



GRUPO 2

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

ANÁLISE DO IMPACTO DA TEMPERATURA PARA O APROVEITAMENTO DO POTENCIAL SOLAR FOTVOLTAICO DO BRASIL

SIMIONI, T. (*)
COPPE | UFRJ

SCHAEFFER, R.
COPPE | UFRJ

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de avaliação das regiões do país com maiores rendimentos no aproveitamento solar fotovoltaico, através do cálculo dos potenciais reais considerando a temperatura de operação como fator determinante para a eficiência. A metodologia deste trabalho compreende uma modelagem matemática para avaliar o impacto da temperatura no aproveitamento solar fotovoltaico brasileiro com a elaboração de mapas corrigidos de energia real. Os principais resultados obtidos mostram que o impacto da temperatura de operação das células fotovoltaicas é expressivo na identificação das regiões com maiores potenciais solares reais e que a eficiência elétrica pode ser reduzida em até 15%.

PALAVRAS-CHAVE

Solar, Fotovoltaica, Eficiência, Temperatura, Metodologia

1.0 - INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das matrizes elétricas mais renováveis do mundo, fato que se deve à grande disponibilidade de recursos naturais, principalmente hídricos, responsáveis pela produção da maior parte da energia elétrica do país. Além do aproveitamento do grande recurso hídrico, recentemente o país vem ampliando a capacidade em novas fontes renováveis de energia, com destaque para as energias eólica e biomassa. Seguindo as boas perspectivas do desenvolvimento de fontes renováveis, surgem novos interesses e previsões de investimentos para o aproveitamento da energia solar, recurso que o país possui grande potencial, graças a sua ideal disposição territorial no globo, embora explorado de forma singela se comparado às outras fontes em produção (EPE, 2015).

O potencial solar brasileiro apresenta destaque ao ser comparado, através dos níveis de irradiação observados no país, com os níveis observados em países do hemisfério norte (MARTINS et al., 2007), que possuem a maior parte da capacidade instalada de energia solar no mundo atualmente (REN21, 2015). Mesmo a região Sul, que possui índices mais baixos, mas ainda assim pode ser comparada à região da Amazônia equatorial, se caracteriza com um potencial significativamente maior que a maioria dos países europeus (MARTINS et al., 2007; PEREIRA, 2006; REN21, 2015).

Apesar da capacidade instalada mundial já contar com mais de 220 GW de energia solar instalada (REN21, 2016), o Brasil possui apenas poucos MW desta fonte em operação (ANEEL, 2016; MME, 2015). No entanto, recentemente as políticas energéticas brasileiras vêm considerando positivamente esta fonte ainda pouco explorada e criando incentivos para o seu desenvolvimento (EPE, 2015).

Portanto, para aproveitar esse enorme recurso renovável, surge a importância de avaliar de forma detalhada o potencial solar brasileiro. Para isso, devem ser considerados todos os fatores e condições reais para o aproveitamento deste recurso, a fim de obter subsídios técnicos eficientes para o planejamento energético nacional. Fatores de perdas para a geração de energia solar podem ser diferentes em países desenvolvidos se comparado àqueles observados no Brasil, como é o caso da temperatura de operação e sua relação com a diminuição do rendimento das células e módulos fotovoltaicos (SKOPLAKI & PALYVOS, 2008a E 2009b; GARCÍA

& BALENZATEGUI, 2004; DU et al., 2015). Além da temperatura, outros fatores de perdas são significativos para a análise do potencial solar brasileiro, como é o caso da sujeira sobre os módulos, sombreamento, umidade, ângulo de instalação e conexões elétricas (SHARMA & CHANDEL, 2013; NDIAYE et al., 2013).

Ao longo das fases do desenvolvimento das tecnologias fotovoltaicas, a temperatura de operação das células e dos módulos representa uma questão central no processo de conversão da energia solar em energia elétrica. No entanto, apenas recentemente a relação e a influência da temperatura no aproveitamento solar estão sendo mais bem discutidas e compreendidas na comunidade científica. A relação do rendimento das células fotovoltaicas com a temperatura vem sendo estabelecida como diretamente dependente de fatores como o nível de irradiação, velocidade do vento, temperatura ambiente e parâmetros físicos característicos de cada tecnologia (SKOPLAKI & PALYVOS 2008a E 2009b; GARCÍA & BALENZATEGUI, 2004).

A partir do exposto surge a motivação para o desenvolvimento do tema proposto, à medida que o país apresenta um grande potencial solar a ser aproveitado e que necessita de análise mais detalhada quanto aos fatores de perdas para o seu aproveitamento, bem como a identificação das regiões com maior disponibilidade e melhores tecnologias a serem utilizadas.

A análise resultante deste trabalho visa compreender o impacto e a importância da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil. Este tema está inserido no contexto do planejamento energético para o aproveitamento do enorme potencial solar brasileiro, levando em consideração fatores de perda técnicos, que inicialmente não são observados ao analisar as diferentes regiões do país e seus potenciais solares locais.

Portanto, este estudo tem como objetivo principal identificar quais regiões do país podem apresentar maior rendimento no aproveitamento solar fotovoltaico considerando a temperatura local como fator determinante para a eficiência das diferentes tecnologias disponíveis.

2.0 - METODOLOGIA

Para avaliar geograficamente o aproveitamento real do recurso solar através da tecnologia fotovoltaica, este estudo utiliza um método de cálculo da energia elétrica gerada considerando a eficiência elétrica real, calculada para cada área de subdivisão do território em uma malha com a maior resolução possível, adequada à disponibilidade e confiabilidade de dados para este nível de subdivisão.

A metodologia é composta por três etapas: a primeira corresponde à obtenção, organização e tratamento dos dados; a segunda, a aplicação dos modelos matemáticos para a irradiação e eficiência horária, produzindo os dados georreferenciados; e a terceira consiste em elaborar os mapas corrigidos. Estas três etapas são aplicadas de forma subsequente para cada um dos 12 meses do ano, o que permite ao final deste processo obter os resultados em média anual.

Dessa forma, a primeira e a segunda etapa supracitadas, sob uma perspectiva prática, podem ser compreendidas visão geral nos seguintes processos sequenciais:

- I. Subdividir o território brasileiro em pequenas áreas, com a máxima resolução possível, adequada à disponibilidade de dados para a malha de subdivisão;
- II. Obter e tratar os conjuntos de dados meteorológicos para os 12 meses do ano;
- III. Repetir os processos das etapas a, b e c abaixo para cada um dos 12 meses do ano:
 - a. Associar, para cada área geográfica, os dados de irradiação, temperatura ambiente e velocidade do vento em valores médios horários típicos para o mês em análise;
 - b. Calcular, para cada área geográfica, a temperatura de operação das células, a eficiência real e a energia gerada através de um modelo matemático que correlaciona as variáveis determinantes para a eficiência elétrica de cada tecnologia fotovoltaica.
 - c. Calcular os indicadores estatísticos de médias, máximos e mínimos, bem como os histogramas mensais por tecnologia.
- IV. Obter os valores médios anuais da eficiência real e energia gerada final por tecnologia;
- V. Elaborar os mapas para os 12 meses do ano e para a média anual dos resultados por tecnologia.

A Figura 1 a seguir ilustra o fluxo de etapas do processo metodológico proposto.

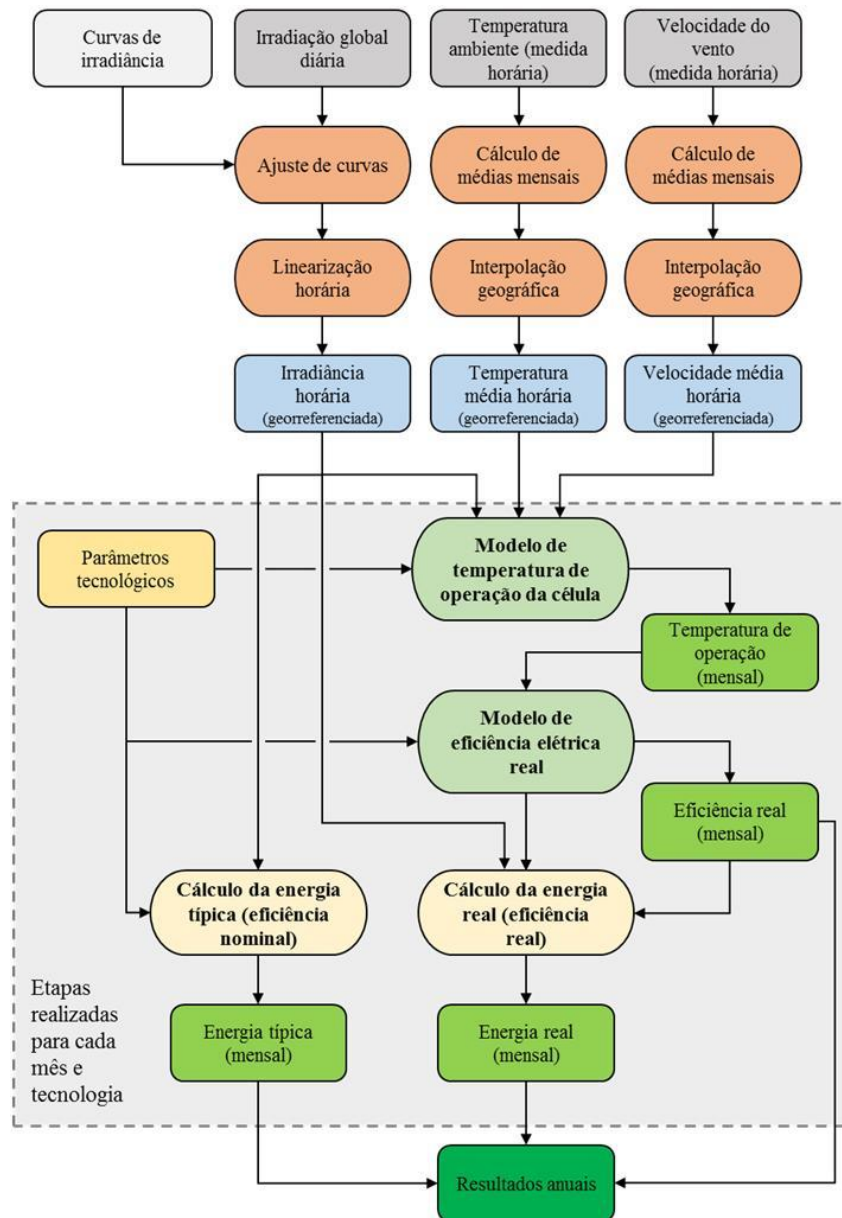


Figura 1. Metodologia

2.1 Obtenção e tratamento de dados

Para a realização do estudo é essencial utilizar um grande conjunto de dados para todo o território nacional, em base georreferenciada para os 12 meses do ano. Os principais dados considerados referem-se à irradiância, temperatura ambiente e velocidade do vento. Visto que o objetivo do trabalho é produzir mapas, é importante que os dados obtidos sejam georreferenciados e que cubram toda a área do território do país. Para o tratamento de dados e processamento de mapas é utilizado o software de geoprocessamento de código livre Quantum GIS (QGIS).

Os dados meteorológicos necessários para a modelagem matemática podem ser obtidos através de bancos de dados de medições de campo ou através de modelos de geração de dados. A pré-análise e o tratamento dos dados são realizados através de verificações estatísticas básicas e da geração de mapas destes dados para comparação com mapas validados e publicados na literatura de conjuntos de dados similares.

Visto que o potencial solar e as condições meteorológicas variam significativamente ao longo do ano e do território brasileiro, faz-se necessário que o estudo seja realizado de forma segmentada na menor escala de tempo possível, que neste caso são os 12 meses do ano. Além disso, o fluxo solar e as condições climáticas apresentam grande variação ao longo das horas do dia, o que não permitiria uma análise representativa caso fossem consideradas médias diárias. Portanto, os dados e a modelagem utilizados são aplicados de forma iterativa para cada mês do ano, de forma individual, através de médias horárias típicas para cada um dos meses. Assim, apenas após este processo iterativo os resultados podem ser reunidos para a análise consolidada anual.

2.1.1 Dados meteorológicos

Para os dados de temperatura e velocidade do vento, são utilizados os valores fornecidos pelo INMET/CPTEC, os quais compreendem medições de estações meteorológicas espalhadas pelo país e convertidas em médias horárias para todos os dias do ano, relativos aos últimos três anos de medições. Neste caso, faz-se necessário calcular as médias mensais típicas para cada variável. No entanto, estes dados não estão disponíveis para uma grande malha de subdivisão do território e, portanto, é preciso realizar uma interpolação geográfica a fim de garantir a abrangência para todos os pontos da subdivisão. A interpolação geográfica é realizada por meio da utilização dos módulos de interpolação e de amostragem geográfica do software QGIS.

2.1.2 Dados de irradiação global

Para os dados de irradiação horária são utilizados os dados do SWERA, produzidos a partir do modelo de transferência de radiação derivado de satélite BRASIL-SR, desenvolvidos pelo INPE e LABSOLAR/UFSC. Este conjunto de dados está disponível para uma malha de grande resolução, que define a subdivisão do território para este estudo. Para utilização no modelo definido realiza-se um ajuste de curvas típicas de irradiação aos dados de energia total diária mensal para que estes representem valores médios horários típicos para cada mês. Este processo deve-se ao fato de que os dados disponíveis representam a irradiação global diária, que consiste na energia total diária média para cada mês (na unidade de Wh/m².d) e a análise necessita dos valores de irradiação, a qual consiste na potência média horária típica de cada mês (na unidade de W/m²). Portanto, o processo de ajuste de curvas para obtenção dos valores de irradiação horária típica mensal é feito através da linearização horária das curvas típicas de irradiação, obtidas do software de simulação de energias renováveis *System Advisor Model* (SAM) e que, por sua vez, são ajustadas aos valores de irradiação global da fonte de dados do estudo para os pontos geográficos correspondentes. Isto é, o perfil de cada curva de irradiação local é ajustado, hora a hora, para que represente um perfil em que a irradiação correspondente dessa curva ajustada seja igual ao valor da fonte de dados base.

2.2 Modelagem matemática

A modelagem matemática para os cálculos da temperatura de operação, eficiência e energia reais é realizada através de Excel, o que também poderia ser realizado por qualquer software de cálculo em organização tabular. A estrutura do modelo permite que para cada ponto do território nacional, identificado por coordenadas geográficas, esteja associado um conjunto de dados de entrada e outro de saída. Os dados de entrada compreendem as variáveis meteorológicas, de potencial solar e parâmetros tecnológicos. Os dados de saída constituem os resultados da aplicação das equações, como a temperatura de operação das células fotovoltaicas, a eficiência elétrica e a energia real produzida para cada caso de análise.

Com base na modelagem estruturada e nos dados tratados, é possível rodar o modelo para os diferentes casos de estudo. Cada caso consiste em um conjunto de dados para cada um dos diferentes períodos do ano e para diferentes tecnologias fotovoltaicas. A análise dos resultados estudo é feita, além dos mapas, através de um conjunto padronizado de medidas estatísticas obtidas sobre aos valores resultantes da modelagem matemática.

2.2.1 Modelo de eficiência elétrica

O modelo de eficiência elétrica real, que define a primeira equação central da análise, é representado pela Equação 1. Este modelo, conhecido como a equação linear tradicional de eficiência elétrica fotovoltaica, é amplamente utilizado em modelagens de sistemas fotovoltaicos relacionadas à dependência da temperatura, conforme descrito por EVANS (1981), SKOPLAKI et al. (2008), SKOPLAKI & PAYVOS (2009) e DUBEY et al. (2015).

$$\eta_c = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})] \quad 1$$

Onde η_c é a eficiência elétrica das células (ou módulos), η_{ref} a eficiência elétrica nominal à T_{ref} , sendo esta a temperatura de referência da tecnologia, β_{ref} o coeficiente de correção da eficiência em função da temperatura (°C⁻¹), também conhecido como coeficiente de temperatura, e T_c a temperatura de operação da célula ou módulo. Os valores de η_{ref} , T_{ref} e β_{ref} representam parâmetros tecnológicos, dependentes dos materiais e arranjos de cada fabricante de equipamentos (EVANS, 1981; SKOPLAKI et al., 2008; SKOPLAKI & PAYVOS, 2009; DUBEY et al., 2015).

2.2.2 Modelo de temperatura de operação

O modelo de temperatura de operação das células, que define a segunda equação central da análise, foi desenvolvido e testado por SKOPLAKI et al. (2008) e está representado pela Equação 2.

$$T_c = T_a + \omega \left(\frac{0,32}{8,91 + 2,0V_f} \right) G_T \quad 2$$

Onde T_c corresponde à temperatura de operação da célula, calculada de acordo com a condições instantâneas de operação: temperatura ambiente, T_a , velocidade do vento, V_f , e irradiação global, G_T . Além das variáveis meteorológicas, a Equação 2 permite ainda calcular T_c para diferentes arranjos de instalação dos módulos fotovoltaicos através da escolha do coeficiente de montagem ω (SKOPLAKI et al., 2008). No caso deste estudo o

coeficiente de montagem (ω) utilizado assume o valor unitário (1,0) que caracteriza a montagem em estrutura metálica livre.

2.2.3 Parâmetros tecnológicos

Para contemplar neste estudo a avaliação das principais tecnologias fotovoltaicas comerciais, considerando parâmetros tecnológicos aplicáveis em projetos reais, os valores típicos dos principais coeficientes foram consolidados através de uma pesquisa de informações dos maiores fabricantes de módulos e células fotovoltaicas no mundo. A primeira etapa desta pesquisa de parâmetros compreende listar os principais e maiores fabricantes das tecnologias fotovoltaicas comerciais. A segunda etapa consiste em obter os catálogos dos produtos destes fabricantes e produzir, a partir deles, os valores médios dos coeficientes e parâmetros por tipo de tecnologia. Portanto, a fim de alcançar resultados médios com maior grau de certeza, buscou-se o maior número de catálogos possíveis para a tecnologia de silício policristalino, a qual representa a mais utilizada atualmente no mundo. A Tabela 1 abaixo apresenta os valores considerados para os parâmetros tecnológicos da tecnologia Poli-Si, bem como os valores máximos e mínimos verificados a partir da pesquisa dos maiores fabricantes mundiais.

Tabela 1. Parâmetros tecnológicos considerados (Tecnologia Poli-Si)

Tecnologia	Eficiência Nominal (%)			Coeficiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)		
	Média	Menor	Maior	Média	Menor	Maior
Poly-Si	15.86	12.80	18.60	0.00415	0.00353	0.00485

2.3 Elaboração dos mapas e análises estatísticas

A elaboração dos mapas é realizada através de um processo padrão, utilizando o software QGIS, de forma que, para cada caso, um mapa com a mesma geometria e nível de informações seja produzido. Para cada mapa são utilizadas cores graduadas para identificar as faixas de valores observados. Estas faixas devem ser padronizadas para garantir a correta interpretação e comparação dos resultados.

A partir dos dados obtidos pela modelagem matemática são realizadas diferentes análises estatísticas a fim de se obter análises qualitativas, comparando diferentes áreas, sob a ótica do efeito da temperatura e identificando quais podem ser as melhores regiões para o aproveitamento solar fotovoltaico. Ademais, são realizadas análises baseadas nos histogramas de distribuição de dados e nas tabelas de classificação de potenciais específicos por região e diferentes tecnologias fotovoltaicas.

3.0 - RESULTADOS

O potencial anual corrigido é resultado da consolidação dos dados mensais obtidos para cada área de subdivisão do território na análise. Assim, o resultado anual de cada ponto dos mapas representa a média da energia diária produzida naquele local ao longo dos 12 meses do ano.

A Figura 2 apresenta um comparativo entre o mapa de energia real produzida (considerando a temperatura como fator determinante da eficiência elétrica real) e o mapa de energia nominal (com a eficiência nominal do fabricante inalterada). Através deste comparativo verifica-se como ocorre uma mudança significativa nas cores dos mapas, o que representa como as condições reais de operação alteram o potencial solar real brasileiro em todas as regiões do país, mesmo que em menor grau em algumas. Contudo as diferenças são mais expressivas quando são realizadas comparações entre regiões de menor escala, como municípios ou mesorregiões, tendo como exemplo as regiões oeste da Bahia e oeste de Minas Gerais.

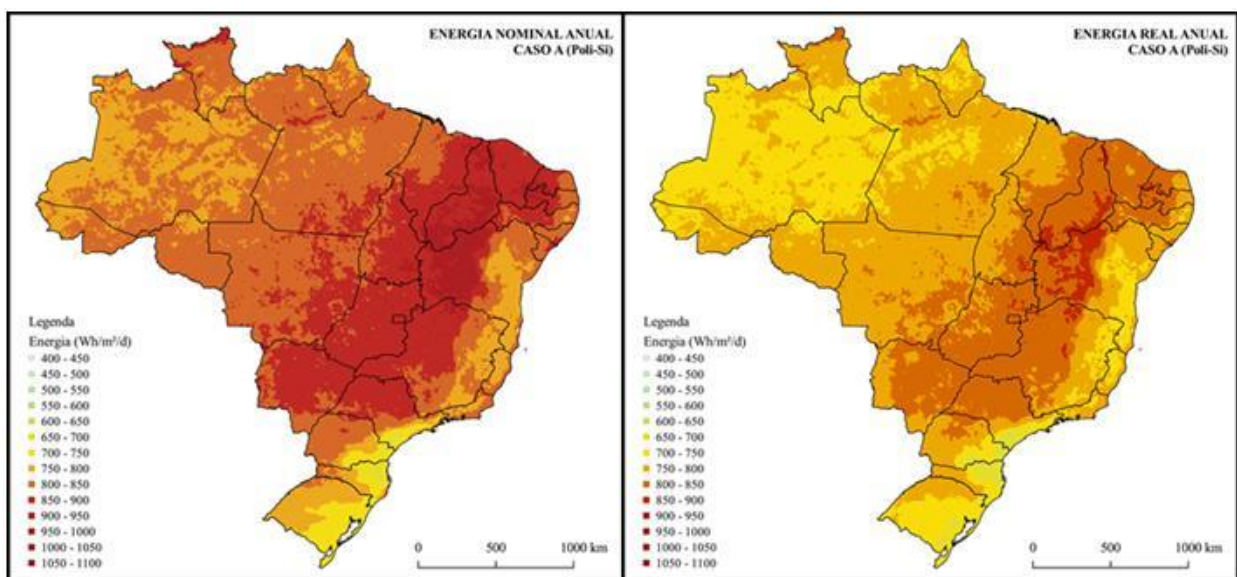


Figura 2. Mapas de energia anual nominal (esquerda) e real (direita) para a tecnologia de silício policristalino.

A análise do mapa de potencial anual corrigido conduz à construção de duas principais observações. A primeira indica que ocorre uma variação relevante entre os potenciais de diferentes regiões brasileiras, porém mais suaves que as divergências expressivas ocorridas na análise mensal. A segunda, e mais importante deste estudo, ratifica como o impacto da temperatura de operação é determinante para a identificação correta das regiões com maior aproveitamento real do recurso solar no Brasil e que, quanto menor a região de análise, mais relevante é o impacto real.

A Figura 3 complementa a análise comparativa entre o potencial real e o nominal através da exibição dos locais com melhor aproveitamento dentre o total de pontos do território brasileiro. Neste mapa estão exibidos apenas os pontos que representam os locais com energia real e nominal acima do valor de energia que divide o percentual total de pontos pela metade. Isto é, dentre os 87.586 pontos da malha de divisão do território, estão selecionados apenas os 43.793 pontos com maior aproveitamento. Para o caso da energia real o menor valor que corresponde aos 50% dos pontos com maior aproveitamento é 776 Wh/m²/d, enquanto para a energia nominal o menor valor é 828 Wh/m²/d.

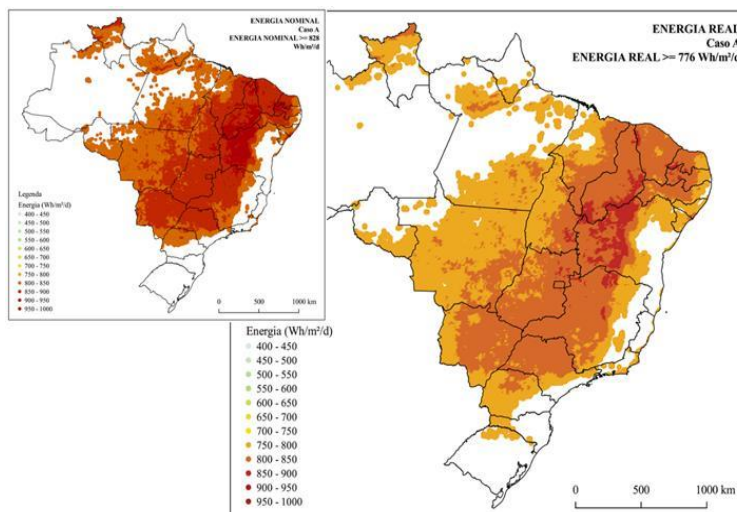


Figura 3. Melhores pontos para o aproveitamento real da energia solar. Os melhores pontos (50% do total) com maior aproveitamento real. Figura menor: melhores pontos (50% do total) com maior aproveitamento nominal.

Verifica-se através da Figura 3 que a distribuição de pontos com melhor aproveitamento real compreende regiões distintas daquelas que caracterizar-se-iam como melhores sob a ótica da energia nominal, sem considerar as condições reais de operação.

A Tabela 2 apresenta a distribuição de áreas do território correspondente a cada faixa de energia real e nominal, e a Figura 4 caracteriza a distribuição de faixas de valores em forma de histograma, mostrando como ocorre uma transposição das faixas de maior distribuição de pontos em níveis de potencial solar ao longo do território brasileiro quando são consideradas as condições reais de eficiência elétrica.

Tabela 2. Distribuição de áreas por faixas de energia.

Faixa (Wh/m ² /d)	Energia Real (km ²)	Energia Nominal (km ²)
550 - 600	200	200
600 - 650	3.600	100
650 - 700	102.200	29.100
700 - 750	2.288.200	214.200
750 - 800	3.891.000	1.695.700
800 - 850	2.245.700	4.051.000
850 - 900	227.300	2.370.400
900 - 950	0	397.600

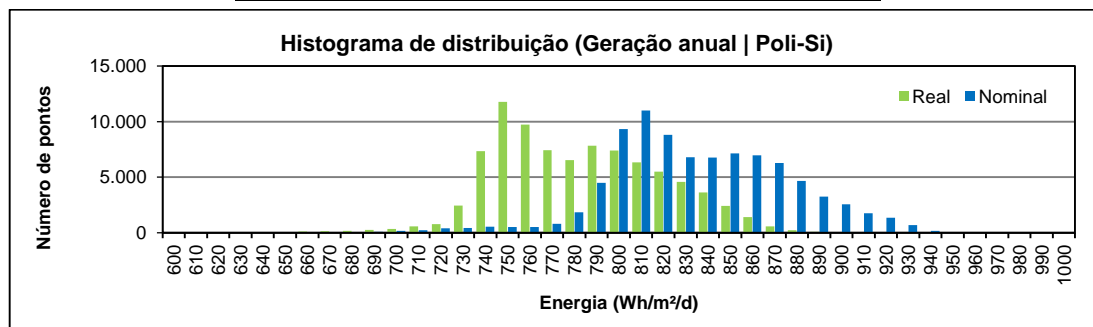


Figura 4. Histograma de distribuição anual para a tecnologia de silício policristalino.

O comparativo entre as regiões com maior potencial solar compreende o resultado mais relevante deste estudo e é sustentado pela classificação ordenada dos estados com maior potencial anual. Esta ordenação é baseada no cálculo de indicadores médios, realizados para cada um dos estados. A classificação principal corresponde à ordem decrescente dos indicadores estaduais médios de energia real média. Duas outras ordenações também são apresentadas e correspondem à energia nominal média estadual e à eficiência média ponderada estadual. O cálculo de cada um destes indicadores é realizado através da média aritmética dos valores correspondentes para todas as áreas inseridas dentro dos limites de cada estado.

A Tabela 3 a seguir apresenta a ordem de classificação dos estados brasileiros (destacando o Distrito Federal) referente à utilização da tecnologia de silício policristalino em arranjo de montagem livre. A escolha do silício para representar esta classificação, baseia-se no fato de que o valor de eficiência elétrica nominal obtido da pesquisa dos principais equipamentos comerciais corresponde a um valor intermediário dentre as demais tecnologias e o coeficiente de temperatura (médio dos maiores fabricantes) é o maior dentre todos os casos de estudo.

Tabela 3. Classificação de estados brasileiros em relação ao potencial solar estadual e eficiência elétrica real.

Posição	Energia Real		Energia Nominal		Eficiência Média Ponderada	
	Estado	Média estadual (Wh/m ² /d)	Estado	Média estadual (Wh/m ² /d)	Estado	Média estadual (%)
1	DF	838	PI	900	RS	15.44
2	PI	835	CE	882	SC	15.42
3	CE	824	DF	879	PR	15.27
4	PB	824	PB	876	DF	15.15
5	RN	819	RN	873	RJ	15.11
6	GO	815	GO	867	SP	15.10
7	PE	808	TO	862	MG	15.07
8	BA	805	MS	857	ES	15.05
9	MS	805	PE	855	PE	15.00
10	MG	804	MA	855	BA	14.98
11	TO	801	BA	854	MS	14.95
12	SP	794	MG	848	SE	14.94
13	MA	793	MT	841	GO	14.93
14	MT	786	SP	837	AL	14.92
15	AL	778	AL	829	PB	14.92
16	SE	777	SE	825	RN	14.88
17	PR	772	RR	825	AC	14.86
18	RR	768	PA	822	MT	14.83
19	PA	766	RO	818	RO	14.82
20	RO	764	AP	807	CE	14.81
21	RJ	759	PR	805	AP	14.79
22	AP	752	AC	802	RR	14.78
23	AC	751	AM	800	PA	14.77
24	ES	745	RJ	799	TO	14.76
25	AM	742	ES	787	PI	14.73
26	RS	735	RS	760	AM	14.73
27	SC	719	SC	743	MA	14.72

Analisando as regiões referentes aos 10 estados com maior aproveitamento real do recurso solar no Brasil, o Nordeste corresponde à região de principal destaque, seguida pelo Centro-Oeste. Essa classificação, tanto a partir da ordenação pela energia real quanto nominal, está diretamente associada aos altos níveis de irradiação global que chegam à superfície destes estados. Porém, verifica-se que ocorre uma alteração em diversas posições no *ranking* ao comparar as classificações em ordem de energia nominal e real.

Por outro lado, do ponto de vista exclusivo das melhores condições operacionais, representada pela classificação de ordem de maior nível de eficiência média ponderada estadual, a região Sul recebe destaque por tomar as primeiras posições no *ranking*. Deve-se esse fato às menores temperaturas ambientes anuais, comparadas ao restante do país, e também à ocorrência de intensos regimes de ventos e baixos níveis de irradiação. Embora a eficiência elétrica real seja sempre maior nos estados do Sul, as diferenças entre os níveis de irradiação entre as regiões são maiores que a diminuição relativa no desempenho das tecnologias, fazendo com que estes estados melhorem de posição na classificação, mas não cheguem às primeiras posições.

Apesar de representar uma área significativamente menor que todos os estados brasileiros, o Distrito Federal, que assumiria a terceira posição na classificação do ponto de vista da energia nominal, assume a primeira posição quando são consideradas as condições reais. Essa alteração de posições ocorre para diversos estados brasileiros, principalmente para aqueles posicionados após a 6ª colocação no ranking. Tomando como exemplo o Tocantins, que se classificaria como o 6º colocado do ponto de vista exclusivo de recurso solar (energia nominal), quando consideras as condições reais este estado desloca-se para a 11ª posição, o que se deve a uma grande redução na eficiência real nesta região. De forma análoga, a Bahia desloca-se da 11ª posição em energia nominal para a 8ª posição em ordem de energia real.

4.0 - CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo central avaliar o impacto da temperatura de operação sobre o aproveitamento real do potencial solar fotovoltaico brasileiro. Para tal foi proposta uma metodologia matemática para análise georreferenciada que permite calcular a temperatura real de operação das células e a eficiência elétrica real para cada região do território brasileiro.

A metodologia proposta, per se, representa um importante resultado deste estudo à medida que pode ser aplicada para análises similares de potencial solar. Visto que a metodologia aborda um problema geográfico associando-se camadas de dados correlacionadas por equações, o número de variáveis analisadas pode ser expandido para incluir outros fatores, como por exemplo o acúmulo de sujeira e a degradação de módulos.

Ademais a estrutura de cálculo da metodologia proposta é aplicável para estudos com outras fontes energéticas, alterando-se as correlações centrais, e também a outros países, com a mudança dos dados base. Importante destacar que a precisão dos resultados está diretamente associada à disponibilidade e confiabilidade dos dados utilizados, os quais precisam ser bem avaliados antes da aplicação da metodologia. Ademais, é importante ressaltar que a aplicação desta metodologia pode trazer resultados mais precisos quando obtidos através de cálculos diários, ao invés de médias mensais, como neste estudo.

Por meio desta metodologia foi possível calcular a temperatura de operação de diferentes tecnologias fotovoltaicas, bem como os valores de eficiência elétrica real, para cada ponto de subdivisão do território brasileiro. Através dos resultados obtidos e das análises conduzidas conclui-se que existe um impacto significativo da temperatura no aproveitamento real da energia solar no Brasil através do uso da tecnologia fotovoltaica.

A redução de eficiência real no Brasil é expressiva em todo o território, podendo ser reduzida em percentuais próximos a 15% em determinados locais. Neste aspecto a região Sul ganha destaque à medida que neste local a eficiência real é pouco reduzida em relação à nominal. Este fato indica que em regiões com perdas reais suaves, o potencial real pode ser subestimado caso sejam considerados fatores de perda padrões ou teóricos para todo o território.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. Banco de Informações de Geração, 01 abr. 2016. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 01 abr. 2016.
- DU, Y., FELL, C. J., DUCK, B., CHEN, D., LIFFMAN, K., ZHANG, Y., GU, M., ZHU, Y. "Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios", *Energy Conversion and Management*, v. 108, pp. 60–67, Out. 2015.
- DUBEY, S., SARVAIYA, J. N., SESHADRI, B. "Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World A Review", *Energy Procedia*, v. 3, pp. 311-321, Mar. 2015.
- EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Empresa de Pesquisa Energética, 2015.
- EVANS, D. L. "Simplified method for predicting photovoltaic array output". *Solar Energy*, v. 27, pp. 555-560, Jul. 1981.
- GARCÍA, A. M. C., BALENZATEGUI, J. L., "Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations", *Renewable Energy* v. 29, pp. 1997–2010, Mar 2004.
- MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., ABREU, S.L. "Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project", *Solar Energy*, v. 81, pp. 517–528, Set. 2007.
- MME. Energia Solar no Brasil e Mundo, Ano de referência – 2014. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015.
- NDIAYE, A., CHARKI, A., KOBİ, A., CHEIKH, M. F. K., NDIAYE, P. A., SAMBOU, V. "Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review", *Solar Energy*, v. 96, pp. 140–151, Ago. 2013.
- PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006.
- REN 21. Renewables 2016, Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2016.
- SHARMA, V., CHANDEL, S. S. "Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, pp. 753–767, Ago. 2013.
- SKOPLAKI, E., BOUDOUVIS, A.G., PALYVOS, J.A. "A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 92, pp. 1393– 1402, Mai. 2008.
- SKOPLAKI, E., PALYVOS, J.A. "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations", *Renewable Energy*, v. 34, pp. 23–29, Jun. 2008.
- SKOPLAKI, E., PALYVOS, J.A. "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations", *Solar Energy*, v. 83, n. 5, pp. 614–624, Mai. 2009.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Tássio Simioni

Bento Gonçalves – RS (03/05/1988)

Engenheiro Químico – UFSC (2012)

Especialista em Engenharia de Processamento de Gás Natural – UFRJ (2014)

Mestre em Planejamento Energético – COPPE/UFRJ (2017)

Atualmente é coordenador de projetos de energia na RADIX. Possui experiência no desenvolvimento de projetos de otimização operacional, eficiência energética na geração de energia elétrica, sistemas de monitoramento, previsão e otimização em tempo real, e novas tecnologias para geração e transmissão de energia, com foco em energias renováveis.