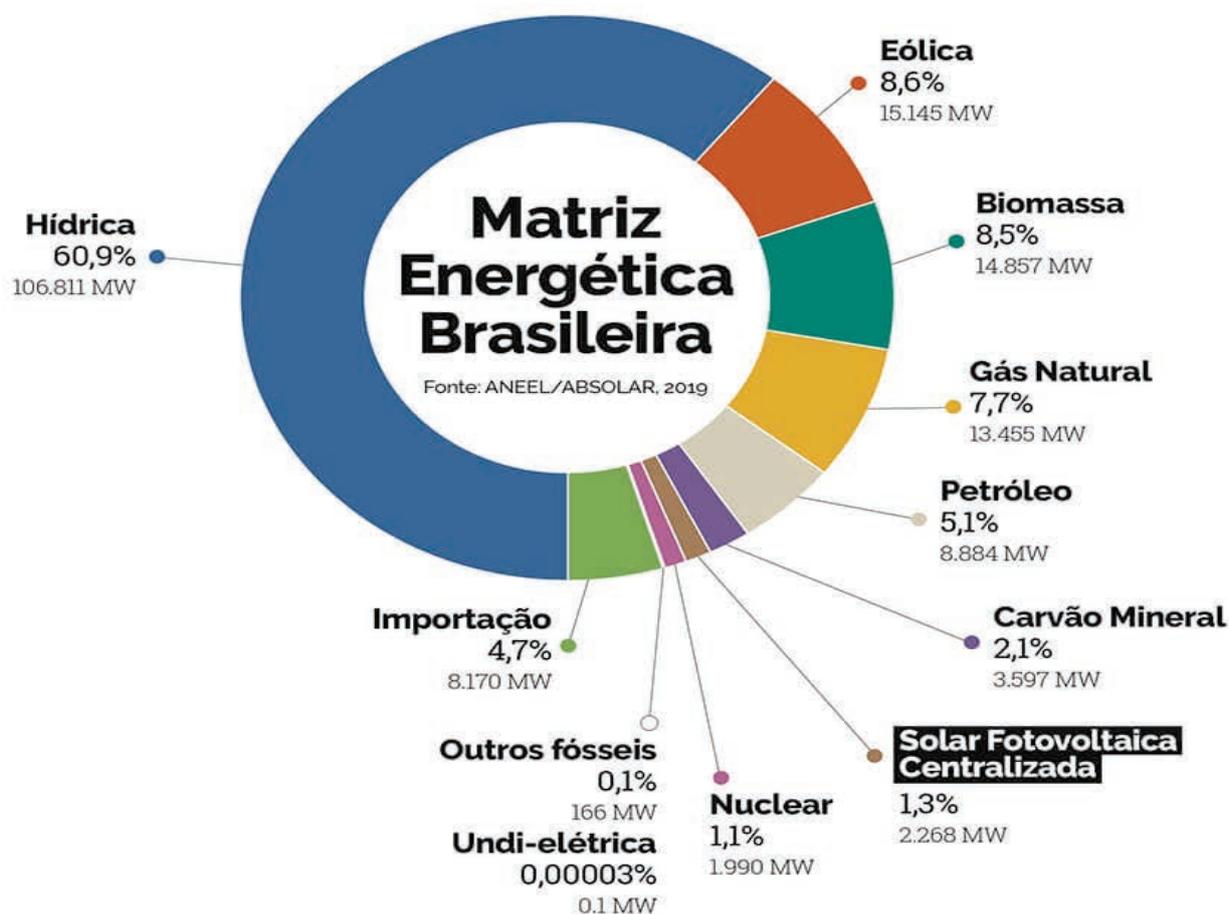


Energia Solar

Para um periódico técnico-científico como a Revista de Química Industrial, estar na vanguarda da tecnologia é um dos seus atributos mais relevantes. E as energias solar e eólica são exemplos notáveis, pois desde a década de 50 do século XX são abordados em artigos, reportagens e matérias informativas, muito antes do advento de temas como energia limpa, renovável e sustentável, matriz energética, aquecimento global e mudanças climáticas.

Já era desde sempre reconhecido o potencial da Região Nordeste para a instalação de parques eólicos e solares, os quais já compõem percentuais significativos na matriz energética brasileira.

Segundo dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a energia eólica compôs 8,6% dessa matriz (15.145 MW), enquanto a solar correspondeu a 1,3% (2.268 MW).



Em paralelo à pressão da sociedade por energias mais limpas, a tecnologia que viabiliza o aproveitamento de energias alternativas vem se desenvolvendo com grande vigor nas últimas décadas.

A Associação Brasileira de Química vem se pautando por temas que mostram a inter-relação da química e outras áreas do conhecimento em seus eventos e em matérias veiculadas por esta Revista.

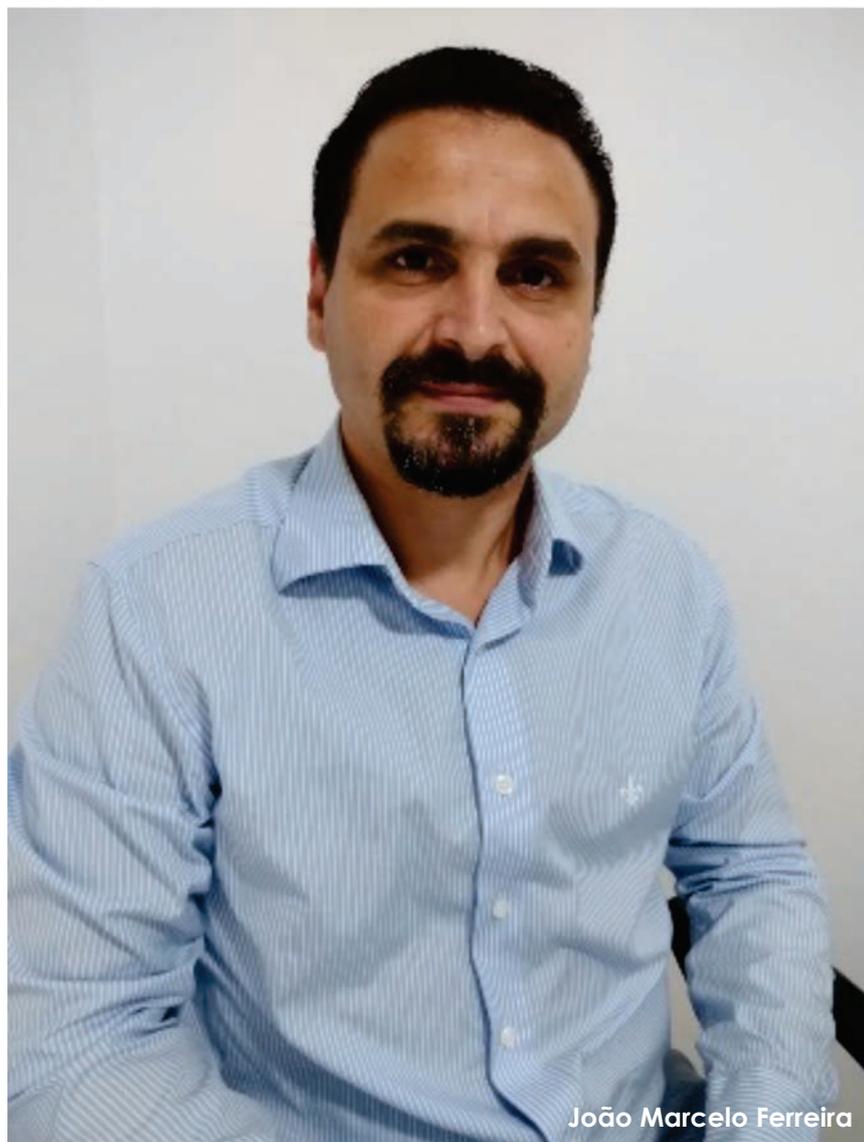
O tema energia solar se mostra muito relevante e atual, propiciando a seus leitores uma ótima oportunidade de conhecer uma das vertentes da pesquisa aplicada que mais atraem jovens pesquisadores em todo o mundo.

A Revista de Química Industrial convidou o Professor João Marcelo Dias Ferreira, do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em João Pessoa. Graduado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, é mestre em engenharia elétrica pela Universidade de São Paulo e doutor em engenharia elétrica, eletrônica, fotônica e sistemas pela Université Paul Cézanne - Aix-Marseille, França.

Tem experiência nas mais diversas áreas da engenharia elétrica, especialmente na área de energias renováveis, com ênfase na área de energia solar fotovoltaica.

Atualmente desenvolve trabalhos principalmente relacionados ao desenvolvimento tecnológico de materiais semicondutores, especialmente silício cristalino, para aplicações fotovoltaicas.

Outro enfoque de sua pesquisa é dado ao dimensionamento e análise de eficiência energética de sistemas fotovoltaicos.



João Marcelo Ferreira

Energia Solar: em que consiste esta forma de energia?

A energia solar, de uma forma ampla, pode ser entendida como toda forma de coletar a energia do sol e torná-la útil para a realização de trabalho. Assim como a própria existência da vida, a maioria das coisas que acontecem na Terra pode ser, de alguma forma, associada à energia fornecida pelo sol. Por exemplo, como o vento se origina do aquecimento da atmosfera pelo sol, a energia do vento pode ser considerada uma forma de energia solar. A biomassa e os biocombustíveis podem ser igualmente contados como uma forma de energia solar, uma vez que utilizam a luz do Sol como sua fonte de energia e não podem crescer sem ela.

O termo “energia solar”, em uma definição tão abrangente, corre o risco de se tornar indefinível e, portanto, torna-se mais apropriado categorizar seu uso.

Na sequência deste artigo, seguiremos o uso mais convencional do termo, e vincularemos a "energia solar" à exploração direta da radiação solar. Isto inclui, portanto, a conversão da luz em energia elétrica por dispositivos fotovoltaicos, bem como o aquecimento direto de fluidos – normalmente a água – ou de estruturas por meio da incidência da radiação proveniente do sol, para a produção de calor e/ou eletricidade. Uma definição bastante pertinente, nesse caso, pode ser encontrada no livro *Solar Revolution*, de Travis Bradford: “energia solar é uma fonte de energia que pode ser diretamente atribuída à luz do sol ou ao calor gerado pelos raios do sol”.

Quais são os requisitos básicos para que a energia solar possa ser aproveitada?

O potencial de energia solar aproveitável em um determinado empreendimento está relacionado à quantidade de energia que pode ser convertida a partir da energia solar, considerando-se o potencial teórico da fonte (intensidade da radiação solar), as características geográficas (localidade, clima, relevo e vegetação), as restrições técnicas (tecnologia empregada, eficiência de conversão, disponibilidade de área) e as restrições ambientais e legais. Dentre esses, o principal requisito necessário ao aproveitamento da energia solar, independentemente de sua natureza e escala (residencial, comercial, industrial etc.), é a análise do recurso solar local. Esta análise foca na compreensão dos padrões históricos do recurso solar local e na realização de previsões futuras, ambas necessárias para garantir o desempenho do sistema de conversão energético.

Em grandes empreendimentos, o

descumprimento dos requisitos mínimos de desempenho energético pode resultar em grandes perdas financeiras. A avaliação dos recursos solares fornece os meios para determinar com precisão a disponibilidade de recursos de radiação solar para o desenvolvimento, implantação e operação de tecnologias de energia solar de modo econômico e sustentável.

Em segundo lugar, se faz necessário o uso de tecnologia de conversão mais adaptada às características do empreendimento e em estreito respeito às características do recurso solar e das especificidades técnicas do local.

Que tecnologias hoje estão disponíveis para a captação da energia solar?

A energia solar tem um enorme potencial, capaz de suprir todas as nossas demandas energéticas diárias. A quantidade de energia da radiação solar que atinge a superfície da Terra em uma hora e meia é suficiente para suprir o consumo energético mundial por um ano inteiro. Em uma linguagem mais científica, isso significa dizer que a Terra recebe uma radiação solar, na camada mais externa da atmosfera, de cerca de 174×10^{15} W [174 PW (petawatts)].

A energia solar incidente na superfície da Terra tem sido ainda aproveitada, por meios mais ou menos tecnológicos, na iluminação natural, no aquecimento e resfriamento passivo de ambientes, no aquecimento de água doméstico, na desinfecção de água, no cozimento de alimentos, na secagem de produtos agrícolas, em processos térmicos industriais e na geração de eletricidade.

Algumas destas tecnologias de conversão da energia solar foram desenvolvidas apenas nos últimos 30 anos como forma de mitigar a mudança climática e a acumulação de dióxido de carbono atmosférico, provenientes da queima de combustível fóssil.

A força da energia solar reside em sua natureza renovável (inesgotável) e na grande variedade de formas que pode ser aproveitada, desde aplicações em pequena escala até aplicações de grande envergadura.

Do ponto de vista das aplicações envolvendo grande potência, podemos separar dois tipos principais de aproveitamento da energia solar: a solar térmica e a solar fotovoltaica.

As tecnologias de aproveitamento solar térmico são representadas pela Energia Solar Concentrada (CSP – *Concentrated Solar Power*), que são grandes centrais geradoras que convertem energia solar em eletricidade, com a concentração da radiação solar, por meio de espelhos refletores, para o aquecimento de um fluido de trabalho. Deste aquecimento resulta a geração de vapor que alimenta uma turbina a vapor acoplada a um gerador elétrico.

Os três principais tipos de sistemas de energia solar concentrada são: concentrador linear, disco parabólico e sistemas de torres de energia.

A Energia Solar Fotovoltaica (PV – *Photovoltaics*) é a tecnologia referente à conversão direta da luz do sol em energia elétrica.



CSP - concentrador do tipo torre central (Heliostato)



CSP - Concentrador do tipo disco parabólico



CSP - Concentrador do tipo linear (calha parabólica)

Esse processo de conversão de luz (fótons) em eletricidade (tensão elétrica), é chamado de efeito fotovoltaico. Este fenômeno foi explorado pela primeira vez, na estrutura formal de uma célula solar, em 1954, por cientistas da Bell Labs, que criaram uma célula solar de silício que gerava uma corrente elétrica quando exposta à luz solar. As células solares foram em seguida utilizadas para alimentar satélites espaciais e itens menores, como calculadoras e relógios. Hoje, a eletricidade advinda das células solares tornou-se competitiva em termos de custo-benefício e os sistemas fotovoltaicos (arranjos de módulos fotovoltaicos) estão sendo implantados em larga escala para ajudar a suprir as crescentes demandas de energia elétrica.

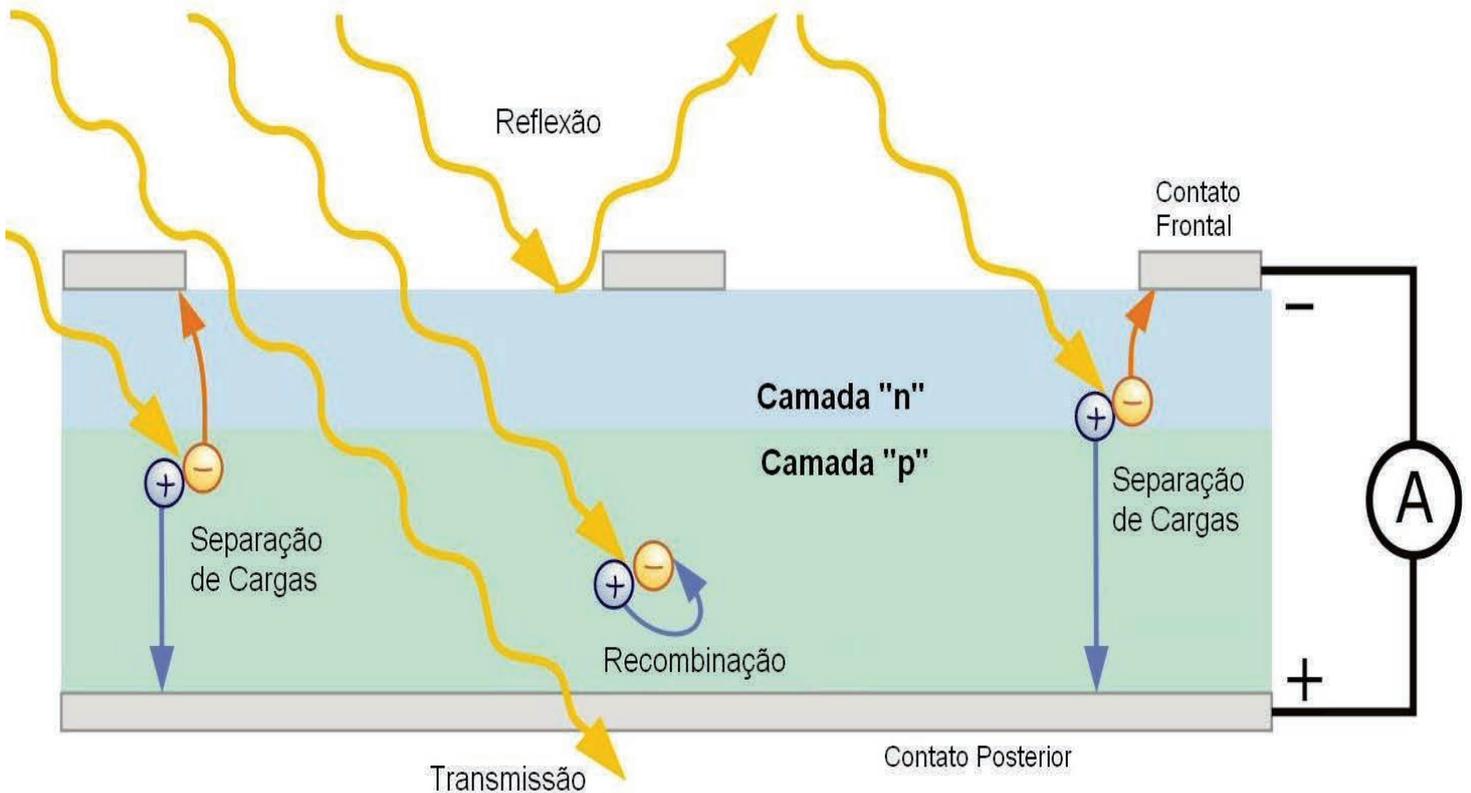
A grande maioria dos módulos fotovoltaicos presentes atualmente no mercado é produzido com o uso da tecnologia de silício cristalino (c-Si), que oferece boa eficiência de



Células fotovoltaicas em aplicações espaciais

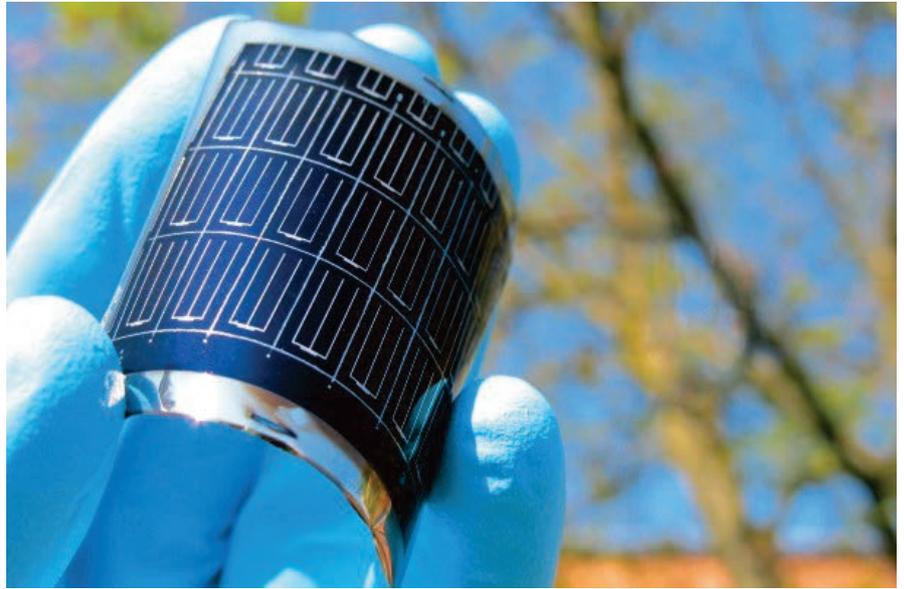
conversão fotovoltaica, grande disponibilidade e variedade de modelos e potências e preços acessíveis.

Estes módulos são normalmente instalados nos telhados de edifícios residenciais ou comerciais ou instalados em estruturas no solo em plantas solares de alta potência.



Esquema básico de célula solar de silício cristalino

Outra tecnologia fotovoltaica comumente utilizada é conhecida como células solares de filme fino, pois são feitas de camadas muito finas de material semicondutor, tais como telureto de cádmio (CdTe) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). A espessura destas camadas finas é da ordem de apenas alguns micrômetros, ou seja, milionésimos de um metro. As células solares de filme fino podem ainda ser flexíveis e leves, tornando-as ideais para aplicações portáteis – como mochilas e vestuário – ou para outras aplicações como janelas fotovoltaicas.



Célula solar flexível de filme fino CIGS

Um terceiro tipo de tecnologia fotovoltaica tem o nome dos elementos químicos que as compõem. As células solares III-V são construídas principalmente a partir dos elementos da tabela periódica do Grupo III – como gálio e índio – e do Grupo V – como arsênio e antimônio. Estas células solares possuem, geralmente, um custo de fabricação mais elevado que outras tecnologias, mas apresentam eficiências de conversão muito maiores. Devido a isto, estas células solares são frequentemente usadas em satélites, veículos aéreos não tripulados e outras aplicações que requerem uma alta relação entre potência e peso.

Outras tecnologias de células solares têm sido pesquisadas e, por isso, são consideradas tecnologias emergentes – como as células solares orgânicas, de pontos quânticos, sensibilizadas a corante e de materiais híbridos orgânico-inorgânicos (também conhecidas como perovskitas). Estas tecnologias de próxima geração podem oferecer custos mais baixos, maior facilidade de fabricação, e outros benefícios. Entretanto, a grande maioria delas necessita de maior desenvolvimento tecnológico

que garantam estabilidade e durabilidade, requisitos necessários para utilização em escala.

Na interface entre a aplicação térmica e a fotovoltaica da energia solar, destaca-se a tecnologia de coletores híbridos fotovoltaico-térmico (PVT – *Photovoltaic Thermal*). Nesse tipo de coletor, o sistema fotovoltaico, além de converter a luz solar em eletricidade, transfere a energia térmica residual para um fluido e fornece também calor como segundo produto da conversão solar. Nesse coletor híbrido a extração do calor pelo fluido auxilia no resfriamento da parte fotovoltaica, melhorando a eficiência elétrica, que é dependente da temperatura.

Quais são, na sua opinião, as melhores oportunidades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de dispositivos mais eficientes para captação da energia solar? Como está a ciência brasileira nesse campo?

Dentro da temática da energia solar existem oportunidades de pesquisa e desenvolvimento, e inovação, em toda a cadeia produtiva da tecnologia, seja na aplicação de novas metodologias, na otimização de processos, no desenvolvimento de novos

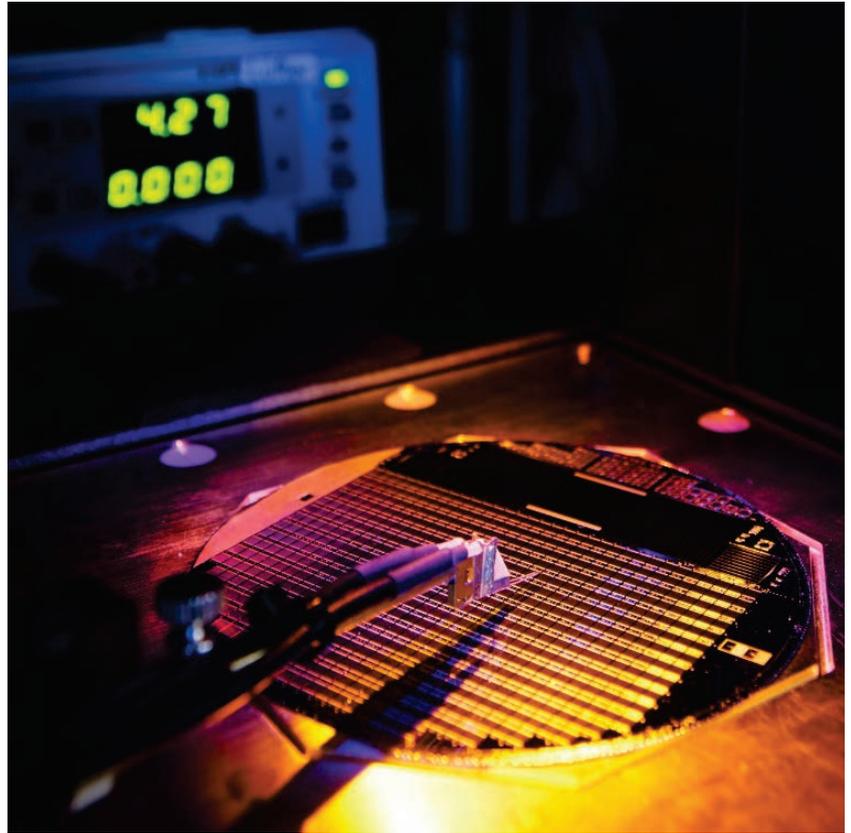
materiais etc. Destaco aqui algumas ações de P&D de energia solar:

► A tecnologia fotovoltaica (PV) apresenta oportunidades especialmente vinculadas à melhoria de eficiência de conversão fotovoltaica, incluindo processos avançados de na tecnologia de silício (cristalino ou não), eficiência de células solares multijunção, na ciência avançada de materiais para células solares de telureto de cádmio e nos processos de estabilização de células híbridas de perovskitas.

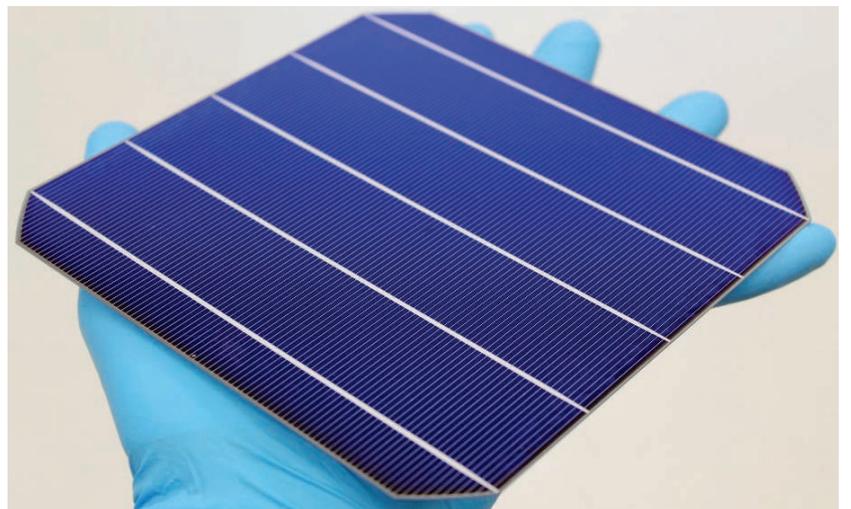
► Na tecnologia de concentração de energia solar (CSP) existem desafios em nível de todos os componentes na coleta solar, receptores e fluidos de transferência de calor, na conversão de energia e no armazenamento de energia térmica, bem como a integração de tecnologias de subcomponentes.

No Brasil, diversos laboratórios e grupos de pesquisa estão envolvidos no desenvolvimento de tecnologias aplicadas à conversão fotovoltaica, seja nas metodologias de modelagem do potencial solar, seja na aplicação da tecnologia fotovoltaica para áreas remotas, sistemas de dessalinização e tratamento de água, seja no desenvolvimento de processos de fabricação, de caracterização e de células em silício policristalino, desenvolvimento de células sensibilizadas a corante e, ultimamente, no desenvolvimento de células perovskitas.

Na temática solar térmica, temos grupos de pesquisa no desenvolvimento de filmes para espelhos concentradores, modelagem numérica de sistemas de concentração, projeto e caracterização de trocadores de calor, bem como aprimoramento de técnicas de refrigeração solar, secadores solares, modelagem numérica de



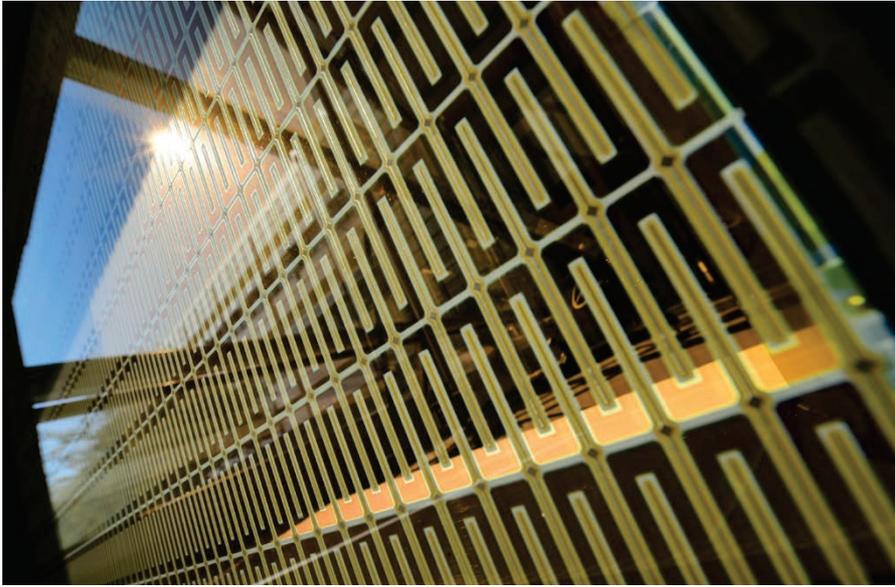
Célula multijunção - Recorde mundial: DEZ/2014 (Eficiência: 46%) - 4 junções - Concentração: 508x.
Fonte: Fraunhofer ISE/Soitec/CEA-Leti



Célula de silício monocristalino

processos termodinâmicos etc.

No nosso centro (CEAR), na Universidade Federal da Paraíba, temos uma equipe multidisciplinar de pesquisadores envolvidos nas mais diversas áreas da energia renovável, especialmente na energia solar, onde os projetos mais relevantes envolvem a análise do potencial solar, a refrigeração solar por adsorção, o desenvolvimento de superfícies seletivas



Seção de módulo fotovoltaico - célula sensibilizada a corante (DSSC)
- 60 cm x 100 cm. Fonte: ISE/Fraunhofer

aplicadas a coletores planos e concentradores solares, a caracterização de concentradores de Fresnel, modelagem, desenvolvimento e balanço energético de coletores híbridos do tipo PVT, modelagem numérica de conversão fotovoltaica, testes de células solares em diversas condições de irradiância e temperatura, desenvolvimento de células sensibilizadas a corante, dentre outros.

No Brasil, quais são as áreas mais propícias para o aproveitamento da energia solar?

O Brasil, graças à sua localização geográfica privilegiada, em zona tropical, recebe uma quantidade maior de radiação solar durante todo o ano, e tem, portanto, um potencial significativo para aproveitar a energia solar em todas as suas variações. Apesar das diferentes características climáticas e ambientais do território brasileiro, a irradiação global é bastante uniforme. O valor máximo - mais de 6,5 kWh/m²/dia – é observado na área semiárida (baixos índices de pluviosidade e nebulosidade) do Nordeste brasileiro.

O valor mínimo de irradiação solar, em torno de 4,25 kWh/m²/dia, é observado na área costeira da região Sul do Brasil, que é caracterizada por uma precipitação relativamente grande.

É importante notar que, apesar das variações dos índices de radiação solar ao longo do território brasileiro, o somatório anual da irradiação solar global horizontal diária em qualquer região do Brasil (1500-2500 kWh/m²) é maior do que a da maioria dos países europeus

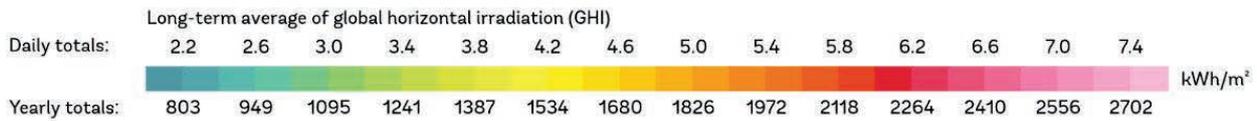
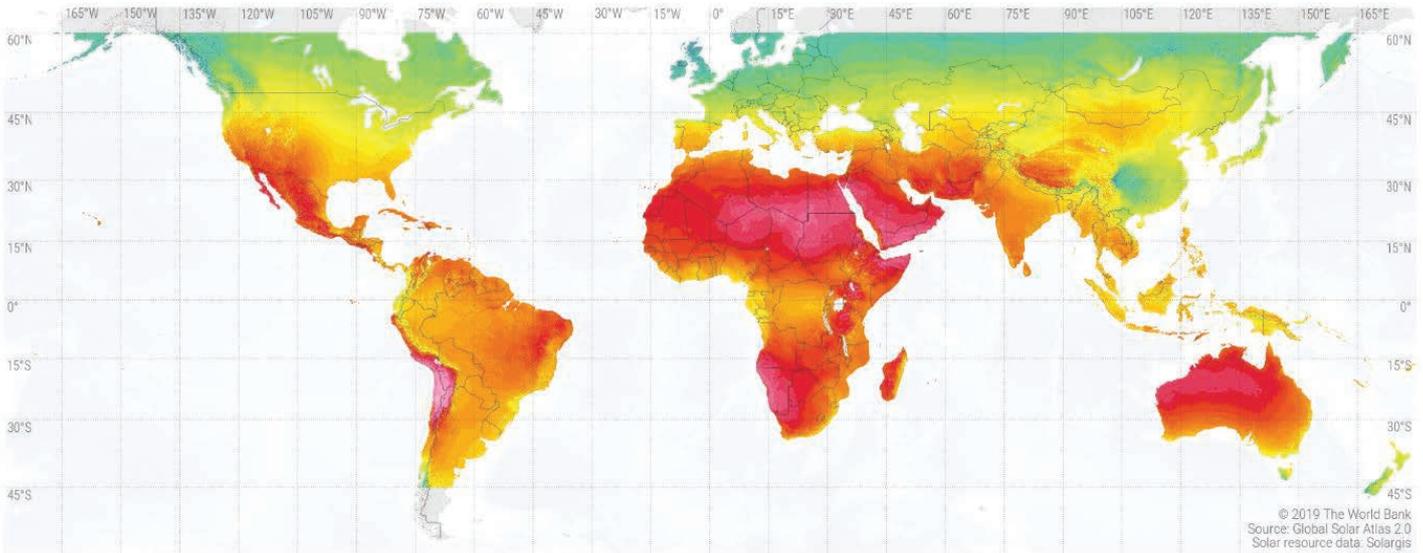
como a Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde os projetos de aproveitamento dos recursos solares são amplamente empregados.

Em resumo, existe uma região preferencial para a aplicação de projetos de conversão da energia solar no Brasil, no chamado Cinturão Solar – área que se estende do Nordeste do Brasil até a região do Pantanal, passando pelo norte de Minas Gerais, pelo sul da Bahia e pelo norte e nordeste do estado de São Paulo, porém os índices solarimétricos verificados nas regiões fora do Cinturão Solar não são proibitivos.



Usina Solar Fotovoltaica São Gonçalo – São Gonçalo do Gurgueia – Piauí
608 MW – a maior usina solar da América do Sul – módulos solares bifaciais.
Fonte: Enelgreenpower.com

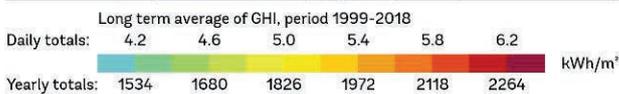
SOLAR RESOURCE MAP
GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit: <http://globalsolaratlas.info>.

Mapa da Irradiação solar global do mundo.
 Fonte: SOLARGIS

SOLAR RESOURCE MAP
GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION
BRAZIL



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit: <http://globalsolaratlas.info>.

Mapa da Irradiação solar global do Brasil.
 Fonte: SOLARGIS

Quais são as aplicações mais promissoras da energia solar?

Um dos caminhos mais trilhados pelas recentes pesquisas em energia solar é a busca por novos materiais fotovoltaicos, eficientes, estáveis e flexíveis, como rota alternativa à clássica célula de silício cristalino. Uma dessas alternativas mais promissoras é uma classe de materiais chamada perovskita. As perovskitas são compostos sintéticos que possuem uma estrutura cristalina ortorrômbica idêntica ao mineral natural com o mesmo nome e que compartilham uma fórmula química estruturalmente semelhante. Dependendo da composição do material, as perovskitas podem apresentar uma grande variedade de propriedades úteis, tais como supercondutividade e atividade fotovoltaica.

Seu uso em células fotovoltaicas é amplamente considerado como uma via promissora de pesquisa, pois demonstraram um aumento sem precedentes na eficiência, de 3,8% para 20,1% em apenas 7 anos de desenvolvimento.

Alguns novos ganhos de desempenho parecem iminentes, pois recentemente foram identificados alguns dos fatores que limitam a eficiência atual.

Alguns desses fatores de desempenho têm sido contornados com a utilização de células

perovskitas na formação de células tandem, sobre um material estável, como silício cristalino, por exemplo.

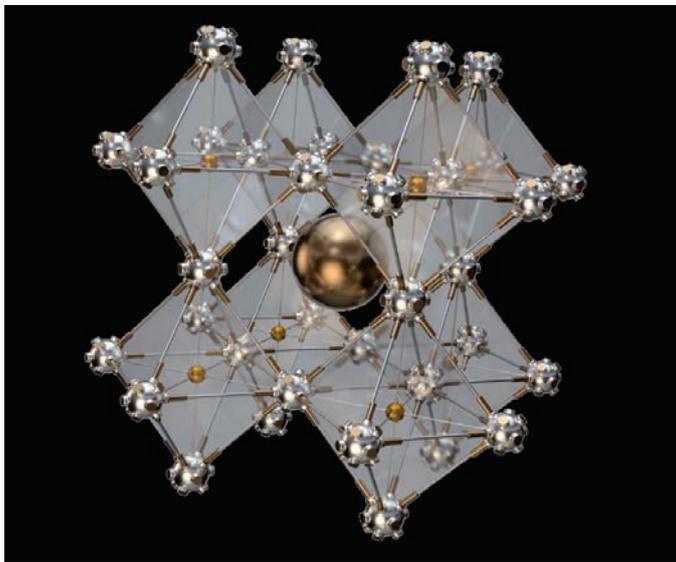
Pesquisadores da Universidade de Oxford, no Reino Unido, desenvolvem atualmente este tipo de tecnologia que deverá estar em pouco tempo no mercado fotovoltaico.

A facilidade e conveniência de aplicação é também um fator motivador na busca de novos materiais fotovoltaicos.

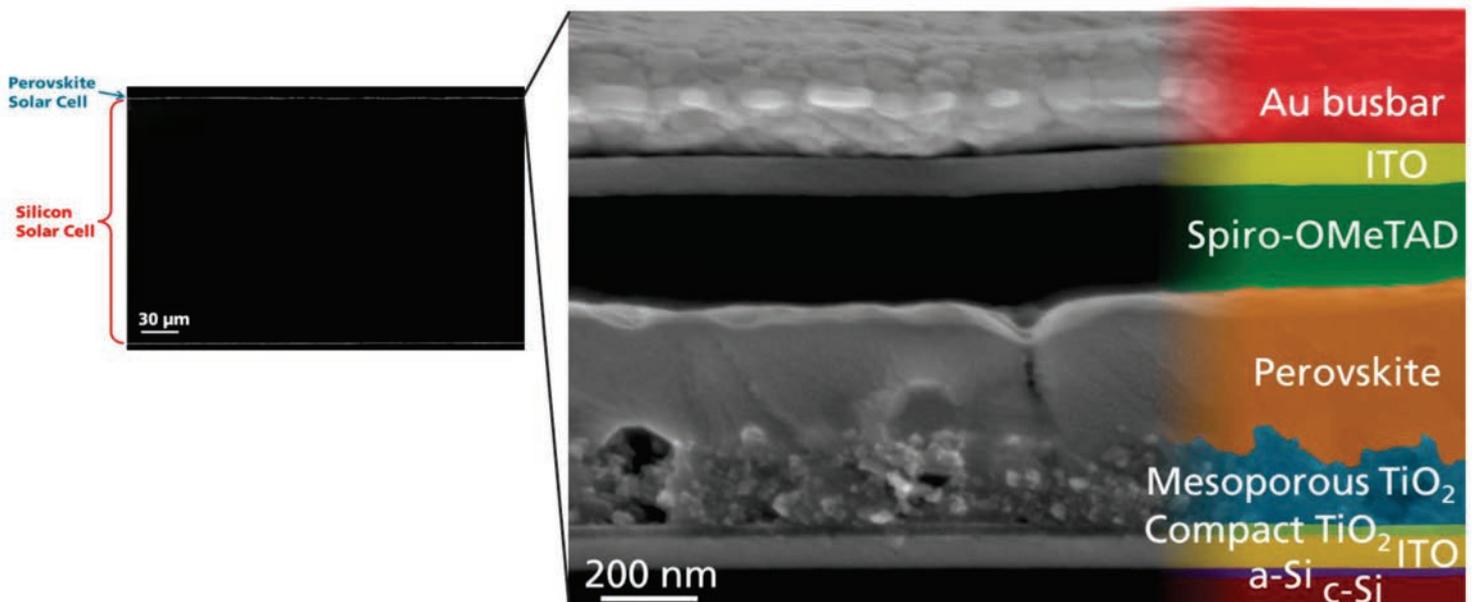
Há uma grande atração na ideia de coletores de energia solar na forma de revestimentos em forma de pintura ou filmes transparentes.

Se tais materiais se tornarem práticos, isto poderá ajudar na adoção da energia solar, pois podem ser usados em situações onde painéis solares rígidos e pesados são impraticáveis.

Um exemplo de tinta solar é uma substância desenvolvida na Universidade de Notre Dame, nos Estados Unidos, feita de nanopartículas semicondutoras. Embora apresente apenas 1% de eficiência, ela pode ser aplicada como uma tinta comum, o que significa que deve ter uma grande variedade de aplicações.



Estrutura ortorrômbica da perovskita.
Fonte: Saule Technologies



Célula tandem – perovskita sobre silício cristalino.
Fonte: ISE/Fraunhofer

Como o profissional da área química pode atuar na área de P&D em energia solar?

A constante evolução das tecnologias voltadas à energia solar sempre foi resultado de uma ciência inter/multidisciplinar. O profissional da área de química tem, certamente, um papel fundamental na superação dos novos desafios tecnológicos. Vejo, particularmente, uma necessidade crescente deste tipo de profissional na área de desenvolvimento de novos materiais e novos compostos, especialmente no aprimoramento das técnicas de síntese e caracterização. Existem ainda demandas relacionadas à efficientização de processos químicos industriais, das técnicas de refinamento de matéria prima, na otimização de processos de deposição de filmes, na gestão de resíduos e na reciclagem de materiais. Os processos relacionados à conversão fotovoltaica, por exemplo, demandam um conhecimento ímpar do profissional da área de química, na manipulação da matéria no controle de fótons, elétrons e moléculas em interfaces; na engenharia de *bandgap* de materiais; nos processos de conversão eletroquímicos; no entendimento das propriedades e interação de estruturas nanoscópicas que evidenciam o comportamento macroscópico da matéria.

Que mensagem final gostaria de deixar aos leitores da RQI

Aqui, um pequeno texto para reflexão sobre a temporalidade, e causalidade, das coisas:

No século V a.C., os gregos se encontraram em meio a uma crise energética. Eles estavam ficando sem combustível: não petróleo ou gás, mas madeira de árvores, que, em grande parte sob a forma de carvão vegetal, era sua fonte de energia para cozinhar e aquecer suas casas. Os cidadãos tinham queimado a maior parte de suas florestas utilizáveis e, em desespero, e vivendo sob um regime de racionamento

de carvão vegetal, começavam a olhar para os olivais. As autoridades abordaram este problema recorrendo a uma solução descrita por Sócrates. O grande filósofo havia escrito que "em casas que olham para o sul, o sol penetra no pórtico no inverno, enquanto no verão o caminho do sol está diretamente sobre nossas cabeças, e acima do telhado, para que haja sombra". Ele não inventou a ideia, mas estava lembrando a seus ouvintes como a arquitetura grega havia tradicionalmente explorado os diferentes caminhos do Sol através do céu em diferentes épocas do ano. Os gregos resolveram sua crise energética organizando o layout de suas cidades para garantir que cada casa pudesse tirar proveito da radiação solar da forma como Sócrates havia descrito. A combinação de uma tecnologia comprovada com uma política governamental esclarecida funcionou, e uma crise foi evitada.

(Phillips, Lee. Solar Energy, in Managing Global Warming: An Interface of Technology and Human Issues; Letcher, T.M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018)

Vivemos um tempo de nova crise ambiental, em que os combustíveis fósseis são os que mais contribuem para a mudança climática e o aquecimento global. A única esperança de reduzir as emissões de gases de efeito estufa é encontrar métodos mais limpos de geração de eletricidade e de transporte. Esta talvez seja a principal razão para se desenvolver formas renováveis de energia, tais como a energia solar, e evitarmos que essa crise perdure.

NOTAS DO EDITOR:

► O endereço de correio eletrônico do Prof. João Marcelo é ferreira@cear.ufpb.br.

► O Currículo Lattes pode ser acessado clicando em <http://lattes.cnpq.br/6782500635447830>.

► Endereço para correspondência:

Prof. João Marcelo Dias Ferreira, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP: 58051-970. Caixa Postal 5115.