

ENERGIA SOLAR

Fundamentos para otimização da geração fotovoltaica

(fatores atmosféricos e de consumo de eletricidade)

Resultados preliminares do projeto OSTSEV desenvolvido pela
IMar/Unifesp, INPE e Leibniz Universität Hannover



Energia Solar

Realização

Autores

Marcelo Pizzuti Pes
Fernando Ramos Martins
Silvia Vitorino Pereira

Equipe envolvida

Maria Francisca Azeredo Velloso
Eduardo Weide Luiz
Francisco José Lopes de Lima

Entidades Executoras



Departamento de Ciências do Mar

Universidade Federal de São Paulo
Campus Baixada Santista



Laboratório de Modelagem e Estudos de
Recursos Renováveis de Energia

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



Institut für Meteorologie und Klimatologie
Leibniz Universität Hannover



Entidades Fomentadoras



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Coordenação de Aperfeiçoamento
de Pessoal de Nível Superior



Deutscher Akademischer Austauschdienst
German Academic Exchange Service



Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Entidades Colaboradoras



ABSOLAR
Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica



Secretaria de Energia
e Mineração

Energia Solar

Conteúdo

Sumário

Apresentação

Introdução

O que é

Formas de aproveitamento

Quanta energia solar está disponível

Otimização da geração



Energia Solar

Apresentação

O ponto de partida para o desenvolvimento desta cartilha surgiu com o projeto de intercâmbio científico intitulado “*Optimization of short-term solar energy variability (OSTSEV)*”, que foi realizado através da colaboração entre o Instituto do Mar da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o *Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMUK)* da *Leibniz Universität* de Hannover, Alemanha. Com o objetivo de estudar a relação entre a geometria de instalação de sistemas fotovoltaicos, as condições atmosféricas locais e a curva diária de consumo de energia elétrica, buscando formas de otimizar a geração fotovoltaica, o projeto manteve dois pesquisadores brasileiros na *Leibniz Universität* para desenvolver uma metodologia que atendesse tal propósito.

O projeto recebeu financiamento do programa NoPA – Novas Parcerias – existente entre a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)* para promover o estabelecimento de cooperação internacional entre instituições de pesquisa brasileiras e alemãs. A *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)* proveu suporte para o desenvolvimento das ações previstas e foi a instituição responsável pela coordenação financeira das atividades que resultaram na publicação desta cartilha.

Devemos aqui ressaltar que esse estudo tem caráter preliminar, ou seja, é primordial que haja continuidade no desenvolvimento da metodologia proposta e, acima de tudo, que sejam realizados experimentos de campo no Brasil a fim de robustecer os resultados para que sejam gerados novos conhecimentos e tecnologias e, conseqüentemente, o aproveitamento de energia solar no Brasil seja auxiliado.

Dessa forma, o intuito desta cartilha não é esgotar o tema de geração fotovoltaica, mas lançar mais questionamentos e luz sobre fatores ainda em desenvolvimento e que consideramos de relevante importância.

Esta cartilha tem também como finalidade reduzir a distância entre o conhecimento técnico-científico e a sociedade em geral através da disseminação de informações sobre energia solar, sendo uma ferramenta dos formadores de opinião e educadores para a conscientização ambiental dos diversos setores da sociedade. Além desta cartilha, os pesquisadores e profissionais envolvidos no projeto OSTSEV também desenvolveram o conteúdo de **Oficinas sobre Energia Solar** realizadas no estado de São Paulo com o suporte da Secretaria de Energia do Estado, da GIZ e da CAPES.

Energia Solar

Introdução

O consumo de energia está fortemente atrelado ao desenvolvimento econômico e social de um país. Demonstrado em diversos estudos, esse aspecto ressalta a importância de uma política energética governamental que tenha como foco o planejamento e execução de ações que visem garantir a capacidade de produzir os recursos energéticos para os diversos setores da sociedade. Países desenvolvidos consomem grande quantidade de energia não apenas para garantir a continuidade de suas atividades econômicas, mas também para oferecer acesso aos serviços sociais básicos como a saúde, educação e entretenimento, mantendo a qualidade de vida de sua população.

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) apresenta maiores valores em regiões que consomem pelo menos 2 TeP de energia. Estudos demonstram que sociedades com acesso a essa quantidade de recurso energético possuem baixas taxas de mortalidade, menores taxas de analfabetismo, maior número de empregos que demandam maior conhecimento tecnológico e capacitação de recursos humanos.

Por outro lado, o consumo de energia tem sido apontado como uma das principais causas de problemas ambientais que ocorrem de forma evidente nas diversas regiões do planeta. Uma vasta literatura científica a esse respeito está disponível. Poluição atmosférica e aquecimento global são os mais frequentemente mencionados, mas há outros que são intensamente observados

em âmbitos regionais em razão das especificidades da matriz energética e das características ambientais de cada país ou região. Entre eles, podemos destacar o deslocamento de populações ribeirinhas, alagamento de grandes áreas, assoreamento de rios e emissão de gás metano como fatores já bastante discutidos no Brasil.

Assim, torna-se cada vez mais importante fazer uso de recursos energéticos que causem o menor impacto possível ao meio ambiente e promover o uso consciente e eficiente dos recursos energéticos disponíveis em âmbito regional e local.

Nesse sentido, a energia solar é um recurso energético que, em virtude da posição geográfica do nosso país (mais da metade do território brasileiro está nas regiões equatorial e tropical do planeta), pode promover tanto o crescimento da eficiência energética do país quanto o acesso amplo à energia, com intuito de impulsionar o avanço do bem estar social e da qualidade de vida de toda a população. Mas ainda existem muitas barreiras para o crescimento do uso de energia solar no Brasil, entre elas podemos destacar a reduzida disseminação de informação fundamentada no conhecimento científico-tecnológico em linguagem de fácil compreensão aos diversos setores da sociedade, inclusive aqueles não habituados às expressões técnicas do setor energético, mas diretamente interessados em função do consumo de energia.

Energia Solar

O que é

Nosso planeta Terra orbita uma estrela: o Sol.

Com raio de aproximadamente 690.000 km, cerca de 110 vezes o raio da Terra, o Sol é uma fonte praticamente inesgotável de energia.

Toda energia irradiada pelo Sol é consequência das reações de fusão nuclear em que átomos de Hidrogênio se unem para formar um novo elemento químico, o Hélio. A energia liberada nas reações químicas faz com que o Sol atinja temperaturas da ordem de 6900° C.

A energia emitida pelo Sol está na forma de ondas eletromagnéticas similares à luz, ao sinal

de celular ou rádio. Ela é conhecida também como radiação de ondas curtas, pois o Sol está a uma temperatura muito superior à dos demais corpos com que convivemos em nosso dia a dia. Para se ter uma idéia, a temperatura média da Terra é da ordem de 15 °C, 460 vezes menor que a do Sol. Esse fato é descrito de forma simplificada pela Lei de Planck, onde o comprimento de onda do pico de energia emitida por um corpo é inversamente proporcional a sua temperatura.

Zona de convecção

A energia continua a ser transportada para a superfície através de correntes de convecção de gás aquecido e resfriado na zona de convecção.

Coroa

Os elementos ionizados dentro da coroa brilham nos comprimentos de onda do raio X e do ultravioleta extremo. Os instrumentos da NASA podem visualizar a coroa do Sol nessas energias mais altas, uma vez que a fotosfera é bastante fraca nesses comprimentos de onda.

Zona radiativa

A energia se move lentamente para fora, levando mais de 170.000 anos para irradiar através da camada do Sol conhecida como zona radiativa.

Núcleo

A energia é gerada por reações termonucleares, criando temperaturas extremas nas profundezas do núcleo do Sol.

Flâmulas Coronais

O plasma da coroa flui para fora, moldado pelas linhas do campo magnético do Sol em formas afuniladas chamadas flâmulas coronais, que se estendem por milhões de quilômetros no espaço.

Cromosfera

Camada relativamente fina do Sol, a cromosfera é esculpida por linhas de campo magnéticas que restringem o plasma solar eletricamente carregado. Ocasionalmente, feições de maiores plasma - chamadas proeminências - são formadas e estendem-se até a muito tênue e quente coroa, algumas vezes expulsando o material fora do Sol.

O Sol: uma massa incandescente de hidrogênio, hélio e outros elementos mais pesados.

Fonte: Mysteries of the Sun, NASA, 2011.

Adaptado da ilustração de Jenny Mottar.

Energia Solar

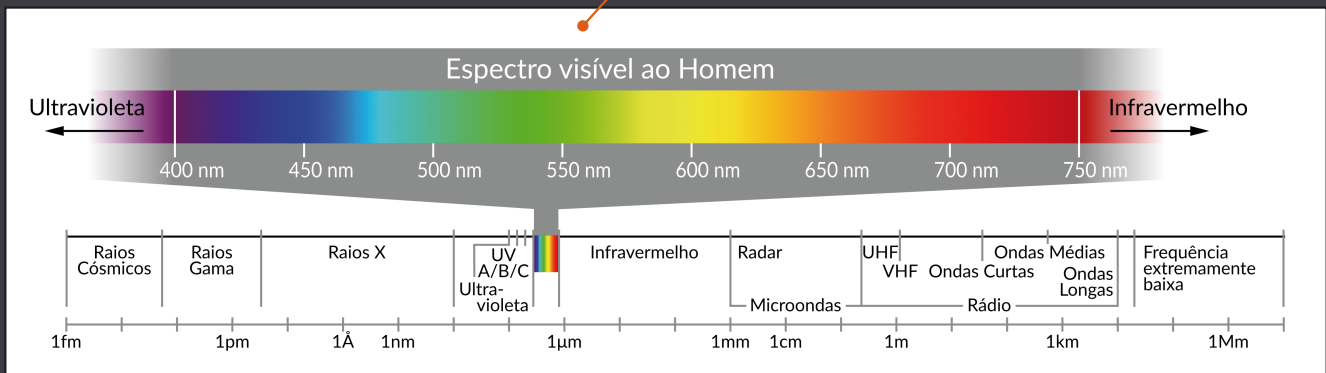
O que é

A energia emitida pela esfera solar cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético e apenas uma fração dessa energia viaja pelo espaço em direção à Terra. De toda energia que chega ao Sistema Terra/Atmosfera, cerca de 81% está em uma faixa de comprimentos de onda que vai da radiação visível ao infravermelho próximo.

Dentro do espectro da radiação solar:

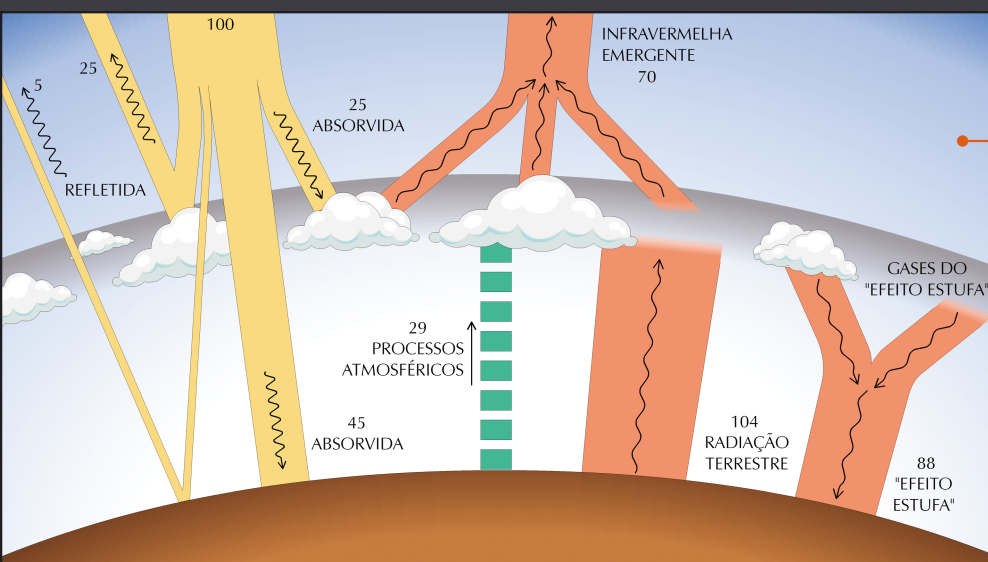
- a radiação visível é composta pelas ondas eletromagnéticas que conseguimos enxergar, estando associada às cores;
- o infravermelho próximo são as ondas que não conseguimos enxergar, mas sentimos como calor.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE, 2017.



Ao chegar à Terra, a energia solar interage com a atmosfera terrestre, o que resulta nos processos de absorção e espalhamento. Esses processos atenuam a energia solar antes que ela atinja a superfície do planeta. O fenômeno de atenuação da energia solar pela atmosfera é chamado de

transferência radiativa e é essencial para manter as condições de vida no planeta, pois reduz a quantidade de radiação ultravioleta que atinge a superfície e funciona como um cobertor mantendo o calor produzido pela incidência da radiação solar, processo chamado **efeito estufa**.



No seu percurso dentro da atmosfera, a energia solar é atenuada pelos gases atmosféricos e aerossóis (chamados particulados) que promovem a absorção e o espalhamento da radiação antes que ela chegue à superfície terrestre.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE, 2017.

Energia Solar

O que é

A energia solar que incide em uma superfície é composta por duas componentes que chamamos de **radiação solar direta** e **radiação solar difusa**. A radiação solar direta representa uma fração da energia solar que consegue atravessar toda a atmosfera sem sofrer nenhuma interação de espalhamento. A radiação direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície do planeta e o Sol. Por outro lado, a componente difusa engloba a radiação solar proveniente de todas as demais direções e é decorrente dos processos de espalhamento da radiação solar pelos gases e particulados presentes na atmosfera.

Para compreendermos o uso da energia solar, precisamos ter em mente alguns conceitos básicos muito utilizados por profissionais da área:

Radiação solar: é a energia transportada na forma de ondas eletromagnéticas provenientes do Sol e medida em unidade chamada Joule (J);

Fluxo de energia radiante: é a taxa de transferência de energia por unidade de tempo medida em Joule por segundo ou Watts ($1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$);

Irradiância solar: medida em Watts por metro quadrado (W/m^2), representa a quantidade de energia solar incidente por segundo em uma área de 1 m^2 (equivale à potência energética por unidade de área);

Irradiância extraterrestre (G_0): representa a quantidade de energia solar incidente por segundo em uma área de 1 m^2 no topo da atmosfera, ou seja, é a quantidade de energia solar que chega na Terra antes de sofrer atenuação pela atmosfera.

Irradiância direta normal (G_n): também conhecida como DNI, é a taxa de energia por

unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.

Irradiância difusa horizontal (G_{dif}): é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área decorrente do espalhamento de parcela da radiação solar direta pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.) durante seu percurso na atmosfera.

Irradiância direta horizontal (G_{dir}): é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal (DNI) e o cosseno do ângulo zenital solar.

Irradiância global horizontal (G): é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. Pode ser determinada pela soma $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$ onde θ_z é o ângulo zenital.

Irradiância global no plano inclinado (G_i): é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado em relação à superfície da Terra em ângulo igual ao da latitude local.

Ângulo zenital solar (θ_z): é um dos ângulos utilizados para determinar a posição do Sol no céu, formado por duas linhas imaginárias, sendo a primeira perpendicular a superfície no ponto de interesse e a segunda linha liga este ponto de interesse ao Sol.

Ângulo azimutal solar (ψ_z): é o segundo ângulo utilizado para determinar a posição do Sol no céu, formado por duas linhas imaginárias, sendo a primeira a linha horizontal entre o Norte Geográfico e o ponto de interesse e a segunda linha é a projeção da linha que une ponto de interesse ao Sol sobre a superfície horizontal.

Energia Solar

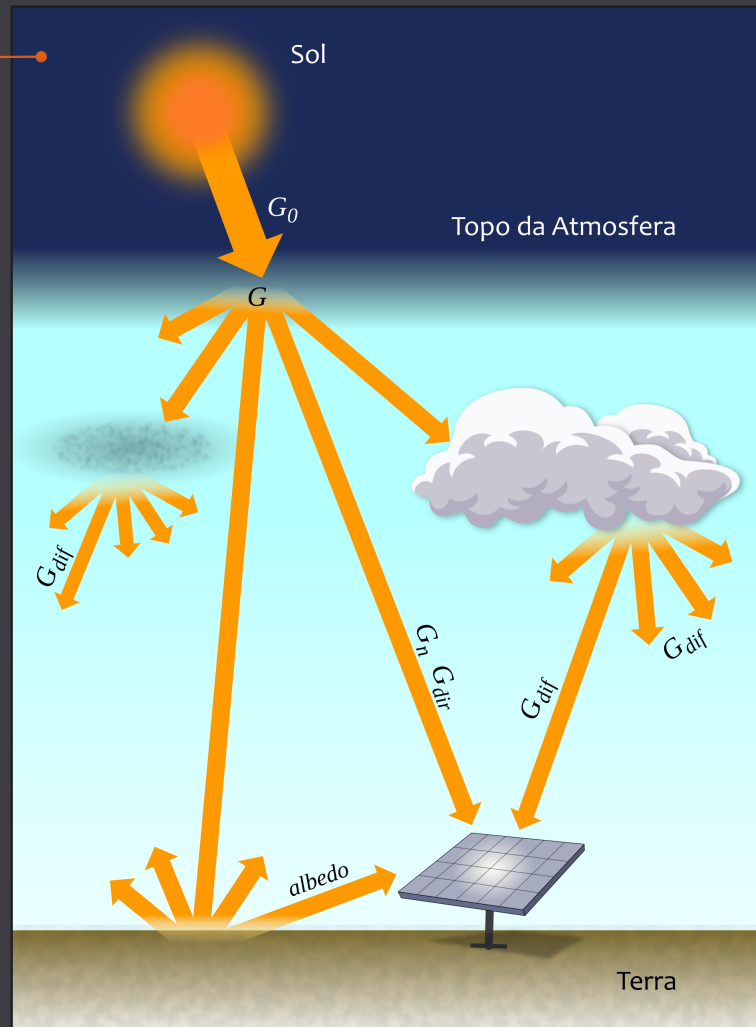
O que é

Um painel solar na superfície terrestre está exposto tanto à componente direta quanto à difusa da irradiação solar. Somadas, as duas componentes correspondem à irradiação solar global.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE, 2017.

A irradiação solar possui um ciclo diário de variação que tem início no nascer do Sol e termina com o pôr do Sol. Ao longo desse período diário, o percurso da energia solar na atmosfera apresenta distâncias maiores no início e fim do dia quando o Sol está próximo do horizonte. A energia solar percorre menor distância na atmosfera no meio dia solar, que é o momento do dia em que o Sol está na posição mais elevada em relação ao ponto de interesse na superfície da Terra. Geralmente, a irradiância incidente na superfície da Terra atinge seu valor máximo (aproximadamente 1.000 W/m^2) no meio-dia solar em condições de céu completamente sem nuvens (céu claro). Condições atmosféricas diferentes acarretam atenuações distintas de forma que quanto maior a nebulosidade, ou a quantidade de poluentes presentes na atmosfera, menor a quantidade de energia solar incidente na superfície.

A energia solar que chega na superfície alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos, químicos e bioquímicos existentes, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos com a aplicação do conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade.



Energia Solar

Formas de aproveitamento

A energia solar pode ser convertida em outras formas de energia úteis para atender a demanda de energia de várias atividades humanas. Exemplos são os sistemas de aquecimento e a geração de eletricidade.

A geração de eletricidade utiliza diferentes tecnologias que podem ser classificadas como sistemas de conversão direta e sistemas de conversão indireta.

O método **direto** é aquele em que o produto final resultante já está disponível para uso após a interação da energia solar com o sistema coletor, como ocorre com o sistema fotovoltaico, por exemplo, que gera eletricidade logo após a radiação solar incidir sobre o painel.

O sistema de geração fotovoltaica utiliza o efeito fotoelétrico baseado na capacidade da radiação eletromagnética de produzir cargas elétricas no momento em que incide sobre uma superfície semicondutora.



Os sistemas fotovoltaicos têm como componente básico as células solares.

Atualmente, as células solares com base de silício monocristalino e policristalino dominam o mercado fotovoltaico, embora haja alternativas, como as células solares de filme fino com diversas variações de materiais.

O arranjo de células solares forma módulos solares que, por sua vez, compõem os painéis solares.

A eficiência das células solares é definida como a proporção da energia solar que chega à superfície do painel e é convertida em energia elétrica. A eficiência máxima está em torno de 22%.

Energia Solar

Formas de aproveitamento

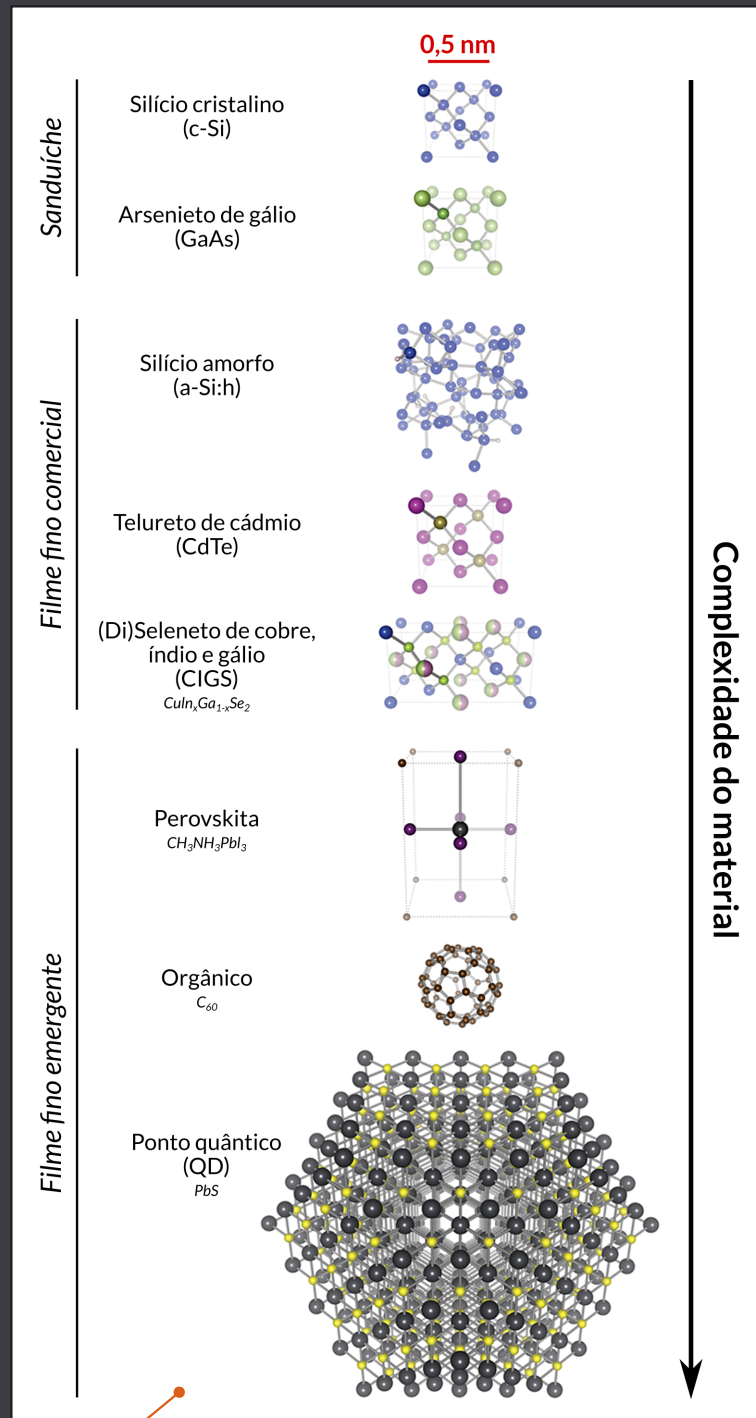
Os painéis fotovoltaicos são construídos a partir de diferentes arquiteturas e materiais, assim como diferentes graus de complexidade.

Do ponto de vista óptico, em geral os painéis contam com duas camadas para maximizar a absorção da energia solar. A camada externa é normalmente de vidro, polímeros ou acrílico e apresenta alta capacidade de transmissão da radiação solar na faixa de 350nm a 1200nm do espectro solar.

Alguns estudos sugerem novas tecnologias para aumentar o aproveitamento da energia solar pelos painéis.

- **Cavidade óptica em células fotovoltaicas de filme fino:** consiste em uma abertura hemi-elipsoide para entrada da luz solar posicionada sobre uma célula solar inclinada que reflete os fótons não absorvidos de volta para a célula solar, possibilitando múltiplas absorções;
- **Efeito de sombreamento dos condutores metálicos:** esse é outro fator que deve ser levado em consideração no que compete ao rendimento dos módulos fotovoltaicos. Responsáveis pela condução da corrente elétrica, esses condutores metálicos compreendem uma fração de 4% a 9% da área ativa da célula solar.

Além dos aspectos ópticos mencionados, as células solares vem apresentando materiais cada vez mais complexos.



Classificação da tecnologia fotovoltaica baseada na complexidade dos materiais.

Disponível em: <http://energy.mit.edu/news/solar-photovoltaic-technologies/> (acesso em março de 2018).

Energia Solar

Formas de aproveitamento

Diversos artigos científicos tratam da evolução e desenvolvimento de novas tecnologias, dentre os quais podemos destacar o esforço internacional de pesquisadores da Austrália, Japão, Itália, Estados Unidos e Alemanha, publicado por

Martin Green e colaboradores. Intitulada “**Solar cell efficiency tables**”, a publicação mantém atualizadas informações sobre a eficiência de painéis fotovoltaicos e as tecnologias mais recentes disponíveis.

Esta tabela contém os resultados da análise de eficiência de células e sub módulos solares de junção simples sob espectro global AM1.5 (1000 W/m²).

Fonte: Green et al., 2017.

Classificação		Eficiência %	Centro de teste
Silício	Si (célula cristalina)	26,7 ± 0,5	AIST (3/17)
	Si (célula multicristalina)	22,3 ± 0,4	FhG-ISE (8/17)
	Si (submódulo de transferência fina)	21,2 ± 0,4	NREL (4/14)
	Si (mini módulo de filme fino)	10,5 ± 0,3	FhG-ISE (8/07)
Células III-V	GaAs (célula de filme fino)	28,8 ± 0,9	NREL (5/12)
	GaAs (multicristalina)	18,4 ± 0,5	NREL (11/95)
	InP (célula cristalina)	24,2 ± 0,5	NREL (3/13)
Filmes finos calcogenetos	CIGS (célula)	21,7 ± 0,5	AIST (1/17)
	CdTe (célula)	21,0 ± 0,4	Newport (8/14)
	CZTS (célula)	10,0 ± 0,2	NREL (3/17)
Microcristalino/amorfo	Si (célula amorfa)	10,2 ± 0,3	AIST (7/14)
	Si (célula microcristalina)	11,9 ± 0,3	AIST (2/17)
Perovskita	Perovskite (célula)	20,9 ± 0,7	Newport (7/17)
	Perovskite (mini módulo)	16,0 ± 0,4	Newport (4/17)
Sensibilizada por corantes	Dye (célula)	11,9 ± 0,4	AIST (9/12)
	Dye (mini módulo)	10,7 ± 0,4	AIST (2/15)
	Dye (submódulo)	8,8 ± 0,3	AIST (9/12)
Orgânicas	Organic (célula)	11,2 ± 0,3	AIST (10/15)
	Organic (mini módulo)	9,7 ± 0,3	AIST (2/15)

Esta tabela contém os resultados da análise de eficiência de células e sub módulos solares de junção múltipla sob espectro global AM1.5 (1000 W/m²).

Fonte: Green et al., 2017.

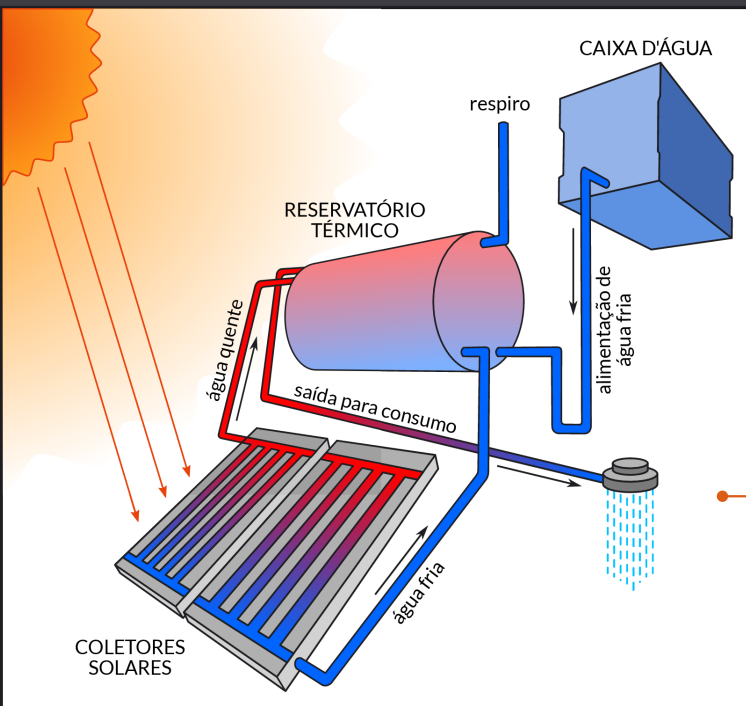
Classificação		Eficiência %	Centro de teste
III-V multijunção (2.17/1.68/1.40/1.06/0.73 eV)	Célula de cinco junções (coladas)	38,8 ± 1,2	NREL (7/13)
	InGaP/GaAs/InGaAs	37,9 ± 1,2	AIST (2/13)
	GaInP/GaAs (monolítico)	32,8 ± 1,4	NREL (9/17)
Multijunção com c-Si	GaInP/GaAs/Si (empilhamento mecânico)	35,9 ± 0,5	NREL (2/17)
	GaInP/GaAs/Si (wafer colado)	33,3 ± 1,2	FhG-ISE (8/17)
	GaInP/GaAs/Si (monolítico)	19,7 ± 0,7	FhG-ISE (8/16)
	GaInP/Si (empilhamento mecânico)	32,8 ± 0,5	NREL (12/16)
	Perovskite/Si (monolítico)	23,6 ± 0,6	NREL (8/16)
	GaInP/GaInAs/Ge; Si (mini módulo de divisão espectral)	34,5 ± 2,0	NREL (4/16)
a-Si/nc-Si multijunções	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	14,0 ± 0,4	AIST (5/16)
	a-Si/nc-Si (célula de filme fino)	12,7 ± 0,4%	AIST (10/14)

Energia Solar

Formas de aproveitamento

Outro exemplo de conversão **direta** são os sistemas de aquecimento de água. Amplamente utilizados no mundo, esses sistemas consistem de uma superfície que converte a energia solar em calor para aquecer água, aproveitando a convecção natural dos fluidos, que faz com que

as partes mais quentes tendam a subir por tornarem-se menos densas. Uma vez aquecida, a água é armazenada em reservatórios termicamente isolados. Esses sistemas trabalham com água aquecida a baixas temperaturas.



Esquema simplificado de um sistema de aquecimento de água a baixas temperaturas.

O método passivo (chamado termosifão) baseia-se na convecção natural dos fluidos. Assim, a água circula pelo sistema sem a necessidade de bombeamento artificial. O calor transferido cria a diferença de temperatura que torna a água aquecida menos densa que a água ainda fria. A tendência do fluido menos denso é flutuar sobre o mais denso, movendo a água quente para cima em direção ao reservatório.

Embora esse sistema seja o mais utilizado, existem sistemas que fazem uso do fluxo forçado.



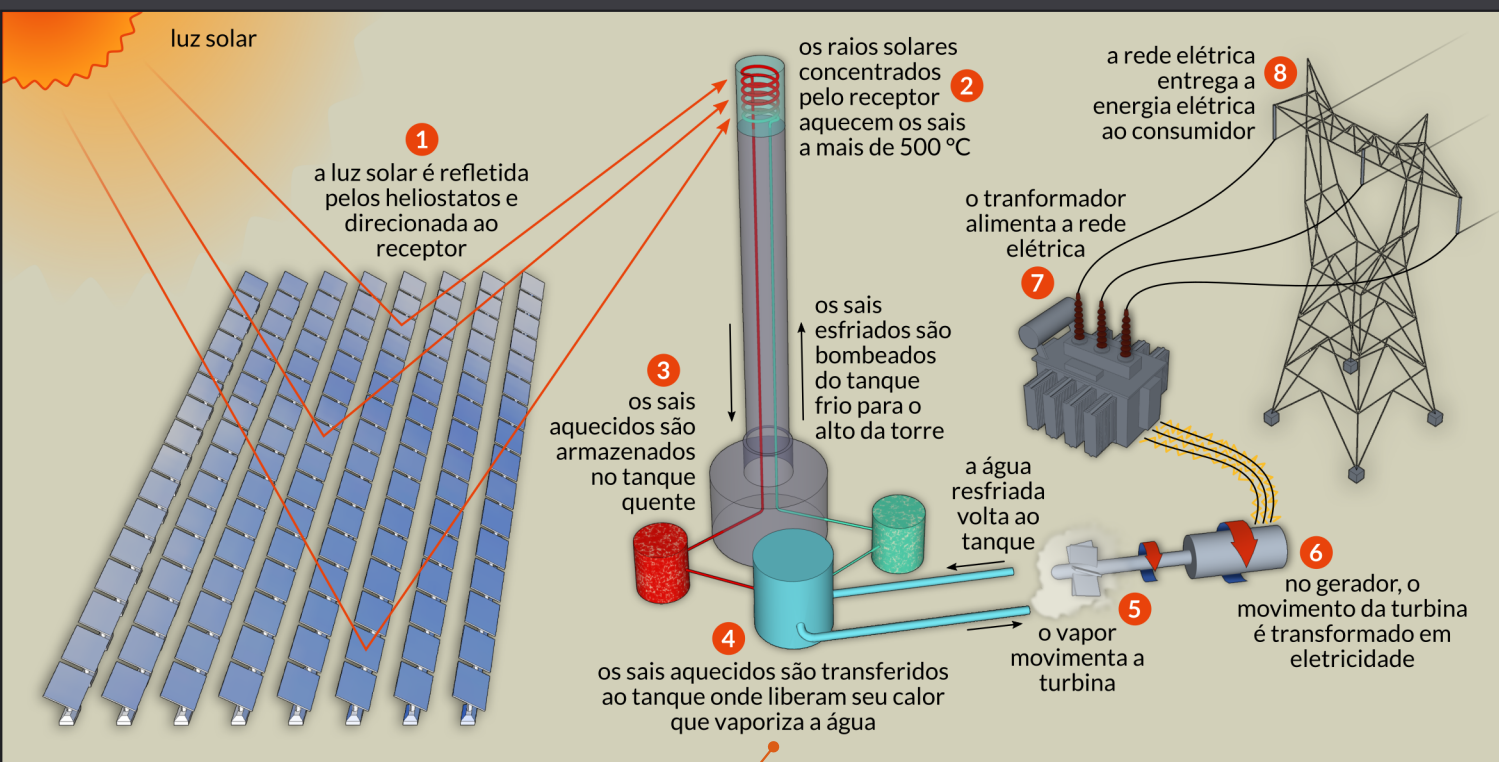
Exemplos de sistemas coletores solares para aquecimento de água a baixas temperaturas, com aplicação de tecnologias diferenciadas.

Energia Solar

Formas de aproveitamento

O método **indireto** de aproveitamento da energia solar, por sua vez, requer uma ou mais etapas até que o produto final esteja disponível para uso. Sistemas heliotérmicos são exemplos de sistemas indiretos de geração de eletricidade, pois a energia solar é primeiramente convertida em energia térmica para então ser convertida em eletricidade. A radiação solar é concentrada por

meio de painéis refletores que dispõem de um sistema de posicionamento ativo e direcionada para tubos contendo um fluido (gás ou líquido) que será aquecido. Esse fluido superaquecido, em uma segunda etapa do processo, aquece e vaporiza a água para acionar turbinas onde a energia cinética será convertida em eletricidade.



A geração heliotérmica utiliza o vapor produzido por um sistema de aquecimento solar para movimentar turbinas e gerar eletricidade.

Existem algumas tecnologias diferentes no que concerne aos concentradores, tendo cada uma delas suas vantagens e desvantagens. Um estudo específico apontará a tecnologia que melhor se adequa a cada situação.

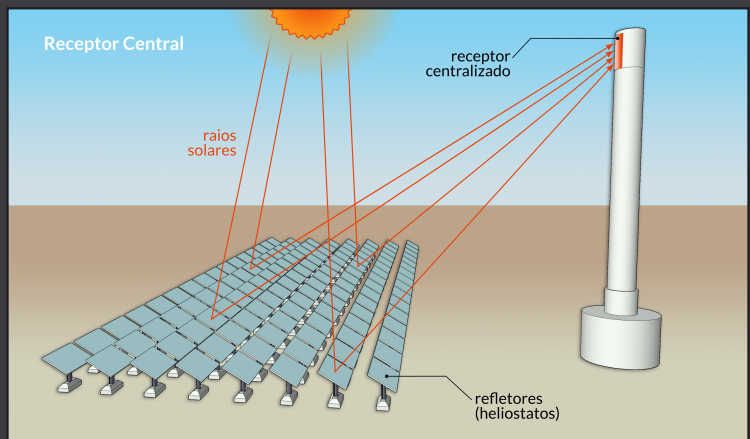
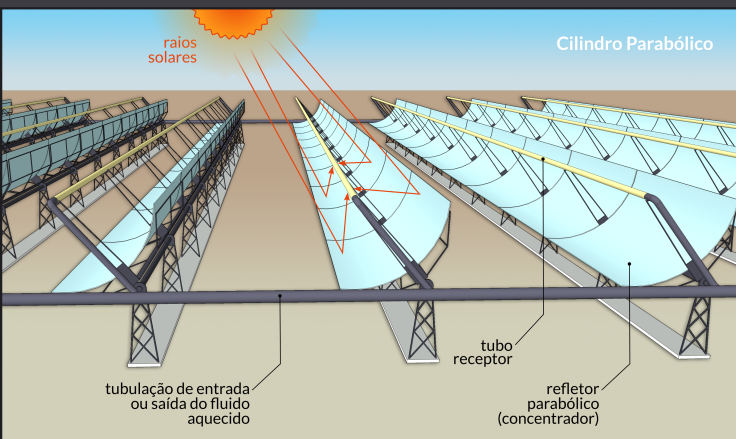
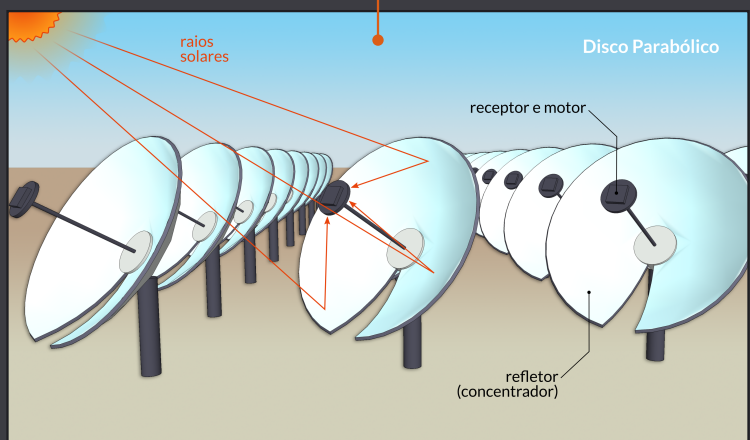
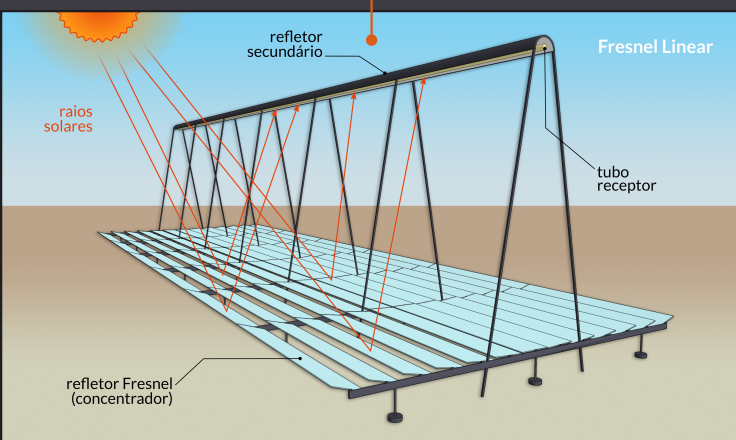
Energia Solar

Formas de aproveitamento

Principais sistemas de concentradores de radiação solar.

Sistemas Lineares

Sistemas Pontuais

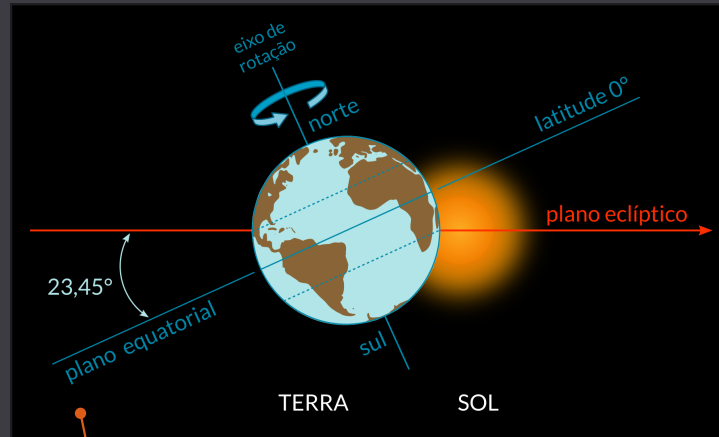


Energia Solar

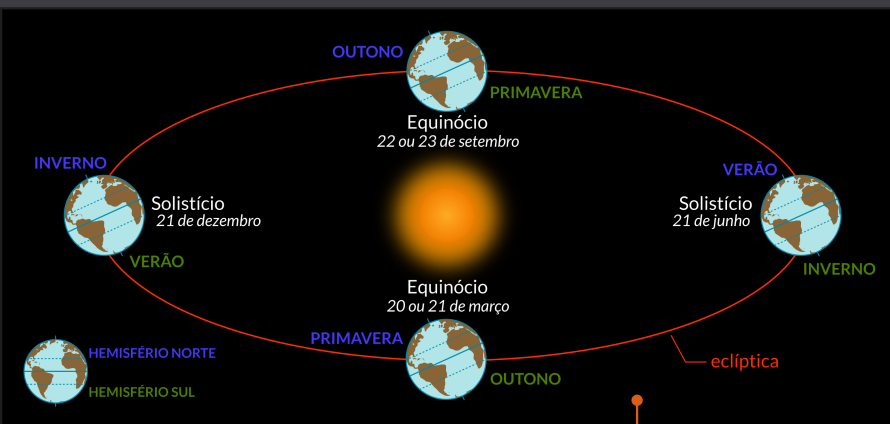
Quanta energia solar está disponível

A partir da nossa rotina diária, é bastante intuitivo compreender que a quantidade disponível de energia solar apresenta variações não só ao longo do tempo como também do espaço. Para que o aproveitamento dessa fonte de energia limpa seja viável técnica e economicamente, é necessário compreender os aspectos que influenciam sua disponibilidade e variabilidade tanto sob o ponto de vista temporal (ao longo do dia e dos meses) quanto do ponto de vista geométrico-espacial (em relação à posição geográfica).

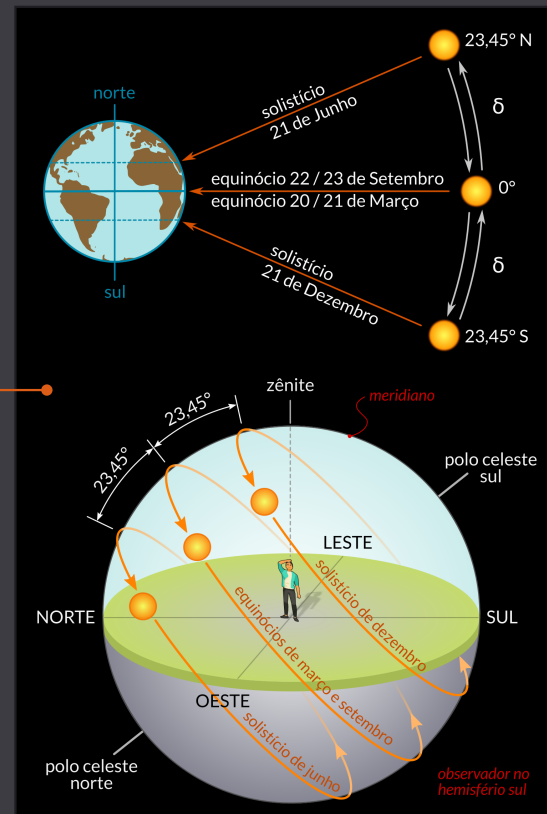
A posição relativa entre o Sol e a Terra determina o ciclo diário e anual. O ciclo anual ocorre como consequência da inclinação de 23,45 graus do eixo axial da Terra em relação ao plano orbital do planeta em torno do Sol.



O plano eclíptico é definido pela órbita da Terra em torno do Sol, conhecida como movimento de translação. Num segundo movimento, a Terra gira sobre seu próprio eixo, o eixo de rotação, com inclinação de 23,45° graus em relação ao plano eclíptico.

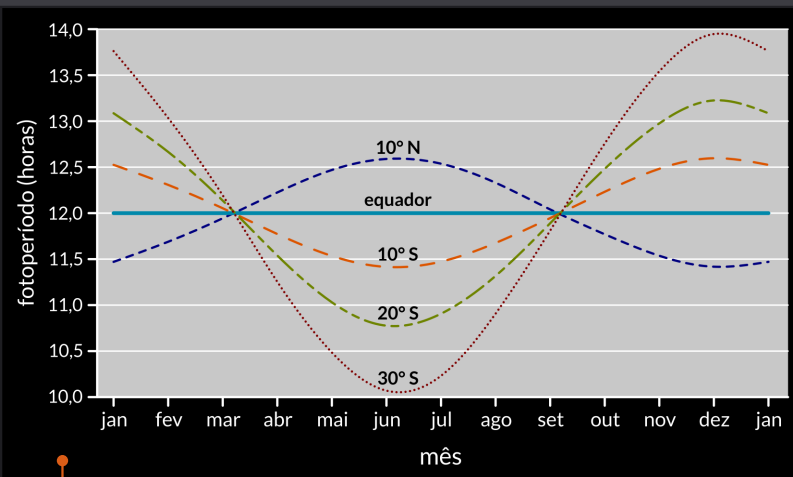


A inclinação do eixo da Terra leva às diferenças na duração do dia ao longo do ano e às estações. O número de horas diárias de luz do Sol (fotoperíodo) está intrinsecamente relacionado às estações do ano. Por convenção astronômica, as estações são determinadas pelos solstícios e pelos equinócios. O solstício é o momento em que o Sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação em latitude medida a partir do Equador. O equinócio é o instante em que o Sol, em sua órbita aparente, cruza o Equador terrestre. No hemisfério Sul, o verão ocorre quando o polo Sul está voltado para o Sol e o inverno ocorre quando o polo Sul está voltado para a direção oposta à do Sol.

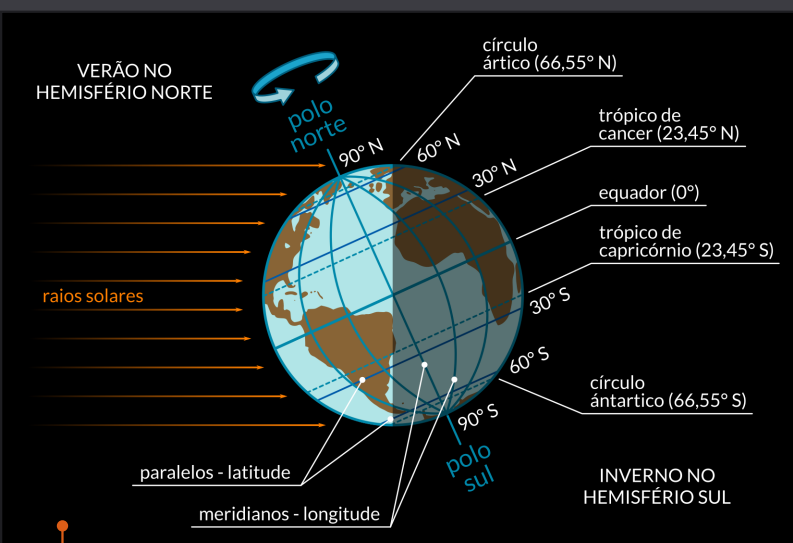


Energia Solar

Quanta energia solar está disponível



O fotoperíodo ou período de tempo entre o nascer e o por do Sol pode ser calculado facilmente para qualquer local e estação do ano. Pode também ser obtido em diversas fontes de informação, incluindo jornais diários, noticiários de televisão ou rádio e sítios da Internet. Além da duração do fotoperíodo, a geometria de iluminação do sistema de conversão de energia (coletor solar ou painel fotovoltaico) depende intrinsecamente da posição do Sol no céu.



Os conceitos de latitude e longitude são essenciais para compreender as relações geográficas de posicionamento de qualquer ponto na superfície terrestre.

A condição ideal para o aproveitamento da energia solar é aquela onde a tecnologia escolhida para a conversão da energia solar em eletricidade ou calor esteja posicionada de forma a permanecer iluminada pelo Sol pelo maior tempo possível ao longo do dia. Como a posição do Sol no céu muda constantemente, para que essa condição seja atendida é necessário um rastreador solar de forma que a tecnologia de conversão possa acompanhar o movimento do Sol. O rastreador realiza um procedimento similar ao dos Girassóis que têm a face de sua flor sempre voltada para o Sol, acompanhando seu movimento diário.

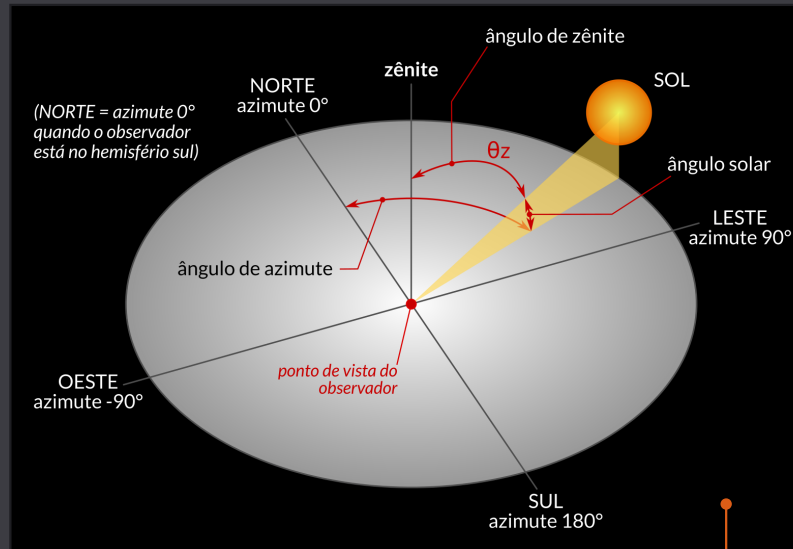
No entanto, o sistema de rastreamento possui um custo relativamente alto apesar de ser uma tecnologia bastante conhecida e simples, o que pode impactar principalmente plantas de conversão da energia solar com grandes áreas. Para reduzir custos sem inviabilizar um empreendimento solar, torna-se necessário determinar a inclinação do sistema de conversão em relação ao solo e a direção para a qual o sistema estará apontando com base no posicionamento do Sol ao longo dos dias e meses do ano. No Brasil, em geral, o sistema de conversão solar deve estar voltado para o Norte e inclinado em ângulo próximo ao da latitude do local de instalação (o Brasil está localizado quase que totalmente no hemisfério Sul).

Outra questão é a possibilidade de sombreamento por obstáculos que estejam entre a posição do Sol no céu e o local de interesse para instalação/operação do sistema de aproveitamento solar. O sombreamento pode ser causado por obstáculos naturais como montanhas, árvores e nuvens. Obstáculos artificiais como edifícios e torres também podem afetar

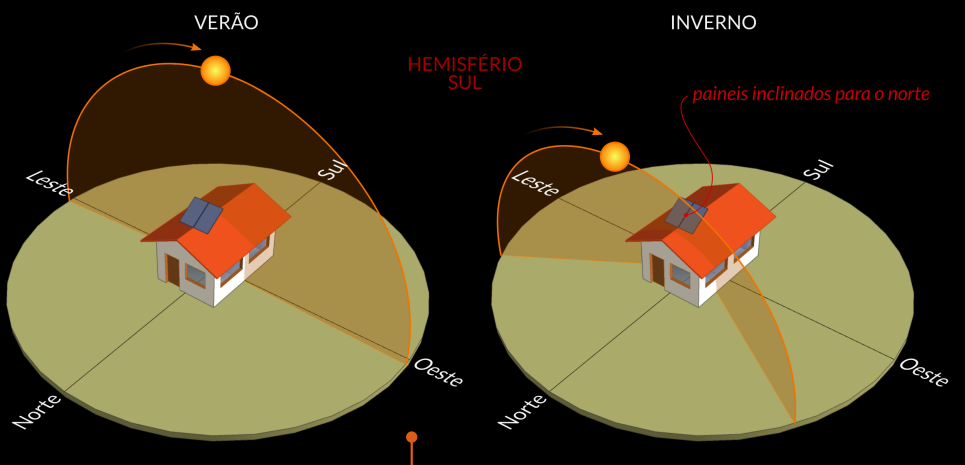
Energia Solar

Quanta energia solar está disponível

significativamente a disponibilidade de energia solar e inviabilizar o seu aproveitamento sob o ponto de vista técnico e econômico. Há muitos recursos e ferramentas computacionais desenvolvidos para prever a posição do Sol em determinado horário, calculando os ângulos zenital e azimutal, o que possibilita avaliar a ocorrência de sombreamento por obstáculos em geral. A determinação do sombreamento causado por nuvens é mais complexa. As nuvens não são fixas em relação à superfície. Estão em movimento na atmosfera em razão de fenômenos climáticos ou meteorológicos.



A compreensão geométrica e espacial permite conhecer a posição do Sol em relação a qualquer ponto na superfície terrestre e descrever numericamente a variabilidade sazonal do período de iluminação da superfície pelo Sol.



Como a maior parte do território brasileiro está localizada no hemisfério Sul, os painéis solares deverão ter uma inclinação mínima igual à latitude local e estar voltados para o Norte. Assim, um painel instalado na cidade de São Paulo precisará estar a pelo menos 23,45° em relação ao plano horizontal, com a face direcionada para o Norte. São Paulo encontra-se no Trópico de Capricórnio.

Conhecer a geometria de insolação e a quantidade de sombreamento a que as tecnologias de conversão estarão sujeitas num dado local é importante, mas não suficiente para explicar a variabilidade da energia solar que incide na superfície. Há mais um fator relevante e preponderante na disponibilidade do recurso energético solar: a atenuação da radiação solar causada pela atmosfera.

Energia Solar

Quanta energia solar está disponível

A atmosfera possui um papel primordial na manutenção da vida pois funciona como um “cobertor” protetor que evita a incidência na superfície terrestre de radiações prejudiciais e garante a manutenção de temperaturas confortáveis para a vida no planeta. O principal fator atmosférico de atenuação da radiação solar é a presença de nuvens que pode atenuar totalmente a irradiação solar direta que chega à superfície, restando apenas a irradiação difusa (aquela fração da energia solar que é espalhada em todas as direções pela atmosfera).

A composição dos gases atmosféricos e a presença de poluentes lançados para a atmosfera também reduz a intensidade da energia que atinge a superfície. Assim, regiões urbanas e metropolitanas apresentam uma disponibilidade de energia solar com características distintas de regiões rurais ou pequenos municípios onde a atmosfera é, geralmente, mais “limpa”. Mas as queimadas utilizadas em práticas agrícolas em diversas regiões do Brasil lançam grande quantidade de gases e partículas poluentes na atmosfera que possuem propriedades óticas que podem atenuar bastante a energia solar que chega à superfície mesmo em áreas menos povoadas.

Para dimensionar de forma bastante aproximada o efeito da atmosfera, a quantidade de energia solar que chega ao solo é cerca de 60% a 70% da que atinge o topo da atmosfera (cerca de 100 km acima do solo) em um dia de céu claro (sem nebulosidade). Em dias nublados ou com muita turbidez (pouca transparência atmosférica), a posição do Sol não pode ser identificada porque não há incidência de irradiação direta e a energia solar é atenuada para valores da ordem de 30% do valor incidente no topo da atmosfera.

Fica claro, desta forma, que a energia solar incidente na superfície, apesar de bastante elevada, está sujeita a diversos fatores que

provocam uma variabilidade muito grande na disponibilidade desse recurso. Surge então a pergunta: como então podemos ter certeza de que o aproveitamento do recurso solar pode contribuir para atender a demanda de energia de forma segura? Para avaliar e compreender a viabilidade técnica do aproveitamento da energia solar é primordial conhecer a quantidade de energia solar que incide no local de interesse. Existem algumas bases de dados de energia solar que possibilitam a avaliação preliminar da quantidade de energia solar recebida num ponto qualquer do território brasileiro. Dentre elas destacamos aqui a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar produzida pela colaboração técnico-científica entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e Universidades brasileiras e internacionais.

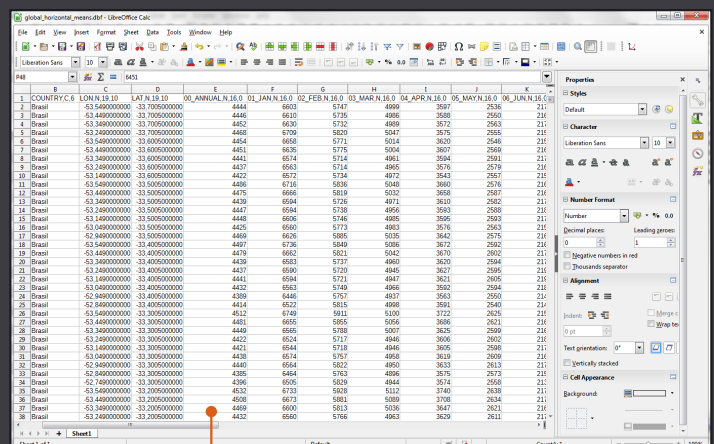
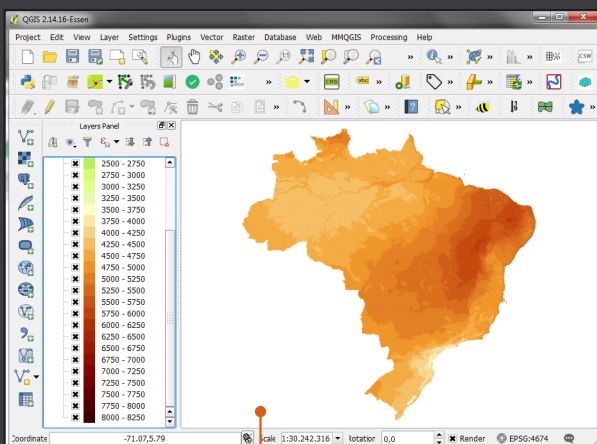
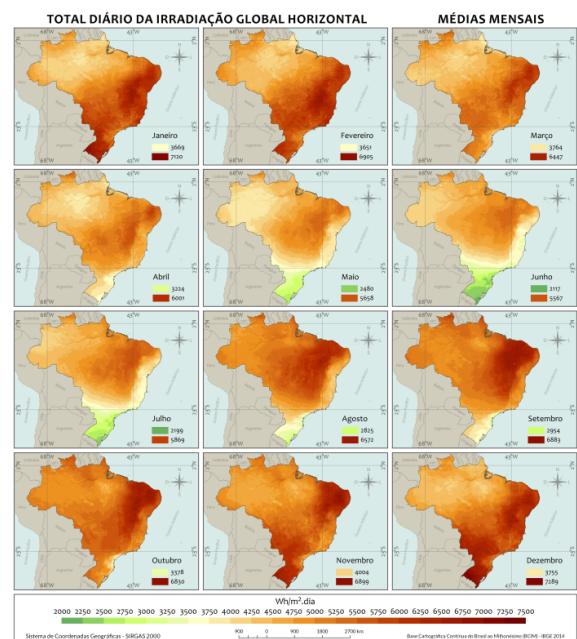
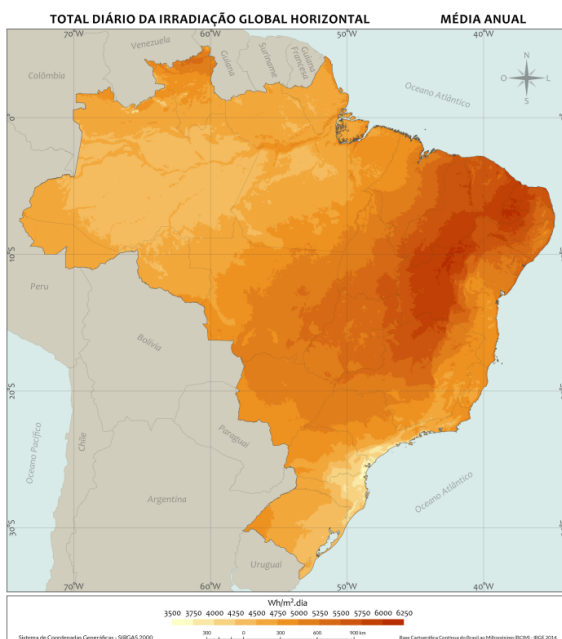
As informações disponíveis no Atlas Brasileiro de Energia Solar são apresentadas na forma de tabelas e mapas georeferenciados com valores médios mensais do total diário de energia solar que incide em áreas com dimensões de 10 km x 10 km ao longo de todo o território brasileiro. Os dados foram produzidos com uso de um modelo computacional que simula os processos de atenuação da energia solar ao longo de seu percurso na atmosfera até incidir na superfície. Para simular a atmosfera, o modelo utiliza dados meteorológicos coletados em estações de superfície e dados de satélite que permitem avaliar a nebulosidade.

Os valores presentes no Atlas Brasileiro de Energia Solar apresentam discrepância bastante reduzida (menor que 5%) quando comparados a valores médios observados por equipamentos de monitoramento da energia solar instalados na superfície. Esse é um aspecto muito importante a ser considerado: os valores apresentados no Atlas mostram a variabilidade sazonal dos valores médios da energia solar e não valores

Energia Solar

Quanta energia solar está disponível

O Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição apresenta potenciais médios de energia solar para todo o Brasil. Realizado pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), foi resultado de intensa colaboração entre o INPE, ao qual o laboratório pertence, e pesquisadores da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).



A base de dados do Atlas Brasileiro está no formato shapefile, composto essencialmente por três arquivos com as extensões shp, shx e dbf. O arquivo .shp será aberto por um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O arquivo .dbf pode ser aberto por uma planilha eletrônica, exemplo Excel ou Libreoffice Calc.

Energia Solar

Quanta energia solar está disponível

horários de energia solar na superfície num momento específico (hora ou dia do ano). Em consequência disso, o Atlas Brasileiro é uma ferramenta sólida e relevante para a compreensão do potencial para uso de energia solar num dado local em termos médios, não fornecendo informações sobre a variabilidade causada por condições meteorológicas momentâneas.

O Atlas possibilita afirmar que, se um local recebe uma incidência média elevada de energia solar, muito provavelmente haverá condições técnicas e retorno econômico de investimentos. Mas para quantificar a variabilidade de curto prazo, i. e., a variabilidade dentro de um dado dia ou de um dia para outro, um estudo detalhado do local deve ser realizado para que os efeitos de sombreamento por relevo, obstáculos e nuvens sejam quantificados de forma mais detalhada temporal e espacialmente. Esse estudo deverá levar em consideração as características locais de relevo, condições atmosféricas e dados de radiação solar coletados no próprio local de interesse. Para a instalação de grandes empreendimentos, a Agência Nacional de Energia Elétrica estabelece requisitos mínimos a serem atendidos pelos empreendedores como pelo menos 1 ano de coleta de dados em superfície no local a ser instalada a planta de geração solar. Dessa forma é possível investigar e demonstrar a viabilidade técnica e econômica.

Para empreendimentos de pequeno porte em geração distribuída, os requisitos são menores e relacionados apenas a aspectos de conexão com a rede, sem exigência de demonstração da capacidade de geração. No entanto, compreender a disponibilidade da energia com boa acurácia permite ao investidor em geração fotovoltaica, além de avaliar a viabilidade técnica do investimento, estimar o tempo de retorno do capital, seja ele um empresário do setor de

energia ou apenas um usuário que pretende aumentar a eficiência energética de seu imóvel.

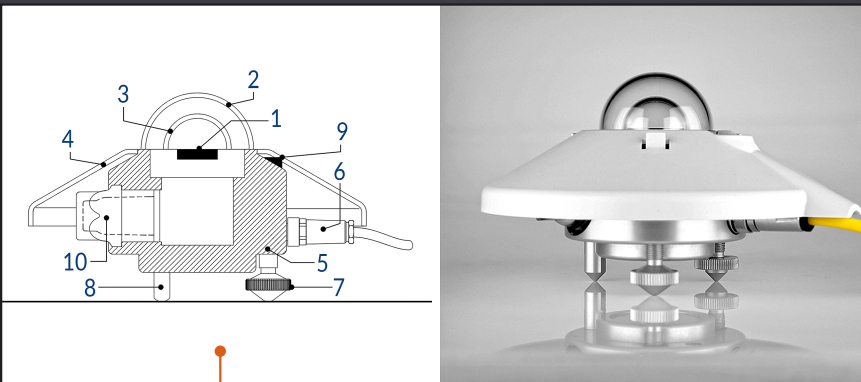
O monitoramento de energia solar na superfície, ou “in situ”, é geralmente realizado por instituições de pesquisa e de monitoramento meteorológico. As séries históricas assim geradas constituem uma base de dados muito importante para estudos da variabilidade da radiação solar, mas também servem para estudos de tendências, que são indicadores importantes em projetos solares. Esses dados também podem ser utilizados para estender sinteticamente série de aquisição de dados solarimétricos curtas para períodos mais longos.

O instrumento destinado a medir a irradiância solar é o piranômetro. Duas tecnologias distintas são normalmente utilizadas: os piranômetros termopares e os semicondutores. A primeira tecnologia utiliza uma termopilha como elemento sensível à quantidade de energia solar incidente. A termopilha exposta à insolação absorve a energia solar, aquece e converte a energia térmica em energia elétrica. A energia solar que incide no sensor é praticamente toda absorvida e convertida em calor, que, por sua vez, é convertido pela termopilha em uma diferença de potencial. A diferença de potencial produz uma corrente elétrica proporcional à quantidade de energia solar incidente na termopilha.

O piranômetro de termopilha constitui hoje o sistema de maior acurácia para medir a radiação solar. No entanto, são equipamentos que de custo elevado, da ordem de alguns milhares de dólares.

Energia Solar

Quanta energia solar está disponível



O piranômetro de termopilha é composto pelo sensor (1), por dois domos de quartzo com baixo teor de ferro para fim de isolamento térmico do sensor (2 e 3), um envoltório branco de proteção (4) para evitar a reflexão da radiação solar para a termopilha, um corpo metálico (5), cabos de conexão elétrica para o sinal gerado pela termopilha (6), uma base regulável (7), uma fixa (8), um nível de bolha para posicionamento na horizontal (9) e um sistema de remoção de umidade substituído periodicamente (10). O instrumento possui sensores de temperatura do corpo e do domo para correção das medições da termopilha e um ventilador (ou aquecedor) destinado a manter a temperatura do conjunto estável ao longo do dia.

Imagem: Kipp&Zonen (2016).

Uma alternativa de menor custo são os piranômetros que fazem uso do efeito fotovoltaico que ocorre em materiais semicondutores, o mesmo fenômeno utilizado nas células fotovoltaicas para geração de eletricidade. O piranômetro semicondutor utiliza um fotodiodo que converte diretamente a radiação solar em energia elétrica. A diferença de potencial é convertida em uma corrente elétrica proporcional à energia solar incidente. Contudo, esses equipamentos apresentam menor acurácia que os de termopilhas. Por conta disso, os piranômetros semicondutores são considerados equipamentos de segunda classe. Estudos mostram que os piranômetros semicondutores podem produzir dados de radiação solar global com incertezas mais elevadas em condições de céu claro do que em condições de céu totalmente nublado como decorrência de suas características físicas de absorção da energia solar. Esse fato implica em estimativas de radiação solar direta (conhecida como DNI na linguagem do setor) superestimadas em cerca de 5% em situações de céu claro.



Apesar de serem classificados como equipamentos de segunda classe, os piranômetros de fotodiodo são mais robustos e apresentam menor custo do que os piranômetros de termopilha. Essas características os tornam atraentes para certas aplicações onde os requisitos de precisão e acurácia não são tão relevantes, tais como em projetos de pequeno porte para geração distribuída.

Imagem: Kipp&Zonen (2016).

Energia Solar

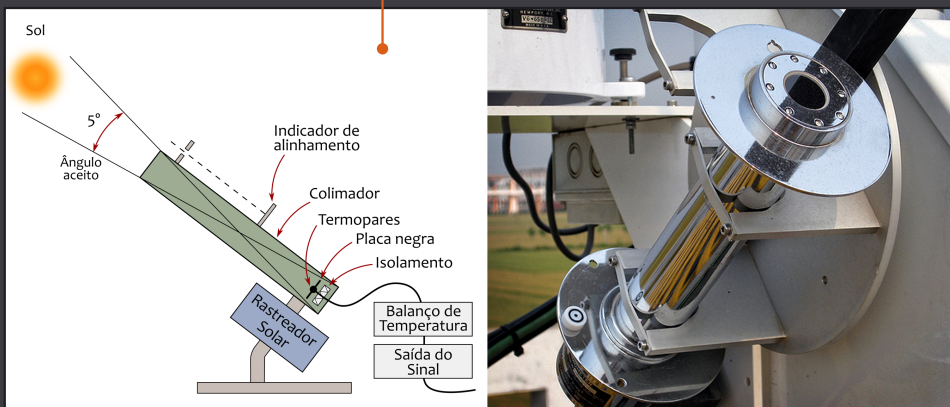
Quanta energia solar está disponível

O pireliômetro é um radiômetro que emprega o mesmo princípio de medição da luz solar utilizado nos piranômetros de termopilhas, porém é dotado de um colimador para que somente a fração da radiação solar que vem diretamente do Sol (DNI, Direct Normal Irradiation) até o local de monitoramento seja medida.

O pireliômetro deve ser utilizado em conjunto com um sistema rastreador solar para que esteja sempre direcionado para o Sol.

O colimador tem um campo de visada padrão internacional de 5° de ângulo sólido. Na sua borda frontal possui um pequeno orifício que projeta a luz solar sobre um ponto marcado na borda inferior do mesmo, permitindo, deste modo, que o operador verifique diariamente o correto alinhamento do equipamento com a direção do Sol e, conseqüentemente, a qualidade das observações realizadas.

Imagem: Kipp&Zonen (2016).



A aquisição de dados da radiação solar difusa só pode ser realizada com a supressão do feixe de radiação solar direta (DNI). Duas técnicas são comumente empregadas quando a aquisição de energia solar difusa é necessária: o anel de sombreamento e o rastreador solar com ocultador esférico.

O anel de sombreamento é uma cinta circular ou semicircular que se adapta ao suporte do piranômetro de tal forma que, durante a trajetória do Sol na abóboda celeste (eclíptica), a sombra do anel esteja sempre projetada exatamente sobre o elemento sensor. O anel deve ser ajustado periodicamente para compensar as mudanças da elevação solar durante o ano. Embora relativamente barato e simples, este equipamento apresenta a desvantagem de encobrir parte da radiação solar difusa que incidiria no elemento sensor, pois o

anel sombreador possui área bem maior do que a necessária para sombrear apenas o sensor.

Mais moderno, contudo bem mais custoso, o rastreador solar é um sistema robotizado com um firmware interno que, uma vez posicionado corretamente em relação à posição do Sol na abóboda celeste e alimentado com a posição geográfica e a data/horário do ajuste, passa a seguir de forma automática a trajetória do Sol. Um grupo de esferas pintadas de negro fumo acoplado ao rastreador solar permite projetar a sombra exatamente sobre o elemento sensor, evitando assim o problema relacionado ao encobrimento parcial do céu causado pelo anel de sombreamento. Muito preciso, o sistema robótico conta com um detector de Sol que permite ao rastreador realinhar-se automaticamente em caso de desalinhamento. Porém, isso só ocorrerá em condições de céu claro.

Energia Solar

Quanta energia solar está disponível

Os sistemas sombreadores são utilizados nas medições de radiação difusa ou radiação de onda longa. Tanto o anel de sombreadimento como o ocultador esférico com rastreador solar precisam estar perfeitamente alinhados com o Sol.

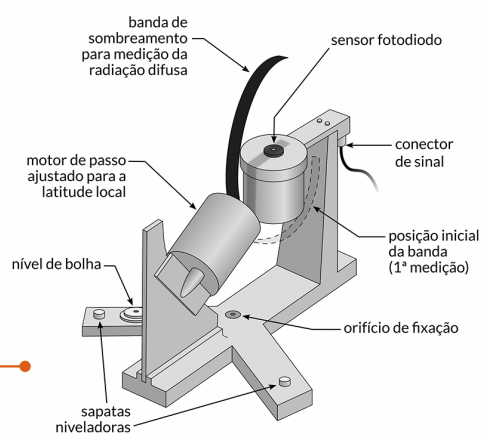
Imagens: Rede SONDA de dados ambientais.



Os radiômetros de banda rotativa são usados frequentemente para avaliação do recurso solar em locais remotos, devido a sua maior robustez, seu baixo consumo de energia e custo reduzido em contraste com conjuntos de pireliômetros e sistemas com rastreador solar. Trata-se de um piranômetro fotodiodo, tendo portanto as desvantagens já apresentadas anteriormente. Um motor de passo gira uma banda de sombreadimento para obter alternadamente medidas de radiação solar global horizontal e difusa. Por subtração, e levando-se em conta o ângulo zenital, pode-se obter a DNI. Devido às limitações do piranômetro fotodiodo, os valores de DNI obtidos com uso deste equipamento apresentam desvios da ordem de 5% em condições de céu claro.

O radiômetro de banda rotativa infere a intensidade dos raios solares pela sucessiva medição da radiação global e difusa e em seguida calculando a diferença.

Imagem: NOAA/Earth System Research Laboratory.



Energia Solar

Quanta energia solar está disponível

A avaliação da cobertura de nuvens no céu é realizada rotineiramente pelos meteorologistas em todas as estações meteorológicas, nos horários sinóticos (00, 06, 12 e 18). Porém o método utilizado para tal medida possui, na realidade, uma grande componente subjetiva, já que depende do operador no turno. Para superar essa subjetividade e permitir o estudo da variabilidade temporal da cobertura de nuvens em escala de minutos, tem-se empregado tecnologias que utilizam câmeras CCD, conhecidas como "all sky".

Os dados coletados por essas câmeras passam por rotinas específicas para primeiro identificar a presença de nuvens sobre o local de interesse e em seguida determinar a fração do céu coberta por elas. As rotinas também avaliam a incerteza sobre essa fração, pois a identificação das zonas de transição entre céu aberto e nuvens é difícil de quantificar. Esse processo, além de remover a subjetividade dos dados observados pelos operadores das estações meteorológicas, obtém a variabilidade da cobertura de nuvens em intervalos de tempo bastante curtos.



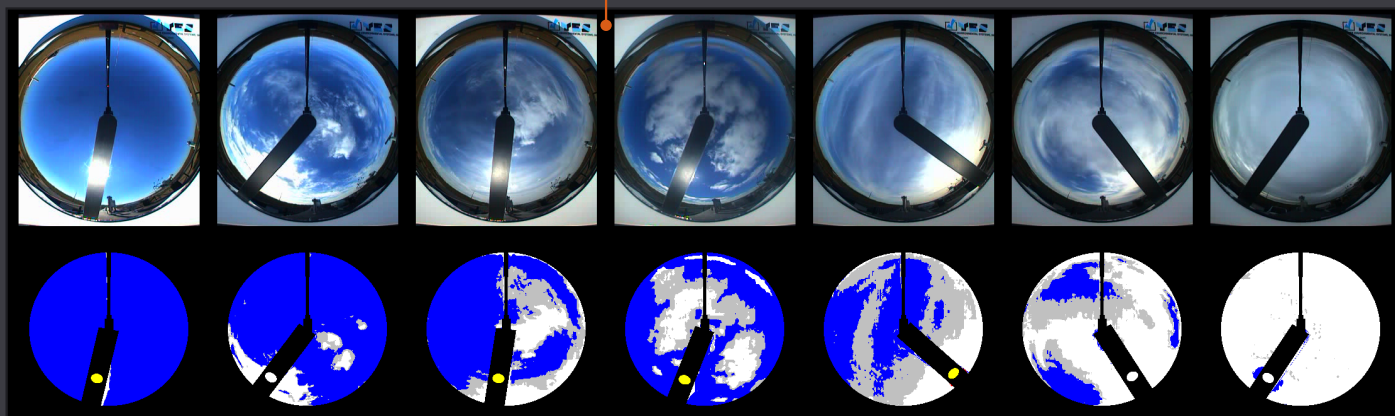
Modelos de imageadores tipo "All Sky" para medição de nebulosidade do céu: de imagem indireta (com espelho) e de imagem direta.

Imagens: rede SONDA de dados ambientais (indireta) e Alcor System (direta).



Rotinas computacionais têm critérios objetivos para mensurar a nebulosidade: imagem obtida pela câmera (em cima) e imagem processada e quantificada (embaixo).

Imagens: rede SONDA de dados ambientais.



Energia Solar

Quanta energia solar está disponível

A instalação dos equipamentos de coleta de dados em superfície deve atender alguns cuidados e requisitos para garantir a qualidade e confiabilidade dos valores medidos. As regras básicas que devem ser observadas são:

- O local deve ter visada desimpedida em todas as direções para evitar sombreamento dos sensores por obstáculos ou relevo;
- O local deve possuir infraestrutura de suporte operacional (alimentação elétrica, aterramento e proteção contra descargas elétricas, fácil acesso ao operador local de manutenção) e segurança a fim de evitar acidentes e ações de vandalismo quando os equipamentos estão em área pública;
- Deve-se evitar locais onde possam ocorrer alteração no uso da terra ao longo do experimento de coleta de dados (por exemplo plantações de árvores ou construção de novas edificações nas proximidades).

Quando a coleta de dados de superfície tem como foco o estudo/projeto de plantas fotovoltaicas, recomenda-se também adicionar à estação de monitoramento solar um piranômetro inclinado montado no mesmo ângulo que os painéis PV para monitorar o desempenho do sistema.

Uma estação meteorológica convencional com sensores de temperatura, vento e precipitação também é útil: poderá contribuir provendo dados que permitirão analisar o desempenho da futura planta e/ou da planta em operação.



Estação da rede SONDA instalada no município de Petrolina, Pernambuco, em parceria com a EMBRAPA Cerrado. A estação dispõe de sensores de irradiação global horizontal, direta normal, difusa e onda longa, assim como sensores de temperatura, humidade, precipitação, velocidade e direção do vento.

Imagens: rede SONDA de dados ambientais.

Energia Solar

Otimização da geração

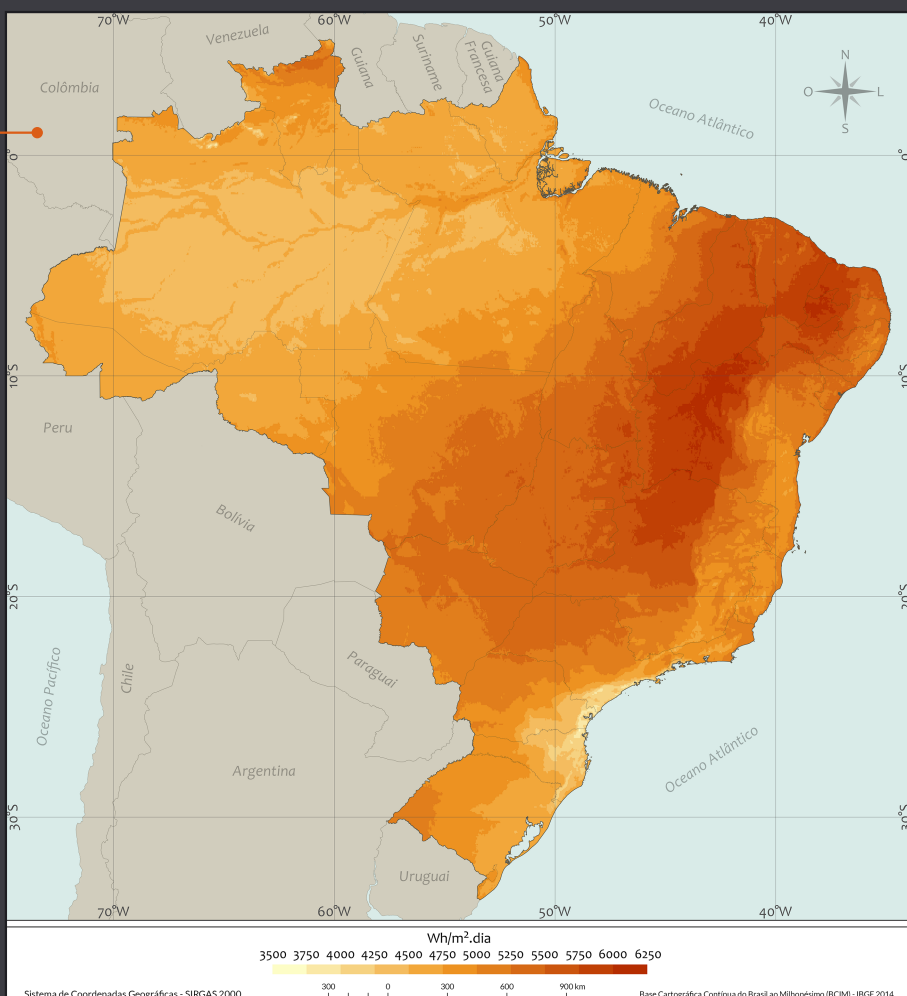
Vimos até aqui que diversos fatores influenciam a geração de eletricidade através de sistemas fotovoltaicos. Resumidamente, a geração fotovoltaica será afetada pelos fatores naturais (dia/noite e estação do ano), pela condição meteorológica e pela geometria de iluminação dos painéis fotovoltaicos. Quanto à geometria, é importante ressaltar que a geração de eletricidade será maior quando o sistema FV estiver voltado para a direção do Sol, ou seja, a radiação solar deve incidir perpendicularmente ao painel. Por essa razão os sistemas móveis, com rastreamento da posição do Sol, geram maior quantidade de eletricidade ao longo do tempo.

Para sistemas FV fixos, é necessário identificar a geometria de instalação mais eficiente para os objetivos do usuário. Se o objetivo é produzir a maior quantidade total de energia ao longo de todo o ano, a literatura técnica indica que o sistema FV deve ser orientado para o norte (quando no hemisfério sul) com inclinação próxima ao valor da latitude do local de instalação. Nessa configuração, a geração máxima de eletricidade será atingida no momento em que o Sol atingir o ponto mais alto no céu em cada dia do ano (meio-dia solar).

Média anual do total diário da irradiação no plano inclinado na latitude conforme resultados publicados no Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª Edição (2017).

No entanto, outras geometrias podem ser utilizadas na instalação dependendo do objetivo a ser alcançado. Se o usuário estiver interessado em produzir a maior quantidade de eletricidade no horário de seu próprio máximo consumo, a fim de reduzir seus gastos com a compra de eletricidade da concessionária de energia, ele poderá alterar a geometria de instalação de seu sistema PV considerando suas informações de consumo (curva de carga) e as condições ambientais e meteorológicas típicas da região onde a instalação será realizada.



Energia Solar

Otimização da geração

Para compreender a geração fotovoltaica em função da curva de carga do usuário, das condições meteorológicas e da geometria de instalação dos painéis solares e desenvolver uma metodologia de melhor aproveitamento foi implementado o projeto "Optimization of short-term solar energy variability (OSTSEV)". Por meio de intercâmbio Brasil/Alemanha, representados pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Leibniz Universität Hannover (Alemanha), com financiamento do Programa NoPa – Novas Parcerias da CAPES e o DAAD, o objetivo do projeto é, em outras palavras, resolver a questão sobre qual a geometria ótima para instalar os painéis solares de modo a obter a máxima geração de energia ao longo do dia exatamente no momento de maior demanda.

O que é a curva de carga?

A curva de carga é o registro horário, em um período diário, das demandas de capacidade, podendo ser, excepcionalmente para período semanal, mensal ou anual (fonte: ANEEL). A integral da curva de carga de um determinado dia representa o consumo diário de energia elétrica nesse mesmo dia.

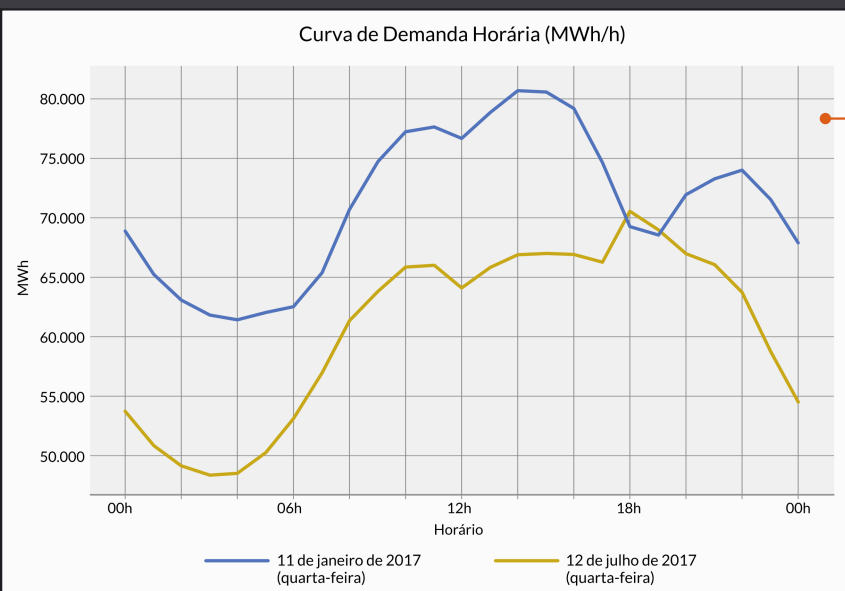
Um parâmetro bastante utilizado no setor elétrico é denominado **fator de carga** que é definido como sendo a razão entre a demanda média e a demanda máxima de eletricidade da unidade consumidora ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado (Resolução Normativa N° 414 – ANEEL).

Diversos fatores determinam a curva de carga. Dentre eles podemos citar:

- Escala e uso: sistemas residenciais, comerciais ou industriais;
- Localização geográfica e clima: variabilidade da temperatura ao longo do ano, tempo de luz natural disponível, etc.;
- Sistemas de aquecimento: a gás ou elétricos.

O gráfico representa a curva de carga horária do sistema elétrico brasileiro (considerado todo o Sistema Interconectado Nacional - SIN) em dois dias específicos: o primeiro, linha azul, durante o verão (11/01/2017, quarta-feira) e o segundo, linha amarela, durante o inverno (12/07/2017, quarta-feira). É possível observar o horário do dia em que o consumo de eletricidade é maior, tanto no verão como no inverno. No entanto, os consumos de energia são distintos nos dias quentes de verão e nos dias com temperaturas mais amenas observados no inverno. Os dois dias representados são dias úteis de modo que a atividade econômica pode ser considerada bastante similar. No dia mais frio, o consumo de eletricidade atinge o valor máximo no início da noite associado ao uso de aquecimento elétrico de água para higiene pessoal, enquanto que no dia mais quente, a carga máxima ocorre no meio do período vespertino em razão da maior demanda de ar-condicionado para a climatização de ambientes durante o horário do dia com temperaturas mais elevadas.

Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018).



Energia Solar

Otimização da geração

Metodologia

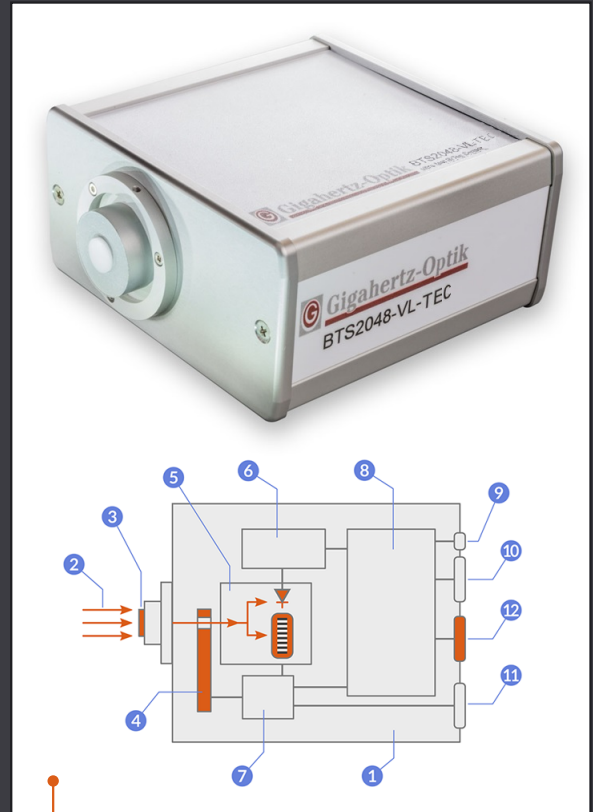
Nos experimentos de campo realizados pelo projeto OSTSEV, foram utilizados equipamentos de alta precisão para garantir que os pesquisadores envolvidos pudessem avaliar a configuração ótima do sistema de geração fotovoltaica.

Um espectrorradiômetro unidirecional e um arranjo de células fotovoltaicas dispostas em diferentes inclinações e ângulos azimutais foram instalados para investigar a energia solar incidente no local de estudo e o desempenho do sistema fotovoltaico.

O espectrorradiômetro, modelo BTS2048-VL, é um sensor capaz de medir a irradiância espectral (em $\text{Wh/m}^2\cdot\text{nm}$) em diferentes intervalos de comprimento de onda do espectro solar. A ele é acoplado um dispositivo de varredura espacial programável, sendo assim possível determinar o número de pontos e o intervalo de tempo entre as medidas. Esse equipamento permite investigar a influência da atmosfera na atenuação da radiação solar.

Quanto maior a quantidade de particulados e gases poluentes presentes na atmosfera, maior a alteração do espectro de radiação solar incidente na superfície. As alterações ocorrem de duas formas: redução da energia total e alteração da composição espectral da radiação solar.

Espectrorradiômetro acoplado a uma unidade de posicionamento (PTU) na plataforma do Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMUK) da Universidade de Hannover.



1. Corpo do espectrorradiômetro modelo BTS2048-VL;
2. Luz incidente;
3. Difusor de cosseno preciso;
4. Disco com filtros OD1, OD2 e "shutter";
5. Sensor BiTec com fotodiodo Si e espectrômetro com matriz CCD;
6. Microprocessador do fotodiodo;
7. Microprocessador do sensor de controle CCD;
8. Microprocessador para processamento de dados e comunicação;
9. Fonte de tensão CC;
10. Interface USB 2.0;
11. Gatilho Entrada/Saída;
12. Interface de ethernet de alta velocidade.

Fonte: Gigahertz-Optik GmbH (2018).

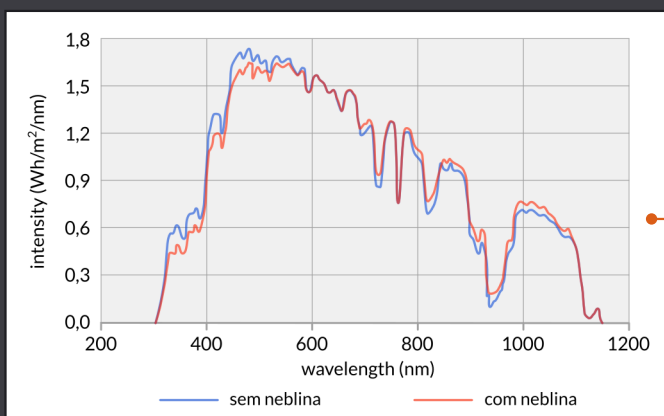
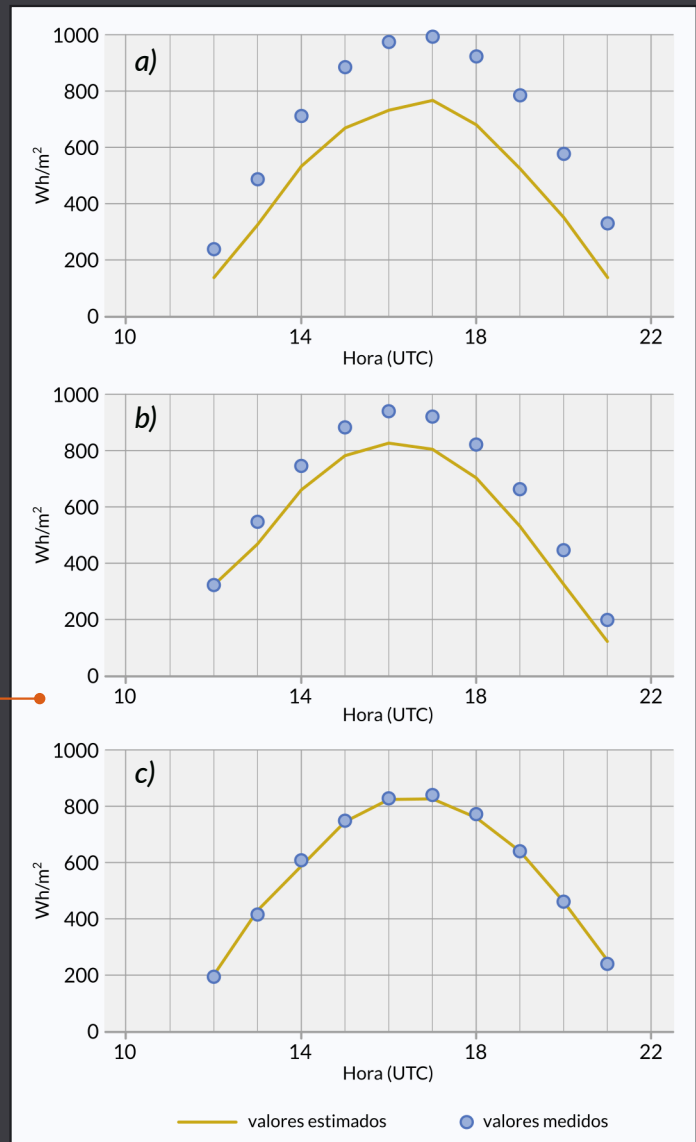
Energia Solar

Otimização da geração

Observações feitas em regiões onde há ocorrência de queimadas de matéria orgânica ligadas à produção agrícola no interior do Brasil, lançando aerossóis na atmosfera, mostram uma atenuação significativa da energia solar incidente na superfície. Estudo desenvolvido em Cingapura com a participação dos pesquisadores brasileiros também apresentou alteração espectral na faixa de interesse para exploração de energia solar quando analisados períodos do ano com e sem a presença de neblina.

Pode-se observar a variação da irradiação global estimada e medida no transcorrer de um dia de céu claro nas estações solarimétricas localizadas em Mina Potosi (a), Cuiabá (b) e Reserva Jarú (c). O dia em estudo nas duas primeiras estações encontra-se no período de máxima ocorrência de queimadas, ou seja, fim de agosto início de setembro, e o dia em estudo na Reserva Jarú está fora da estação seca, não havendo queimadas nas proximidades. Nos gráficos à esquerda, os valores medidos são representados por círculos azuis e os valores estimados são representados por linhas amarelas.

Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2, p. 145-159, (2004).



Em Cingapura, são encontradas na neblina partículas de fumaça de vários tamanhos, as menores estando abaixo de 10nm. Essas partículas causam espalhamento e absorção adicionais da irradiação, o que leva à alteração observada no espectro.

Fonte: IEEE Journal of Photovoltaics, v. 4, n. 6, (2014).

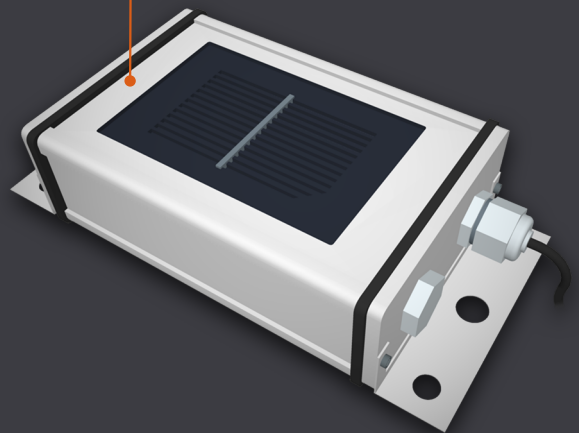
Energia Solar

Otimização da geração

O arranjo de painéis fotovoltaicos em diferentes inclinações e condições ambientais idênticas permite a avaliação de resultados individualizados.

O arranjo consiste em células solares de silício com especificações idênticas dipostas em diferentes ângulos zenitais (ZE) e azimutais (AZ) entre si. A partir da corrente gerada é possível determinar qual a irradiância recebida e a energia gerada por cada unidade.

Imagens: IMUK da Universidade de Hannover.



Energia Solar

Otimização da geração

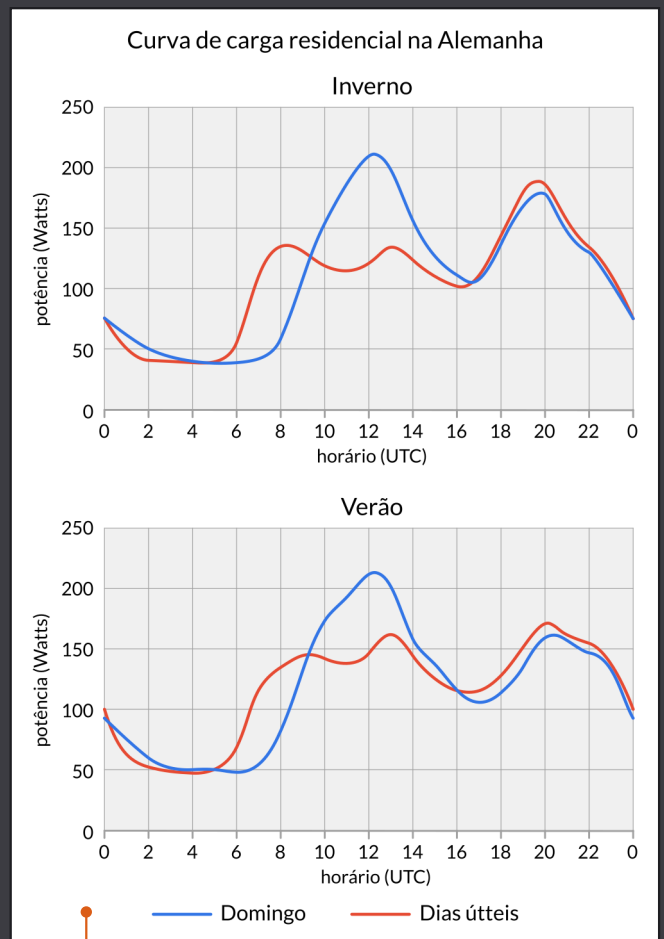
Resultados Alcançados

Serão apresentados a seguir, em forma de gráficos e tabelas, os resultados obtidos durante os trabalhos realizados no projeto OSTSEV na Universidade de Hannover.

Como visto anteriormente, a curva de carga do sistema está associada ao perfil de consumo de energia elétrica ao longo de um determinado período. Considerando os horários de pico observados nas curvas de carga da Alemanha, podemos ajustar o nosso sistema de geração solar para atender as demandas identificadas?

Para instalações de painéis solares na Alemanha (hemisfério Norte), o método tomado como referência é alinhar os painéis para o Sul com inclinação vertical igual à latitude do local.

No decorrer da campanha de medições realizadas no estudo, foram obtidos dados de geração das células solares fotovoltaicas e dados do espectroradiômetro anteriormente descrito, ambos em dezoito combinações geométricas diferenciadas, durante os dias 05 e 06 de maio de 2017 em Hannover, latitude $52,37^{\circ}$ N. Os dados coletados permitiram a análise de desempenho de cada uma dessas configurações.

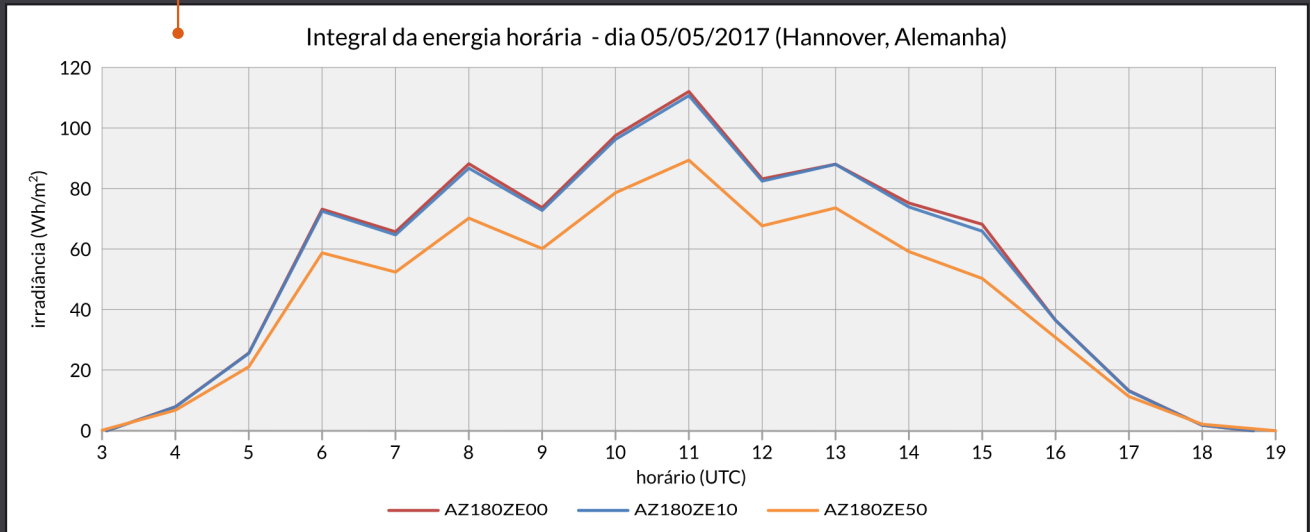


Nos gráficos estão identificadas as curvas de carga doméstica na Alemanha, nos períodos de verão e inverno, em dias úteis (vermelho) e domingos (azul). Nos dias úteis, identificamos três picos de consumo em ambos os períodos: no inverno, os picos ocorrem às 8:00, 13:00 e 20:00 UTC, enquanto que no verão ocorrem às 9:00, 13:00 e 20:00 UTC. Aos domingos os picos de carga ocorrem às 12:00 e 20:00 UTC.

Energia Solar

Otimização da geração

As curvas da integral de energia gerada em escala horária por sistemas FV durante o dia 05 de maio de 2017 foram obtidas em três geometrias distintas: AZ180ZE00 (azimute 180°, orientação Sul e ângulo zenital 0°), AZ180ZE10 (azimute 180°, orientação Sul e ângulo zenital 10°) e AZ180ZE50 (azimute 180°, orientação Sul e ângulo zenital 50°).



Comparando os valores das integrais horárias de energia gerada entre as 3:00 e 19:00 UTC para as 18 orientações das células solares, verificamos que as células direcionadas para o Sul e com inclinação entre 0° e 10° apresentam os maiores valores de geração para os horários de pico de consumo 9:00 e 13:00 UTC.

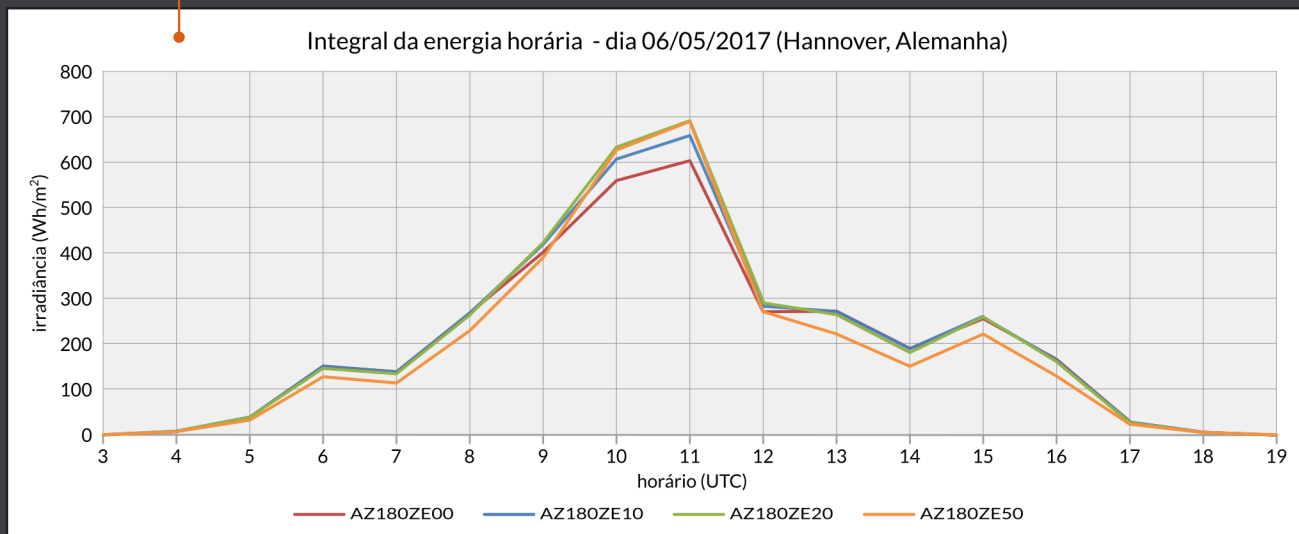
Dia 05/05/2017 - Hannover, Alemanha

Azimute	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	90,0	270,0	90,0	270,0	180,0	0,0	135,0	225,0	135,0	225,0
Zênite	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	45,0	45,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	45,0	45,0
Hora	Integral da Irradiância (Wh/m²)																	
3	5,1	5,1	4,9	4,5	4,9	4,6	4,1	3,4	4,0	4,2	1,9	2,1	0,6	0,8	0,5	0,7	4,5	4,6
4	21,7	21,5	20,7	19,5	18,8	17,7	16,0	13,7	17,4	17,6	9,2	9,8	8,2	8,7	8,0	8,3	17,8	17,8
5	65,5	64,9	62,7	59,5	56,0	53,0	48,2	41,6	52,0	53,1	28,3	30,3	28,6	28,6	28,2	29,0	53,5	53,3
6	69,2	68,1	65,8	62,4	58,4	55,0	50,0	42,9	53,8	56,5	28,5	31,9	29,4	30,1	28,2	30,5	55,0	56,2
7	86,6	85,2	82,5	78,4	73,3	69,0	63,0	54,2	67,9	70,3	36,3	40,0	37,8	38,5	36,7	38,6	69,5	70,1
8	76,3	75,2	73,1	69,7	65,4	61,7	56,4	48,7	60,8	61,4	32,9	35,0	33,9	33,4	33,1	34,3	62,4	62,1
9	89,3	88,1	85,8	81,7	76,5	72,1	65,9	56,9	71,0	72,9	38,5	41,6	40,1	39,7	39,2	40,6	72,8	73,0
10	109,8	108,4	105,2	100,0	93,2	87,7	80,0	69,0	86,3	91,2	46,8	52,5	48,9	50,5	47,3	50,7	88,0	90,0
11	88,2	87,5	85,2	81,3	76,2	72,0	65,9	57,0	69,9	73,6	38,1	42,9	40,4	40,4	39,2	41,3	72,1	73,2
12	90,1	89,9	87,9	84,0	78,8	74,6	68,4	59,3	71,2	74,6	38,6	43,0	42,1	39,3	40,4	42,9	74,1	75,6
13	75,6	74,8	72,4	68,8	64,4	60,9	55,7	48,3	62,5	60,3	34,8	34,3	34,3	36,6	34,3	33,8	62,6	60,5
14	69,9	67,3	63,7	59,4	54,8	51,0	46,1	39,4	55,1	59,2	31,0	35,1	27,4	37,6	28,3	29,8	52,7	54,1
15	44,1	44,1	43,2	41,4	39,2	37,1	33,8	29,2	33,9	37,5	17,8	21,8	20,1	18,1	18,6	21,3	36,0	38,2
16	16,2	16,0	15,5	14,8	14,5	13,7	12,5	10,7	13,3	13,4	7,3	7,6	6,6	7,0	6,6	6,8	13,8	13,7
17	2,9	2,9	2,8	2,7	3,3	3,1	2,7	2,3	2,3	2,5	1,0	1,2	0,4	0,3	0,3	0,5	2,9	3,0
18	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-0,1	-0,1
19	-0,9	-0,9	-0,8	-0,7	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-1,4	-1,5	-1,5	-1,5	-0,2	-0,2
Total	908,7	897,6	870,0	826,6	777,8	733,1	668,6	576,6	720,5	747,3	389,9	427,8	396,1	406,8	386,2	406,0	737,4	745,1
Máximo	109,8	108,4	105,2	100,0	93,2	87,7	80,0	69,0	86,3	91,2	46,8	52,5	48,9	50,5	47,3	50,7	88,0	90,0

Energia Solar

Otimização da geração

Durante o dia 06 de maio de 2017, foram também obtidas por sistemas FV as curvas da integral de energia gerada em escala horária nas mesmas três geometrias utilizadas no dia anterior, AZ180ZE00, AZ180ZE10 e AZ180ZE50, acrescidas da geometria AZ180ZE20.



Dia 06 de maio de 2017, a curva de maior magnitude no horário do primeiro pico de consumo, 9:00 UTC, refere-se aos ângulos AZ180ZE20 (azimute 180°, orientação Sul, ângulo zenital 20°). No segundo horário de pico, 13:00 UTC, as curvas AZ180ZE00 e AZ180ZE10 são praticamente iguais quanto à magnitude da irradiação solar incidente.

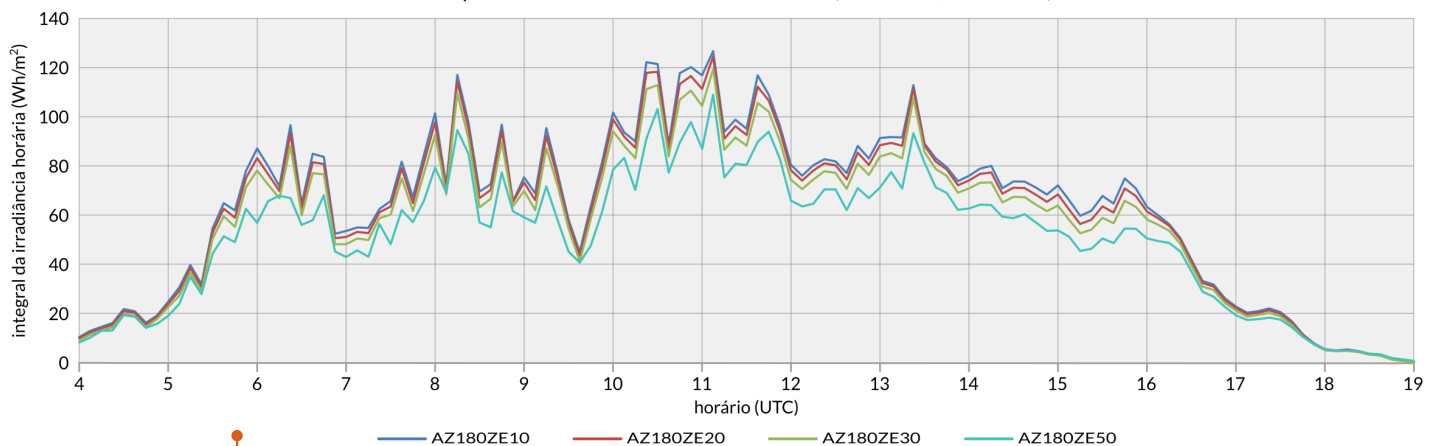
Dia 06/05/2017 - Hannover, Alemanha

Azimute	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	90,0	270,0	90,0	270,0	180,0	0,0	135,0	225,0	135,0	225,0
Zênite	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	45,0	45,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	45,0	45,0	
Hora	Integral da Irradiância (Wh/m²)																	
3	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,7	0,6	0,5	0,3	0,0	0,0	-0,3	-0,3	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	0,5	0,5
4	8,8	8,8	8,5	8,1	8,2	7,7	7,0	6,0	7,1	7,2	3,6	3,9	2,9	2,9	2,8	2,9	7,7	7,7
5	39,6	39,5	38,5	36,8	34,9	33,0	30,1	26,0	32,2	32,0	17,5	18,2	17,7	16,9	17,6	17,5	33,5	32,7
6	150,6	151,0	147,8	142,2	133,8	128,2	117,9	102,9	150,1	104,9	97,0	63,2	74,1	68,4	92,9	65,5	147,7	111,5
7	139,0	138,4	135,0	129,1	120,7	114,5	104,8	91,3	110,3	118,0	60,9	71,2	66,5	64,0	63,5	70,0	113,8	117,5
8	265,9	268,2	263,9	254,9	239,9	229,5	211,3	185,1	232,6	201,3	134,0	117,6	135,4	116,8	144,4	122,5	241,2	213,5
9	401,7	419,0	422,9	418,1	401,7	390,2	364,1	324,5	377,7	275,1	217,4	158,1	238,3	156,9	261,7	181,5	412,6	333,9
10	559,3	606,5	632,7	642,6	632,0	626,4	593,8	536,3	491,3	384,7	220,3	181,3	394,8	158,7	373,9	279,2	610,2	534,0
11	602,9	658,2	690,8	704,1	696,8	689,0	656,0	594,7	449,5	488,9	169,2	206,1	439,5	167,2	329,8	379,3	611,4	640,0
12	271,4	283,1	288,0	286,3	278,1	271,0	254,9	229,0	203,3	240,1	107,6	136,9	171,8	112,8	137,0	172,1	245,2	270,0
13	271,8	271,3	264,7	253,0	235,6	222,3	203,3	176,5	211,1	226,7	115,1	131,4	129,2	122,8	124,2	132,6	220,4	226,9
14	189,9	187,2	181,5	172,8	160,7	151,2	138,4	120,9	143,1	172,5	79,2	109,5	90,2	99,1	82,5	102,8	145,5	164,1
15	256,6	259,7	258,7	250,8	236,0	222,1	203,8	176,0	148,3	320,6	89,1	249,4	125,2	105,4	98,5	220,6	164,4	298,1
16	166,6	164,4	161,3	153,4	141,9	129,7	116,9	98,8	82,7	266,6	53,3	237,8	74,1	74,3	58,4	179,5	91,0	222,6
17	28,5	28,2	27,4	26,2	25,2	23,8	21,9	19,1	23,5	23,8	13,2	14,1	14,0	14,9	13,7	14,5	24,0	24,1
18	6,3	6,2	6,0	5,7	6,1	5,7	5,2	4,5	4,9	6,0	2,6	3,8	3,2	3,6	3,0	3,7	5,4	6,1
19	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	-0,3	0,0	-0,5	-0,1	-0,1	0,0	-0,2	0,0	0,2	0,4
Total	3358,5	3489,3	3527,4	3483,6	3352,8	3245,3	3030,3	2692,1	2667,6	2868,4	1379,3	1702,1	1975,6	1283,6	1802,6	1942,9	3074,4	3203,5
Máximo	602,9	658,2	690,8	704,1	696,8	689,0	656,0	594,7	491,3	488,9	220,3	249,4	439,5	167,2	373,9	379,3	611,4	640,0

Energia Solar

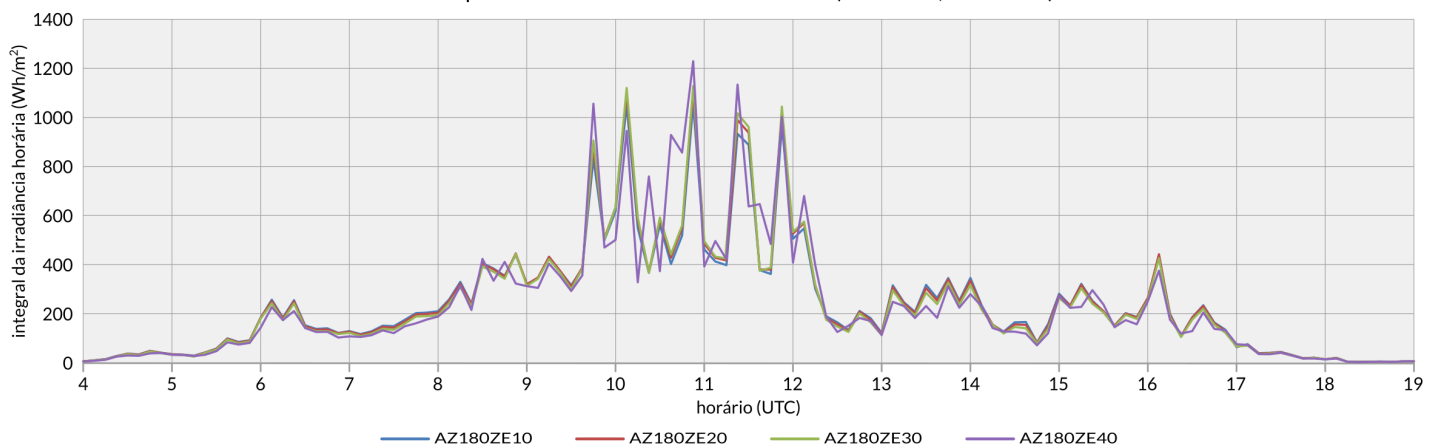
Otimização da geração

Espectrorradiômetro - dia 05/05/2017 (Hannover, Alemanha)



As séries de integrais de irradiância horária obtidas pelo espectrorradiômetro BTS nos dias 05 e 06 de maio de 2017 corroboram as medições feitas pelas células solares. A curva da geometria AZ180ZE50 é a mais próxima da inclinação ideal sugerida na literatura, que neste caso seria uma inclinação igual a 52°, a latitude de Hannover.

Espectrorradiômetro - dia 06/05/2017 (Hannover, Alemanha)



Energia Solar

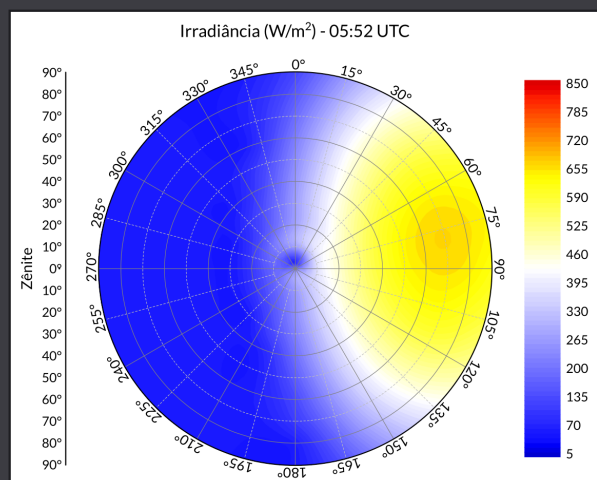
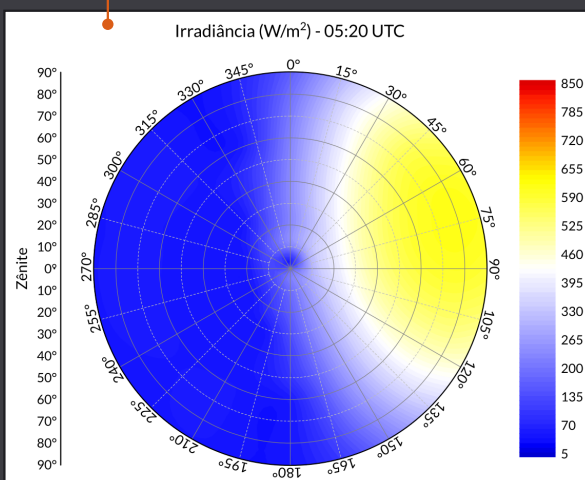
Otimização da geração

A sequência de gráficos polares a seguir mostra a evolução da irradiância solar ao longo de um dia de céu claro (27/05/2017). As medições foram feitas pelo espectrorradiômetro unidirecional que realizou 145 aquisições de medidas por varredura polar em intervalos de oito minutos. Os círculos concêntricos representam o ângulo zenital solar em que foram tomadas as medidas, variando de 0° a 90°, de modo que o espectrorradiômetro estará mais próximo do ponto central do gráfico quando atingir sua

posição mais elevada no céu (meio-dia solar). As linhas radiais representam o azimuth solar, sendo o valor de 180° correspondente à direção Sul.

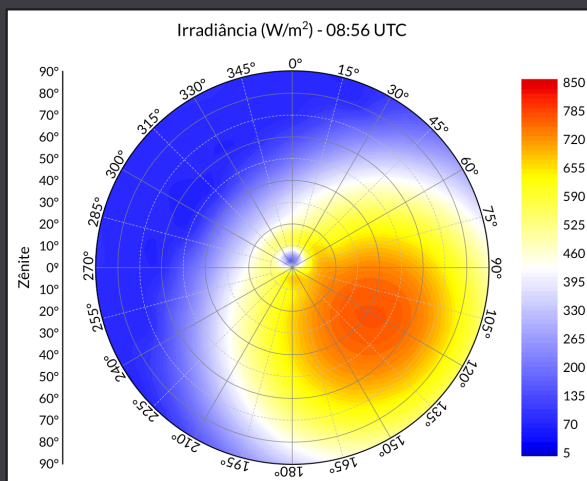
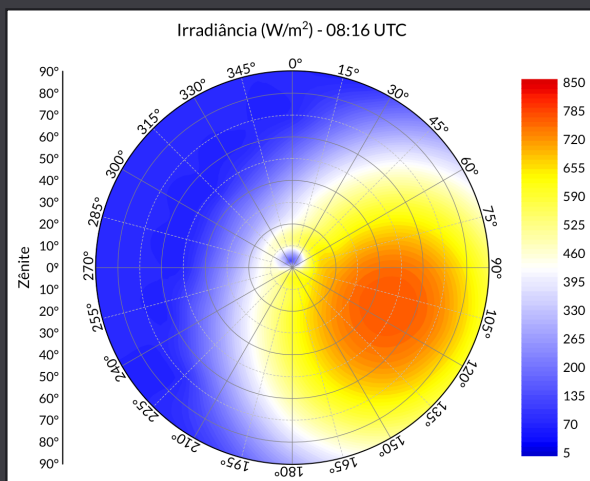
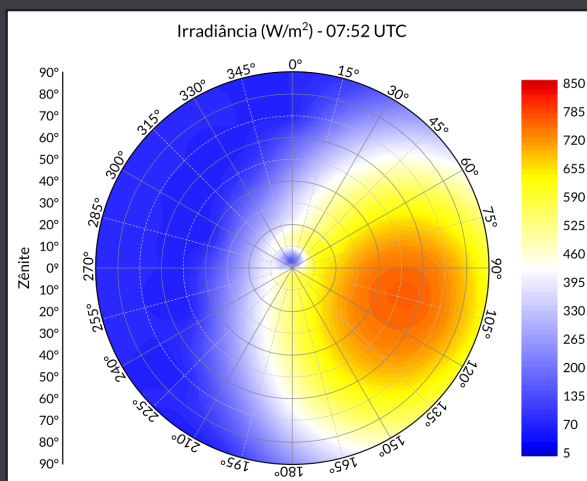
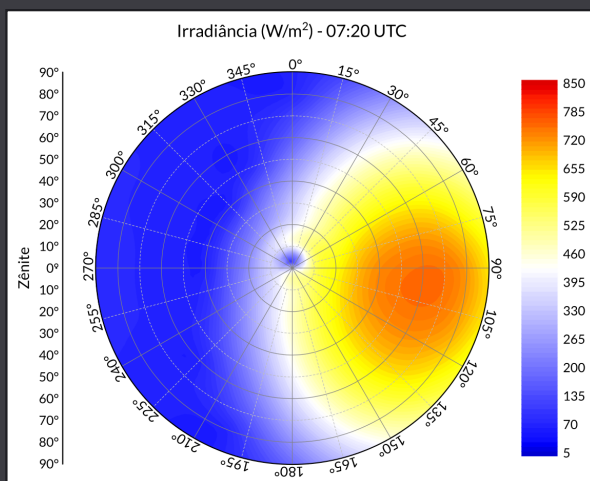
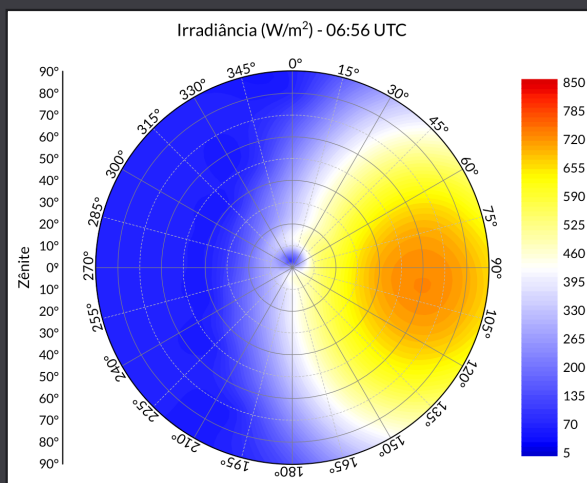
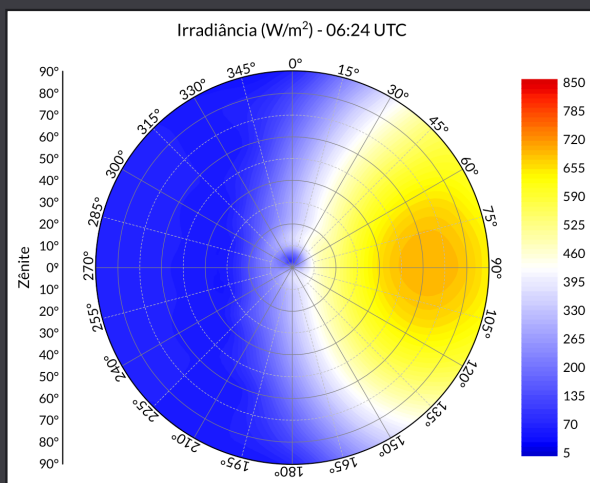
A escala de cores utilizada nos gráficos representa os valores de irradiância, variando de 5 a 850 W/m². As cores quentes (tons de vermelho), além de indicarem os maiores valores de energia incidente, também indicam a área do gráfico que representa as células solares cujos planos tendem a um ângulo perpendicular em relação à radiação solar.

No primeiro gráfico, a área de irradiância mais intensa indica que o nascer do Sol ocorre aproximadamente no ângulo azimuthal de 70°. Nos gráficos seguintes, à medida que o ângulo zenital diminui ao longo do dia, a área com irradiância mais intensa desloca-se para Sul do gráfico, estando no azimuth 180° em torno do meio dia. No por do Sol, a área mais intensa encontra-se aproximadamente no azimuth 290°. Assim, para maior geração de eletricidade, os painéis solares instalados em Hannover devem ser orientados para o Sul.



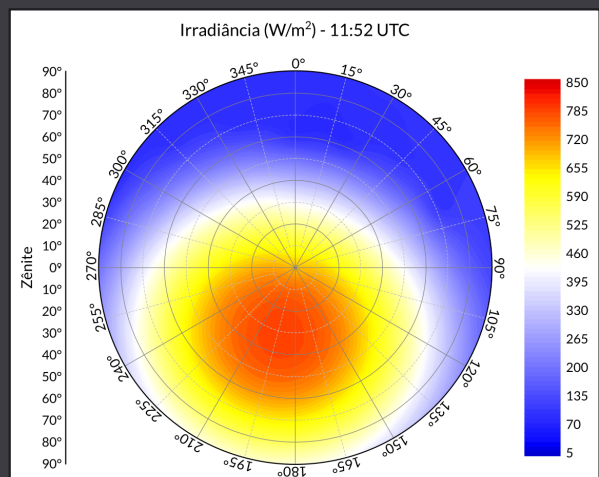
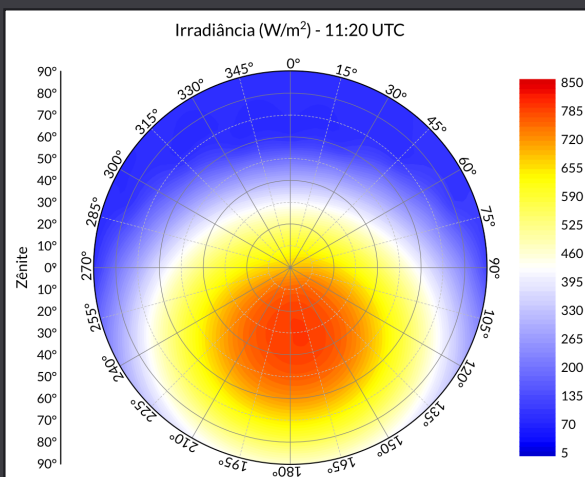
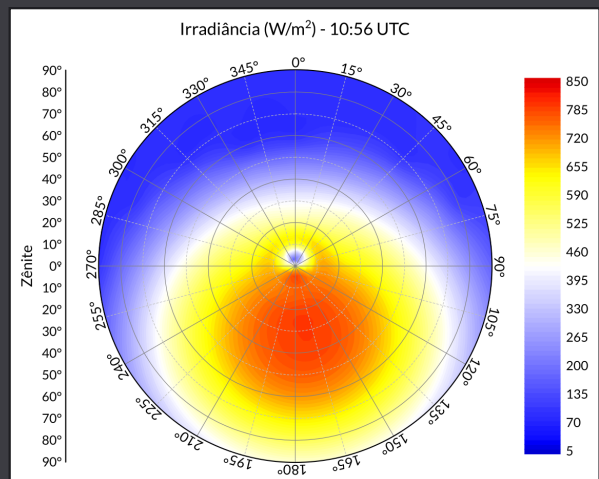
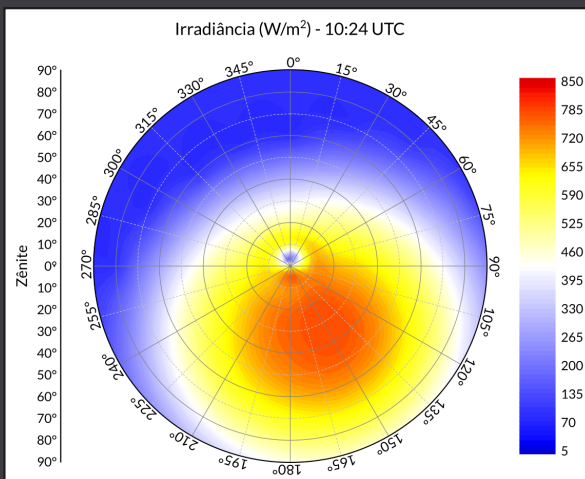
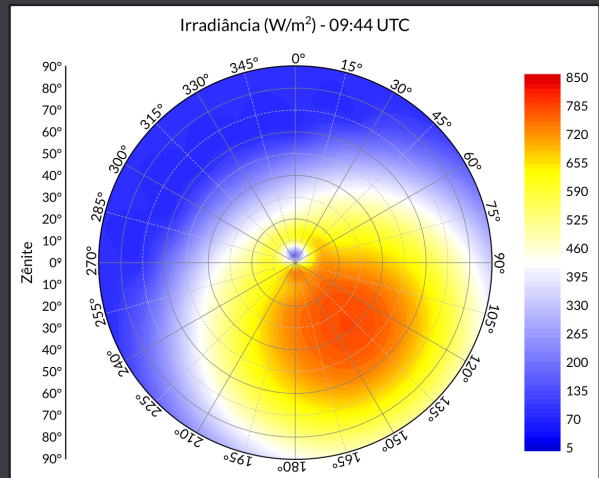
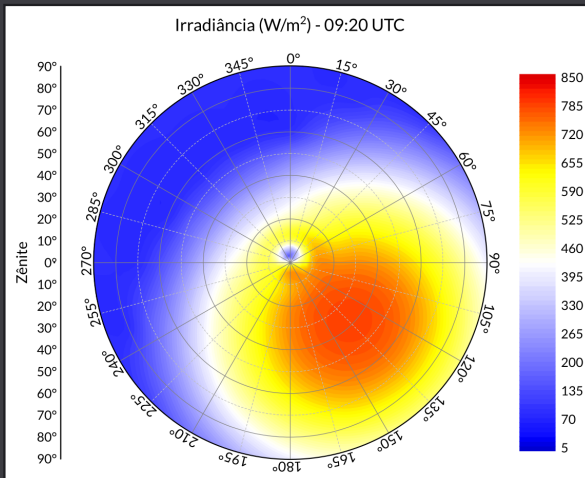
Energia Solar

Otimização da geração



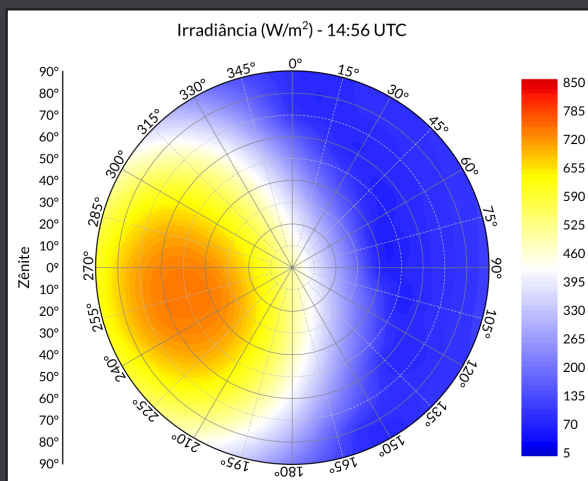
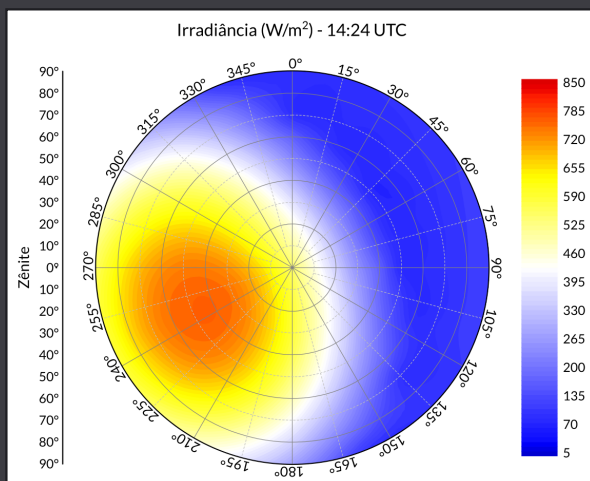
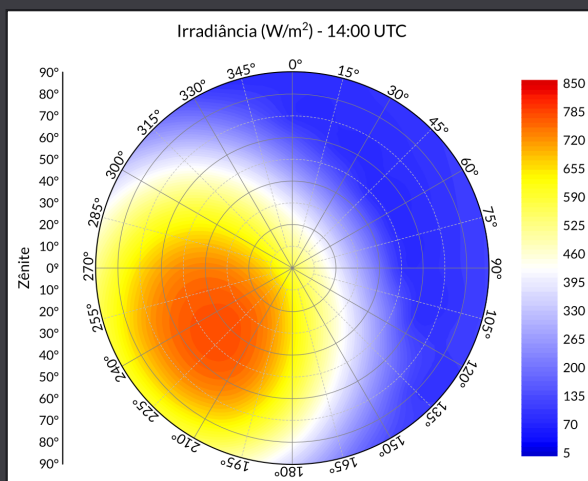
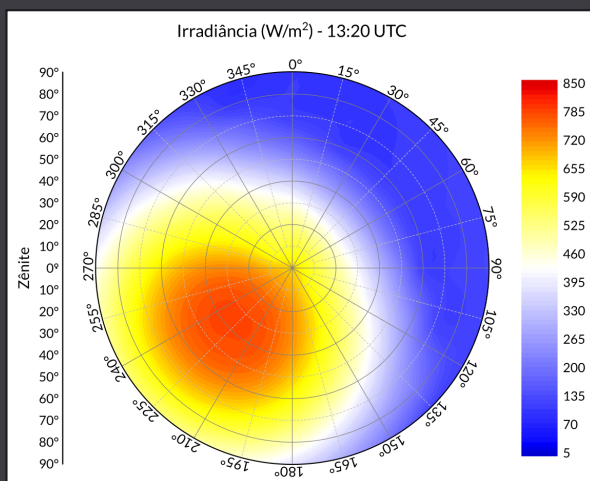
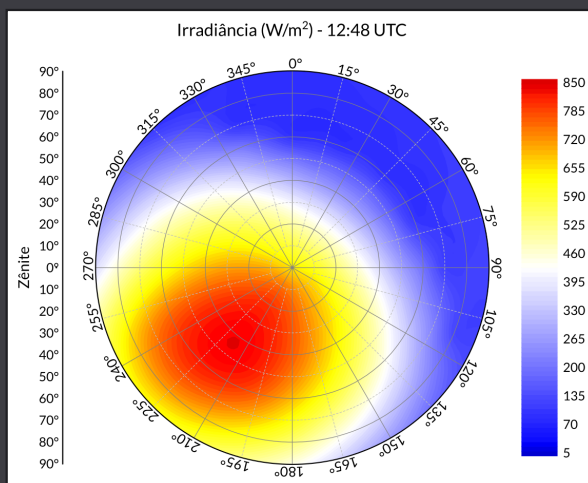
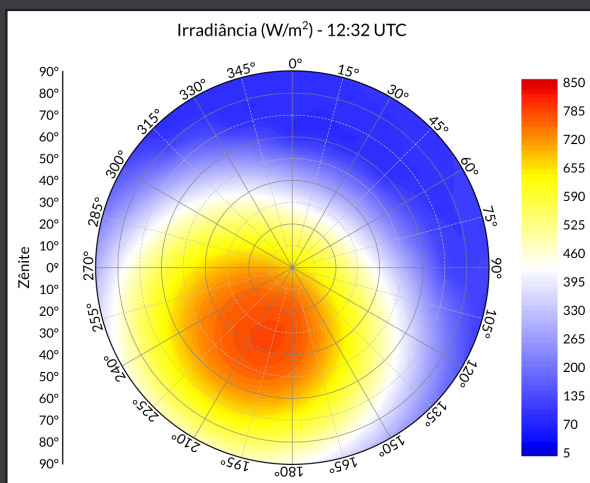
Energia Solar

Otimização da geração



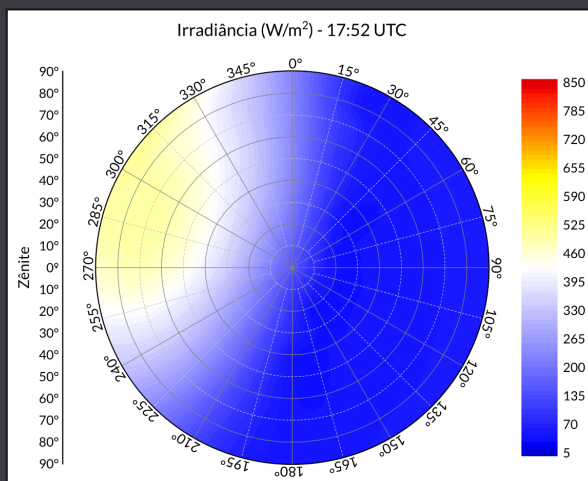
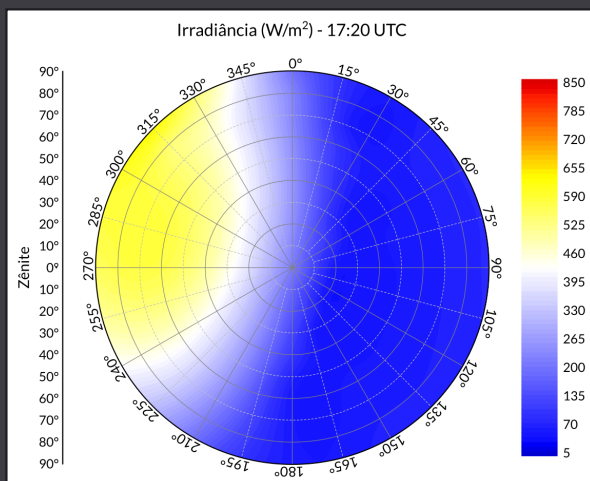
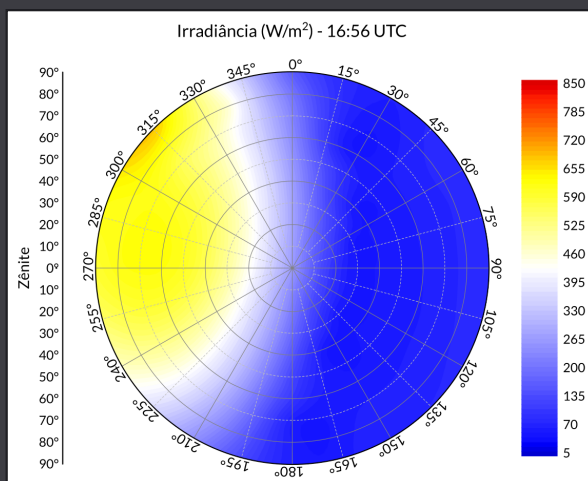
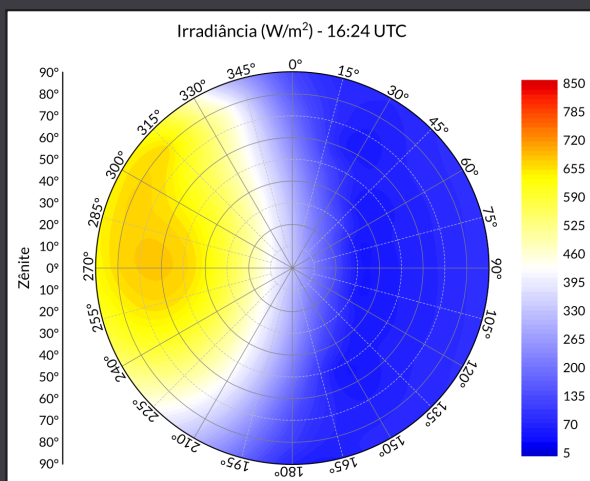
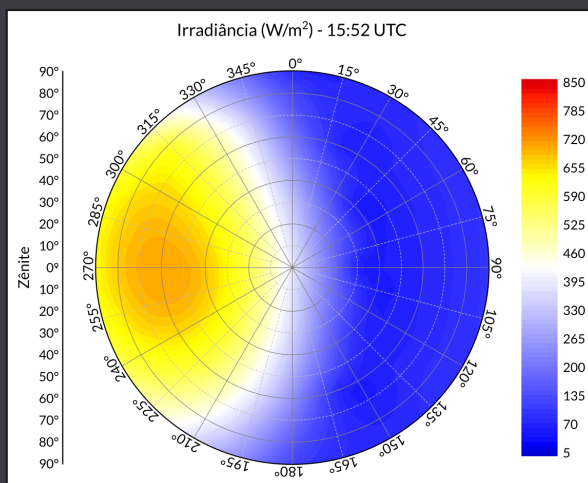
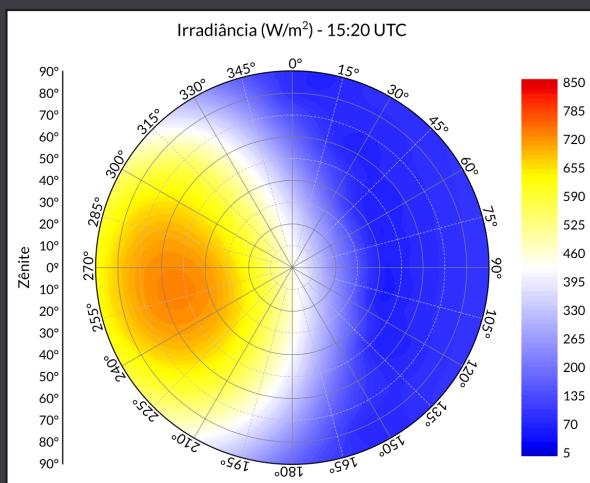
Energia Solar

Otimização da geração



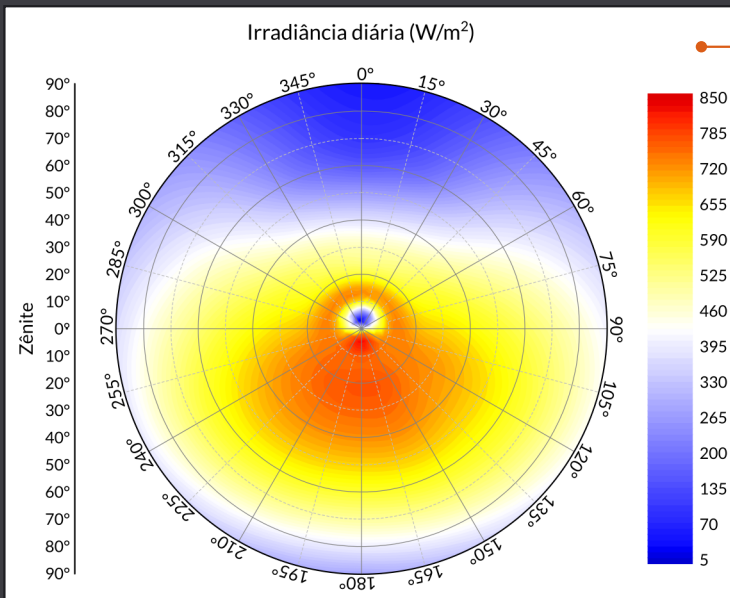
Energia Solar

Otimização da geração



Energia Solar

Otimização da geração



A integral diária da irradiância solar observada no mesmo dia de céu claro (27/05/2017) corrobora o ângulo de inclinação em que a célula solar deve estar para receber a máxima incidência de energia solar ao longo do dia.

Os gráficos apresentados anteriormente referem-se a dados coletados no hemisfério Norte, na latitude 52,39° Norte e longitude 9,70° Leste, na Alemanha, ou seja, pelo padrão adotado para instalação de painéis solares, assume-se que a inclinação do painel solar deve ser em torno de 50,37°. No entanto, os resultados obtidos sugerem não ser esta a melhor opção de ângulo, nem para otimizar a geração de acordo com a curva de carga, nem para maximizar a geração nos dias em que o experimento foi realizado.

Certamente, é necessário realizar experimentos com maior extensão e que cubram outros períodos do ano para que uma conclusão mais abrangente sobre o ponto ótimo de trabalho para o sistema fotovoltaico possa ser atingida, tanto em termos temporais (mais dias do ano) como em termos meteorológicos (situações de maior nebulosidade e concentração de aerossóis como observadas no território brasileiro). Mas, mesmo levando essa necessidade em conta, os

resultados apontam para a importância do questionamento em torno de qual a melhor geometria de orientação para que um sistema de geração fotovoltaica possa atender as demandas específicas de cada usuário (perfil de consumo, local, etc). Por exemplo: a curva de carga doméstica difere entre os países e difere também no âmbito regional e local em territórios extensos como o brasileiro. Fatores climáticos, socioeconômicos e até mesmo culturais podem determinar diferentes padrões de consumo de energia elétrica dos usuários.

A produção de conhecimento técnico científico exige uma amostragem muito maior de dados e conclusões finais só podem ser obtidas levando-se em consideração as características específicas de um determinado local de interesse para a geração. Nesse caso, precisaríamos de dados adquiridos ao longo de, no mínimo, um ano para avaliar todas as possíveis variáveis que influenciam as condições meteorológicas típicas e a geração fotovoltaica.

Energia Solar

Otimização da geração

No caso brasileiro, estudos como o discutido aqui são necessários principalmente pela recente e crescente inserção da energia fotovoltaica em nossa matriz energética. Já dispomos de estudos robustos sobre o potencial solar, como o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), em sua segunda edição, que vem sendo usado para auxiliar o setor energético.

Quando consideramos os sistemas de geração residencial onde a legislação permite que o proprietário venda seu excedente para a concessionária de energia, a instalação de um sistema de geração fotovoltaica dependerá da prioridade dada pelo proprietário: produzir o máximo de energia possível, priorizando a venda, ou otimizar a geração para atender seu próprio consumo em horários de pico de demanda?

Um dos produtos derivados das informações e da base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, foi disponibilizado no website da CRESESB e apresenta as séries de irradiação no plano horizontal e no plano inclinado na latitude (ângulo de inclinação do painel) no município de São José dos Campos – SP.

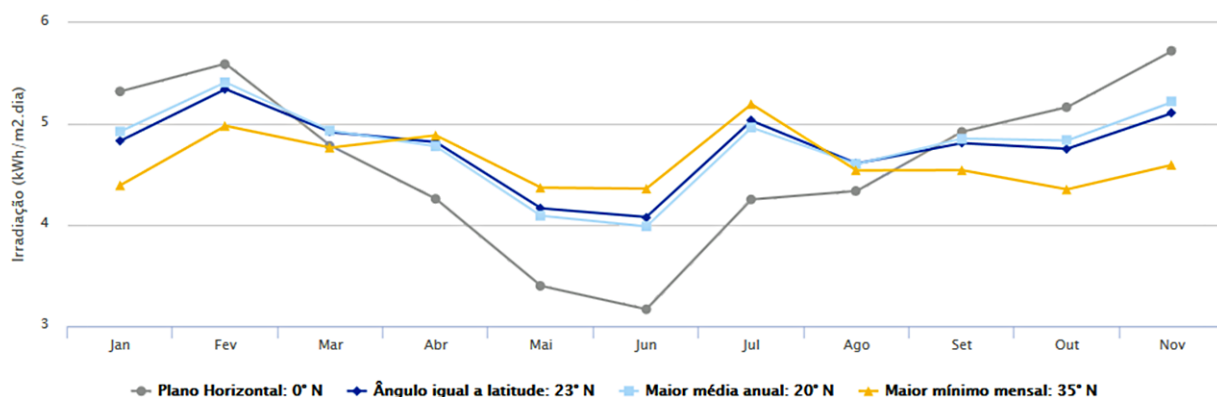
Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>

Estação: Sao Jose dos Campos
Município: Sao Jose dos Campos , SP - BRASIL
Latitude: 23,201° S
Longitude: 45,949° O
Distância do ponto de ref. (23,23° S; 45,9° O): 6,0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
☒	Plano Horizontal	0° N	5,32	5,60	4,79	4,26	3,40	3,17	3,28	4,25	4,34	4,92	5,17	5,72	4,52	2,56
☒	Ângulo igual a latitude	23° N	4,83	5,35	4,92	4,82	4,17	4,08	4,13	5,03	4,61	4,81	4,76	5,11	4,72	1,27
☒	Maior média anual	20° N	4,93	5,41	4,93	4,78	4,09	3,99	4,05	4,97	4,60	4,86	4,84	5,22	4,72	1,42
☒	Maior mínimo mensal	35° N	4,39	4,98	4,77	4,89	4,37	4,36	4,38	5,20	4,54	4,54	4,35	4,60	4,61	,84

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Sao Jose dos Campos–Sao Jose dos Campos, SP–BRASIL

23,201° S; 45,949° O



Highcharts.com