



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO DE JANEIRO
Campus Nilópolis

Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em ensino de
Ciências Mestrado Profissional em Ensino de Ciências
Campus Nilópolis

FUNDAMENTOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA



*Fundamentos de energia solar para a disciplina
Fundamentos de Sistemas Fotovoltaicos*

*Alexandre da Silva Barcellos
Alexandre Lopes de Oliveira*

FUNDAMENTOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

*Fundamentos de energia solar para a disciplina
Fundamentos de Sistemas Fotovoltaicos*

Alexandre da Silva Barcellos
Alexandre Lopes de Oliveira

Nilópolis, 2022

Dedicatória

Dedico esta obra a toda minha família por todo amor, apoio, carinho e confiança no meu trabalho e, em especial, aos meus queridos pai e mãe, o Sr. Rudinei Gomes de Azevedo e a Sra. Maria Helena da Silva, que sempre olharam e vibraram por mim.

Alexandre da Silva Barcellos

Este material instrucional pedagógico foi gerado a partir da dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Ciências intitulada “APLICAÇÕES DIDÁTICAS DA METODOLOGIA PEER INSTRUCTION E DE UMA CÉLULA SOLAR CONSTRUÍDA COM LED: um ensaio experimental didático para a disciplina Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica no Curso FIC Instalador de Sistemas Fotovoltaicos”, defendida em 21 de julho de 2022, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), *Campus Nilópolis-RJ*. O presente recurso didático-pedagógico foi aprovado pela banca avaliadora da defesa de dissertação.

REVISÃO CIENTÍFICO-TEXTUAL

Prof. Titular Vitor Luiz Bastos de Jesus

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro

Prof. Titular Augusto Cesar de Castro Barbosa

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Sumário

1. ENERGIA.....	1
1.1 O consumo de energia pelo homem	2
1.2 Fontes de energia.....	6
1.2.1 Fontes não renováveis	7
1.2.2 Fontes renováveis.....	14
2. PANORAMA ATUAL DA TECNOLOGIA FV	24
2.1 O cenário mundial.....	24
2.2 O cenário nacional	26
2.2.1 Legislação brasileira para o setor de energia solar	31
2.2.2 Etapas e procedimentos para solicitação de micro e minigeração distribuída fotovoltaica.	35
3. RADIAÇÃO SOLAR.....	37
3.1 O Sol	37
3.2 Aspectos da radiação.....	38
3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO	43
3.3.1 Piranômetro	43
3.3.2 Pireliômetro.....	44
4. GEOMETRIA CELESTE.....	46
4.1 Coordenadas Geográficas	48

4.1.1 Longitude (λ).....	48
4.1.2 Latitude (φ).....	48
4.2 Coordenadas Astronômicas.....	49
4.2.1 Sistema Horizontal.....	49
5. SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA.....	51
5.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA E ELETRICIDADE.....	52
5.1.1 Torre solar.....	52
5.1.2 Concentradores parabólicos.....	53
5.2 ENERGIA SOLAR TÉRMICA E AQUECEDOR SOLAR	55
5.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	58

1. ENERGIA

Atualmente vivemos num mundo com muitas tecnologias e a energia, em suas mais diversas formas, é quem o move. Contudo, desde sempre ela esteve presente nas ações humanas e foi decisiva na luta pela sobrevivência e evolução do homem.

A energia está presente das mais diversas maneiras no dia a dia do ser humano. Nos seus afazeres domésticos, nos exercícios, na alimentação, no lazer, trabalho e em muitos objetos que o auxilia em sua caminhada. Enfim, em todas as suas ações há consumo de energia.

Mas, afinal, o que é energia?

Tal termo é muito amplo e de difícil definição, suporta em si muitos sentidos. Na Grécia antiga, século IV A.C., Aristóteles, em sua obra *Metafísica*, identificava energia (“*energeia*”) como uma realidade em movimento. Até meados do século XIX o conceito de energia era confundido com a definição de força, e foi nesse mesmo século que houve a diferenciação de ambos os conceitos [1].

Atualmente, a definição mais usual, que quase corresponde ao senso comum e é encontrada em muitos livros, afirma que “energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho”.

Outra questão relevante na formação e entendimento do conceito de energia é que ela nunca pode ser criada. Ela será sempre transformada de uma forma para outra. Portanto, a forma da energia pode variar no tempo, mas a quantidade total não muda, permanece constante. Esse é um dos mais importantes princípios da Física, o princípio da conservação da energia.

1.1 O CONSUMO DE ENERGIA PELO HOMEM

Em todos os processos que ocorrem no organismo humano há consumo de energia. Para pensar, ler, andar, correr, há gasto de energia. O coração, para manter o sangue circulando no corpo, gasta energia. Assim, não há nada que possa ocorrer voluntariamente ou involuntariamente no corpo que não necessite de energia.

Nos tempos atuais a demanda do homem por energia ultrapassou as necessidades básicas, aquelas que tinham em tempos distantes, tais como alimentar-se, proteger-se do frio e dos predadores. Hoje ela também é usada para aquecer a água nas casas, acender as lâmpadas, produzir imagem e som nos aparelhos de áudio visual; movimentar os automóveis, trens e aviões; criar bens e cultivar alimentos.

Para que o homem chegasse no nível de evolução atual, ele precisou aprender como utilizar as diversas formas de energia presentes na natureza ao seu favor. Atualmente ele transforma as fontes naturais tais como: energia solar, eólica, do petróleo, das águas correntes dos rios, vegetação, carvão mineral e urânio, em outras formas de energia. Como exemplo podemos citar a energia elétrica e a dos combustíveis refinados, fontes bases dos processos industriais e da utilização nas grandes cidades e zonas rurais.

A demanda por energia vem aumentando com o crescimento da população mundial. Estudos mostram que entre 2013 e 2035 o consumo esperado de energia deve aumentar em 35% e esse é um dos grandes desafios da humanidade: prover

energia para todos os cidadãos do planeta para que sejam atendidas, no mínimo, as necessidades básicas [1].

Além da necessidade de garantir energia para todos, outro grande desafio é a redução da dependência dos combustíveis fósseis como o carvão mineral, o petróleo e gás natural, dominantes nas matrizes energéticas dos países, como mostra a Figura 1.1. Basicamente essas fontes respondem por 80% do fornecimento de energia no mundo e, devido à natureza dela, com capacidade de reposição muito baixa, menor do que a taxa de consumo, correm o risco de se esgotarem.

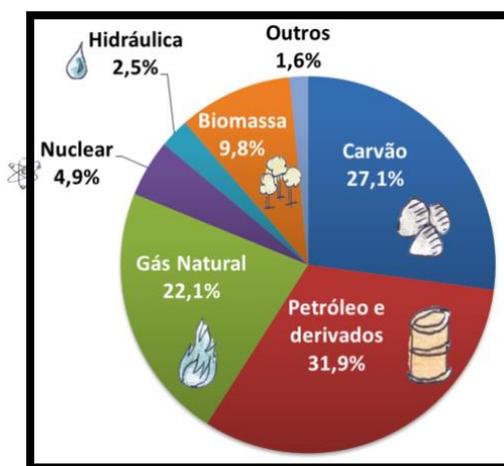


Figura 1.1 Matriz elétrica energética.

Fonte: International Energy Agency (IEA), 2018.

Então migrar para fontes alternativas é um processo necessário, mas que muitas vezes esbarra em questões de ordem econômica, logística e de disponibilidade de recursos naturais. Esses entraves precisam ser resolvidos para as que nações

dependentes dessas fontes energéticas consigam se desenvolver baseadas em fontes renováveis e limpas.

Paralelamente às questões de disponibilidades das fontes fósseis de energia, há também as questões socioambientais. Essas fontes emitem gases nocivos ao equilíbrio climático do Planeta ao serem queimadas nos motores dos automóveis, nas fornalhas das fábricas e nas caldeiras das usinas, intensificando o efeito estufa. Gases como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o vapor de água (H_2O), principais agentes para a geração efeito estufa, são comumente emitidos nos processos industriais, de produção de energia e nos motores a combustão.

O efeito estufa é uma condição em que o calor que entra num determinado sistema, não consegue sair, ficando aprisionado. Para grande parte dos cientistas, a temperatura média do planeta está aumentando porque as atividades humanas estão emitindo para a atmosfera grande quantidade de gases que acabam por intensificar o efeito estufa (GEE).

Essa elevação na temperatura tem tido como consequências o derretimento das geleiras nos polos, chuvas e ventanias mais intensas, aumento dos níveis dos rios e mudanças dos cenários climáticos habituais [2].

Portanto é necessário que as ações humanas para frear o aquecimento global sejam rápidas, a fim de evitar que temperatura global ultrapasse o limite de 2°C , valor que poderia levar à extinção em massa de muitas espécies no Planeta [3]. Para isso, precisa-se pensar e pôr em prática ações que viabilizem o uso de fontes de energia mais limpas e com capacidade de renovação maior do que a taxa de uso pelo homem, a fim de diminuir o impacto causado pelos combustíveis fósseis na natureza.

1.2 FONTES DE ENERGIA

Com relação às fontes de energia, podemos classificá-las como fontes primária ou secundária, quando é levado em consideração a sua disponibilidade natural na natureza.

Fontes primárias – são aquelas que são existentes na natureza, tais como: solar, eólica, carvão mineral, petróleo, águas correntes dos rios, vegetação e urânio.

Fontes secundárias – são aquelas criadas a partir das primárias. Como exemplo podem ser citadas a fonte de energia elétrica, o combustível refinado do petróleo, pronto para ir para os tanques dos automóveis, o calor advindo da queira do carvão mineral entre outras.

Outra classificação para as fontes de energia leva em consideração a sua taxa de renovação em relação ao consumo humano dessas fontes. Nesse sentido, as fontes podem ser:

Não renováveis ou convencionais – aquelas que são finitas ou esgotáveis. Para a maioria delas, a reposição na natureza é muito lenta, pois resulta de um processo de milhões de anos sob condições específicas de temperatura e pressão. Quanto mais se usa as fontes de energia não renováveis, menos haverá no estoque total. São exemplos de fontes não renováveis de energia: petróleo, carvão mineral, gás natural e nuclear.

Renováveis – As fontes de energia que pertencem a este grupo são consideradas inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem usadas. São exemplos de fontes renováveis: hídrica (energia da água dos rios), solar (energia do sol), eólica (energia do vento), biomassa (energia de matéria orgânica), geotérmica (energia do interior da Terra), oceânica (energia das marés e das ondas) e hidrogênio (energia química da molécula de hidrogênio).

As fontes de energia não renováveis, atualmente, são as mais consumidas no mundo e isso ocorre porque suas características são bem conhecidas, possuem um rendimento energético elevado (poucas perdas de energia no processo de transformação), preços atrativos, geram muitos empregos e possuem infraestrutura construída para geração e distribuição (usinas, dutos, ferrovias e rodovias). Os principais usos das fontes não renováveis são na geração de eletricidade, como combustível nos transportes de cargas e de pessoas e no aquecimento de casas [2].

1.2.1 Fontes não renováveis

As fontes não renováveis compreendem os combustíveis fósseis e os radioativos.

1.2.1.1 Fontes fósseis:

As fontes fósseis são recursos que foram formados há milhões de anos a partir do depósito de matéria orgânica (animais

e plantas) em camadas do subsolo e submetidas a condições especiais de temperatura e pressão. Ao longo dos anos a matéria orgânica de animais e plantas mortos foram sendo cobertas por sedimentos e se depositando no fundo dos mares. Camada após camada e milhares de anos depois essa matéria foi se transformando em petróleo e gás, ficando presos em reservatórios.

A – Petróleo & Gás natural

O petróleo é uma substância oleosa, inflamável e menos densa do que a água. Ele consiste numa mistura de hidrocarbonetos, compostos químicos a base de Carbono (C) e Hidrogênio (H), em estado líquido nas condições ambientes de temperatura e pressão. Além do uso como fonte de energia, o petróleo é utilizado como matéria prima na fabricação de inúmeros compostos como os plásticos, as borrachas sintéticas, tintas, solventes, produtos cosméticos etc.

O gás natural pode ser encontrado na forma livre ou associado à fase óleo. Ele é uma mistura de hidrocarbonetos contendo desde o metano (CH_4) até o hexano (C_6H_{14}). O gás natural é utilizado como combustível na indústria, nos veicular e no uso doméstico. Além disso, ele apresenta aplicação como matéria-prima nas indústrias siderúrgica, química e de fertilizantes. O processamento desse gás é feito nas unidades de processamento de gás natural (UPGN) e comprimido para a distribuição pelas estações distribuidoras.

Tanto o petróleo como o gás natural ocorrem em regiões denominadas de "bacias sedimentares", lugares sob a superfície terrestre que eram mais baixos e planos que o terreno em volta e

que permitiram o depósito de matéria orgânica e o aterro por fragmentos de rochas e terras, conforme Figura 1.2. As bacias sedimentares podem ser marinhas ou terrestres e nelas o petróleo e o gás natural são encontrados em poros, pequenos buracos dentro de rochas sedimentares (também chamadas de rochas reservatórios) [2].

Segundo o Instituto brasileiro de petróleo e gás (ibp), as maiores reservas de petróleo e gás provadas no mundo encontram-se no Irã com 343 bilhões de barris equivalentes de petróleo (bep), estando esse país no topo do ranking. Em seguida aparece a Venezuela com 340 bilhões bep, a Rússia com 335 bilhões bep, Arábia Saudita com 332 bilhões bep e o Canadá 179 bilhões bep. O Brasil ocupa atualmente a 23ª posição com um volume de 16 bilhões bep [4].

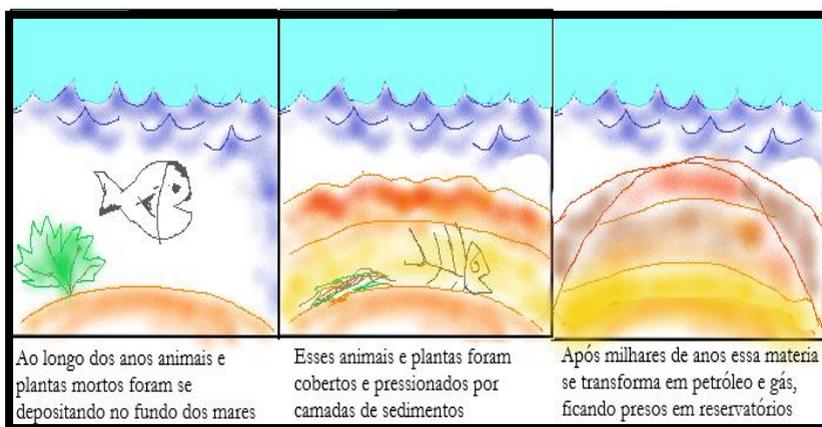


Figura 1.2 Processo de formação do petróleo e gás.

Fonte: próprio autor.

B – Carvão mineral

O carvão mineral é encontrado em locais onde havia florestas e pântanos que originaram esse recurso. Ele é formado por troncos, raízes, galhos e folhas de árvores gigantes que cresceram há 250 milhões de anos em pântanos rasos. Esses vegetais, após morrerem, depositaram-se no fundo lodoso e foram sedimentados. Com o tempo, sob temperatura e a pressão da terra que foram se acumulando sobre esse material, criou-se as condições adequadas para a transformação dele em carvão mineral, conforme ilustra a Figura 1.3.

Segundo o site do serviço geológico do Brasil (CPRM) as reservas mundiais de carvão mineral são muito grandes: 847,5 bilhões de toneladas e tem capacidade para atender à produção atual por 130 anos. As reservas mais significativas estão nos Estados Unidos, na Rússia e China que, juntos, detêm 60% do volume total. O Brasil, nesse cenário, detém 0,7% apenas da reserva mundial.



Figura 1.3 Processo de formação do carvão mineral.

Fonte: BRASIL. <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-e-energia>. Acesso: 03/2020.

Além de possuir uma das maiores reservas mundiais de carvão mineral, a China também lidera o ranking na produção e no consumo. O país produz cerca de 47% da produção mundial e consome cerca de 50% de todo carvão que é produzido no mundo. Já o Brasil, em termos de produção e consumo, ele aparece timidamente com 0,1% e 0,4% respectivamente no ranking dos países que utilizam esse recurso energético.

O carvão mineral encontra várias aplicações no setor industrial. Ele pode ser aproveitado para geração de eletricidade, por meio de usinas termoeletricas, na geração de calor para processos de secagem de produtos, tais como a cerâmicas, na fabricação de vidros e em altos fornos, onde é fundido o minério de ferro para a produção do ferro metálico e aço.

C – Xisto

O xisto betuminoso é uma rocha sedimentar composta por matéria orgânica oleosa denominada betume. Esse material, também chamado de folhelho pirobetuminoso, é proveniente da transformação química de resíduos vegetais ao longo de milhões de anos. Ele é rico em material orgânico e contém querogênio (uma sólida mistura de compostos químicos orgânicos), a partir do qual podem ser produzidos hidrocarbonetos líquidos chamados de petróleo de xisto [2].

Os depósitos de xisto betuminoso são frequentes em todo o mundo. As estimativas de reservas globais vão de 2,8 a 3,3 trilhões de barris de óleo recuperável, contra 1,6 bilhões de barris de petróleo das fontes convencionalmente exploradas.

Os maiores depósitos de xisto encontram-se nos EUA, com 62% dos recursos mundiais; na Rússia e no Brasil. Juntos esses três países possuem 86% dos recursos, segundo consta em matéria no site da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE).

No Brasil, a maior parte do xisto encontrado está localizada na cidade de São Mateus do Sul, no estado do Paraná e o controle de exploração dessa substância pertence à Superintendência Internacional de Xisto (SIX), da Petrobrás, que pesquisa e desenvolve tecnologias para aproveitamento desse material.

O óleo de xisto quando refinado é idêntico ao petróleo e dá origem a diferentes produtos e subprodutos empregados em diversas áreas da indústria. Como óleo combustível, ele pode ser usado como fonte de energia. O gás de xisto, muito semelhante ao gás natural, é muito utilizado na indústria de cerâmica. Já o enxofre é útil à produção de ácido sulfúrico, fabricação de medicamentos, fertilizantes, alimentos, entre outros. A nafta é empregada na produção de solventes e como combustível industrial. Além desses já citados tem-se a Cinzas de xisto usada na fabricação do cimento, o calxisto, que é aplicado à correção da acidez de solos agricultáveis e o xisto retornado, utilizado como insumo industrial na fabricação de vidros, cimento e cerâmica vermelha.

1.2.1.2 Fontes radioativas:

As fontes radioativas utilizadas para geração de energia advêm de isótopos de elementos químicos com núcleos pesados como o Urânio (U), Polônio (Po), Rádio (Ra), e Tório (Th). Esses elementos, em geral, possuem número atômico (Z) maior do

que 84 e são instáveis, por isso emitem partículas e onda, para tornarem-se mais estáveis e mais leves.

Desses elementos, o urânio é o mais utilizado para produção de energia elétrica. Ele é um mineral encontrado na natureza com relativa abundância e antes de ser usado, passa por enriquecimento, processo de purificação e concentração.

Na geração de energia utilizando elementos radioativos como combustível, seus núcleos são bombardeados de forma controlada por nêutrons e partidos em dois, num processo conhecido como fissão nuclear. A energia liberada durante o processo de fissão nuclear aquece um fluido, geralmente a água, produzindo vapor que, em alta pressão, movimenta as turbinas acopladas a geradores elétricos, produzindo assim, energia elétrica, conforme ilustra a Figura 1.4.

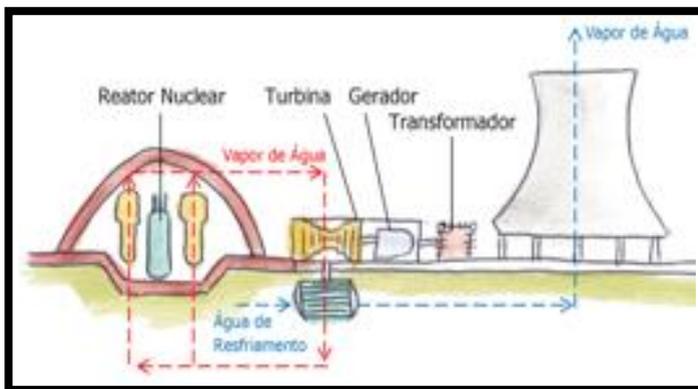


Figura 1.4 Usina nuclear de geração de energia.

Fonte: BRASIL. <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-e-energia>. Acesso: 03/2020.

A geração de energia baseada em combustível radioativo é vista por muitos como positiva, pois é uma fonte de energia barata

e limpa, não impactando no clima da Terra. Entretanto, por causa do perigo da radiação emitida na produção desta energia e da radioatividade dos materiais utilizados, outros sentem que ela pode não ser uma energia alternativa viável para o uso de combustível fóssil ou energia solar.

Atualmente existem mais de quatrocentas usinas nucleares em operação no mundo e elas respondem por aproximadamente 5% de toda energia gerada no mundo. A maioria dessas usinas encontra-se no Reino Unido, EUA, França e no Leste europeu.

O problema mais relevante no uso dessa tecnologia é que vazamentos ou explosões nos reatores por falhas em seus sistemas de segurança provocam graves acidentes nucleares, como o ocorrido em Chernobyl, na Ucrânia, em 1986, o mais grave da história. Na ocasião houve mais de trinta mortos, centenas de feridos e forma uma nuvem radiativa que se espalhou por toda a Europa.

O Brasil tem apenas duas usinas nucleares, Angra 1 e Angra 2, localizadas no Estado do Rio de Janeiro. Elas entraram em operação em 1985 (Angra 1) e 2001 (Angra 2) e são responsáveis pela produção de 3% da energia consumida no país [5].

1.2.2 Fontes renováveis

1.2.2.1 Hídrica

A energia proveniente das fontes hídricas é gerada a partir do aproveitamento das águas correntes dos rios. Essas águas entram em movimento devido à energia potencial que elas

possuem nas cabeceiras dos rios e, à medida que as águas ganham velocidade no decorrer do curso do rio, essa energia vai se transformando em energia cinética.

Para o aproveitamento do potencial energético é necessário construírem-se usinas hidrelétricas, locais onde a energia cinética da água é transformada em energia elétrica. Quando a água em movimento chega numa dessas usinas, construída em seu curso, ela passa por uma turbina. Parte de sua energia cinética movimenta a turbina fazendo-a girar. Acoplada à turbina encontra-se o gerador, que gira junto com a turbina produzindo energia elétrica, conforme mostrado na Figura 1.5.

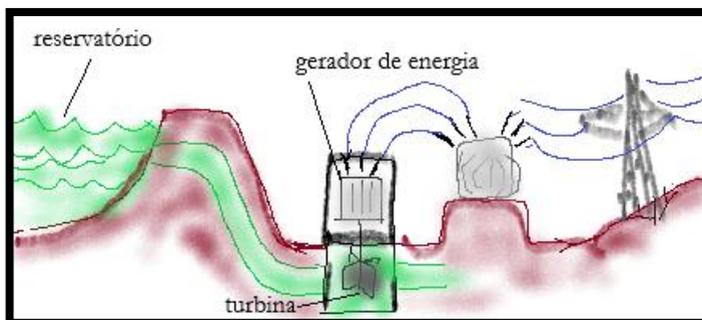


Figura 1.5 Usina hidrelétrica geradora de energia.

Fonte: próprio autor.

Esse sistema básico que aproveita a energia da água para gerar eletricidade é chamado de usina hidrelétrica. Essas usinas podem ser construídas de duas formas: represando as águas do rio, criando assim uma bacia d'água ligada à usina por meio de dutos, ou aproveitando-se apenas da velocidade das águas para gerar energia, sem construção de barragem. Esse modelo de usina é conhecido como fio d'água.

Ambas as construções, hidrelétricas com barragens ou a fio d'água, apresentam vantagens e desvantagens. As usinas que utilizam as barragens são menos dependentes dos volumes de águas nos rios, pois elas mantem uma reserva em suas represas. Isso confere a essas usinas uma estabilidade maior quanto à produção de eletricidade. Entretanto, para se construir essas barragens, é necessário alagar grandes áreas causando a morte de diversas plantas e animais e a retirada, muitas vezes, de famílias dos seus lares.

Na construção da usina fio d'água não há alagamento e, por isso, ela não apresenta os problemas citados para as usinas com barragens. Entretanto, essas usinas são muito dependentes das condições dos rios. Em períodos de seca elas podem ser obrigadas a interromper o abastecimento de energia por falta d'água no rio.

O Brasil possui o maior potencial hidráulico do mundo e 65,2% da energia elétrica gerada no país é proveniente da fonte hídrica. Segundo Abbud & Tancredi (2010) [6], o potencial energético do país é uma das suas maiores riquezas, devido à disponibilidade hídrica e o relevo geográfico, o que fornece geração de energia renovável.

Dentre as principais usinas do país está a usina de Itaipu, construída no rio Paraná, localizada na divisa entre o Brasil e Paraguai. Ela é binacional, pois pertence aos dois países e é considerada a segunda maior do mundo, com capacidade instalada de 14 mil MW de potência.

A energia hidráulica é considerada renovável pois suas quantidades se renovam a cada ciclo de evaporação, devido ao calor do Sol, e precipitação da água em forma de chuva, alimentando as fontes nascentes dos rios.

1.2.2.2 Eólica

A energia eólica é obtida por meio do aproveitamento do vento, que é o movimento das massas de ar devido ao gradiente de pressão sobre elas. A energia dos ventos é transformada em energia elétrica através dos aerogeradores, equipamentos com imensas hélices acopladas por um eixo a um gerador de eletricidade. Essas hélices, em geral, possuem o tamanho de uma asa de avião e são instaladas em torres de até 150 metros de altura. Elas giram devido à ação do vento e fazem o gerador girar, gerando assim, energia elétrica, conforme Figura 1.6.

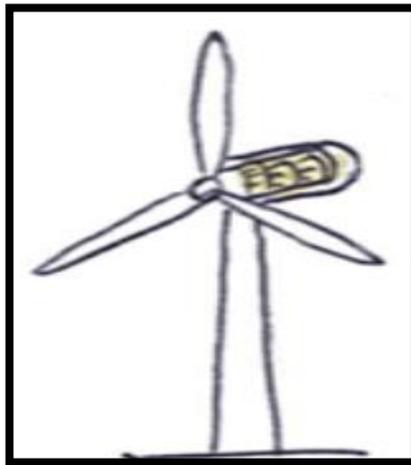


Figura 1.6 Usina eólica geradora de energia.

Fonte: Fusão termonuclear, extraído de
<<http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node10.htm>>, acesso em 03/2020.

Apesar de, aparentemente, o vento estar presente em todos os locais, para que seja viável a instalação de uma usina eólica num

determinado lugar, alguns critérios técnicos devem ser atendidos como: as condições da massa ar que deve apresentar intensidade próxima de 500 W/m^2 , a uma altura de 50 metros, velocidade em torno de 8 m/s e questões ambientais [7].

No Brasil, por exemplo, as regiões mais propícias para a instalação de usinas eólicas são o Sul e o Nordeste, onde esses critérios são atendidos. Nesses locais os ventos são abundantes e permitem a instalação de vários “parques eólicos” (conjuntos de aerogeradores; equivalentes às usinas).

Atualmente, no cenário mundial, a China e Estados Unidos lideram o ranking em capacidade eólica instalada nos últimos anos. Na Europa ela cobriu 15% da demanda de eletricidade no continente no ano de 2019 e, em relação ao Brasil, o país ficou em 5º colocado em 2018 no ranking mundial de capacidade eólica, segundo dados divulgados pelo Global Wind Energy Council (GWEC).

1.2.2.3 Solar

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico) na célula solar. O efeito fotovoltaico consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz [8].

Hoje, essa tecnologia vem se desenvolvendo e crescendo em números de instalações. Os países que mais se destacam no mercado mundial de energia solar fotovoltaica são a China, líder do ranking desde 2015, alcançando uma potência instalada de 176,1 GW em 2018, os Estados Unidos da América (EUA), com

capacidade instalada de 62,2 GW, Japão com 56 GW e a Alemanha com 45,4 GW.

No Brasil a situação ainda é um pouco tímida, quando comparada com os países que ocupam o topo do ranking em produção de energia solar. Mesmo possuindo um excelente território com potencial energético para a exploração do mercado de energia solar fotovoltaica, que chega a superar o potencial de países europeus que estão na liderança mundial desse mercado, e de vir experimento um expressivo crescimento dessa tecnologia ano após ano, ele continua com uma capacidade instalada que ainda não o coloca entre os dez maiores líderes mundiais em produção. Atualmente a sua geração está em torno de 2,3 GWp, sendo que 16,2% apresentam-se na modalidade de geração distribuída e 83,8% em projetos de geração centralizada. Esse é um número ainda insignificante, quando comparado ao total de 141 GW de capacidade instalada de energia elétrica, na matriz elétrica brasileira.

1.2.2.4 Biomassa

Do ponto de vista energético a biomassa é toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia [9]. A lenha, o bagaço de cana-de-açúcar, o cavaco de madeira, os resíduos agrícolas, as algas, os restos de alimentos e até o excremento animal que, após sua decomposição, produzem gases que são usados para gerar energia.

A biomassa também pode ser queimada diretamente, como no fogão à lenha, para aproveitamento do calor. Ou ainda pode ser

utilizada para aquecer água e produzir vapor em alta pressão, que é usado para acionar turbinas e geradores elétricos.

Por ser considerada uma fonte energética limpa e renovável, o interesse na utilização de biomassa ganhou espaço no mercado de energia. No Brasil, a biomassa mais utilizada para geração de eletricidade atualmente é oriunda da cana-de-açúcar, plantada e processada principalmente nas regiões Sudeste e Centro-oeste.

A biomassa pode também originar compostos tais como álcool (etanol), óleos vegetais e gorduras, que são processados e usados como combustíveis. Os materiais mais usados vêm da soja, cana-de-açúcar, mamona e milho. Assim como para a biomassa, a produção de biocombustíveis ocorre principalmente nas regiões Sudeste e Centro-oeste.

1.2.2.5 Geotérmica

A energia geotérmica ou energia geotermal é a energia obtida do calor presente no interior da Terra. Circundando o núcleo existe uma camada chamada manto que é formada por magma (semelhante à lava dos vulcões) e rocha, e a última camada, mais externa é a crosta terrestre, onde habitam os seres humanos, os animais e as plantas.

A crosta terrestre tem espessura variável e é fraturada em vários "pedaços" (fissuras), conhecidos como placas tectônicas. O magma formado no manto pode emergir para a superfície próximo dos limites dessas placas, como por exemplo, em erupções vulcânicas. Essas rochas que absorvem o calor do magma estão em alta temperatura, aquecendo também as águas subterrâneas que

podem emergir como gêiseres (nascente termal ou minas de água quente), conforme ilustra a Figura 1.7.

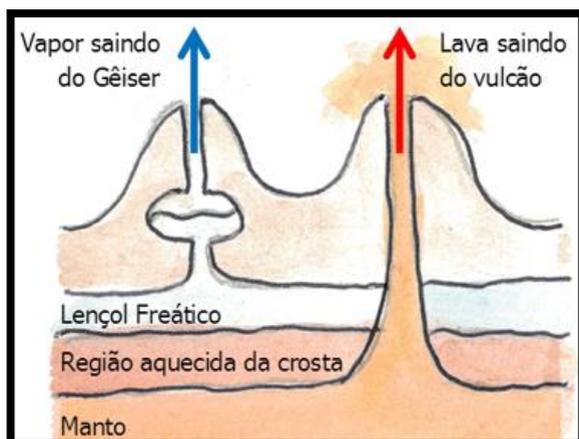


Figura 1.7 Gêiser e vulcão.

Fonte: BRASIL. <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-e-energia>. Acesso: 03/2020.

Para a geração elétrica, perfura-se o subsolo onde há grande quantidade de vapor e água quente, os quais devem ser retirados por dutos e conduzidos a um gerador na superfície da terra para a transformação da energia geotérmica em elétrica. É uma fonte de energia renovável porque o calor é produzido continuamente nessas camadas internas da Terra.

1.2.2.6 Oceânica

A energia gerada a partir desta fonte vem dos oceanos, de onde se aproveita o movimento das águas. Essa energia pode vir das ondas, das marés e das correntes marinhas, transformando a energia mecânica dos oceanos em energia elétrica.

O aproveitamento dessa fonte ainda está em desenvolvimento, havendo poucas usinas em operação no mundo.

De maneira muito similar ao que ocorre numa usina eólica, o movimento da corrente marinha gira uma turbina, transformando energia cinética em eletricidade.

O movimento das ondas provoca oscilação de cilindros internos. Esses cilindros pressionam óleo a passar por motores. A rotação desses motores aciona geradores elétricos, produzindo eletricidade.

Para o aproveitamento desta energia, é construída uma barragem em locais de grande amplitude de maré, onde a passagem da água gira uma turbina, transformando a energia cinética em eletricidade (maremotriz).

1.2.2.7 Hidrogênio

O hidrogênio é o menor elemento químico conhecido e está muito presente no nosso dia a dia, principalmente combinado com outros elementos, formando, por exemplo, água, plásticos, pães, seres vivos, etc. Já sua forma pura, gasosa, encontra-se em pequena quantidade na atmosfera. O hidrogênio para ser uma fonte de energia, precisa ser gerado, por isso, ele é considerado uma fonte secundária de energia e não é naturalmente repostado pela natureza.

Atualmente, o hidrogênio é aplicado como matéria prima na síntese de diversos produtos e seu uso como fonte combustível ainda está em desenvolvimento. O processo de geração de energia ocorre a partir da reação do hidrogênio com oxigênio, produzindo calor sem a emissão de poluentes atmosféricos e geração de

resíduos. Além disso, o hidrogênio pode também ser convertido em eletricidade por meio de células combustíveis.

As células combustíveis são equipamentos onde ocorre uma reação química semelhante a que ocorre em pilhas e baterias, mas nas células combustíveis, deve-se sempre fornecer hidrogênio, seja na forma pura ou em um composto (geralmente gasoso ou líquido) rico nesse elemento.

Dentro da célula combustível o hidrogênio se separa em duas partes: uma delas se associa ao oxigênio (gás importante para a nossa respiração), liberando calor e tendo como produto a água; a outra parte do hidrogênio, passa por um fio metálico, gerando a corrente elétrica.

No entanto, para obter hidrogênio na sua forma gasosa, deve-se utilizar energia. O hidrogênio pode ser produzido a partir de várias fontes e a forma mais comum é a partir de combustíveis fósseis, como o gás natural e carvão mineral. Pesquisas tentam viabilizar sua obtenção a partir da quebra das moléculas de água usando eletricidade de fontes renováveis (solar, vento) e também a partir da biomassa.

2. PANORAMA ATUAL DA TECNOLOGIA FV

2.1 O CENÁRIO MUNDIAL

A energia solar está disponível em abundância em todos os lugares da superfície da Terra e a sua quantidade incidente é, em torno, de 10.000 vezes maior que o total de energia consumida pela humanidade [10], como mostra a Figura 2.1. Esse fator, aliado ao grande desenvolvimento tecnológico que essa fonte tem experimentado, tem a tornado mais competitivas frente a outras opções, proporcionando uma maior participação dela na matriz elétrica de muitos países, incluindo o Brasil.

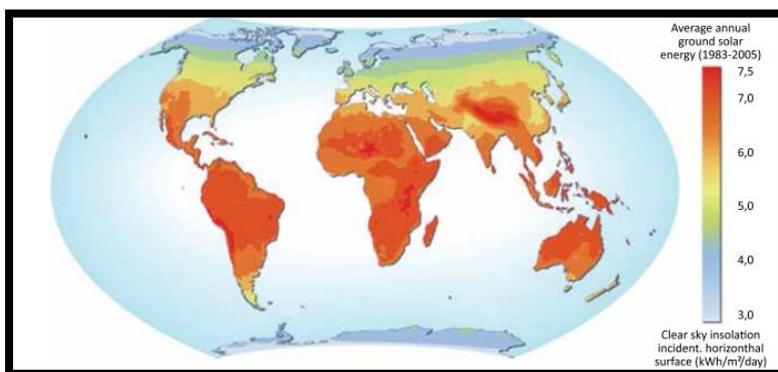


Figura 2.1 Potencial de Energia Solar no Mundo.

Fonte: United Nations Environment Programme – UNEP; NASA Surface Meteorology and Solar Energy – SSE, 2008 apud EIA (2018).

Pode-se ver pela figura que as regiões mais vermelhas são aquelas que recebem maior quantidade de energia, em kWh, por

metro quadrado, por dia. Estados Unidos, Canadá, os Continentes europeu e asiático recebem menos energia do que os países localizados mais próximos dos trópicos, porém apresentam um potencial de instalação bem maior, demonstrando que as políticas de apoio a essa tecnologia tem sido bem-sucedidas.

Em 2018 a capacidade instalada de energia solar no mundo alcançou 487,8 GW, 24,3% superior ao verificado no ano precedente e aproximadamente 22 vezes maior do que o observado em 2009. Em média, no decênio 2009–2018, a capacidade instalada de geração de energia elétrica a partir da fonte solar cresceu 40,8% ao ano no mundo como mostra o gráfico na Figura 2.2 [11].

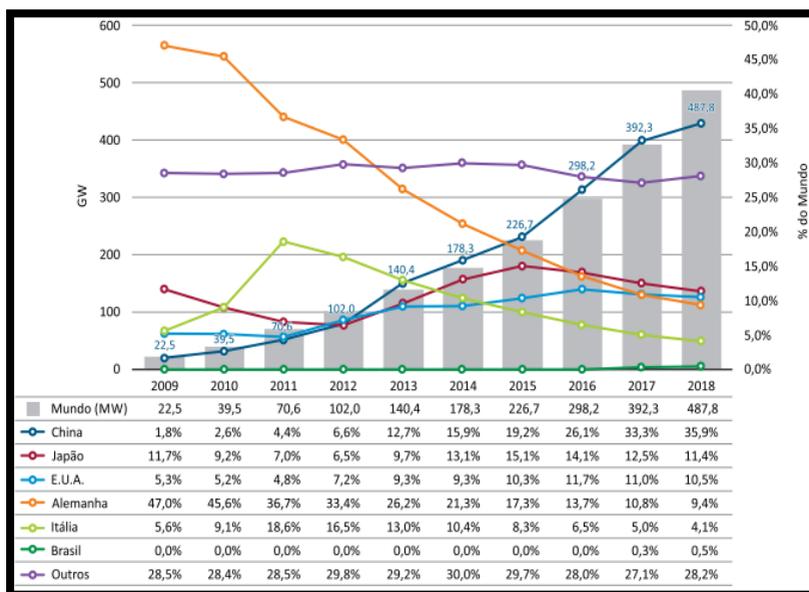


Figura 2.2 Evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo. (GW) e participação dos principais países e do Brasil (%)
 Fonte: BP (2019). Elaboração: BNB/ETENE/Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais.

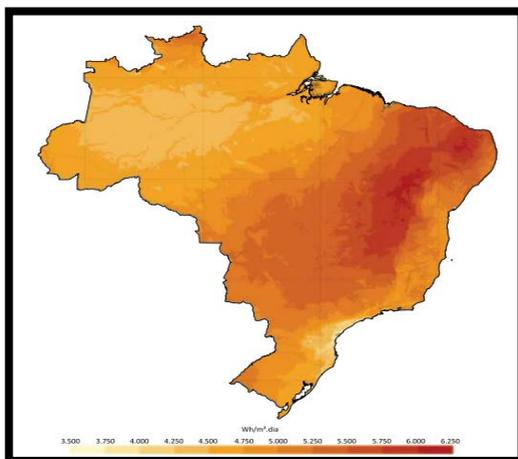
Este cenário de aumento expressivo na expansão da geração solar tende a se manter no mundo nos próximos anos, face ao apelo para a produção de energia a partir de fontes renováveis, às perspectivas de redução do custo de geração e ao aumento da eficiência da tecnologia fotovoltaica.

Ao longo do decênio 2009–2018, assistiu-se a paulatina ascensão da participação da China na capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo, alcançando a liderança em 2015 alcançando uma potência instalada de 176,1 GW em 2018. Os Estados Unidos da América (EUA) seguem a China com capacidade instalada de 62,2 GW, logo em seguida vem o Japão com 56 GW e a Alemanha com 45,4 GW. Esses quatro países são hoje as maiores potências em energia solar fotovoltaica, segundo dados apresentados no Fórum de Energias Renováveis – Green Rio em 2019 [12].

2.2 O CENÁRIO NACIONAL

A grande extensão territorial e o elevado nível de irradiação solar existente no Brasil, representam um enorme potencial para a geração solar fotovoltaica. O Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado em 2017 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, apresenta um estudo em que mostra os valores médios anuais da irradiação solar no Brasil, como pode ser visto na Figura 2.3. De acordo com esse estudo, a região que possui os melhores parâmetros, apresentando o maior nível de irradiação no plano inclinado (média anual de 5,52 kWh/m²dia) e menor variabilidade interanual durante o ano, é o Nordeste [13]. Por esse motivo, na porção semiárida dessa região, onde a elevada irradiação está

associada à ocorrência de baixa precipitação e menor cobertura de nuvens ao longo do ano, é a que melhor se credencia a ser o destino de investimentos em geração de energia elétrica a partir da fonte solar, como já se observa nos leilões da ANEEL [14].



Fonte Pereira et al. (2017).

Figura 2.3: Brasil: total diário de irradiação no plano inclinado na latitude – média anual.

Destaque-se ainda que o potencial solar no Brasil apesar de superar o potencial de países europeus, por exemplo, que estão na liderança mundial desse mercado, apresenta uma capacidade instalada que ainda não o coloca entre os dez maiores líderes mundiais em energia fotovoltaica. Uma das possíveis explicações para esse cenário em que o Brasil se encontra frente aos números internacionais pode estar relacionada ao grande potencial brasileiro para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

Essas fontes apresentam um potencial total de 805 GW de potência e o Brasil tem apenas uma capacidade instalada de

170 GW, representando que ainda pode crescer muito em termos de produção de energia. Desse total, 172 GW é para a fonte hídrica, 440,5 GW para a fonte eólica e 28.519 GW para a fonte solar em projetos centralizados e 164,1 GW para essa fonte em projetos residenciais de geração distribuída.

Portanto, são enormes as possibilidades de investimentos para suprir as necessidades do País por meio das fontes renováveis, particularmente com a utilização dos recursos solar e eólico.

Segundo artigo escrito no caderno setorial ETENE, do Banco do Nordeste, a energia solar no Brasil teve grande impulso a partir de 2016, em razão de avanços no marco legal da geração distribuída e principalmente devido à queda no preço dos módulos fotovoltaicos. De 2016 a 2019, a capacidade de geração solar experimentou crescimento de 231% ao ano, em média, alcançando 4.472,8 MW de potência instalada, como mostra o gráfico na Figura 2.4 [14].

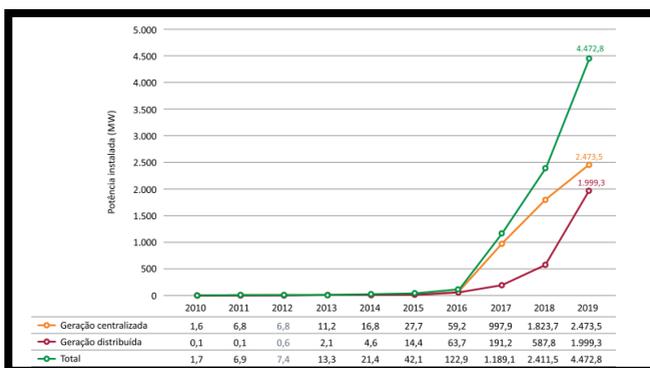


Figura 2.4 Evolução da capacidade instalada de geração de energia solar no Brasil (MW).

Fonte: ANEEL (2020). Acesso em 12 mar. 2020.

A geração centralizada no país corresponde a 55% e a geração distribuída a 45% da capacidade instalada fotovoltaica (em dados do final de 2019), estando esta última modalidade avançando muito mais rapidamente. Considerando projetos de geração distribuída e centralizado, a região que lidera o Ranking de capacidade instalada, com 41,57%, é o Estado do Nordeste, principalmente pelo grande número de projetos de energia centralizada que ocorrem na região, como mostrado da tabela 2.1.

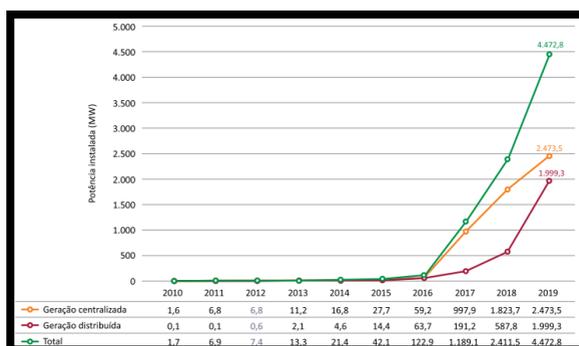


Tabela 2.1 Capacidade instalada de geração distribuída centralizada de solar fotovoltaica nas Regiões Brasileiras.

Fonte: ANEEL (2020). Acesso em 12 mar. 2020. Elaboração: BNB/ETENE/Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais.

A geração centralizada de energia solar fotovoltaica no Brasil, ocorre principalmente por meio de leilões realizados pela CCEE, promovidos pela ANEEL. Nos sete leilões realizados em que a fonte solar foi contemplada, foram aprovados 160 projetos, perfazendo um montante de 4.767,1 MW de potência.

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2029 [15], a previsão de crescimento para projetos em geração centralizada é de 5 TWh em 2019 para 21 TWh no horizonte do

Plano. Esse crescimento representa um incremento de 15,4% ao ano no decênio 2019–2029, caso essa expansão se confirme.

A geração distribuída atingiu cerca de 2 GW no final do ano de 2019, de capacidade instalada tornando o investimento na geração própria bastante rentável no Brasil. Os fatores que concorreram para isso foram os avanços na legislação, ocorrida a partir da Resolução Normativa (REN) ANEEL Nr. 482/2012 e aperfeiçoamentos proporcionados pela REN 687/2015, o alto valor das tarifas de eletricidade para os consumidores e um modelo de compensação de créditos extremamente favorável. Essas medidas levaram não apenas consumidores residenciais, mas também comércios, bancos e indústrias a investirem em sistemas de geração distribuída [15]

Em relação à geração distribuída, segundo projeções do referido Plano Decenal, haverá em 2029 1,3 milhão de instalações de sistemas de micro ou minigeração distribuída, totalizando 11,4 GW. Em termos de energia, estima-se que sejam gerados 13 TWh para esse mesmo ano, correspondentes a aproximadamente 1,4% da geração de energia elétrica em 2019 [16].

Esse é o panorama atual da situação da energia solar no Brasil, um país com excelente potencial natural para exploração dessa fonte, mas que ainda depende de uma política mais consolidada, sem riscos de alterações na legislação que passam desanimar o setor em expansão.

2.2.1 Legislação brasileira para o setor de energia solar

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) iniciou o processo para ampliar a geração de energia solar fotovoltaica em unidades consumidoras ao editar a Resolução Normativa (NR) ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012. A NR nº 482 estabelece as condições gerais para o acesso de geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e cria o sistema de compensação de energia [17].

A seguir são listadas as principais normativas que regulamentam o mercado de geração de energia solar fotovoltaica:

Resolução Normativa Nº 414 – Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica (com atualização da Res. 670 de 2016).

“Apresenta, para as distribuidoras e consumidores, as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Trata sobre contratos, medição para faturamento, leitura, cobrança, pagamento, responsabilidades da distribuidora e do consumidor, ressarcimento de danos elétricos, dentre outros assuntos”.

Resolução Normativa Nº 482 – Acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica (com a atualização da Res. 687 de 2015).

“Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”.

PRODIST Módulo 3 seção 3.7 R. 06 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

“Estabelecer as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, ao sistema de distribuição, não abrangendo as Demais Instalações de Transmissão – DIT, e definir os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão, aplicando-se aos novos acessantes bem como aos existentes”.

2.2.1.1 Resolução 482/2012 – REN 687/2015

A resolução 482 da ANEEL foi o marco regulatório que permitiu aos consumidores realizar a troca da energia gerada com a da rede elétrica, criando as regras e o sistema que compensa o consumidor pela energia elétrica injetada na rede [18].

Desde 17 de abril de 2012, é permitido o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica nacionais (redes elétricas das concessionárias), através das normas criadas na Resolução 482 da ANEEL. Dessa forma, todo consumidor ativamente cadastrado no Ministério da Fazenda, por um CPF ou um CNPJ, tem concessão para conectar um sistema gerador de energia elétrica próprio, oriundo de fontes renováveis (hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada), paralelamente às redes de distribuição das concessionárias [18].

2.2.1.2 Sistema de Compensação de Energia (Net Metering)

Na regulamentação do processo de injeção e consumo de energia elétrica, criou-se o sistema de compensação de energia

elétrica. Nele, toda a energia ativa, em Watt, injetada na rede pelo sistema gerador de uma unidade consumidora, é emprestada gratuitamente à distribuidora local e posteriormente compensada sobre o consumo de energia elétrica ativa, também em Watt. Essa compensação pode ocorrer integralmente na unidade em que o sistema se encontra instalado ou, após compensar a energia na unidade de instalação o excedente pode ser usado para compensar a energia em outra unidade consumidora ou de outra, desde que ambas pertençam ao mesmo titular em CPF ou CNPJ.

Ainda, os créditos energéticos permanecem válidos podendo ser compensados em um prazo de até 60 meses, já que a energia elétrica gerada pela unidade consumidora pode ser superior à consumida, ocasionando o acúmulo de créditos a serem utilizados em meses posteriores.

2.2.1.3 Microgeração e Minigeração de Energia

Compreende-se microgeração distribuída por um sistema gerador de energia elétrica, com potência instalada inferior ou igual a 75 kW (quilowatts) e minigeração distribuída por um sistema gerador de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW (megawatts).

2.2.1.4 Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras

Pode-se entender como empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, condomínios verticais e/ou horizontais, situados em mesma área ou área contígua, com o sistema gerador instalado em área comum, onde as unidades consumidoras do local

e a área comum do condomínio sejam energeticamente independentes entre si.

Assim, os créditos energéticos gerados são divididos entre os condôminos participantes e a área comum do empreendimento, sob responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do local.

“Nessa modalidade de geração, não é necessário estabelecer nenhum tipo de consórcio ou associação, pois a própria administradora do condomínio já representa a entidade (CNPJ) responsável pelo sistema gerador”, neste sentido, a administradora é a responsável por estabelecer quem são e quais as parcelas que cada condômino tem direito sobre o crédito energético”.

2.2.1.5 Geração compartilhada

Consumidores de CPF ou CNPJ distintos, abastecidos pela mesma concessionária distribuidora, associados por meio de cooperativa ou consórcio, respectivamente, onde a unidade micro ou minigeradora fica em local diferente das unidades consumidoras compensatórias. Em outras palavras, através da geração compartilhada os consumidores se unem na geração de energia elétrica.

“Nessa modalidade de geração, é necessário estabelecer um consórcio, associação ou cooperativa para que essa entidade (CNPJ) represente e administre o sistema gerador e estabeleça o rateio dos créditos energéticos”.

“Veja que existe uma diferença crucial entre geração com múltiplas unidades geradoras e geração compartilhada, uma vez que o sistema gerador é instalado em um local diferente do ponto de consumo, já não se pode utilizar o CNPJ do condomínio e, por isso, deve se estabelecer o sistema gerador em ‘Geração Compartilhada’”.

2.2.1.6 Autoconsumo remoto

Caracteriza-se por consumidores, pessoa física, que possuem unidades consumidoras de mesma titularidade, onde a geração distribuída de energia elétrica está em local diferente dos locais que fazem uso dos créditos energéticos. E consumidores, pessoa jurídica, que possuem unidades consumidoras em mesmo CNPJ, incluindo matriz e filial, onde a geração distribuída de energia elétrica está em local diferente dos locais que fazem uso dos créditos energéticos.

“Nessa modalidade de geração, enquadram-se todos os consumidores que desejam instalar um gerador de energia elétrica para compensar os gastos da fatura de energia, mas não possuem espaço suficiente para tal, no local de consumo. Nessa modalidade não se faz necessário estabelecer nenhum tipo de entidade administradora terceira.”

É importante destacar que, segundo a Resolução Normativa, não é permitido a nenhum tipo de consumidor que possui um micro ou minigerador instalado em sua unidade consumidora vender os créditos energéticos para a concessionária ou para um vizinho. Sendo toda geração para consumo próprio.

2.2.2 Etapas e procedimentos para solicitação de micro e minigeração distribuída fotovoltaica.

O acesso de gerador à rede da concessionária é realizado através de aprovação do projeto de geração do cliente. Esse procedimento deve ser realizado por um profissional devidamente

qualificado para o serviço, para que os materiais e os equipamentos elétricos utilizados estejam de acordo com as Normas Técnicas e de Segurança vigentes.

A solicitação do serviço é feita mediante a entrega da documentação conforme o tipo de cliente e da central geradora. Em geral, os documentos básicos são: documentação de identificação oficial com foto, no caso de pessoa física ou comprovante do cadastro nacional de pessoa jurídica (CNPJ), para pessoas jurídicas; projeto de instalação do sistema, contendo diagrama elétrico; memorial descritivo do projeto com as devidas informações e certificados de conformidades dos equipamentos.

As etapas e prazos legais para aprovação do projeto, vistoria e troca de medidor são: (1) 15 dias para aprovação de projeto, habilitando o acesso à rede da concessionária pelo cliente. (2) 7 dias para a realização da vistoria/comissionamento, depois da aprovação do projeto. (3) 5 dias para entrega do relatório de vistoria/comissionamento, após a realização da vistoria; aprovação do ponto de conexão, sendo o mesmo liberado para utilização. não havendo pendências no relatório de vistoria, o acessante é liberado para conectar o gerador à rede, conforme fluxo apresentado na Figura 2.7.



Figura 2.7 Fluxo de responsabilidade e atividades para homologação do sistema fotovoltaico.

Fonte: Light.

3. RADIAÇÃO SOLAR

3.1 O SOL

O Sol é a estrela mais próxima do planeta Terra. Ele possui um diâmetro médio de $1,39 \times 10^9$ m, sendo 109 vezes maior do que o diâmetro da Terra. A massa do Sol é de $1,98 \times 10^{30}$ kg e é constituída, principalmente, de Hidrogênio e Hélio. De toda massa do sistema solar, aproximadamente 99,8% pertencem ao Sol.

O Sol possui uma temperatura efetiva em torno 5.762 K e, basicamente, ele pode ser representado pelas seguintes regiões: o núcleo, a zona radioativa e a zona convectiva, de acordo com a Figura 3.1

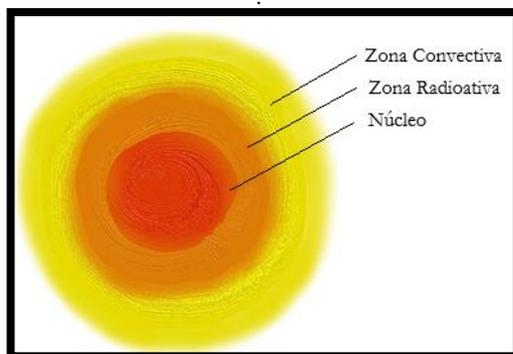


Figura 3.1 O Sol e as principais regiões solares.
Fonte: próprio autor.

O núcleo é a região mais central do sol, onde a energia é produzida através das reações nucleares. A temperatura no núcleo

é de 15.000.000 °C e a pressão atinge valores 340 bilhões de vezes maior do que a pressão atmosférica na Terra.

O espectro de luz emitido pelo Sol é composto por ondas de luz em diversas frequências, que variam de 10 a 10^{38} Hz. Dentre essas ondas de luz está a luz visível, aquela capaz de sensibilizar nossos olhos. A luz visível ocorre na faixa de 10^{14} a 10^{16} Hz e, acima dela, está a faixa de luz ultravioleta e abaixo dela, a faixa de luz infravermelha, como mostra a Figura 3.2.

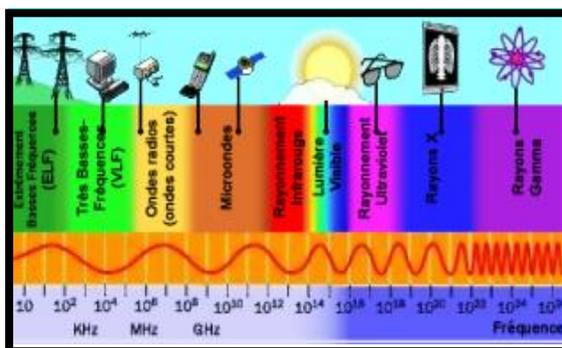


Figura 3.2 Faixa de frequência da radiação emitida pelo Sol.

Fonte: <http://www.astronoo.com/pt/artigos/espectro-eletromagnetico.html>.

Acesso em 03/2020.

3.2 ASPECTOS DA RADIAÇÃO

A radiação é o processo de transmissão de energia que ocorre devido à diferença de temperatura entre dois pontos, sem que necessariamente haja um meio material para a transmissão. Esse é o principal processo de troca de energia entre o Sol e a Terra. Contudo, no estudo da energia solar, para aplicações em sistemas fotovoltaicos, alguns conceitos envolvendo a radiação são importantes para se definir, tais como:

Irradiância: taxa na qual a energia radiante incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície. Sua unidade é dada por: W/m;

Irradiação: energia incidente por unidade de área, numa superfície, obtida dentro de um intervalo de tempo especificado (geralmente uma hora ou um dia). Sua unidade é dada por kWh/m.

Existem diversas unidades para se representar valores de radiação solar. A Tabela 3.1 mostra algumas dessas unidades e fatores de conversão.

Tabela 3.1 Unidades para radiação solar (Irradiância e Irradiação) e fatores de conversão.

Converter de	Para	Fator de multiplicação
W/m ²	Cal/cm ² .min	0,0014331
MJ/m ² .dia	kWh/m ² .dia	0,27778
Cal/cm ²	J/cm ²	4,1868
Cal/cm ²	kWh/m ²	0,01163
kWh/m ²	J/cm ²	360

Fonte: próprio autor.

A radiação emitida pelo Sol passa através do espaço até ser interceptada por planetas e outros objetos espaciais. A taxa de radiação solar sobre uma superfície normal aos raios solares, por unidade de área (irradiância), numa distância média da Terra ao Sol, na ausência de atmosfera, é definida como constata solar (F_0), e o seu valor médio é $1.360,8 \pm 5$ W/m.

Conhecer o Sol e como a energia fornecida por ele varia em função das relações astronômicas entre ele e a Terra e processos físicos ocorridos na atmosfera é importante para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica [19]. Com o intuito de conhecer o seu espectro dentro e fora da atmosfera, muitas

medições foram realizadas em várias altitudes, acima da camada atmosférica, usando foguetes sondas, e no solo. Desses estudos resulta a forma espectral da radiação fora da atmosfera e após atravessá-la, chegando à superfície da Terra, como mostrado na Figura 3.3.

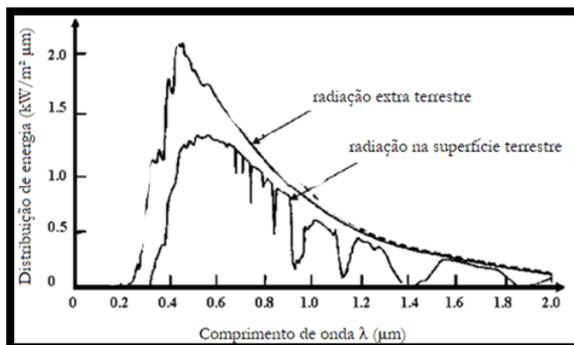


Figura 3.3 Espectro de radiação extra terrestre e radiação na Terra.

Fonte: Macagnan, M. H. Introdução à radiação solar. Unisinos. São Leopoldo. 2010 b.

É possível observar, a partir da Figura 3.3, diferenças significativas entre o espectro extraterrestre e o da superfície terrestre. Isso acontece porque a atmosfera causa atenuações e distorções, influenciando na distribuição espectral da radiação solar.

As intensidades das distorções sofridas pela radiação solar ao atravessar a atmosfera dependem da distância percorrida por ela desde o início da atmosfera, no espaço, até a superfície terrestre. Um fator definido como massa de ar (AM) caracteriza essas distorções, como mostra a Figura 3.4.

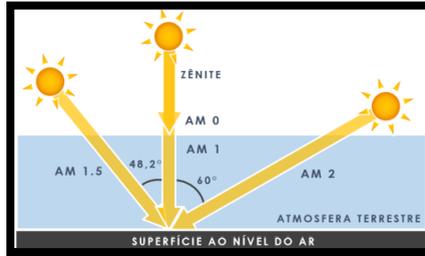


Figura 3.4 Variação da distância percorrida pela radiação na atmosfera terrestre de acordo com o ângulo zenital.

Fonte: adaptado VILELA, W. Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar. 2010.

Observando a Figura 3.4 percebemos que AM 2 determina o maior caminho para a radiação solar, portanto o espectro de luz que incide na atmosfera nesse ângulo sofrerá maiores distorções e atenuações. AM 0 representa o espectro de luz antes de chegar na atmosfera e, AM 1, representa o menor caminho do espectro percorrido na atmosfera terrestre.

As células solares são produzidas por muitas empresas e laboratórios, possibilitando a utilização de diferentes tecnologias nos módulos fotovoltaicos. Por tanto, definir as condições que permitem a comparação de todas as diferentes tecnologias é importante para se ter uma referência de comparação. O padrão de referência atual para as tecnologias de módulos fotovoltaicos é a standard test conditions (STC), caracterizado por uma irradiância de 1.000 W/m^2 , num espectro AM 1,5 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Devido às influências da atmosfera sobre a radiação solar, apenas cerca de 54% da irradiância que chega no topo da atmosfera, atinge o solo terrestre, os outros 46% são refletidos para o espaço ou absorvidos no caminho. Da radiação que incide sobre o solo há 3 parcelas a se considerar, como mostra a Figura 3.5:

- Radiação direta (R_{dir}): é aquela vinda diretamente do Sol, responsável pela sombra nítida.
- Radiação difusa (R_{dif}): é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento na atmosfera.
- Radiação de albedo (R_a): é aquela que atinge uma superfície inclinada após ser refletida no solo.

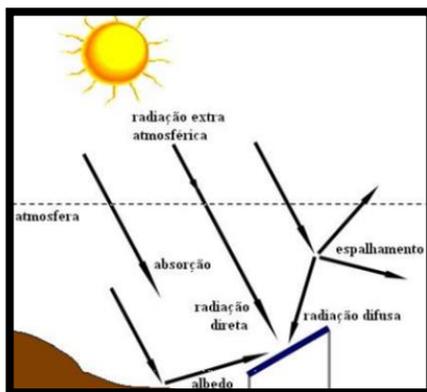


Figura 3.5 Radiação direta, difusa e de albedo incidentes sobre o módulo solar.
 Fonte: HCC Engenharia Elétrica. <https://hccengenharia.com.br/a-irradiancia-solar-no-rio-grande-do-sul-e-suficiente-para-gerar-energia-solar/grafico-2-radiacao>.

A radiação total (R_{total}) que incide sobre o módulo é a soma de todas as parcelas direta, difusa e de albedo.

Em dias claros de Céu aberto, cerca 80% da radiação que incide sobre o módulo é proveniente da radiação direta, mas em dias nublados, as nuvens bloqueiam a parcela direta da radiação, chegando apenas as parcelas de radiação difusa e albedo.

3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO

A medição das componentes da radiação solar na superfície terrestre é muito relevante para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. O histórico dessas medidas, podem servir de base para projetos de instalações de sistemas térmicos e fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações [20].

Com a finalidade de se padronizar as medidas das radiações a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) estabeleceu limites de são determinados limites de precisão para os instrumentos e padronizou as medições em: radiação global e difusa no plano horizontal e radiação direta normal. A radiação global (R_{global}) em questão é a soma das parcelas direta e difusa, não levando em consideração a parcela de albedo.

3.3.1 Piranômetro

O piranômetro, como mostra a Figura 3.6, mede a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco, igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar [20].



Figura 3.6 Imagem de um Piranômetro.

Fonte: <https://energes.com.br/fale-energes/piranometro/>.

Outro instrumento que mede a radiação global é o Actinógrafo. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Os sensores são conectados a uma pena que, quando de sua expansão, registram o valor instantâneo da radiação solar. Sua precisão encontra-se na faixa de 15 a 20% e é considerado um instrumento de terceira classe.

3.3.2 Pireliômetro

Os pireliômetros são instrumentos que medem a radiação direta. Ele se caracteriza por apresentar uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento, como mostrado na Figura 3.7, segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor [20].



Figura 3.7 Imagem de um pireliômetro.

Fonte:

http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=311. Acessado em 03/2020.

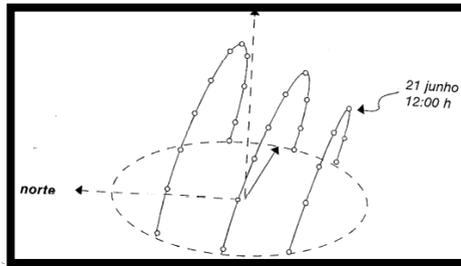


Figura 4.2 Movimento diário do Sol visto da Terra.
Fonte: Macagnam, 2010.

Alguns planos e pontos na esfera celeste foram definidos pelos antigos gregos e, ainda hoje, eles continuam úteis para a determinação da posição dos astros no céu. A saber:

- Zênite: é o ponto no qual a vertical do lugar intercepta a esfera celeste, acima do observador.
- Nadir: é o ponto diametralmente oposto ao Zênite.
- Horizonte: é o plano tangente à Terra e perpendicular à vertical do lugar em que se encontra o observador. Como o raio da Terra é pequeno diante do raio da esfera celeste, pode-se considerar que o plano do horizonte intercepta a esfera celeste em um círculo máximo, passando pelo centro.
- Equador celeste: é o círculo máximo em que o prolongamento do Equador da Terra intercepta a esfera celeste.

4.1 COORDENADAS GEOGRÁFICAS

4.1.1 Longitude (λ)

É o ângulo medido ao longo do Equador da Terra, tendo origem o meridiano de Greenwich como referência e extremidade no meridiano do lugar. A longitude varia de 0° a 180° para leste ou oeste de Greenwich como mostra a Figura 4.3. É usual atribuir-se o sinal positivo às longitudes a oeste e o sinal negativo às longitudes a leste.

4.1.2 Latitude (φ)

É o ângulo medido ao longo do meridiano do lugar, com origem no equador e extremidade no lugar e apresenta variação entre -90° e $+90^\circ$. O sinal negativo indica latitudes do Hemisfério Sul e o sinal positivo Hemisfério Norte, como mostra a Figura 4.3.

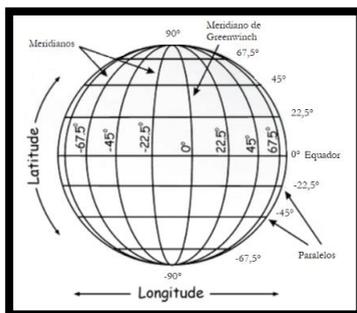


Figura 4.3 Coordenadas geográficas - latitude e longitude.

Fonte: adaptado de <http://gis.humboldt.edu>.

4.2 COORDENADAS ASTRONÔMICAS

4.2.1 Sistema Horizontal

Esse sistema utiliza como plano fundamental o Horizonte celeste. O horizonte do observador, nesse sistema, é o círculo que tem como eixo normal o zênite do observador e que passa através do centro da Terra prolongando-se até interceptar a esfera celeste. As coordenadas neste sistema são o Azimute e a altura.

- Azimute (A): é o ângulo medido sobre o horizonte, no sentido horário (NLSO), com origem no Norte e fim no círculo vertical do astro. O azimute varia entre 0° e 360° .
- Altura (h): é o ângulo medido sobre o círculo vertical do astro, com origem no horizonte e fim no astro. A altura varia entre -90° e $+90^\circ$. O complemento da altura se chama distância zenital (z). Assim, a distância zenital é o ângulo medido sobre o círculo vertical do astro, com origem no zênite e fim no astro. A distância zenital varia entre 0° e 180° ($h + z = 90^\circ$).

A Figura 4.4 mostra os ângulos azimutal (γ_s), elevação solar (α), o ângulo de zênite (θ_z) para um observador num local sobre a superfície terrestre.

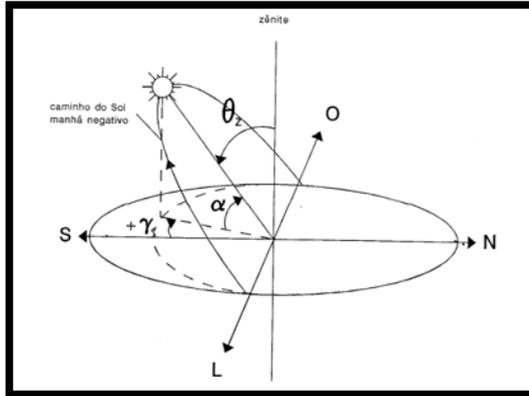


Figura 4.4 Coordenadas azimute (A) e altura (h) e o ângulo zênite (θ_z) num sistema horizontal.

Fonte: adaptado de <https://leobenez.tripod.com/sistema-de-cordenadas.html>.

Uma informação útil em problemas envolvendo o posicionamento do Sol é o ângulo do nascer, para uma dada latitude e inclinação. Ele indica o ângulo horário em que o Sol nasce. Da mesma forma que o ângulo Ocaso (pôr do Sol) indica o ângulo que Sol se põe. Esses ângulos variam ao longo do ano e isso determina trajetórias diferentes para o Sol. No verão, a trajetória do Sol é mais alta do que no inverno [22], como mostra a Figura 4.5.

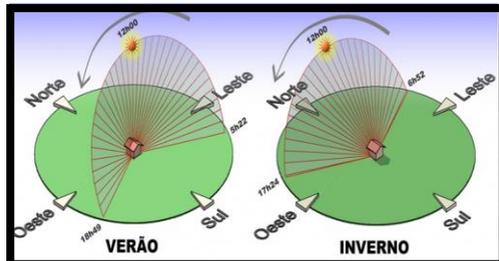


Figura 4.5 Nascer do Sol em diferentes dias do ano.

Fonte: <http://dtabach.com.br/arquitetura/artigo/face-norte-mitos-verdades> Acesso: 03/2020.

5. SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

A energia solar pode ser aproveitada de algumas maneiras para aquecer, criar condições bioclimáticas ou gerar eletricidade. A distribuição das aplicações da energia solar é apresentada na Figura 5.1.

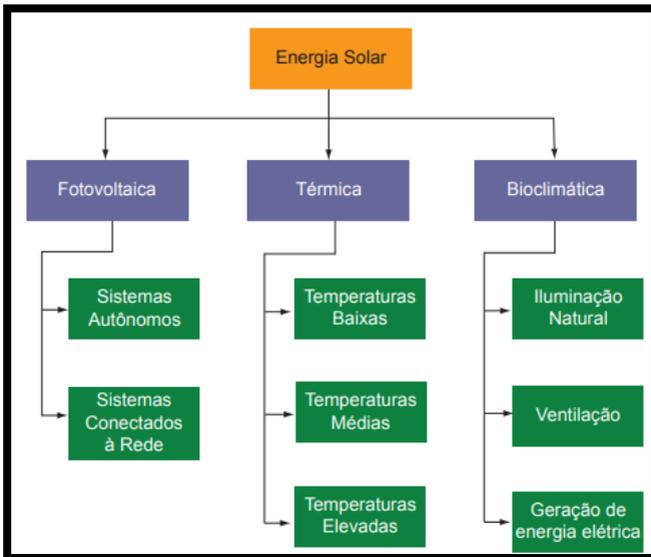


Figura 5.1 Fluxograma das aplicações da energia solar.

Fonte: RODRIGUES, D. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil. 2010.

O aproveitamento da energia solar térmica não se restringe ao aquecimento de água, ela pode também ser utilizada em plantas de dessalinização, secagem de grãos, geração de vapor de água, produção de energia elétrica, dentre outras. Cada forma de aproveitamento da energia térmica está associada a um conjunto

de tecnologias mais adequadas para maximizar a eficiência do sistema [23].

5.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA E ELETRICIDADE

Na geração de eletricidade, alguns sistemas podem ser utilizados aproveitando-se o calor do Sol para aquecer um sistema com um certo fluido. A intenção é que esse fluido aqueça e se expanda, atravessando uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica. Quando o fluido passa pela turbina, essa gira e faz o gerador de eletricidade girar também, gerando energia elétrica.

5.1.1 Torre solar

A torre solar é formada por um conjunto de espelhos, denominados heliostatos. Esses espelhos acompanham o movimento do Sol durante o ano inteiro e refletem seus raios para um receptor na torre localizada no centro do conjunto de espelhos, como mostra a Figura 5.2. A tecnologia que a torre solar utiliza, baseia-se em aproveitar a energia térmica solar para gerar energia elétrica a partir do aquecimento de um fluido a alta pressão que se vaporiza. A incidência de todos os raios em um único ponto possibilita que o fluido térmico armazenado na torre atinja temperaturas entre 1500 °C e 2000 °C, podendo assim produzir vapor que é aproveitado para acionar uma turbina e gerar energia elétrica [23].



Figura 5.2 Torre solar na Espanha – Central Solar PS 20

Fonte: RODRIGUES, D. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil. 2010.

Essa tecnologia de geração de energia elétrica por meio da energia solar já é economicamente viável e, no mundo, existem cerca de 50 usinas solares térmicas que utilizam esse princípio de funcionamento em diferentes estágios de construção [23].

Na Figura 5.1 é mostrada a mais recente central solar em funcionamento na Espanha, com capacidade de geração de 20 MW, suficiente para abastecer 10 mil residências, reduzindo a emissão de 12 mil toneladas de CO₂ por ano.

5.1.2 Concentradores parabólicos

Essa tecnologia é composta por espelhos esféricos côncavos e uma tubulação que é montada no ponto focal dos

espelhos, como mostra a Figura 5.3. Um fluido térmico, que pode ser água, óleo ou ainda outras substâncias, circula na tubulação do sistema devido ao aumento de pressão causado pela incidência da energia solar, após refletir nos espelhos côncavos. A incidência desses raios solares sobre o tubo, aquece o fluido fazendo-o se expandir e passar por uma turbina, fazendo-a girar. Um gerador acoplado à turbina, gira, gerando energia elétrica, como mostrado na Figura 5.4.

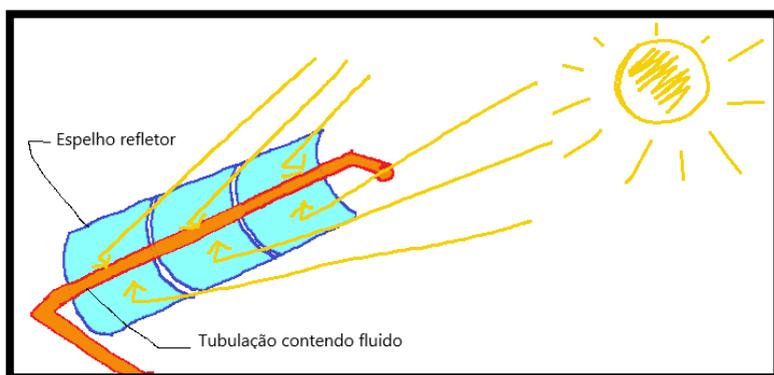


Figura 5.3 Concentradores parabólicos.

Fonte: próprio autor.

As empresas que fabricam essas tecnologias afirmam já possuir domínio para produzir, instalar e operar este tipo de usinas. Nos EUA existem esses tipos de usinas operando com capacidade de produção de até 350 MW, suficiente para abastecer cidades com 350 mil residências [23].

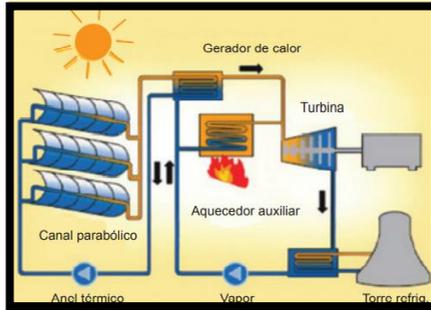


Figura 5.4 Esquema de funcionamento de um concentrador parabólico.
 Fonte: RODRIGUES, D. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil. 2010.

Tanto os concentradores solares quanto as torres utilizam os mesmos princípios físicos utilizados nas usinas termelétricas convencionais, a diferença está no combustível utilizado que é a energia solar. Além dos geradores supracitados, existem outras que utilizam o calor do Sol para produzir energia elétrica.

5.2 ENERGIA SOLAR TÉRMICA E AQUECEDOR SOLAR

O aquecedor solar térmico é uma tecnologia que aproveita a energia solar para aquecer água, principalmente, para banho ou piscina nos setores residencial, industrial e de serviços.

O gráfico da Figura 5.5 apresenta a participação dos setores residencial, de serviços e industrial no mercado de aquecedores solares, além de destacar o mercado de piscina em particular [23].

Analisando este gráfico pode-se observar que o setor residencial é o principal mercado, sendo o restante dividido entre os setores de serviços (hotel, motel, hospital, creche, asilo etc.) e indústrias, onde se tem pouca utilização dessa tecnologia.

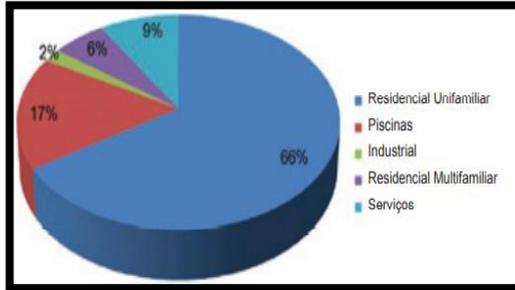


Figura 5.5 Mercado brasileiro de aquecedores solares por setor.

Fonte: RODRIGUES, D. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil. 2010.

Pensando-se no setor residencial, para aquecimento da água no chuveiro e nas torneiras, os sistemas térmicos podem utilizar convecção natural ou convecção forçada. Nos sistemas de convecção natural, a água circula do reservatório (boiler) para os coletores e vice-versa sem a necessidade de bomba. A água aquecida nas placas é empurrada para dentro do boiler pela água mais fria presente no fundo, como mostra a Figura 5.6.

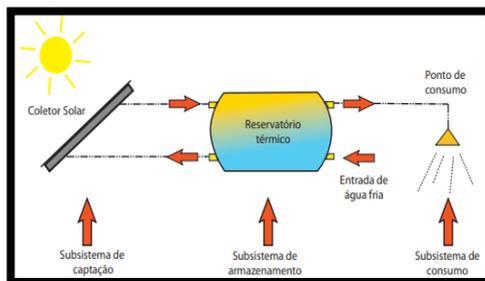


Figura 5.6 Circulação de água entre o reservatório o coletor solar.

Fonte: RODRIGUES, D. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil. 2010.

Para que ocorra a convecção natural da água nos coletores para o reservatório, é necessário que os coletores estejam num nível abaixo do reservatório, como ilustra a Figura 5.7.

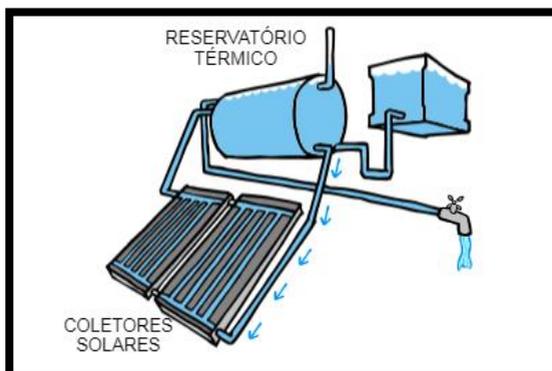


Figura 5.7 Sistema de aquecimento de água por convecção natural.

Fonte: <https://tecnologianocampo.com.br/energia-solar>.

Existem três situações em que a convecção natural não é possível: quando o volume for superior a 1000 litros de água por dia; quando a área instalada for superior a 12 m², ou quando não for possível conseguir os desníveis mínimos entre o reservatório e os coletores [23]. Nesses casos, o recurso que se utiliza é a bomba d'água para circular a água de maneira forçada. Na circulação forçada o sistema de aquecimento de água requer novos componentes: a bomba, o controlador diferencial de temperatura (CDT) e a válvula de retenção, como mostra a Figura 5.8.

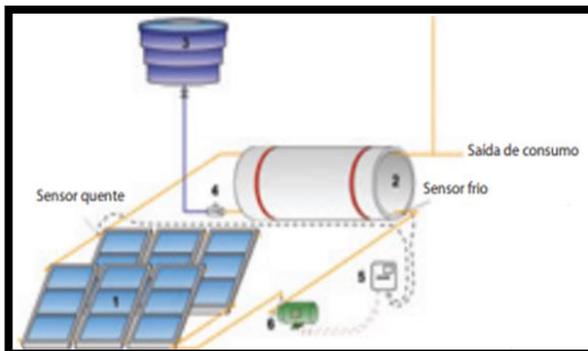


Figura 5.8 Sistema com convecção forçada.

Fonte: RODRIGUES, D. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil. 2010.

Outra aplicação para os aquecedores térmicos de água é o aquecimento de piscina. Entretanto, para essa aplicação não é possível fazê-lo com convecção natural, sendo sempre necessária a presença da bomba d'água no sistema. Além, não há a necessidade do reservatório de água como apresentado para os aquecedores de água para uso doméstico, a piscina é o próprio reservatório de água quente.

A grande diferença entre o sistema de aquecimento de banho residencial e o de piscina é o volume de água que circular nas placas; no sistema de banho residencial circula em média 1,5 litros por m^2 por minuto, enquanto na piscina circulam 4,5 litros, ou seja, três vezes mais.

5.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica ocorre a partir da transformação da energia luminosa em energia elétrica. O

dispositivo que promove a conversão da energia luminosa em elétrica é a célula fotovoltaica.

As células fotovoltaicas são, fundamentalmente, constituídas por dois contatos metálicos e duas pastilhas de material semicondutor. A conversão de energia ocorre quando uma diferença de potencial elétrica (ddp) se estabelece nas extremidades dos contatos metálicos, a partir da incidência de luz sobre o material semicondutor [24].

As pastilhas semicondutoras são constituídas principalmente por Silício (Si), elemento químico da família IVA da tabela periódica, que apresenta condutividade elétrica entre os metais e os isolantes. As pastilhas de Si passam por um processo de dopagem, processo em que elementos químicos de outras famílias, adequadamente escolhidos, são incluídos nos cristais de Si de forma que, ao final do processo, a pastilha apresente mais elétrons livres, na dopagem do tipo N, ou falta de elétrons, caracterizado por lacunas (“cargas positivas”), na dopagem tipo P.

As pastilhas dopadas do tipo N e do tipo P, quando unidas umas com as outras formam componentes de grande aplicabilidade em produtos eletroeletrônicos existentes no mercado. Um desses componentes é o diodo de junção P-N, formado a partir da união entre uma pastilha semicondutora do tipo P e outro tipo N [25].

De acordo com Pinho e Galdino [26] “as células fotovoltaicas podem ser entendidas essencialmente como diodos (junções PN) de grande área, preparadas especialmente para que ocorra o efeito fotovoltaico”. Quando a luz incide sobre a célula, uma diferença de potencial (ddp) surge nas extremidades dos contatos metálicos da célula. Se uma carga for ligada aos contatos

metálicos, uma corrente circulará por ela, como mostra a Figura 5.9.

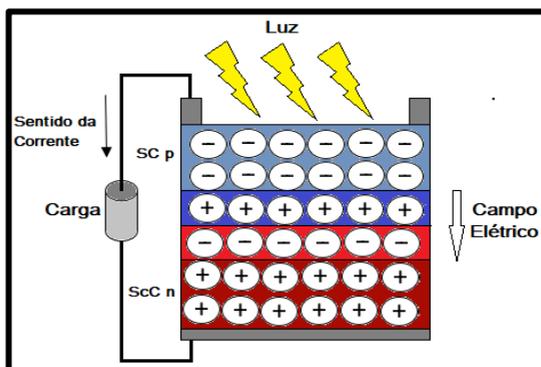


Figura 5.9 Fluxo de elétrons através de um condutor interligado entre os terminais PN de uma célula fotovoltaica.

Fonte: próprio autor.

As células fotovoltaicas são a base dos módulos presentes hoje no mercado para venda. Esses módulos fotovoltaicos são compostos, em geral, por 72 células, mas isso pode variar dependendo da potência que eles fornecem. A Figura 5.10(a) mostra uma célula típica encontrada nos módulos. Elas são interligadas em série e dispostas sob uma camada de vidro, protegidas por uma estrutura metálica para dar a devida resistência ao módulo fotovoltaico, como mostrado na Figura 5.10(b).

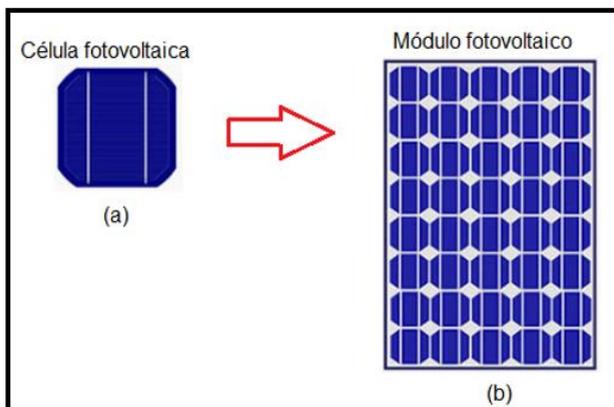


Figura 5.10 Representação de uma célula e um módulo fotovoltaico.

Fonte: adaptado portalsolar.

As características elétricas de um módulo fotovoltaico podem ser determinadas por ensaios tomando algumas condições como padrão, tais como temperatura e irradiância. Em laboratório, os módulos fotovoltaicos comerciais são ensaiados sob *standard test condition* (STC), ou condições padrão de teste, e suas características são apresentadas nas folhas de dados fornecidas pelos fabricantes [27].

As três grandezas elétricas mais relevantes nos projetos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos são a potência, tensão e corrente. Conhecer o comportamento dessas grandezas diante das condições climáticas e do posicionamento dos módulos em relação ao norte geográfico e à superfície da Terra, é bastante importante quando se deseja entender os princípios de funcionamento de um sistema de geração de energia fotovoltaica.

O comportamento da tensão e da corrente é bastante influenciado pelas condições climáticas. Em dias de tempo nublado a corrente que o módulo pode fornecer é bem menor do

que em dias ensolarados, sendo a corrente depende diretamente da radiação que incide sobre o módulo. A tensão, por sua vez, sofre influência maior com a variação da temperatura. Em dias mais quentes, a tensão fornecida pelos módulos será menor do que em dias mais frios. A variação na incidência da radiação solar e na temperatura, acabam por definir a potência de saída dos módulos.

A Figura 5.11(a) mostra o comportamento da corrente em função da variação da radiação incidente nos módulos, destacando que, com a diminuição da radiação, há uma queda acentuada no fornecimento de corrente e uma variação mínima da tensão nos terminais do módulo. Na Figura 5.11(b), é mostrada a variação da temperatura e o que acontece, principalmente, com a tensão. Nesse caso ela sofre uma variação maior do que a corrente, tendo o seu valor diminuído, na medida que a temperatura aumenta.

A potência de um módulo pode ser encontrada calculando-se a área sob a curva num gráfico de corrente por tensão (I-V). Entretanto, é mais comum apresentar o comportamento da potência por meio de um gráfico de potência por tensão, como mostrado na Figura 5.12. Como pode ser visto no gráfico, a máxima potência que o módulo pode fornecer ocorre no ponto (I_{mp} , V_{mp}), corrente em potência máxima e tensão em potência máxima.

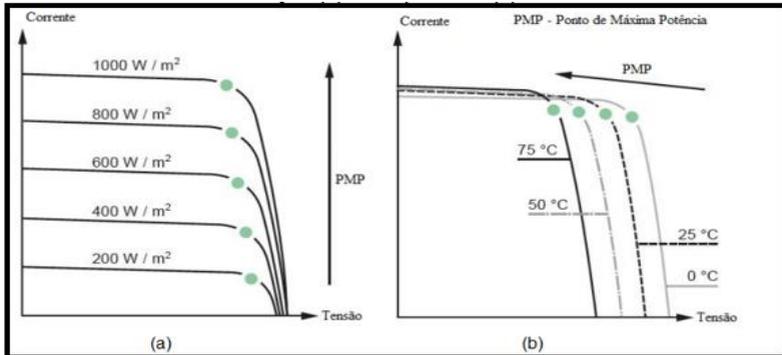


Figura 5.11 Curvas características de Corrente x Tensão de um painel fotovoltaico, com os efeitos da radiação (a) e temperatura (b).
 Fonte: Bicalho, 2018.

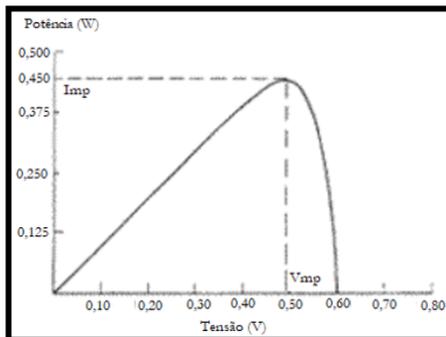


Figura 5.12 Curva de potência com relação à variação de tensão no módulo.
 Fonte: Cresceb, 2008.

O posicionamento dos módulos voltados para a passagem do sol ao longo do dia também influencia na geração de energia. Nesse sentido, encontrar o melhor ângulo de inclinação do painel (β) em relação ao plano horizontal e o ângulo azimutal (γ), o ângulo entre a projeção da normal à superfície e o plano do meridiano local, conforme mostrado na Figura 5.13, maximiza o aproveitamento da radiação solar e, conseqüentemente, a geração de energia.

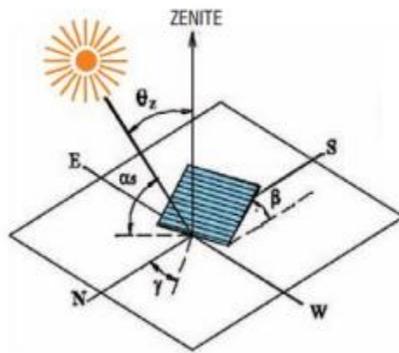


Figura: 5.13 Ângulos solares.
Fonte: ARRUDA, 2004.

Sendo os módulos fotovoltaicos os responsáveis pela captação da luz do Sol e transformação em energia elétrica, por meio de suas células, definir cuidadosamente o posicionamento deles em relação ao Sol significa maximizar a geração de energia. Nesse sentido, conhecer os fundamentos relacionados com as instalações dos módulos, para o curso FIC em questão, seria bastante relevante para a formação dos discentes que almejam qualificação nesse campo de trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] SMETS, A. et al. SOLAR ENERGY. The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion Technologies and Systems. Inglaterra: UIT Cambradgi, 2016.
- [2] EPE. ABCDEnergia, nov. 2020. Disponível em: <www.epe.gov.br>.
- [3] CARVALHO, J. F. D. O consumo de energia, da antiguidade aos dias de hoje. Ilumina, 2017. Disponível em: <<https://www.ilumina.org.br/o-consumo-de-energia-da-antiguidade-aos-dias-de-hoje-artigo/>>.
- [4] IBP. ibp. instituto brasileiro de petróleo e gás, 2018. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-reservas-provadas-de-petroleo-e-gas-natural-em-2018/>>.
- [5] MASILI, G. S.; ESTEVES, R. J. G. A. Usina Nuclear. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/nuclear/nuclear.htm>>.
- [6] ABBUD, O. A.; TANCREDI, M. Transformações recentes da matriz brasileira de geração de energia elétrica – causas e impactos principais. Senado, 2010. Disponível em: <<http://www12.senado.gov.br/>>.
- [7] ECYCLE. eCycle. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/2899-energia-eolica.html>>.
- [8] CRESESB. ENERGIA SOLAR PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES. CRESESB. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>.
- [9] ANEEL. Banco de Informações de Geração. ANEEL, 2012. Disponível
- [10] SMETS, A. et al. SOLAR ENERGY. The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion Technologies and Systems. Inglaterra: UIT Cambradgi, 2016.
- [11] BEZERRA, F. D., Energia Solar, Caderno Setorial ETENE. Banco do nordeste, 2020.
- [12] ABSOLAR, “Custos menores para a instalação de projetos para geração de energia solar,” 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3dqrOID>.
- [13] E. B. PEREIRA, F. R. MARTINS, A. R. GONÇALVES, R. S. COSTA, F. J. L. d. LIMA, R. R., S. L. d. ABREU, G. M. TIEPOLO, S. V. PEREIRA e

J. G. SOUZA, “Atlas brasileiro de energia solar,” 2017. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html.

[14] BEZERRA, FRANCISCO DINIZ. Energia Solar. Caderno Setorial ETENE. Banco do nordeste. 2020.

[15] MME; EPE. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas: www.epe.gov.br. 2019

[16] BEZERRA, F. D. (2020). Energia Solar. Caderno Setorial ETENE. Banco do nordeste.

[17] Nascimento, R. L. ENERGIA SOLAR NO BRASIL - Câmara dos Deputados. 2017. Acesso em 05 de 2021, disponível em [hppts://bd.camara.leg.br](http://bd.camara.leg.br):

[18] Santana, L. Energia Solar / Tudo sobre Energia Solar / Resolução 482 da ANEEL: 3 Principais Pontos Comentados. Acesso em 05 de 2021, disponível em BlueSol energia solar: <https://blog.bluesol.com.br>

[19] Neves, G. M. Influência do Espectro da Radiação Solar. São José dos Campos: INPE. 2016

[20]

CRESCERB.http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&language=pt&cid=311. Acessado em 03/2020

[21] FILHO, K. S. O; SARAIVA, M. F. O. Astronomia e Astrofísica. UFRGS. Porto Alegre. 2003.

[22] MELO, E. M. Geração Solar Fotovoltaica: Estimativa do fator de sombreamento e irradiação em modelos tridimensionais de edificações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP. 2012

[23] RODRIGUES, D. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. Ekos Brasil. 2010

[24] SZE, S. M; NG, K.K. Physics of Semiconductors Devices. 3ª Edição. New Jersey. Hoboken. 2007.

[25] CARNEIRO, J. Semicondutores: modelo matemático da célula fotovoltaica. Universidade do Minho. Departamento de Física. Azurém. 2010.

[26] PINHO, J. T; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: cepel/cresesb, 2014.

[27] VILLALVA, M. G; GAZOLI, J. R. Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações. Ed. Érica. Pinheiros, SP. 2012.