

POTENCIAL ENERGÉTICO

3.1 INSUMO SOLAR

A energia solar é, literalmente, toda a energia irradiada pelo sol, seja em sua forma de luz visível ou não. Essa energia pode ser aproveitada de diversas formas, sendo principalmente utilizada para fins de iluminação na arquitetura, fotossíntese, aquecimento de água e produção de energia elétrica.

A potência específica que atinge a superfície da Terra pode ser avaliada utilizando-se a lei da radiação esférica, que é expressa por:

$$I_{Terra} = I_{Sol} \times \left[\frac{R_{Solar}}{D_{Sol-Terra}} \right]^2 \quad (2)$$

Onde:

R_{Solar} é o raio solar médio, da ordem de $6,95 \times 10^5$ km;

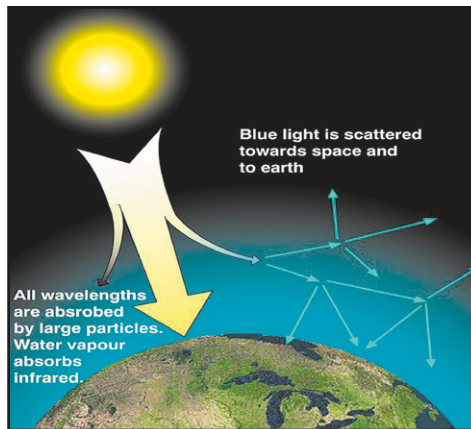
$D_{Sol-Terra}$ é a distância do sol à Terra, da ordem de $1,49 \times 10^6$ km.

De (2) depreende que uma superfície imediatamente fora da atmosfera terrestre e exposta perpendicularmente ao sol é atingida por uma potência específica

de 1.353 W/m^2 – constante solar, que corresponde à integração do espectro de emissão em todo o domínio.

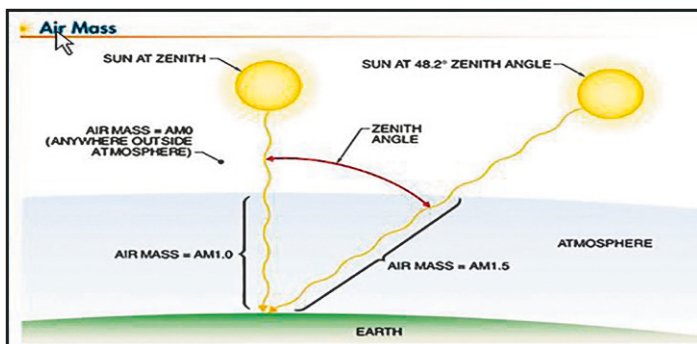
A energia que atinge a Terra, Figura 3.1, é menor do que a emanada pelo sol em sua superfície, pois durante a travessia da atmosfera terrestre ocorrem fenômenos de absorção, reflexão e difusão, com intensidades diferentes para cada radiação do espectro solar.

Figura 3.1 Fenômenos que ocorrem com a radiação solar ao atravessar a atmosfera terrestre. Fonte: (Honsberg, 2008)



Para a caracterização sintética do fenômeno define-se uma grandeza que é denominada de Air Mass Ratio - AM que é a relação entre a distância percorrida na atmosfera em determinadas condições de dia, hora e lugar e aquela que seria percorrida quando o sol estivesse a pino no local da medição, isto é, quando o sol estiver perpendicular à superfície terrestre no ponto de medição. A Figura 3.2 ilustra graficamente o significado do Air Mass.

Figura 3.2 Interpretação do Air Mass. Fonte: (Arizona Solar Power Society, 2010)

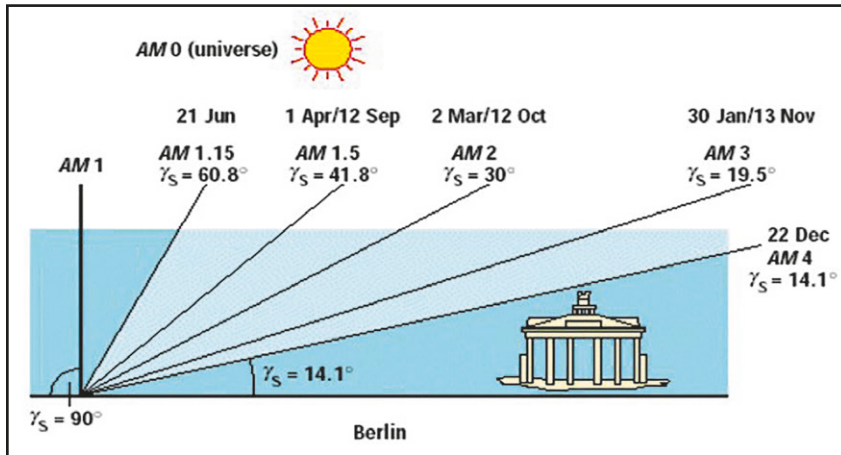


Destaca-se que o AM correspondente ao sol a pino é definido como AM 1.0 e aquele que corresponde a um ângulo zenital de 48,20 corresponde a um AM 1.5, isto é: $1,0/\cos 48,2 = 1,5003 \cong 1,5$. Além disso, na entrada da atmosfera terrestre o AM assume o valor AM 0 e a irradiação correspondente será igual à constante solar, $1,353 \text{ W/m}^2$.

Na Figura 3.3 apresentam-se valores da AM para diversas posições do sol em Berlin. O ângulo γ_s representa o complemento do azimute para 90° . Isto é:

$$\frac{1}{\cos(90 - 60,8)} = 1,5003 \cong 1,5 \quad (3)$$

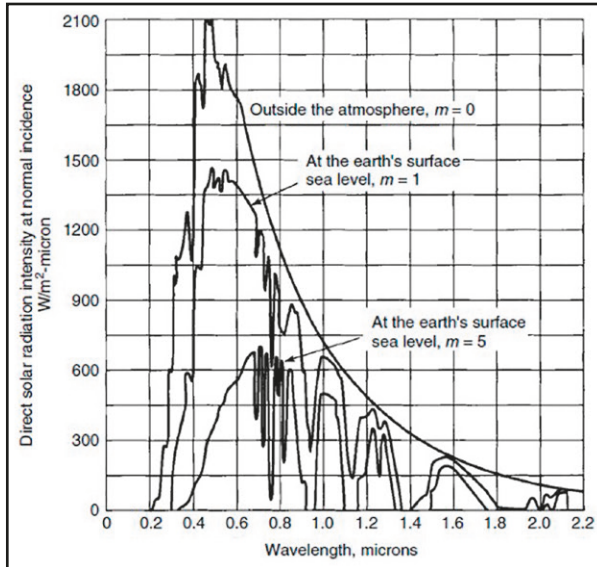
Figura 3.3 Valores do Air Mass para várias posições do sol em Berlin (Planetary Science, s.f.)



O valor Air Mass Ratio de 1,5 – AM 1,5 – é utilizado como valor de referência para as condições de ensaio padronizadas, “*Standard Test Conditions*”, e o espectro solar correspondente é considerado como um espectro solar médio sobre a Terra, cujo espectro de energia é de 2 % para as radiações ultravioleta, 54 % na faixa visível e o restante, 44 % de infravermelha.

Para cada valor de AM corresponde um valor de radiação solar incidente sobre a Terra que diminui com o aumento de AM. Assim, por exemplo, se para AM 1,0 tem-se 925 W/m^2 , para AM 1,5 ter-se-ia 827 W/m^2 e para AM 2,0 valor de 691 W/m^2 . A Figura 3.4 apresenta o impacto da atmosfera na radiação solar incidente sobre a Terra em função do valor de AM. Destaca-se que o valor AM 5 corresponde ao sol poente.

Figura 3.4 Variação do espectro solar – radiação direta – com o valor de AM (Hristov)

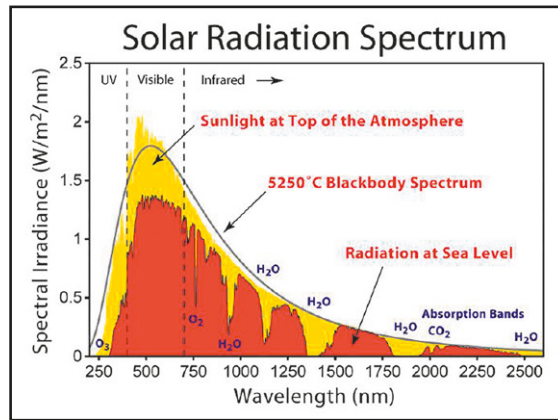


Devido aos fenômenos descritos, a quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra, geralmente, está limitada a $1.000 W/m^2$. Entretanto em dias de céu claro com nuvens, sem poluição atmosférica e com o sol a pino, motivados pelas reflexões nas nuvens, valores superiores podem ser alcançados.

O valor médio diário para o fluxo solar por unidade de superfície terrestre é usualmente da ordem de três vezes menor que o valor “instantâneo” de $1000 W/m^2$ citado acima. A razão dessa redução é devida aos períodos de noite que se seguem aos de dia e à variação da inclinação do sol em relação ao horizonte, isto é, à variação do ângulo de incidência dos raios solares.

A Figura 3.5 apresenta o espectro do corpo negro, que simula o sol e o espectro solar de radiação na entrada da atmosfera e ao nível do mar.

Figura 3.5 Influência da atmosfera no espectro solar (Jayakumar, 2009)



O fluxo radiante que atinge a superfície da Terra e que pode ser capturado por um receptor adequado, Figura 3.6, é formado por três componentes:

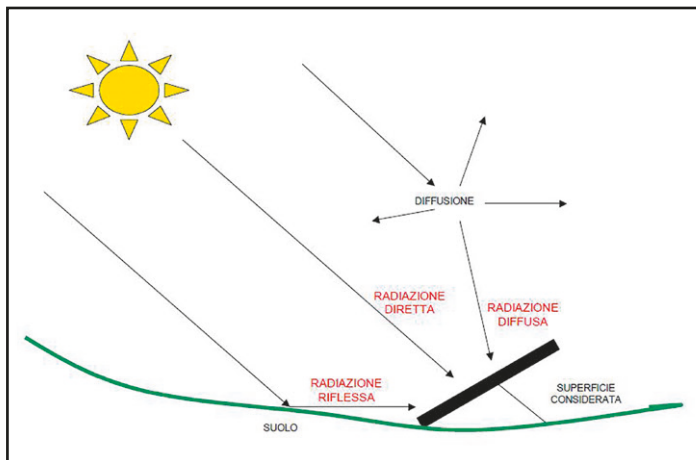
- Radiação direta que após atravessar a atmosfera alcança o receptor;
- Radiação difusa que é gerada pela interação com moléculas na atmosfera;
- Radiação refletida que tendo atingido o solo ou outros objetos é refletida para o receptor.

A seguir é procedida a análise desses três componentes da radiação solar que incide no receptor e que é denominada Radiação Global, “*Global Radiation – GI*”.

3.1.1 Radiação direta

Uma boa parte da radiação direta que atravessa a atmosfera é absorvida pelos vários gases que a compõem ou sofre difusão nas moléculas de ar em suspensão. Na média, a cada ano, menos da metade da radiação que alcança a parte superior da atmosfera alcança a superfície da Terra. Entretanto, em dias de céu claro, com sol a pino, a porcentagem dessa radiação pode ser de até 70 %. A atenuação da energia incidente é função da distância percorrida ao longo da atmosfera, conforme apresentado anteriormente, e de outros fatores, tais como, poeira em suspensão no ar, vapor de água, nuvens e poluição da atmosfera. A avaliação dessa atenuação é bastante complexa sendo feita por funções exponenciais empíricas baseadas em modelos simplificados.

Figura 3.6 Componentes da radiação global



3.1.2 A radiação difusa

A radiação difusa que alcança um coletor é produzida por partículas em suspensão na atmosfera, pela umidade e pelas nuvens. A determinação de seu montante, pela multiplicidade de elementos envolvidos, é muito mais complexa que a da radiação direta. A quantificação da radiação difusa é feita, em primeira aproximação, através de modelos muito simplificados que assumem que a radiação se propague em todas as direções com a mesma intensidade. Da aplicação desses modelos, para dias de céu muito claro, a radiação difusa é cerca de 15 % do total da radiação que incide sobre uma superfície horizontal.

3.1.3 A radiação refletida – o albedo

Da física nuclear e da astronomia define-se albedo, como sendo a fração, expressa em centésimos, da energia incidente que é refletida por um corpo ou superfície. Esta última parcela de energia, que é captada por um coletor, advém da reflexão da energia que é recebida por superfícies de corpos existentes ao seu redor. Essa energia proveniente dessa reflexão pode ter valor elevado ou desprezível conforme o meio em que o coletor se encontra. Exemplificando, a neve recém caída apresenta refletância da ordem de grandeza de 0,8 ao passo que em um telhado, tal refletância é de 0,10. Na Tabela 3.1 apresentam-se valores típicos de albedo de acordo com a superfície do solo.

Tabela 3.1 – Valores típicos de albedo (VDMA, 2018)

Superfície	Albedo
Água	5-15 %
Gramma	15-25 %
Terra seca	20-30 %
Concreto	25-30 %
Areia	30-35 %
Neve nova	80-85 %

3.1.4 Medição da energia incidente na Terra

Há dois tipos básicos de medições que são efetuadas para a radiação solar que alcança a Terra: a potência e o fluxo que incide sobre um receptor:

Designa-se por irradiação a potência instantânea específica captada por unidade de superfície, perpendicular aos raios solares. A irradiação é definida como a potência, que num determinado instante t , atinge uma superfície plana horizontal. É medida em kW/m^2 . A irradiação de 1000 W/m^2 é definida como a irradiação a pino e corresponde ao valor máximo que usualmente se encontra nas diferentes localidades da Terra quando o sol está a pino num dia de céu claro, sem nuvens. Este valor é utilizado como referência para a definição das condições de ensaio padronizadas (*Standard Test Conditions*) que se presta para comparar as diferentes situações e componentes das tecnologias de aproveitamento da energia solar, bem como referência para dados de placa de equipamentos.

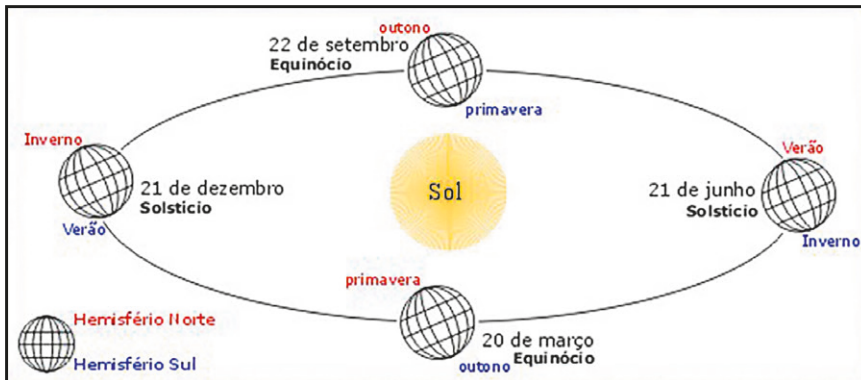
Designa-se por insolação, a energia absorvida por uma unidade de superfície, durante um determinado período, usualmente um dia, um mês ou um ano. É definida como a energia média, num período, que é recebida por uma superfície plana horizontal e expressa em $\text{kWh/m}^2/\text{período}$ de observação, por exemplo, quando o período de observação é o dia tem-se $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$.

3.1.5 Variação da disponibilidade de energia solar

A energia solar como fonte primária de energia apresenta disponibilidade variável ao longo do dia, do ano e do lugar considerado. Como se sabe, além da Terra realizar movimentos de rotação em relação ao seu eixo, inclinado de $23^\circ 27'$, percorre uma órbita elíptica ao redor do sol em movimento de translação, que dá lugar aos equinócios e aos solstícios. Os equinócios de outono e primavera correspondem a durações iguais para o dia e para a noite. Evidentemente,

quando no hemisfério norte tem-se o equinócio da primavera, no Sul tem-se o de outono. Já os solstícios de inverno e verão correspondem ao afastamento máximo da Terra ao sol. No inverno os dias são mais curtos e as noites mais longas e no verão ocorre o inverso.

Figura 3.7 A translação da Terra (Astrologie, s.f.)



Um receptor situado numa localidade da Terra recebe irradiação do sol, que varia em função da:

- Posição geográfica: latitude, que representa a distância da localidade ao equador ao longo de um meridiano, expressa pelo ângulo cujo vértice está no centro geométrico da Terra e os lados são os segmentos definidos pela intersecção do equador com o meridiano e o ponto onde a localidade se situa. Nota-se que, nas regiões polares, os raios de sol nunca estarão perpendiculares e não receberão energia solar alguma durante um grande período do ano;
- Estação do ano e dia: define a proximidade do sol à Terra sendo que a irradiação é máxima quando essa distância for mínima;
- Hora do dia: a exposição da Terra ao sol varia devido à sua rotação e a sua inclinação;
- Posição do coletor: a orientação da superfície coletora deve estar, tanto quanto possível, perpendicular em relação aos raios solares para se obter incidência máxima;

- Condições locais: as condições do meio em que o receptor está localizado têm influência sobre a irradiação, sobretudo na produção de sombreamento;
- Condições climáticas: as condições climáticas e meteorológicas têm grande influência sobre a irradiação. Assim, a presença de nuvens, a umidade e a densidade do ar no local têm grande influência no nível de irradiação recebida, por exemplo, numa área desértica a irradiação é muito maior do que em uma área de floresta tropical.

3.1.6 Diagrama de percursos solares

A duração do período de luz durante o dia sofre variação com as estações do ano. Assim, no hemisfério norte, o período de permanência de luz solar é máximo no solstício de verão quando o sol alcança a posição mais alta, enquanto no solstício de inverno, verifica-se a permanência e altura mínimas. Por outro lado, nos dois equinócios, de primavera e de outono, a altura do sol está entre a máxima e a mínima e a duração do dia e da noite é igual.

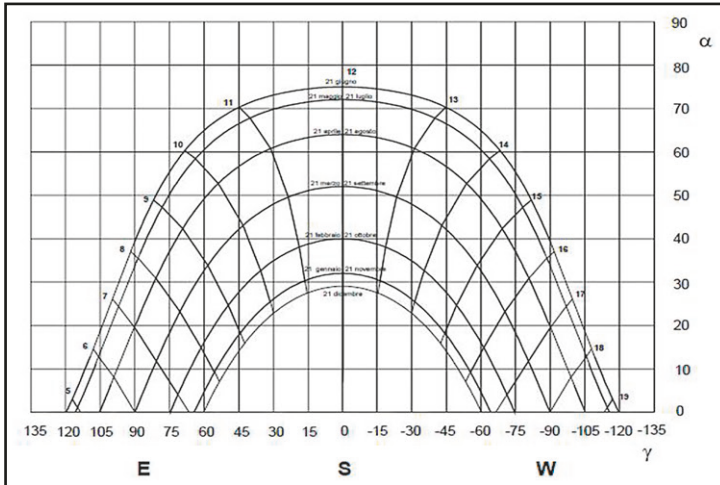
A posição do sol em relação a um ponto na Terra é definida pelo ângulo da altura solar (α) e do ângulo azimutal ou azimute (γ), isto é:

- Ângulo da altura solar: é o ângulo vertical entre a direção do sol e o plano horizontal;
- Azimute: é o ângulo horizontal formado entre o plano vertical que passa pelo sol e a direção do sul, sendo positivo para leste e negativo para oeste;
- Estes dois ângulos dependem da declinação (δ) da latitude e do ângulo de declinação horária. A declinação é o ângulo formado pela direção do sol com o plano do equador, seu valor, no hemisfério norte, varia durante o ano de $-23^\circ 27'$ no inverno para $23^\circ 27'$ no verão.

Os valores da altura solar e do azimute em qualquer período do ano podem ser conhecidos através dos diagramas de percursos solares. Esses diagramas são traçados para cada latitude e apresentam a altura solar e o zênite para os vários períodos do ano. Por outro lado, os diagramas em coordenadas cartesianas apresentam a projeção vertical do percurso solar tal como seria visto por um observador situado na Terra. No eixo horizontal apresenta-se o azimute e no vertical as alturas solares. As trajetórias solares estão traçadas para o dia 21 de cada mês

do ano. O gráfico da Figura 3.8 ilustra o diagrama de percursos solares para uma latitude de 38°, no hemisfério norte.

Figura 3.8 Diagrama dos percursos solares em coordenadas cartesianas (ACCA, s.f.)



3.1.7 Diagramas típicos da radiação solar

A Figura 3.9 apresenta o aspecto típico da radiação solar diária e a Figura 3.10 ilustra a curva típica de irradiação, ao longo das semanas do ano para o hemisfério norte, enquanto que a Figura 3.11 e a Figura 3.12 ilustram a influência de um dia com céu nublado na irradiação.

Figura 3.9 Curva de variação da energia solar durante um dia (Arizona Solar Power Society, 2010)

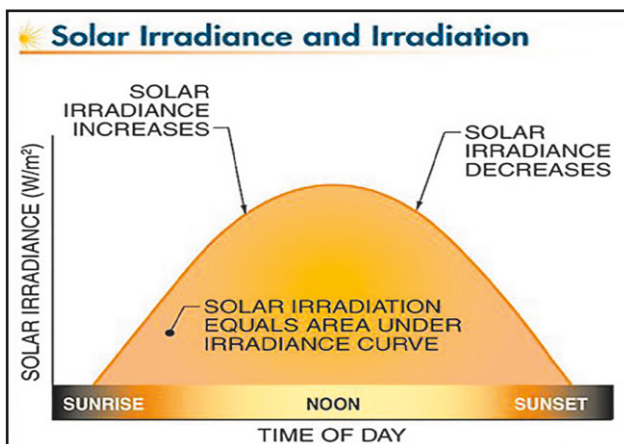


Figura 3.10 Variação da irradiação com as semanas do ano para o Hemisfério Norte (Newport)

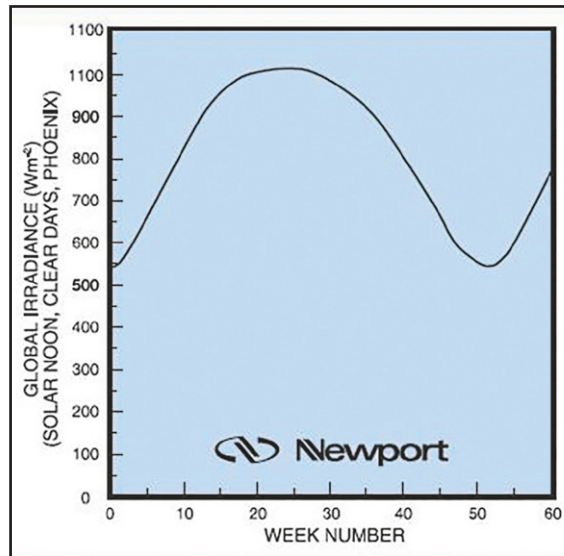


Figura 3.11 Irradiação num dia de céu claro (Newport)

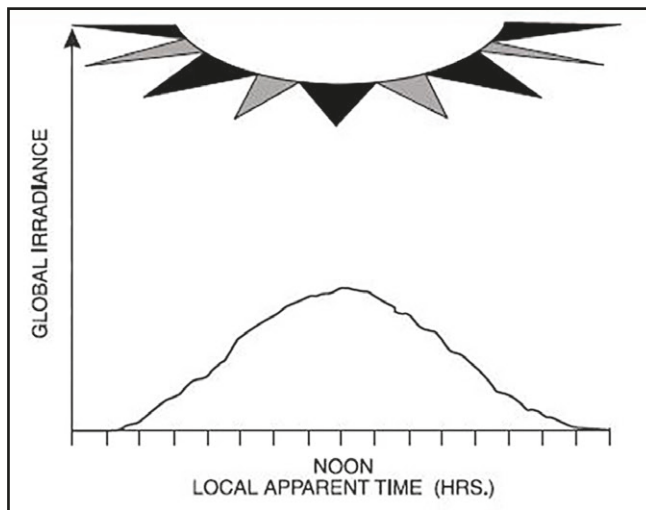
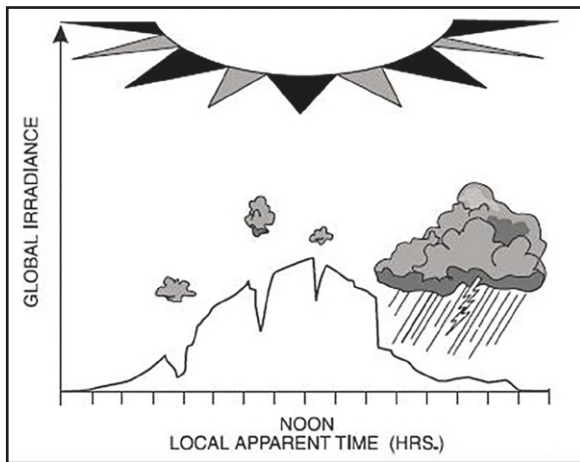


Figura 3.12 Irradiação num dia nublado com chuva (Newport)



A Tabela 3.2 ilustra a intensidade aproximada da radiação solar global e de suas componentes direta e difusa sob diferentes condições meteorológicas.

Tabela 3.2 – Intensidade aproximada típica da radiação solar em função das condições meteorológicas (Newport)

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

3.1.8 Horas de sol a pino

As Horas de Sol a Pino representam uma medida equivalente da insolação total em um dia. Este parâmetro é definido para uma localidade especificada e representa a quantidade equivalente de horas em condições de sol a pino, isto é 1000 W/m², que produzem a mesma insolação que a da condição real.

A Figura 3.13 e a Figura 3.14 mostram como a quantidade de Horas de Sol a Pino é obtida graficamente impondo-se a igualdade entre as áreas de um

retângulo de altura igual à irradiação em hora de sol a pino, cuja área é equivalente à da área definida pela curva real de irradiação.

Figura 3.13 Número de horas equivalentes de sol a pino (Arizona Solar Power Society, 2010)

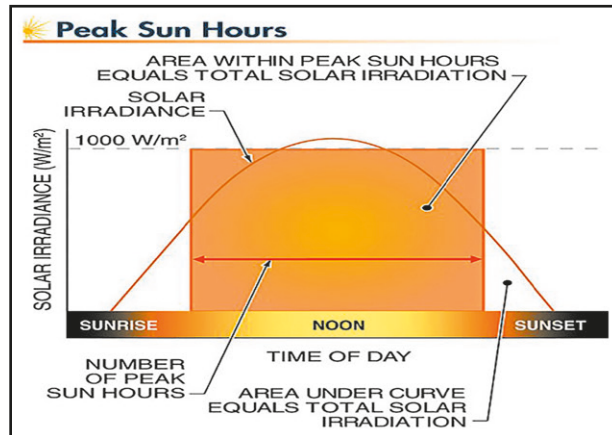
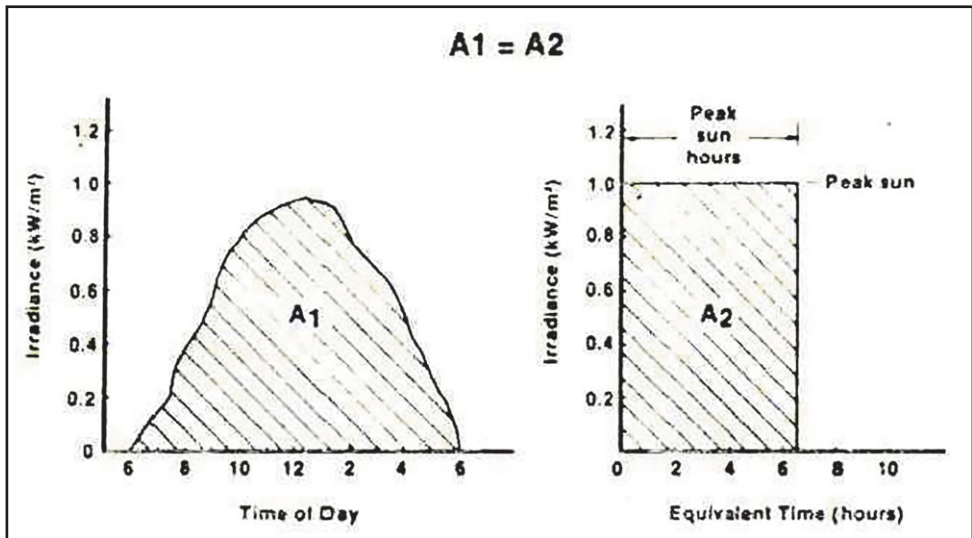


Figura 3.14 Número equivalente de horas de sol a pino (Stine & Geyer, 2001)



3.2 AFERIÇÃO DO POTENCIAL

Os dados do potencial solar citados no item anterior podem ser obtidos de distintas fontes e por equipamentos específicos. A seguir são destacadas as principais formas de medição com fins de produção de energia elétrica, assim como uma comparação do potencial mundial.

3.2.1 Medições de irradiação solar

Devido à grande variação das condições climáticas ao longo do ano, em uma localidade, as medições relativas à energia solar são realizadas em longos períodos para ter validade estatística, utilizando-se dois parâmetros:

Radiação diária média

É obtida pela média mensal dos valores da radiação diária, mês a mês, num período de 30 anos. Nota-se que pode haver valores mensais que se afastem significativamente em relação à média histórica do mês.

A insolação horária mensal média para o Ano Meteorológico Típico

Os dados característicos do Ano Meteorológico Típico (TMY – *Typical Meteorological Year*) são obtidos procedendo-se a análise estatística dos dados meteorológicos - solar e meteorológico – dos anos passados e extraíndo-se dessa série os dados históricos para cada um dos meses, utilizando-se aqueles de maior representatividade.

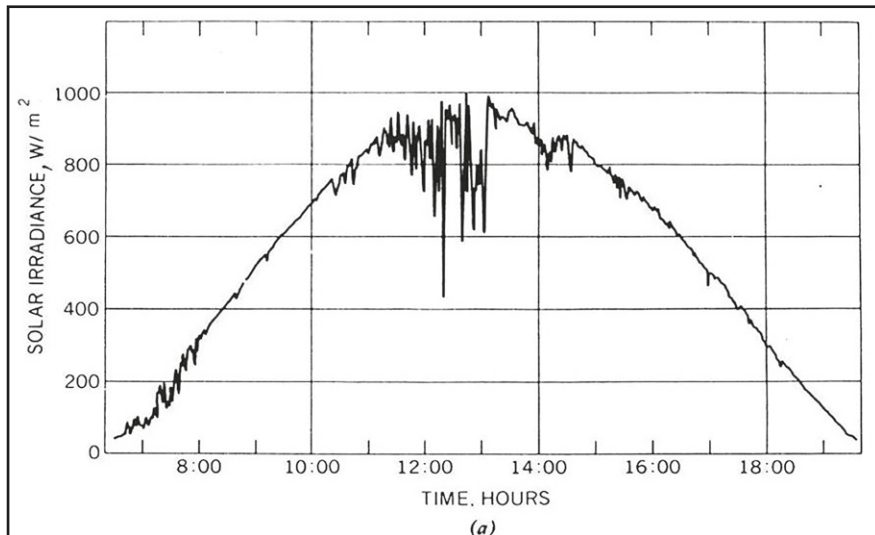
As medidas dos dados de irradiação e insolação provêm usualmente de duas fontes:

Medições diretas efetuadas em estações na Terra

Essas medidas são realizadas utilizando-se o piranômetro e o pireliômetro. O piranômetro, instrumento principal, mede a radiação solar global, proveniente de todas as direções incidente sobre o instrumento. A Figura 3.15 e a Figura 3.16 representam os dados globais típicos de irradiação solar registrados em um piranômetro disposto horizontalmente para um dia de céu claro e um dia com

nuvens. Usualmente, as leituras do piranômetro são armazenadas para obter-se a insolação diária expressa em kWh/m²/dia.

Figura 3.15 Exemplo de irradiação global sobre uma superfície horizontal em dia de céu claro (Stine & Geyer, 2001)



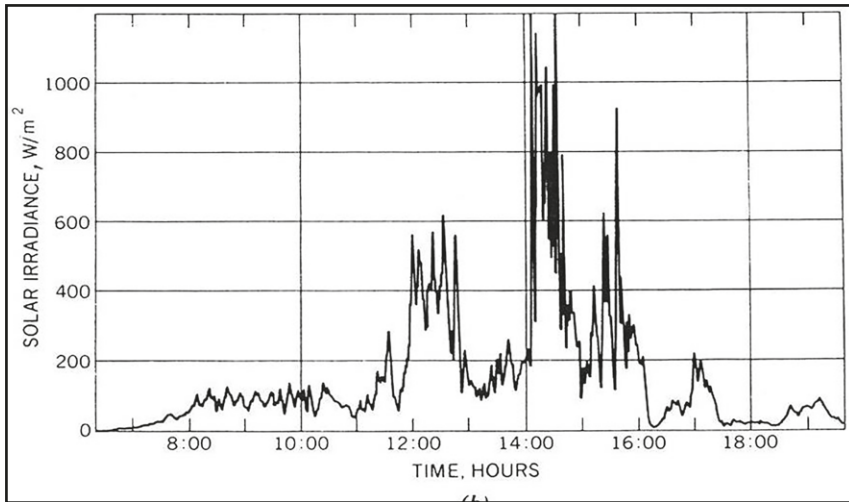
O pireliômetro, por sua vez, mede a irradiação direta normal sendo constituído de um termopar que conta com dispositivos que o orientam em direção ao sol. A componente difusa da radiação é medida através de piranômetros que contam com dispositivos específicos destinados a neutralizar a ação da componente direta.

Medidas por satélites

Uma fonte complementar de dados é usualmente obtida por transmissão à distância de medições proveniente de satélites geoestacionários. Os dados dos satélites são intrinsecamente menos precisos do que os obtidos por estações na Terra. As imagens dos satélites fornecem uma estimativa global da radiação solar sobre um plano horizontal com resolução espacial de até 10 km por 10 km. Os satélites medem tão somente a radiação solar refletida para o alto e a difusa. Esses valores são convertidos em medidas de irradiação global ou direta por meio de algoritmos que se utilizam de hipóteses empíricas e balizamento com dados de estações terrestres.

A disponibilidade de irradiação solar é medida por várias instituições como *World Radiation Data Center* (WRDC, Rússia), *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-Brasil), Centro Aeroespacial Alemão (DLR), *Bureau of Meteorology Research Center* (Austrália), CIEMAT (Espanha), ENEA (Itália).

Figura 3.16 Exemplo de irradiação global sobre uma superfície horizontal em dia de céu nublado (Stine & Geyer, 2001)



3.2.2 Potencial da disponibilidade de energia solar

A energia solar recebida pela Terra é cerca de $1,53 \times 10^9$ TWh/ano, superando o consumo de energia elétrica em cerca de 10.000 vezes, que é aproximadamente $1,5 \times 10^5$ TWh/ano. Assim, observa-se que a energia do sol incidente na Terra por apenas uma hora é da ordem de grandeza do consumo de energia elétrica de um ano (IPCC, 2011).

Por outro lado, a potência que a Terra recebe do sol, corresponde a cerca de 40.000 vezes a potência elétrica instalada no mundo e a demanda de energia elétrica da Terra poderia ser atendida utilizando-se apenas 4 % da superfície do deserto do Saara.

Quanto à questão ambiental, a energia solar tem significativo potencial para reduzir o efeito estufa. De fato, a emissão de CO_2 produzida na fabricação dos dispositivos de conversão fotovoltaicos é ínfima, tendo sido estimada de 18

a 76 g/kWh para essas células e de 14 g/kWh para as usinas que utilizam a tecnologia de concentração solar. Por outro lado, a operação de usinas solares não produz gases de efeito estufa, podendo evitar a utilização de combustíveis fósseis (IPCC, 2011).

O potencial técnico de energia solar é uma estimativa prática, que representa a quantidade de radiação que poderia ser efetivamente utilizada considerando-se o rendimento de conversão das tecnologias disponíveis, como centrais fotovoltaicas e centrais de conversão da energia solar em energia térmica, bem como os fatores locais tais como disponibilidade de terrenos e condições meteorológicas.

O potencial técnico é função de vários parâmetros e hipóteses, alguns de difícil avaliação, como por exemplo: a composição de fontes térmicas adotada, o desenvolvimento de novas tecnologias e as possíveis melhorias de desempenho. Assim, há diversas metodologias para sua determinação, que entretanto podem levar a diferentes resultados.

A Tabela 3.3 apresenta os valores de potencial técnico por regiões do mundo, mostrando que a energia elétrica que poderia ser obtida da energia solar é muito maior do que o consumo de fontes convencionais.

As aplicações efetivas da energia solar e o seu potencial econômico dependem, além de seu potencial técnico, também de ampla variedade de fatores como por exemplo: vínculos ambientais, topografia, condições climáticas, eficiência da tecnologia utilizada na conversão, política nacional de incentivos para a produção de energia por fontes renováveis, e características técnicas e operativas do sistema elétrico.

Tabela 3.3 – Potencial técnico anual de energia solar (IPCC, 2011)

Regiões	Faixa das estimativas	
	Mínimo EJ	Máximo EJ
América do Norte	181	7.410
América Latina e Caribe	113	3.385
Europa Ocidental	25	914
Europa Central e Oriental	4	154
União Soviética - URSS	199	8.655
Meio Oeste e Norte da África	412	11.060
África Sub Saariana	372	9.528
Ásia Pacífica	41	994
Ásia do Sul	39	1.339
Ásia Central	116	4.135
Pacífico OECD	73	2.263
Total	1.575	49.837
Relação entre potencial técnico e demanda de energia em 2008 (492 EJ)	32	101

Obs. 1 EJ = 278 TWh

No que tange às políticas nacionais e locais, das quais a demanda de instalações de centrais fotovoltaicas depende, é importante salientar que no ano de 2009 pelo menos 60 países – 37 desenvolvidos ou em transição e 23 em desenvolvimento – promoveram políticas para incentivar a geração com fontes renováveis, nas quais a energia solar está inserida.

Atualmente, a energia solar é amplamente utilizada em regiões onde existem limitações físicas ou ambientais para as outras fontes, em aplicações com a central solar desconexa da rede (“off-grid”) e, de modo geral, naquelas situações em que o uso da energia solar é justificado economicamente face às alternativas.

A gama de tecnologias que utiliza energia solar é bastante diferenciada e apresenta mercados com taxas de crescimento muito diferentes, variando na faixa de 10 % a 50 % ao ano, fazendo com que o potencial econômico de cada tecnologia seja sensível à evolução do seu custo diante de alternativas, surgindo oportunos nichos de mercado.

3.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

A utilização da energia solar, com as tecnologias atualmente disponíveis, apresenta vantagens e limitações, destacando-se:

3.3.1 Vantagens

- É renovável e inesgotável;
- Está disponível em praticamente todos os países do mundo, não sendo localizada como ocorre, por exemplo, com a hidroeletricidade;
- Não produz emissões nocivas de gás estufa na atmosfera;
- Pode ser utilizada modularmente, em pequena ou grande escala, inclusive em utilização doméstica;
- É de fácil instalação e manutenção;
- Representa uma alternativa viável técnica e economicamente para o suprimento de energia elétrica a zonas isoladas;
- É adequada para aplicações em Geração Distribuída utilizadas em Redes Inteligentes.

3.3.2 Limitações

- Tecnologias utilizadas em energia solar ainda se encontram em fase de desenvolvimento, com baixos níveis de rendimento;
- Alto custo de investimento;
- Disponibilidade durante período diurno quando há irradiação suficiente, necessitando de armazenagem, em alguns casos, de alto custo ou de fonte alternativa, para uso em outros períodos;

- Necessidade de área de grande dimensão a para a instalação, por exemplo, é necessário cerca de 1 hectare para uma instalação solar fotovoltaica de 1 MW;
- A produção de energia solar depende significativamente das condições climáticas, que são incertas;
- A irradiação solar é função da localidade podendo ocorrer limitações geográficas para a produção de energia elétrica.