design Document, UNFCCC, Cape Town.
5. EPE. EPE cadastra 1.034 projetos para Leilão de Reserva 2014. Disponível em <[http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%20\(2014\)/EPEcadastra1034projetosparaLeil%C3%A3odeReserva2014.aspx](http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%20(2014)/EPEcadastra1034projetosparaLeil%C3%A3odeReserva2014.aspx)>. Acesso em 21 de set. 2014.
6. EPE. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em: 21 de abril. 2014.
7. EIA. China. 2010. Disponível em: <<http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=CH>><http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=CH>>. Acesso em: 22 de abril. 2014.
8. IPCC. Climate Change 2014: working group III: Mitigation of Climate Change. 2014. Disponível em: <http://report.mitigation2014.org/drafts/final-draft-postplenary/ipcc_wg3_ar5_final-draft_postplenary_chapter7.pdf>. Acesso em: 24 de set. 2014.
9. LEI, XIAOYU. *CGN Damao Bailingmiao Photovoltaic Farm 20MWp Phase I Project*. 2012. 52 p. Project Design Document, UNFCCC, Beijing.
10. PV POWER PLANTS. National Markets. 2013. Disponível em: <<http://www.pv-power-plants.com/industry/national-markets/>>. Acesso em: 14 de mai. 2014.
11. SBAMPATO, FERNANDO CÉSAR SOTERO. Simulação de parâmetros operacionais em um sistema CFV utilizando resfriamento ativo, 2014. Dissertação – CEFET-MG.
12. SHAH, AMEET. *Solar power project at Jodhpur, Rajasthan*. 2006. 34 p. Project Design Document, UNFCCC, Mumbai.
13. SOLAR and wind energy resource assessment. Disponível em: <<http://maps.nrel.gov/swera>>. Acesso em: 14 Abr. 2014.