



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS DE TRATAMENTO DE DADOS APLICADOS AO LEVANTAMENTO DE RECURSO SOLAR

Raphael Barbosa Frederico

INPE
São Jose dos Campos
2016

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS DE TRATAMENTO DE DADOS APLICADOS AO LEVANTAMENTO DE RECURSO SOLAR

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Raphael Barbosa Frederico (Universidade Federal de São Paulo, Bolsista
PIBIC/CNPq)

E-mail: raphael_frederico@hotmail.com

Dr. Enio Bueno Pereira (INPE, Orientador)

E-mail: enio.pereira@inpe.br

Dr. Fernando Ramos Martins (UNIFESP/INPE, Co-Orientador)

E-mail: fernando.martins@unifesp.br

Junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. Enio Bueno Pereira, por toda confiança depositada e paciência de uma orientação a distância.

Ao meu co-orientador, Dr. Fernando Ramos Martins, que me orienta desde quando entrei na Unifesp, em 2014, onde todo o conhecimento que pude adquirir até o momento sobre o assunto, foi passado e orientado por ele. Que além da orientação na pesquisa, me orienta nas tomadas de decisões da vida acadêmica.

Aos pesquisadores do Laboratório de Estudos Aplicados aos Recursos Renováveis do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (LABREN/CCST-INPE), pelo suporte dos materiais utilizados no trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que me abriu as portas para a realização da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

À Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), que me proporcionou uma bagagem relevante para a pesquisa, além da estrutura física para as reuniões.

À todos meus amigos e familiares, que de alguma forma me apoiaram e torceram por mim.

Aos meus pais, Paulo Sérgio Frederico e Seleta Maria Barbosa Frederico, pelo eterno amor, incentivo e apoio. São os meus dois pilares da vida.

À minha irmã, Isabela Barbosa Frederico, por ser além de irmã, minha melhor amiga. Por me fazer enxergar o estudo e conhecimento como algo especial do ser humano, aquilo que ninguém tira de você.

À Deus, que nunca me desampara e sempre me mostra o caminho certo das coisas, que tudo acontece no tempo certo. Obrigado por cuidar da minha saúde e segurança.

RESUMO

Através da conexão energia e meio ambiente, é possível estabelecer uma relação de causa e efeito entre o uso de energia, desenvolvimento socioeconômico e danos ambientais. O avanço do desenvolvimento econômico e o estilo de vida moderno têm provocado um aumento na demanda energética. Junto a isso, as preocupações ambientais decorrentes do crescimento das emissões de poluentes atmosféricos e o cenário de vulnerabilidade do recurso hídrico, provocado pelas oscilações climáticas, têm acarretado em importantes desafios científicos no âmbito da inovação e no desenvolvimento de alternativas para produção de energia através de fontes renováveis e de baixo impacto ambiental. Nesse contexto, a energia solar emerge com destaque. Para uma avaliação consistente do potencial e viabilidade econômica do aproveitamento solar, estudos são necessários não só para quantificar a disponibilidade, mas também a variabilidade, tanto em escala espacial quanto temporal. Concomitante a sua crescente participação na matriz energética do país, estudos têm apontado desafios a serem superados, como exemplo, as inconsistências nos dados gerados pelos diferentes sistemas observacionais disponíveis. Desta forma, este trabalho propõe o estudo e desenvolvimento de software computacional para aplicação de métodos de tratamento e qualificação de dados observados em estações de coleta de dados em superfície. A base de dados utilizada neste estudo é disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, responsável pela operação e manutenção das redes de estações solarimétricas do Projeto SONDA. Neste estudo, serão revisados os algoritmos e posteriormente, propostas melhorias de modo a aumentar a confiabilidade dos modelos computacionais de levantamento do recurso solar, e conseqüentemente no debate mais amplo da problemática energética e ambiental do país.

STUDY AND DEVELOPMENT OF DATA PROCESSING ALGORITHMS APPLIED TO THE SURVEY OF SOLAR RESOURCE

ABSTRACT

Through the energy and environment connection, you can establish a cause and effect relationship between energy use, socioeconomic development and environmental damage. The advancement of economic development and modern lifestyle have led to an increase in energy demand. Next to this, environmental concerns arising from the growth in emissions of air pollutants and the vulnerability scenario of water resources caused by climate oscillations have entailed in important scientific challenges in the field of innovation and the development of alternatives for energy production through renewable and low environmental impact sources. In this context, solar energy emerges prominently. For a consistent assessment of the potential and economic viability of solar utilization, studies are needed not only to quantify the availability but also the variability in both spatial and temporal scale. Concomitant with their increasing participation in the energy matrix of the country, studies have pointed out challenges to be overcome, for example, inconsistencies in the data generated by the various available observational systems. Thus, this work proposes the study and development of computer software for application of data processing and qualification methods observed in surface data collection stations. The database used in this study is provided by the National Institute for Space Research, responsible for the operation and maintenance of solarimetric station networks of SONDA design. In this study, we reviewed the algorithms and subsequently proposed improvements to increase the reliability of computer models of lifting the solar resource, and therefore in the broader debate on energy and environmental issues in the country.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quadro de consumo final de energia no mundo.	1
Figura 2 - (a) Matriz energética brasileira e (b) Matriz de energia elétrica brasileira.	3
Figura 3 - Dinâmica diária do ângulo horário e anual da declinação solar.	5
Figura 4 - Esfera celeste mostrando trajetória aparente do sol e do ângulo de declinação do sol.	6
Figura 5 - Representação do solstício e equinócio.	7
Figura 6 - Espectro de radiação eletromagnética emitida pelo Sol e pela Terra.	9
Figura 7 - Curvas de irradiação no topo da atmosfera e na superfície terrestre em função dos comprimentos de onda e dos respectivos absorvedores.	10
Figura 8 - Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.	11
Figura 9 - Espectro de radiação térmica em 5 diferentes altitudes.	12
Figura 10 - Piranômetro de radiação global aberto.	12
Figura 11 - Mapa da radiação global média sazonal do Atlas Brasileiros de Energia Solar.	14
Figura 12 - Mapa de localização das estações de medição da rede SONDA. O número de identificação para cada local é apresentado na Tabela 2.	15
Figura 13 - Módulo com a plataforma de sensores da Estação de Brasília.	16
Figura 14 - Rastreador solar com 3 sensores da Estação de Petrolina.	16
Figura 15 - Definições e siglas.	19
Figura 16 - Fluxograma de qualificação e validação de dados.	23
Figura 17 - Fluxograma de execução do software de validação do projeto SONDA V.3.5.	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis observadas nas estações da rede SONDA.	17
Tabela 2 - Lista de locais das estações de medição da rede SONDA, incluindo número de identificação, posição geográfica, tipo de estação e período de tempo dos dados disponíveis.	18
Tabela 3 - Parâmetros de códigos de avaliação objetiva dos dados.	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e justificativa	1
1.2 Objetivos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Dinâmica celeste	4
2.2 Energia solar	7
2.3 Balanço radioativo da atmosfera e seus efeitos	8
2.4 Métodos de medição	12
3 DADOS E METODOLOGIA	14
3.1 Projeto SONDA	14
3.2 Processo de qualificação de dados	18
3.3 Histórico de versões e modificações	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
5.1 Trabalhos futuros	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e justificativas

A relação entre os estágios de desenvolvimento humano e consumo de energia demonstra como a evolução no uso dos recursos energéticos propiciou o desenvolvimento da sociedade humana ao longo do tempo, desde o homem primitivo até a sociedade altamente tecnológica (Goldemberg e Villanueva, 2003). A questão energética é de suma importância no desenvolvimento da sociedade e da economia, basta analisar o progresso das técnicas de trabalho em diferentes áreas das atividades humanas, como a indústria, alimentação, agricultura, moradia, comércio e locomoção, que foram proporcionadas através do consumo e uso de recursos energéticos.

O aumento da demanda e consumo de energia decorrente do progresso tecnológico e do avanço no desenvolvimento humano, são apontados como os principais fatores na aceleração das alterações climáticas e ambientais, relatam a comunidade científica. O uso de recursos fósseis, como o petróleo e o carvão, representam aproximadamente, 79% da matriz de consumo final mundial. A queima desses combustíveis fósseis, causam grandes quantidades de emissões de gases poluentes atmosféricos, principalmente do efeito estufa (GEE), gerando grandes alterações climáticas e ambientais, como o fenômeno de aquecimento global.

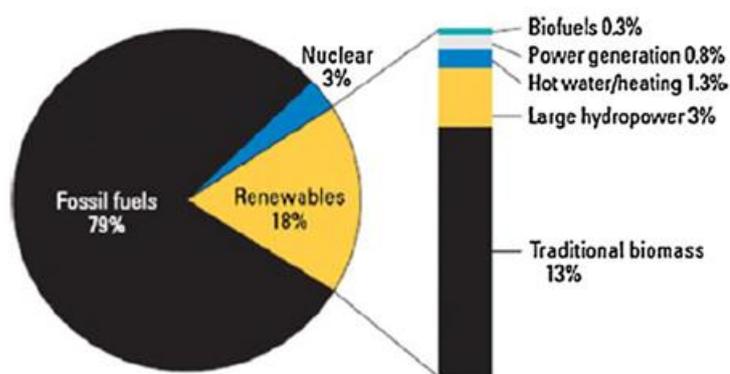


Figura 1 - Quadro de consumo final de energia no mundo.

A sociedade, juntamente com a comunidade científica e os governos, têm procurado opções de fontes energéticas limpas e de baixo impacto ambiental, motivados não só pela busca de meios que venham a complementar a atual demanda de energia e seus cenários

de crescimento, como também pelo apelo da diminuição do uso de combustíveis fósseis, em função dos problemas ambientais e do possível esgotamento destes recursos nas próximas décadas.

Neste cenário atual, onde é considerado como certo a continuação do aumento da demanda energética mundial, em contrapartida, uma diminuição no uso de combustíveis fósseis, as fontes renováveis de energia com baixa emissão de carbono, vem ganhando um papel fundamental nesta discussão, gerando acordos internacionais e previsões de grandes investimentos para os próximos anos. A tendência geral é que os preços das tecnologias de produção de energias renováveis venham a diminuir com o aumento dos estudos e aprimoramento das técnicas já conhecidas. Tal demanda se faz presente tanto na fase de instalação e desenvolvimento das tecnologias de conversão, quanto na exploração do recurso energético em si.

Neste contexto, se destaca o uso da energia solar, que apresenta diversos benefícios, como a viabilização da chegada de energia em regiões demasiadamente custosas em termos de sistemas convencionais, o regulamento da oferta de energia em períodos de estiagem, além de permitir a diminuição do uso de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade. Imenso é o leque de possibilidades, podendo ser utilizada desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos, até nas grandes centrais, que empregam energia solar concentrada. Esses mesmos sistemas autônomos são alternativas para oferecer energia elétrica a regiões que não fazem parte do sistema interligado brasileiro (MARTINS et al., 2008).

Portanto, para que sejam implementados e desenvolvidos os sistemas de conversão de energia solar no Brasil, tanto autônomas quanto nas grandes centrais, é muito importante o mapeamento do potencial solar no território brasileiro, de modo a fomentar a migração para uma matriz energética limpa e menos dependente dos recursos hídricos e fósseis. Estudos para o mapeamento do potencial de energia solar podem ser desenvolvidos por meio de diferentes formas, as principais são a utilização de uma rede de radiômetros, que devem estar distribuídos de forma estratégica sobre uma região de interesse; outra forma conhecida, é o uso de modelos computacionais para parametrização dos processos radiativos e solução da equação da transferência radiativa.

O Brasil, por estar localizado em sua maior parte na região tropical, possui grande potencial de energia solar durante todo o ano. Pode se dizer que a utilização de energia solar traria um gama de benefícios a longo prazo, principalmente em regiões remotas onde o custo da eletricidade pela rede convencional é extremamente alta, viabilizando o

desenvolvimento socioeconômico destas áreas. Além disso, é importante destacar que haveria uma regulação da energia em situações de estiagem, diminuindo a dependência das hidroelétricas e do mercado do petróleo, conseqüentemente reduzindo os impactos ambientais causados pelas hidroelétricas e as emissões de gases poluente da atmosfera. Esta fonte energética apresenta elevado potencial de crescimento no Brasil, contudo seu crescimento comercial e investimentos em larga escala vem se esbarrando na escassez de informações sobre a disponibilidade e viabilidade relacionadas a esse recurso. A maior parte dessas informações provem do setor de pesquisa básica e climatológica, sendo constituída por séries incompletas e dispersas, pois essas informações geralmente foram coletadas para outros fins que não aquele do setor energético, portanto constituem uma base de dados inadequadas e insuficientes para esse fim.

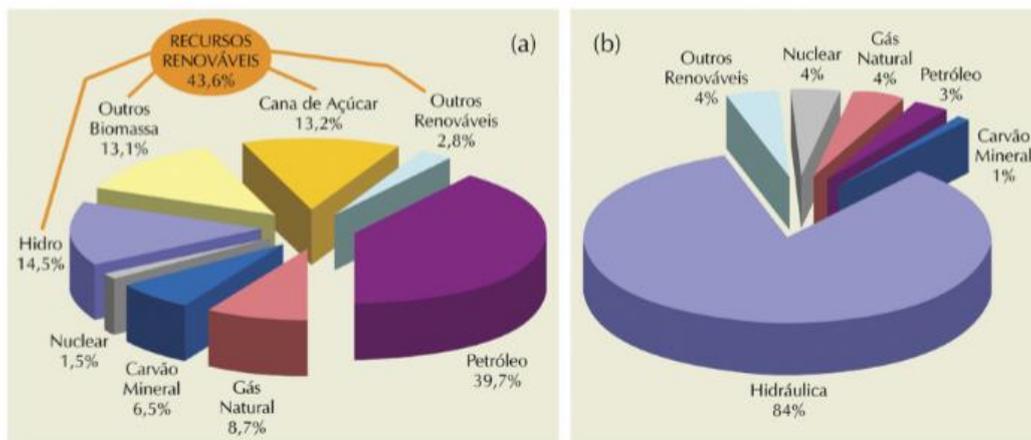


Figura 2 - (a) Matriz energética brasileira e (b) Matriz de energia elétrica brasileira.

É muito importante que para uma avaliação consistente destes mencionados potenciais, sejam realizados estudos que não só quantifiquem sua disponibilidade, mas também a sua variabilidade, em escala tanto espacial quanto temporal. Sendo assim, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, no âmbito das atividades desenvolvidas dentro do Centro de Ciência do Sistema Terrestre, possui competência em estudos de fontes renováveis de energia através do LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia. Este grupo realiza de pesquisa em meteorologia aplicada ao setor de energia e sobre seus impactos no sistema climático, com foco na observação, na modelagem computacional e no desenvolvimento de cenários face as mudanças ambientais globais. Para que se possa quantificar o recurso solar deve-se valer de dados

observacionais, que envolvem variáveis meteorológicas medidas em diversas estações. Por conta disso, em função do elevado volume de dados gerados pelos diferentes sistemas observacionais disponíveis, é comum estabelecer rotinas computacionais para que a sua qualidade possa ser verificada, sinalizando possíveis inconsistências. Estes mecanismos tentam garantir que os dados utilizados possuam a confiabilidade necessária para servir de base nas análises de potencial solar.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o estudo dos métodos de tratamento e qualificação aplicados aos dados meteorológicos utilizados na quantificação do recurso solar nacional, revisando os algoritmos e propondo melhorias de modo a aumentar a confiabilidade das análises e subsidiar a validação de modelos computacionais de levantamento do recurso solar no futuro.

Como objetivos específicos, este estudo propõe:

- Estudo dos métodos de qualificação de dados ambientais e revisão dos critérios de qualificação atuais, ou seja, compreender os critérios de qualificação hoje aplicados aos dados solarimétricos e aos dados espaciais, verificando sua consistência e analisando possíveis falhas.
- Avaliação dos pontos críticos e formulação de novos critérios, ou seja, será realizado uma análise das deficiências encontradas e proposto alterações nos critérios que apresentam problemas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dinâmica celeste

A Terra é o terceiro planeta mais próximo Sol que compõe o Sistema Solar. Ela se caracteriza por realizar dois grandes movimentos: rotação e translação. No movimento de rotação, a Terra gira em torno de seu próprio eixo, numa inclinação de aproximadamente

23,5°. Na translação, o planeta realiza o movimento em torno do Sol, descrevendo uma hélice elíptica.

Em virtude da forma elíptica da órbita terrestre, a distância Terra-Sol varia ao longo do ano em torno de um valor médio de 149,6x106 km. A mínima distância Terra-Sol é de aproximadamente 147,1x106 km, enquanto que a máxima é de 152,1x106 km. O ponto da trajetória da Terra mais próximo ao Sol é denominado periélio e o mais afastado de afélio. A Terra passa pelo afélio em 4 de julho e pelo periélio em 3 de janeiro. A quantidade de radiação solar incidente na Terra é inversamente proporcional ao quadrado da distância Terra-Sol (IQBAL, 1983). No periélio, a Terra recebe aproximadamente 3,4% a mais de radiação solar do que no afélio.

Uma vez que o eixo da terra é inclinado em relação ao Equador solar, e a posição relativa Terra-Sol é alterada a cada instante, um mesmo local sobre o globo terrestre recebe durante o ano diferentes quantidades de energia solar. A energia que incide sobre um ponto fixo em uma superfície horizontal do globo terrestre é expressa em função da declinação solar (dinâmica anual), da latitude e do ângulo horário (dinâmica diurna). Neste sentido, a geometria de iluminação na superfície terrestre, dependente dos ângulos solares (ângulo zenital solar e ângulo azimutal solar), é controlada pela dinâmica anual e diurna do disco solar.

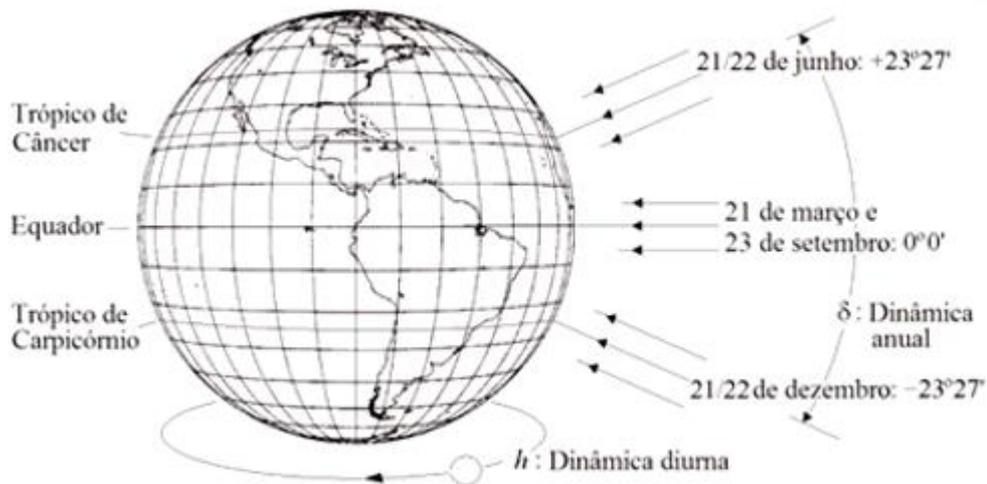


Figura 3 - Dinâmica diária do ângulo horário e anual da declinação solar.

Zenite, é o ponto de intersecção entre a normal traçada a partir de um observador estacionário na superfície terrestre com a esfera celestial solar. O ângulo zenital, ou

distância zenital, é o ângulo entre o zenite local e uma linha ligando o observador ao Sol. A elevação solar, corresponde a altura angular do Sol sobre o horizonte celestial do observador. O azimute solar, é o ângulo no zenite local entre o plano do meridiano do observador e o plano do grande círculo que passa através do zenite e do Sol. O ângulo horário, ângulo medido no pólo celestial entre o meridiano local e o meridiano solar (IQBAL, 1983), corresponde ao percurso aparente do Sol através dos meridianos. A declinação solar, corresponde ao ângulo formado entre a linha que liga o centro da Terra ao Sol e o plano do Equador, variando de $23^{\circ} 27' N$ a $23^{\circ} 27' S$, aproximadamente.

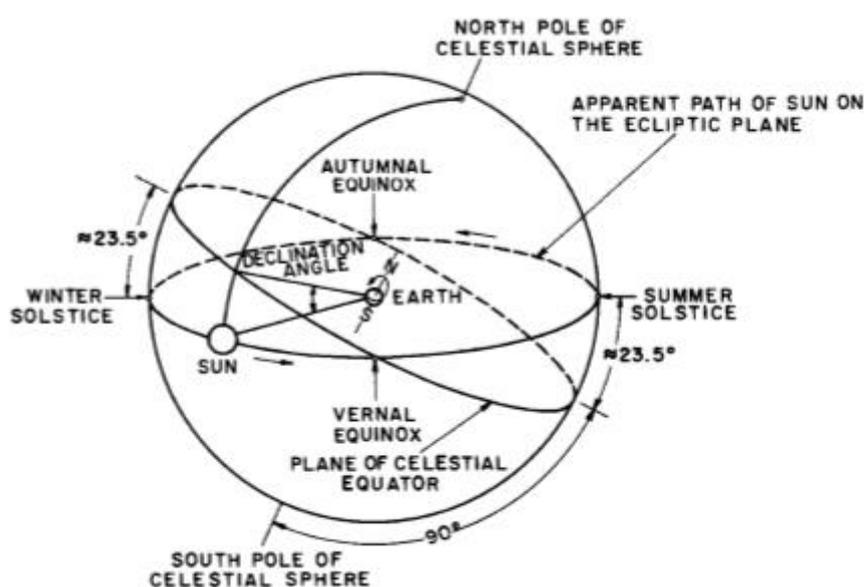


Figura 4 - Esfera celeste mostrando trajetória aparente do sol e do ângulo de declinação do sol.

As posições do Sol onde sua declinação é igual aos valores extremos, nos trópicos de Câncer e Capricórnio, são denominadas de solstícios; e as posições de declinação nula, na linha do Equador, são denominados de equinócios. Dessa forma, quando em determinada época do ano, a luz solar incide com maior intensidade sobre o hemisfério norte e na outra parte do ano incide com maior intensidade sobre o hemisfério sul, caracteriza o solstício. Já o equinócio, ocorre quando em determinada época, a luz solar incide de maneira igual sobre os dois hemisférios. Portanto, é solstício de verão no hemisfério sul quando a luz solar incide com maior intensidade sobre este hemisfério, ao mesmo tempo, é solstício de inverno no hemisfério norte, devido a menor incidência de luz solar neste hemisfério.

As estações do ano são definidas com início nos solstícios e nos equinócios. No hemisfério Sul, o solstício de verão ocorre em 21/22 de dezembro, o solstício de inverno em 21/22 de junho e o equinócio de outono e primavera em 21 de março e 23 de setembro, respectivamente. No hemisfério Norte, a data de início das estações do ano ocorre seis meses depois em relação ao hemisfério Sul.

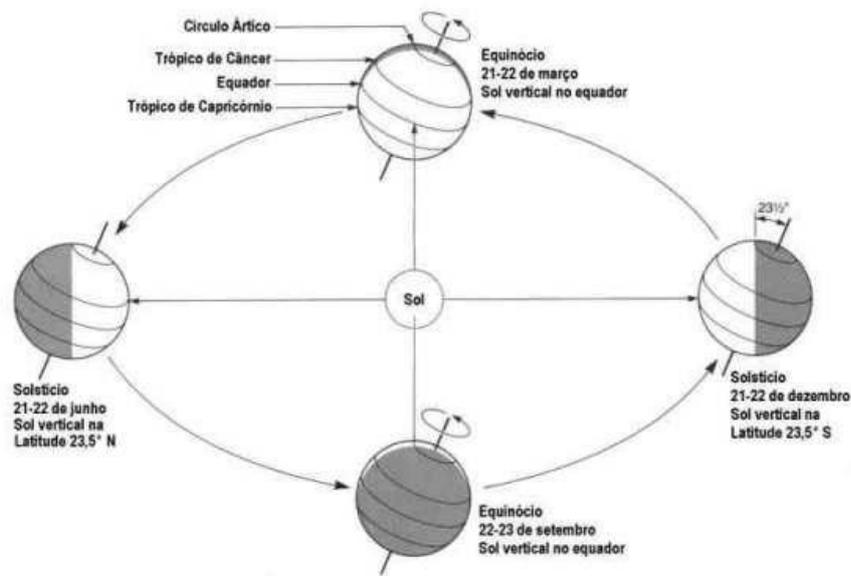


Figura 5 - Representação do solstício e equinócio.

2.2 Energia solar

O Sol é a maior fonte de energia do sistema Terra-Atmosfera, possuindo um diâmetro de $1,39 \times 10^6$ km e um volume de $1,412 \times 10^{18}$ km³. A energia solar, é a energia produzida pelo sol através de reações químicas e nucleares (ou fusão nuclear), que consiste basicamente na reação de dois átomos de hidrogênio formando um átomo de hélio. É a fonte que causa a radiação solar e que apresenta um papel fundamental por constituir na principal força motriz para processos térmicos, dinâmicos e químicos da Terra, como a circulação geral da atmosferas e brisas, que são causados pelos movimentos do ar em todas as escalas através do gradiente de temperatura da superfície terrestre.

A energia proveniente do Sol que chega até a superfície, propagando-se como energia radiante, é denominada de radiação solar. A quantidade de energia radiante, num intervalo unitário de comprimento de onda, que atravessa uma unidade de área tomada

perpendicularmente a direção considerada, na unidade de tempo, é a radiância (ou intensidade de radiação), sendo a principal característica de um campo de radiação.

A constante solar, é a irradiância solar que atinge o topo da atmosfera terrestre, apresenta o valor aproximado de 1367 W/m², caracterizando a entrada de radiação solar. Esse parâmetro apresenta variações ao longo do ano, devido aos efeitos astronômicos, principalmente aqueles ligados a órbita da Terra ao redor do Sol. A irradiância solar que incide na superfície da Terra depende de alguns fatores, como o comprimento de onda, de fenômenos que ocorrem na própria fonte de energia (erupções solares, manchas solares, variações de temperatura na atmosfera solar), da distância do Sol-Terra (associado ao movimento de rotação da Terra e à órbita da Terra em torno do Sol), além de outros fatores associados a interações da radiação eletromagnética com os constituintes da atmosfera da Terra (como as nuvens, umidade, ozônio e aerossóis, que alteram a disponibilidade de energia solar na superfície). A razão entre a irradiância solar na superfície terrestre e no topo da atmosfera, é definida como transmitância atmosférica.

2.3 Balanço radioativo da atmosfera e seus efeitos

A radiação eletromagnética solar, normalmente nomeadas como “radiação de ondas curtas”, que penetram os estratos atmosféricos, apresentam comprimentos de ondas entre 0 e 4 micrometros. Parte dessa radiação que incide na superfície terrestre é absorvida e reemitida para o espaço. A radiação que é reemitida para o espaço é conhecida como radiação terrestre, normalmente nomeadas como “radiação de ondas longas”, por apresentarem comprimentos de onda superiores a 4 micrometros.



Figura 6 - Espectro de radiação eletromagnética emitida pelo Sol e pela Terra.

Ao atravessar a atmosfera há três tipos de incidência de energia na superfície terrestre: a radiação direta, onde não ocorre interferências de fatores atmosféricos, ou seja, toda energia emitida chega a superfície; a radiação difusa, que devido as interferências de fatores atmosféricos, faz com que parte da energia emitida seja absorvida ou espalhada; e por último, a radiação global, que é o conjunto da radiação direta e radiação difusa.

A radiação eletromagnética é atenuada por processos de espalhamento e absorção, causados pelas partículas (denominados aerossóis) e moléculas de gases atmosféricos. Os coeficientes de absorção e de espalhamento dependem do comprimento de onda da radiação, além das espécies de gases e aerossóis presentes na atmosfera.

Aproximadamente 30% da radiação incidente no topo da atmosfera são refletidos pelas nuvens, pela superfície do planeta, e pelos gases e partículas atmosféricas. Os outros 70% são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível).

O processo de absorção da energia solar por constituintes atmosféricos, alteram o espectro eletromagnético da radiação solar incidente, à medida que a mesma percorre a atmosfera terrestre, atenuando principalmente a radiação eletromagnética na região da radiação ultravioleta. A radiação nesta faixa de comprimento de onda é intensamente absorvida na camada de Ozônio (situada cerca de 35 km acima da superfície) em razão das reações fotoquímicas que ocorrem nessa camada da atmosfera. O processo de absorção da radiação solar é seletiva, destacando o ozônio (O₃), o vapor d' água e o dióxido de carbono (CO₂) como os principais agentes absorvedores, sendo os dois últimos os principais gases do efeito estufa. A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é

reemitida na faixa do infravermelho do espectro de radiação eletromagnética, sendo que aproximadamente 6% são provenientes da superfície e aproximadamente 64% tem origem em nuvens e constituintes atmosféricos.

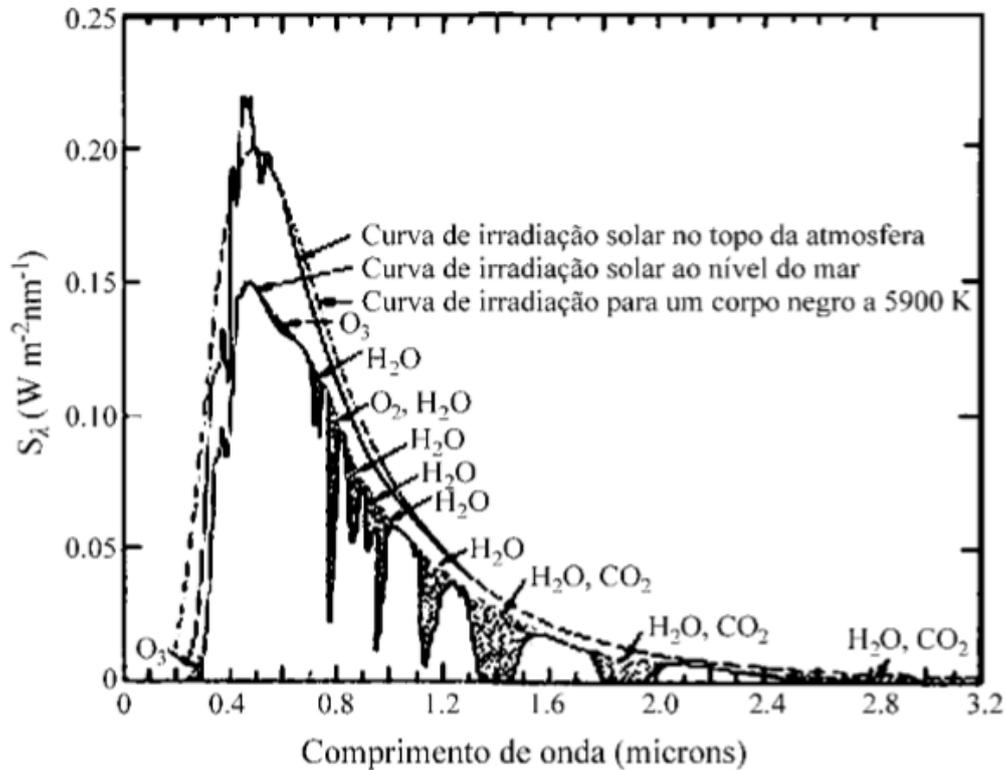


Figura 7 - Curvas de irradiância no topo da atmosfera e na superfície terrestre em função dos comprimentos de onda e dos respectivos absorvedores.

O processo de espalhamento é um fenômeno natural no qual a radiação incidente interage com os constituintes atmosféricos de forma a alterar a direção de propagação das ondas eletromagnéticas. Destacam-se dois processos de espalhamentos: Mie, onde partículas grandes (com tamanhos próximos ao do comprimento de onda da radiação) são responsáveis pela tonalidade branca, exibida por nuvens, nevoeiros e a abundância de particulados na atmosfera de núcleos urbanos; e Rayleigh, onde partículas pequenas (com dimensões muito menores que o comprimento de onda da radiação) são responsáveis pela tonalidade azul do céu durante o dia.

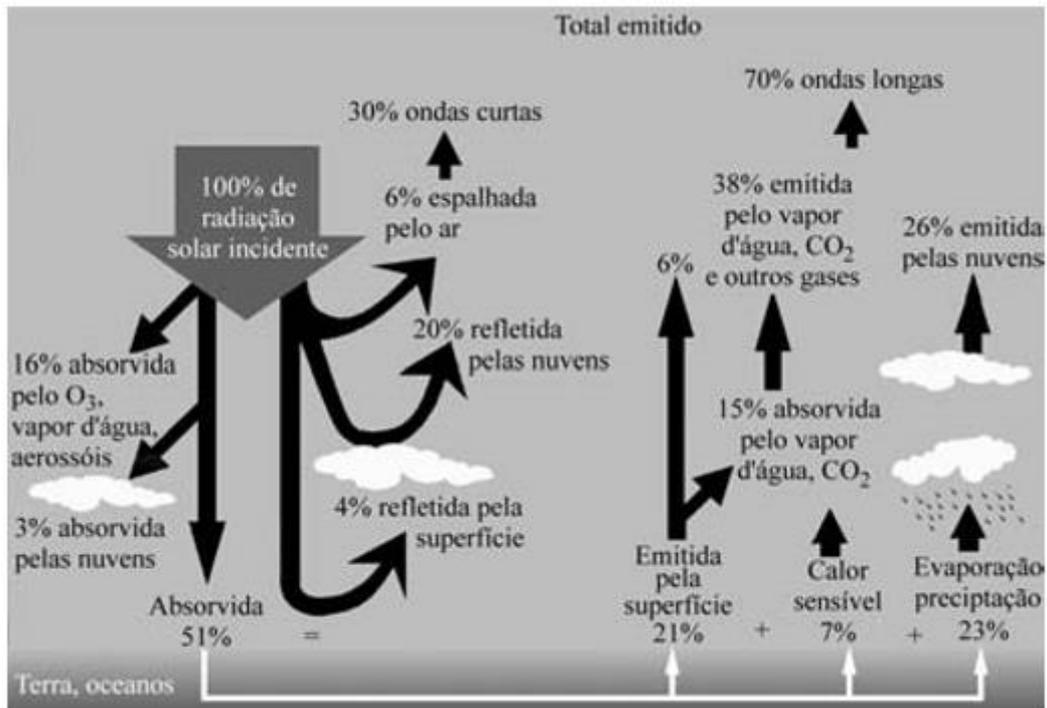


Figura 8 - Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.

Mais de 99% da radiação solar apresenta comprimento de onda inferior a 4 μm , ou seja, praticamente toda a radiação solar se encontra na região de ondas curtas correspondendo a região do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. A Figura 6, apresenta o espectro de radiação eletromagnética da radiação térmica emitida pelo planeta quando observado do espaço a diferentes altitudes: 1 - 100 m, 2 - 4,6 km, 3 - 10 km, 4 - 18 km e 5 - 28 km, apresentando comprimento de onda entre 4 μm a 12 μm , ou seja, na faixa de comprimento de ondas longas.

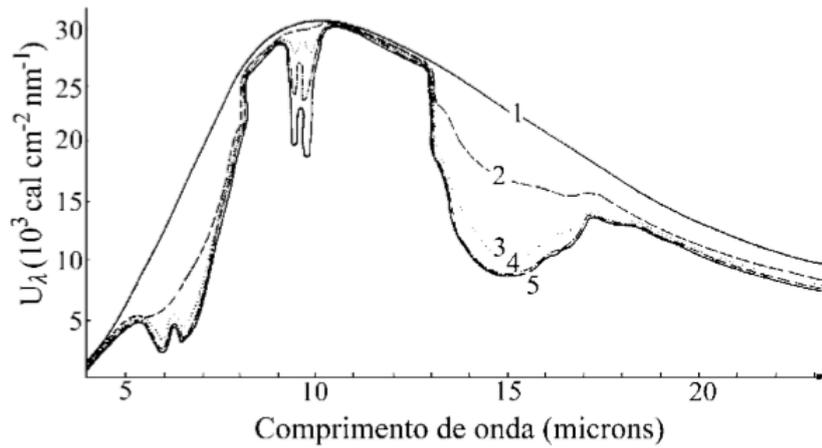


Figura 9 - Espectro de radiação térmica em 5 diferentes altitudes.

2.4 Métodos de medição

Existem diversos métodos para conhecer e medir a disponibilidade de energia solar incidente na superfície da Terra. Os principais equipamentos utilizados são: heliógrafo, actinógrafo, piranômetro, pirgeômetro, pirheliômetro, fotômetro solar, imageador, sobreamento e o radiômetro, que é o equipamento mais utilizado, apresentando muitos modelos que se diferem tanto pela precisão dos dados observados quanto pelo custo.



Figura 10 - Piranômetro de radiação global aberto.

Os radiômetros fornecem medidas pontuais com grande acurácia, mas, além de apresentarem custo elevado para grandes extensões territoriais, como é o caso do Brasil, produzem resultados com elevado grau de incerteza, devido aos processos de interpolação e extrapolação entre estações de superfície distribuídas de forma esparsa e muito heterogênea.

Outra alternativa é a aplicação de modelos computacionais que estimam a radiação solar incidente na superfície através da parametrização dos processos radioativos no sistema Terra-Atmosfera, fornecendo resultados bastante confiáveis e custo relativamente baixo quando comparado aos outros. Alguns estudos realizados por Guarnieri et al. (2006) e Perez et al. (1997), e Martins e Pereira (2011), concluíram que a precisão das estimativas horárias e diárias fornecidas por modelos numéricos que utilizam imagens de satélite só será inferior que a precisão dos resultados obtidos por interpolação/extrapolação de dados coletados em superfície, se a distância entre os radiômetros for inferior a 35-50 km. Portanto, no caso do Brasil, por apresentar grandes extensões territoriais, mostram-se mais adequadas as estimativas de modelos numéricos. Contudo, Perez et al. (1997) mostraram que os desvios de estimativas de irradiação solar na superfície podem ser reduzidos se técnicas estatísticas forem adotadas para refinamento das estimativas de modelos numéricos utilizando dados de uma rede de observações em superfície, mesmo que a quantidade de estações seja pequena na região de estudo.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, divulgou o levantamento da disponibilidade de energia solar no território brasileiro, utilizando um modelo de transferência radiativa alimentado por dados climatológicos e de 10 anos de informações extraídas de imagens de satélite geoestacionário, sendo validado por dados coletados em estações de superfície. Nele são mostrados mapas de isolinhas de horas de insolação e radiação solar global, preparados por técnicas de extrapolação dos valores contidos na sua base de dados, além disso, a publicação também traz uma compilação de grande valor científico, que disponibiliza valores históricos de medidas de horas de insolação e irradiância solar global, direta e difusa em regiões espalhadas por todo o país.

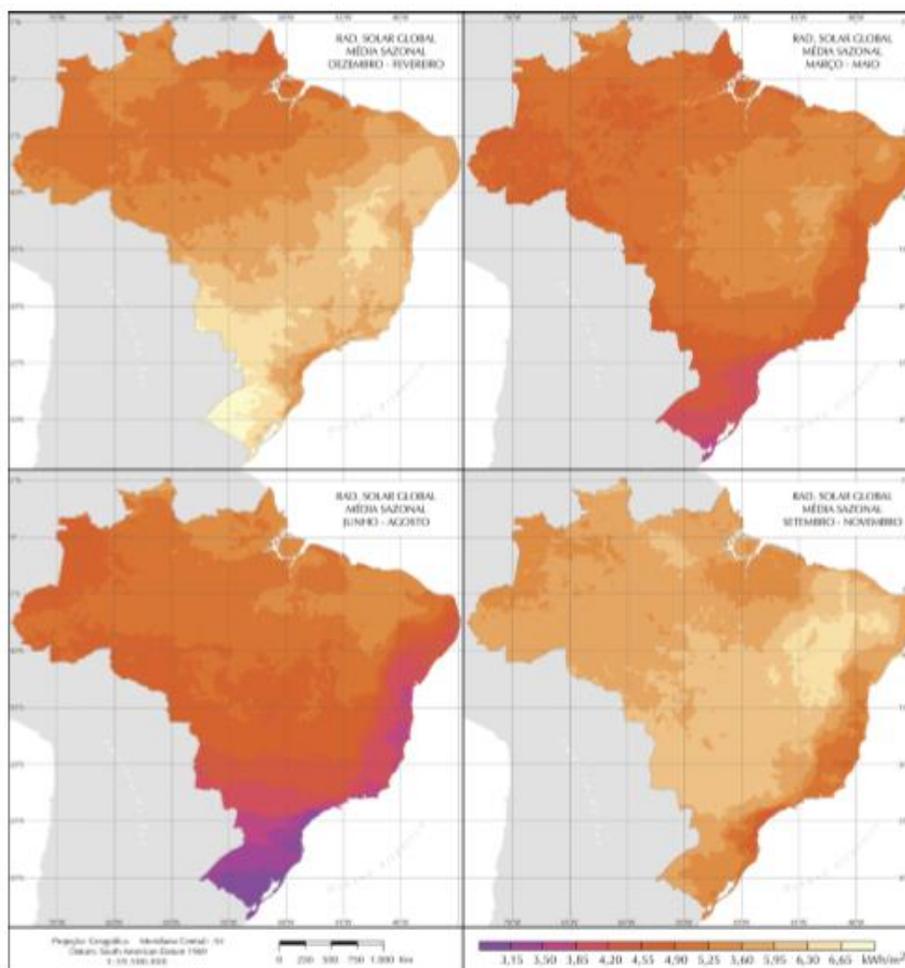


Figura 11 – Mapa da radiação global média sazonal do Atlas Brasileiros de Energia Solar.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Projeto SONDA

A rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) provem de um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para a implementação de infra-estrutura física e de recursos humanos destinados a montar e levantar a melhor base de dados de superfície necessária ao levantamento de recursos de energia solar e eólica no Brasil, para que assim sejam planejados e realizados o seu uso.

Atualmente, o projeto SONDA encontra-se totalmente implementado e conta com um total de 18 estações distribuídas em todo território nacional, para que assim possa abranger todos os climas típicos do Brasil. Das 18 estações, 13 são próprias e as outras 5 são de empresas e instituições parceiras.

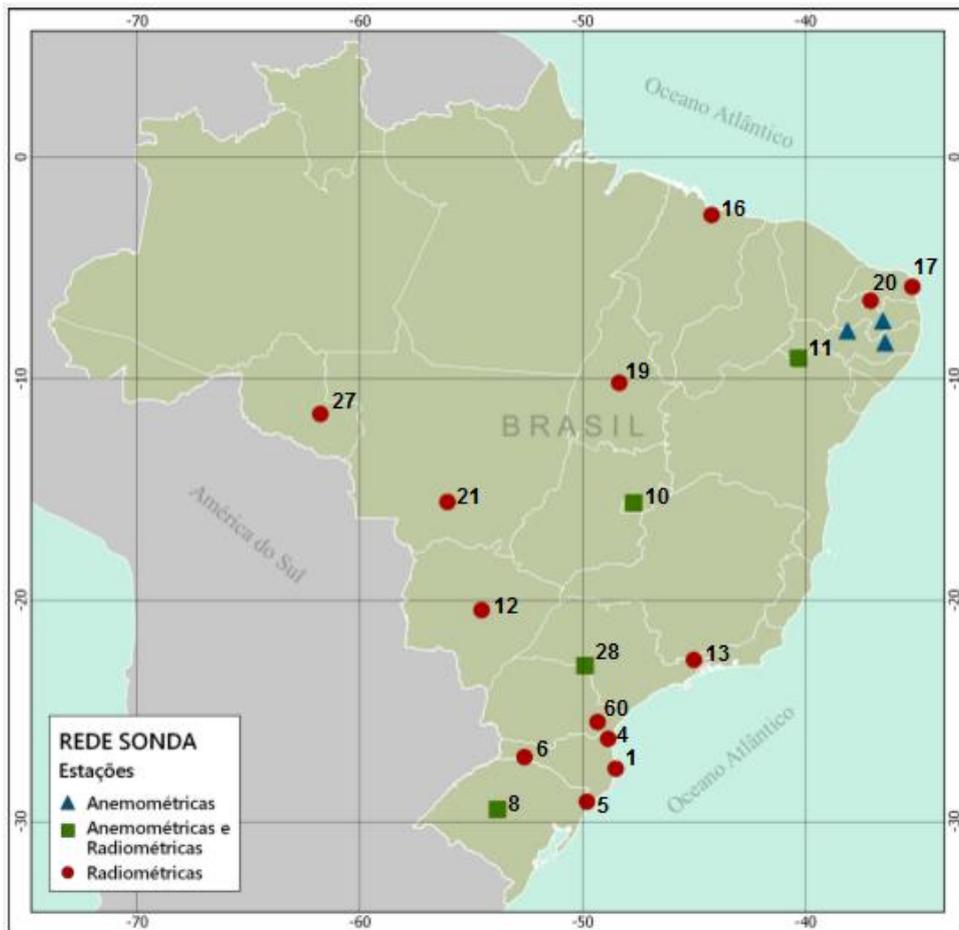


Figura 12 - Mapa de localização das estações de medição da rede SONDA. O número de identificação para cada local é apresentado na Tabela 2.

Os dados coletados por essas estações são disponibilizados livremente no website do projeto (<http://sonda.ccst.inpe.br>), onde os dados brutos em si não são modificados, mas sinalizados em arquivo a parte, indicando sua condição, ficando assim a critério do usuário a utilização ou não do dado suspeito. No website do projeto, também conta com informações detalhadas sobre a rede, as estações e os critérios de validação aplicados nos dados, para garantir-lhes maior confiabilidade.



Figura 13 - Módulo com a plataforma de sensores da Estação de Brasília.



Figura 14 - Rastreador solar com 3 sensores da Estação de Petrolina.

O Projeto SONDA conta com três tipos de estações: as solarimétricas (S), que utilizam variáveis relacionadas a energia solar; as anemométricas (A), que utilizam variáveis

relacionadas a caracterização dos ventos; e as estações que são ambas (SA), ou seja, utilizam variáveis tanto solarimétrica quanto anemométrica. Como este trabalho é direcionado a energia solar, o foco estão nas estações do tipo S e SA. Neste contexto, as principais variáveis radiométricas analisadas são: Radiação global horizontal, Radiação direta normal, radiação difusa, Radiação de onda longa, Radiação PAR e Iluminância.

Variables	Unit	Type		
		S	A	SA
Wind speed at 25 m	$m s^{-1}$		•	•
Wind direction at 25 m	$^{\circ}$ (degree)		•	•
Temperature at 25 m	$^{\circ}C$		•	•
Wind speed at 50 m	$m s^{-1}$		•	•
Wind direction at 50 m	$^{\circ}$ (degree)		•	•
Temperature at 50 m	$^{\circ}C$		•	•
Surface air temperature	$^{\circ}C$	•		•
Relative humidity	%	•		•
Atmospheric pressure	<i>mbar</i>	•		•
Precipitation	<i>mm</i>	•		•
Wind speed at 10 m	$m s^{-1}$	•		•
Wind direction at 10 m	$^{\circ}$ (degree)	•		•
Global radiation	$W m^{-2}$	•		•
Direct radiation	$W m^{-2}$	•		•
Beam radiation	$W m^{-2}$	•		•
Long wave radiation	$W m^{-2}$	•		•
PAR radiation	$\mu mol s^{-1} m^{-2}$	•		•
Illuminance	<i>kLux</i>	•		•

Tabela 1 - Variáveis observadas nas estações da rede SONDA.

A validação dos dados é bastante rigorosa e baseia-se nos testes da Baseline Solar Radiation Network (BSRN), da World Meteorological Organization (WMO) e outros desenvolvidos pela experiência do grupo de Energias Renováveis do Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST).

Nº de Identificação	Nome	Código	Lat. (°S)	Lon. (°W)	Alt. (m)	Tipo de Estação	Período
1	Florianópolis	FLN	-27.6017	-48.5178	31	Solarimétrica	2004-atual
4	Joinville	JOI	-26.2525	-48.8578	48	Solarimétrica	2004-atual
5	Sombrio	SBR	-29.0956	-49.8133	15	Solarimétrica	2003-atual
6	Chapecó	CHP	-27.0800	-52.6144	700	Solarimétrica	2004-2010
8	São Martinho	SMS	-29.4428	-53.8231	489	Solar/Anem	2004-2012
10	Brasília	BRB	-15.6009	-47.7131	1023	Solar/Anem	2004-atual
11	Petrolina	PTR	-9.0689	-40.3197	387	Solar/Anem	2004-atual
12	Campo Grande	CGR	-20.4383	-54.5383	677	Solarimétrica	2004-atual
13	Cachoeira Paulista	CPA	-22.6896	-45.0062	574	Solarimétrica	2014-atual
16	São Luiz	SLZ	-2.5933	-44.2122	40	Solarimétrica	2005-atual
17	Natal	NAT	-5.8367	-35.2064	58	Solarimétrica	2007-2012
19	Palmas	PMA	-10.1778	-48.3619	216	Solarimétrica	2004-atual
20	Caicó	CAI	-6.4669	-37.0847	176	Solarimétrica	2002-2008
21	Cuiabá	CBA	-15.5553	-56.0700	185	Solarimétrica	2004-atual
27	Rolim	RLM	-11.5817	-61.7736	252	Solar/Anem	2005-2009
28	Ourinhos	ORN	-22.9486	-49.8942	446	Solar/Anem	2006-2011
60	Curitiba	CTB	-25.4954	-49.3312	891	Solarimétrica	2004-atual

Tabela 2 - Lista de locais das estações de medição da rede SONDA, incluindo número de identificação, posição geográfica, tipo de estação e período de tempo dos dados disponíveis.

3.2 Processo de qualificação de dados

A metodologia aplicada no processo de qualificação dos dados solarimétricos e espaciais consistem em quatro níveis sequenciais, desde filtros mais grosseiros até filtros mais refinados. Esses filtros sinalizam quando um dado é considerado suspeito de incorreção através da execução de algoritmos que adotam alguns critérios com limites.

A aprovação em cada etapa é requisito para a continuidade do processo. Logo, quando um dado for considerado aprovado numa etapa, o dado receberá o código de aprovado e a etapa seguinte será iniciada. Contudo, se não houver aprovação, o processo será interrompido e o dado receberá o código equivalente a suspeito.

Definições:

- θ : ângulo zenital;
- μ_0 : cosseno do ângulo zenital;
- S_0 : constante solar;
- AU : distância Terra-Sol em unidades astronômicas;
- $S_a = S_0/AU^2$: constante solar ajustada pela distância Terra-Sol;
- σ : constante de Stephan-Boltzman;
- T_a : temperatura do ar em Kelvin;
- G : radiação de onda curta medida pelo piranômetro descoberto;
- D : radiação de onda curta medida pelo piranômetro coberto;
- B_{NSW} : radiação direta normal componente da radiação de onda curta;
- B_{SW} : radiação direta normal multiplicada por μ_0 ;
- LW_{down} : radiação de onda longa incidente medida pelo pirgeometro;

- LW_{up} : radiação de onda longa refletida medida pelo pirgeometro.
- G_{model} : radiação global obtida pelo modelo de céu claro C Parametrization Model.
- D_{model} : radiação difusa obtida pelo modelo de céu claro C Parametrization Model.
- B_{model} : radiação direta obtida pelo modelo de céu claro C Parametrization Model.

Figura 15 - Definições e siglas.

3.2.1 Primeiro nível

No primeiro nível, são testados os limites fisicamente possíveis, onde são esperados valores dentro de um intervalo já conhecido. Os limites utilizados no primeiro nível são:

- Radiação Global Horizontal:

$$\begin{aligned} \text{mín.: } & -4 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx.: } & S_a 1,5 \mu_0^{1,2} + 100 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

- Radiação Direta Normal:

$$\begin{aligned} \text{mín.: } & -4 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx.: } & S_a \end{aligned}$$

- Radiação Difusa:

$$\begin{aligned} \text{mín.: } & -4 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx.: } & S_a 0,95 \mu_0^{1,2} + 50 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

- Radiação de Onda Longa:

$$\begin{aligned} &\text{se desvio padrão} \neq 0 \\ \text{mín.:} & 40 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx.:} & 700 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

- Radiação PAR:

$$\begin{aligned} &\text{se desvio padrão} \neq 0 \\ \text{mín.:} & -4 \mu\text{mols s}^{-1}\text{m}^{-2} \\ \text{máx.:} & 2,07 * (S_a * 1,2 * \mu_0^{1,2} + 100 \text{ W m}^{-2}) \mu\text{mols s}^{-1}\text{m}^{-2} \end{aligned}$$

- Iluminância:

$$\begin{aligned} &\text{se desvio padrão} \neq 0 \\ \text{mín.:} & -4 \text{ klux} \\ \text{máx.:} & 0,1125 * (S_a * 1,2 * \mu_0^{1,2} + 100 \text{ W m}^{-2}) \text{ klux} \end{aligned}$$

3.2.2 Segundo nível

No segundo nível, são filtrados os eventos extremamente raros. Os limites utilizados nesse nível são:

- Radiação Global Horizontal:

$$\begin{aligned} \text{min:} & -2 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx:} & S_a 1,2 \mu_0^{1,2} + 50 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

- Radiação Direta Normal:

$$\begin{aligned} \text{min:} & -2 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx:} & S_a 0,95 \mu_0^{0,2} + 10 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

- Radiação Difusa:

$$\begin{aligned} \text{min:} & -2 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx:} & S_a 0,75 \mu_0^{1,2} + 30 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

- Radiação de Onda Longa:

$$\begin{aligned} \text{min:} & 60 \text{ W m}^{-2} \\ \text{máx:} & 500 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

- Radiação PAR:

$$\begin{aligned} \text{min:} & -2 \mu\text{mols s}^{-1}\text{m}^{-2} \\ \text{máx:} & 2,07 * (S_a * 1,2 * \mu_0^{1,2} + 50 \text{ W m}^{-2}) \mu\text{mols s}^{-1}\text{m}^{-2} \end{aligned}$$

- Iluminância:

min: -2 klux

máx: $0,1125 * (S_a * 0,95 * \mu_0^{1,2} + 50 \text{ W m}^{-2}) \text{ klux}$

3.2.3 Terceiro nível

No terceiro nível, as variáveis são comparadas com outras da mesma estação, onde são esperados valores dentro de certos limites e cada variável medida tem contribuição no valor da outra. O dado é suspeito caso tenha uma incoerência entre as variáveis. Os limites utilizados são:

- Radiação Global Horizontal:

sendo $S_{SW} = D_{SW} + (B_{NSW} * \mu_0)$

min: G/S_{SW} deve ser entre $\pm 8\%$ de 1,0 para $\theta < 75^\circ$ se $S_{SW} > 50 \text{ W m}^{-2}$

máx.: G/S_{SW} deve ser entre $\pm 15\%$ de 1,0 para $93^\circ < \theta < 75^\circ$ se $S_{SW} > 50 \text{ W m}^{-2}$

- Radiação Direta Normal:

máx: $(B_{NSW} \mu_0 - 50) \leq \text{direta horizontal } (G - D_{SW}) \leq (B_{NSW} \mu_0 + 50)$

- Radiação Difusa:

min: $D/G < 1,05$ para $\theta < 75^\circ$ se $G > 50 \text{ W m}^{-2}$

máx.: $D/G < 1,10$ para $93^\circ > \theta > 75^\circ$ se $G > 50 \text{ W m}^{-2}$

- Radiação de Onda Longa:

máx.: $0,4 \times \sigma T_a^4$

máx.: $\sigma T_a^4 + 25$

- Radiação PAR:

máx.: $2,07 * G \mu \text{ mols s}^{-1} \text{ m}^{-2}$

- Iluminância:

máx.: $0,115 * G \text{ klux}$

3.2.4 Quarto nível

No quarto e último nível, a radiação global, direta e difusa, são comparadas com o modelo de céu claro, conhecido como Parametrization Model C (Iqbal, 1983). O dado é suspeito caso a medida esteja inconsistente quando comparada com estimativas de modelos computacionais. Os limites utilizados no último nível são:

- Radiação Global Horizontal:

$$\text{máx.: } G < G_{\text{model}}$$

- Radiação Direta Normal:

$$\text{máx.: } B_{\text{NSW}} < B_{\text{model}}$$

- Radiação Difusa:

$$\text{máx.: } D > D_{\text{model}}$$

Cada dado terá um qualificador de quatro dígitos, onde o resultado de cada uma das etapas aplicadas no controle de qualidade é dado na forma de códigos numéricos, lidos da direita para a esquerda, que classificam o valor medido dentre dos parâmetros apresentado na Tabela 3.

0	Nenhum procedimento foi executado.
2	Dado suspeito de ser incorreto.
5	Procedimento não pode ser executado.
9	Dado de boa qualidade ou não suspeito.

Tabela 3 - Parâmetros de códigos de avaliação objetiva dos dados.

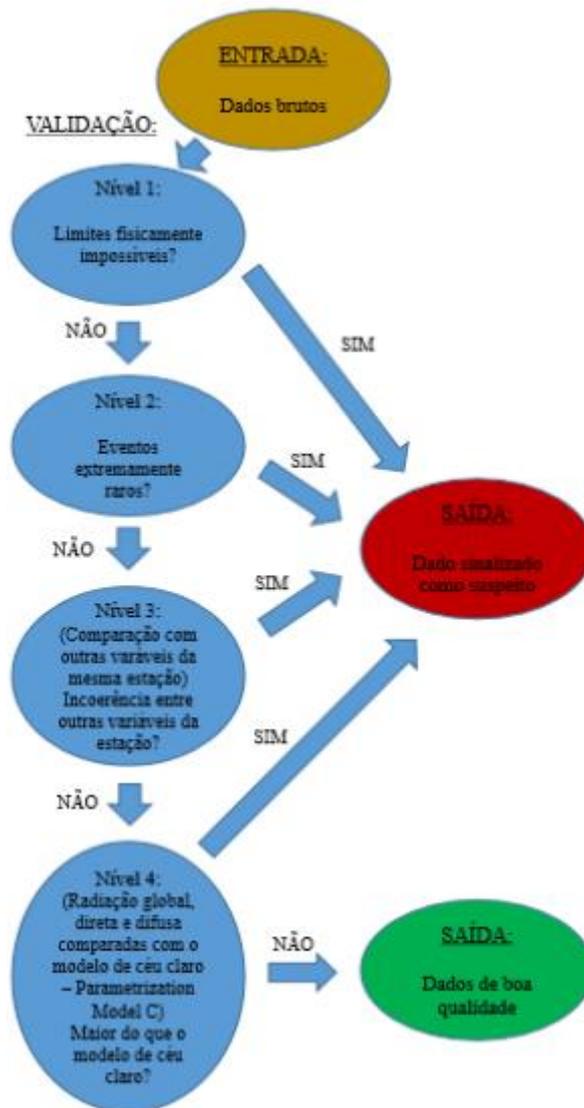


Figura 16 - Fluxograma de qualificação e validação de dados.

Em relação a estrutura de entrada e saída dos arquivos, o nome dos dados ocorre conforme a sequência: composto por estação (região onde está localizada a estação) + ano + mês. O software de validação encontra-se na versão 3.5, totalmente desenvolvido na linguagem de programação JAVA, e a versão 4.0 está em andamento. Ambas versões apresentam o esquema geral apresentado na Figura 14.

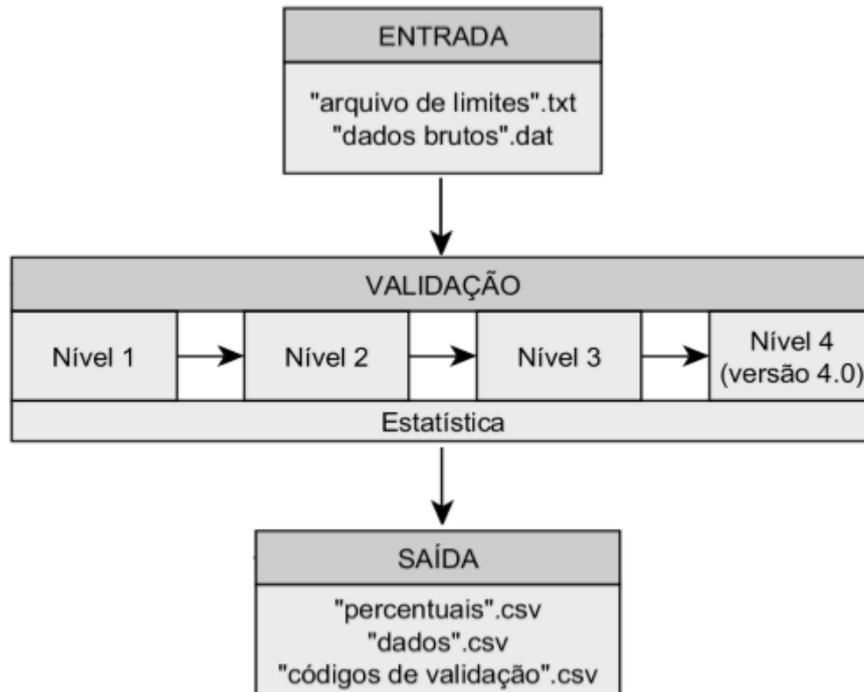


Figura 17 - Fluxograma de execução do software de validação do projeto SONDA V.3.5.

3.3 Histórico de versões e modificações

- 07.04.2014 - Versão 3.5: Alteração da constante de conversão de PAR e LUX.
- 03.04.2014 - Versão 3.5: Correção da formatação de caracteres no código.
- 02.04.2014 - Versão 3.5: Adequação das janelas de informação do java.
- 01.04.2014 - Versão 3.5: Adaptação do código para rodar em ambientes linux e Windows.
- 27.03.2014 - Versão 3.5: Refeito a validação no nível 3 da radiação global (versão 3.4 com problema).
- 13.03.2014 - Versão 3.4: Correção da fórmula utilizada para a validação da radiação global e difusa.
- 12.02.2014 - Versão 3.4: Alteração da fórmula do day angle e da impressão do relatório.
- 28.01.2014 - Versão 3.4: Remoção da verificação de onda longa na rotina de desalinhamento de tracker.
- 29.11.2013 - Versão 3.3.2
- 21.08.2013 - Versão 3.3
- 03.07.2013 - Versão 3.2.1

- 31.10.2012 - Versão 3.2
- 16.08.2012 - Versão 3.1.2
- 19.06.2011 - Versão 3.1.1
- 07.02.2011 - Versão 3.1
- 26.04.2010 - Versão 3.0
- 13.05.2009 - Versão 2.1
- 03.02.2009 - Versão 2.0
- 31.03.2006 - Versão 1.0

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas diversas reuniões e encontros, entre o aluno e o co-orientador, havendo uma integração entre o aluno e os pesquisadores do Laboratório de Estudos Aplicados aos Recursos Renováveis do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (LABREN/CCST-INPE), de modo a discutir o andamento e aprimoramento do projeto.

Foram estudados os métodos de qualificação de dados ambientais, ou seja, foi aprimorado o conhecimento no tema de qualificação e validação de dados ambientais. Posteriormente, foram revisados os critérios de qualificação atuais, ou seja, houve a compreensão dos critérios de qualificação hoje aplicados aos dados solarimétricos e aos dados espaciais, para que assim seja verificado sua consistência e analisada as possíveis falhas. Foram avaliados alguns pontos críticos das deficiências encontradas, para que em trabalhos futuros sejam formulados novos critérios e sua implementação em um código computacional.

Foi possível observar que a maioria dos dados validados como suspeitos, são devido ao mau funcionamento, problemas de operação e de manutenção, como acidentes com animais e equipamentos não estarem alinhados com precisão em relação ao Sol.

Foi possível observar também, que existem alguns poucos dados que estão sendo marcados como suspeitos na gama dos dados bons, contudo, ainda não há conhecimento dos reais motivos.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho realizou o estudo dos métodos de tratamento e qualificação aplicados aos dados meteorológicos utilizados na quantificação do recurso solar nacional, revisando os algoritmos e os critérios de qualificação atuais. Foi verificada sua consistência e analisado as possíveis falhas e os pontos críticos.

Com os resultados do presente estudo, conclui-se que o processo de qualificação de dados do Projeto SONDA é um dos principais recursos em uso hoje no Brasil aplicados ao recurso solar. Esse processo que originou diversas publicações de impacto relacionados a energia solar, apresentam resultados bastante satisfatórios, mostrando que os procedimentos de qualificação e validação dos dados da rede SONDA são consistentes e de boa qualidade. Contudo, existem alguns casos que requer mais investigação, a fim de explicar os motivos de alguns dados no intervalo de dados bons, estarem classificados como dados suspeitos.

Acredita-se que caso os limites utilizados nos critérios de qualificação de dados passem por processos de reajustes, ou seja, sejam configurados para condições climáticas e temporais características do Brasil, a verificação dos dados coletados aplicados ao levantamento de recurso solar se tornem ainda mais consistentes e refinados.

Portanto, é importante uma análise física e quantitativa das equações temporais e espaciais utilizadas nos limites dos critérios adotados no processo de qualificação e validação de dados do levantamento de recurso solar do Brasil.

5.1 Trabalhos futuros

Diante das conclusões observadas neste trabalho de pesquisa, entende-se como sendo os próximos passos para melhorias no processo de qualificação e validação de dados do Projeto SONDA:

- Continuação da investigação, ainda mais aprofundada, das falhas e deficiências encontradas.
- Análise crítica dos limites dos critérios das equações físicas temporais e espaciais, realizando reajustes conforme as características do clima e do tempo do Brasil.

- Formulação de novos critérios e a sua implementação em um código computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IQBAL, Muhammad. An introduction to solar radiation. Elsevier, 2012.

HEINEMANN, Detlev; LORENZ, Elke; GIRODO, Marco. Forecasting of solar radiation. Solar energy resource management for electricity generation from local level to global scale. Nova Science Publishers, New York, 2006.

ZHANG, Xingxing et al. Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 599-617, 2012.

FLORIDES, G. A. et al. Review of solar and low energy cooling technologies for buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 6, n. 6, p. 557-572, 2002.

KHATIB, Tamer; MOHAMED, Azah; SOPIAN, K. A review of solar energy modeling techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 5, p. 2864-2869, 2012.

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. A review of solar photovoltaic technologies. Renewable and sustainable energy reviews, v. 15, n. 3, p. 1625-1636, 2011.

JOURNÉE, Michel; BERTRAND, Cédric. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. Solar Energy, v. 85, n. 1, p. 72-86, 2011.

KHATIB, Tamer; MOHAMED, Azah; SOPIAN, K. A review of solar energy modeling techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 5, p. 2864-2869, 2012.

MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno; ECHER, MP de S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário—o Projeto Swera. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.

MARTINS, Fernando Ramos et al. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. Energy Policy, v. 36, n. 8, p. 2865-2877, 2008.

SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, MAG de; CAMARGO, IM de T. Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (V CBPE). Brasília. 2006.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar. Ed. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, v. 1, p. 60, 2006.

SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C.; PEREIRA, A. C. Satellite studies of biomass burning in Amazonia – some practical aspects. *Remote Sensing Reviews*, 10. 91- 103. 1994.

SILVA, A. A. A espessura óptica de aerossóis na banda do UV-B. Tese de Doutorado - INPE, São José dos Campos, 2001.

SILVA, S. A. B., SIMÕES, P. M., MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B. Aplicação da Geoestatística no Desenvolvimento de uma Base de Dados Climatológicos para Uso no Modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR. *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte. P. 1211-1218, 2003.

PEREIRA, E.B.; SETZER, A.W.; GERAB, F.; ARTAXO, P. E.; PEREIRA, M.C.; MONROE, G.; Airborne measurements of burning of biomass aerosols in Brazil related to TRACE-A experiment. *Journal of Geophysical Research*, 101(D19),23983-2399, 1996.

PEREZ R., P. INEICHEN, K. MOORE, M. KMIETIK, C. CHAIN, R. GEORGE AND F. VIGNOLA. A New Operational Satellite-to-Irradiance Model. *Solar Energy* 73, 5, 307-317P, 2002.

PEREZ, R. SEALS, R.; INEICHEN, P.; STEWART, R.; MENICUCCI, D. A new simplified version of the Perez Diffuse irradiance model for tilted surfaces, *Solar Energy*, 39: 221-232, 1987.

PEREZ, R. SEALS, R.; STEWART, R. Modelling irradiance on tilted planes: a simpler version of the Perez Model. *Proc. of ISES World Congress em Hamburg, Alemanha*, 1987.

PEREZ, R., SEALS, R., ZELENKA, A., RENNÉ, D., The strengths of satellite based solar resource assessment. *Proceedings of ASES-97 Annual Meeting*. 1997.

Harshvardhan; Davies, R.; Randall, D.A.; Corsetti, T.G. A fast radiation parameterization for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 92:1009-1016, 1987.

BSRN, Baseline Solar Radiation Network – Quality Assurance of Database. World Meteorological Organization.

Ceballos, J. C.; Bottino, M. J.; Souza, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *Journal of Geophysical Research*, 109, D2, D02211 10.1029/2003JD003531, 2004.

Rigollier, C.; Lefreuve, M.; Wal, L. The method HELIOSAT-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar energy*, 77:159-169, 2004.

Negri, Jean Cesare et al. “Opções tecnológicas para a geração distribuída até 30MW” in *Revista Eletricidade Moderna*, São Paulo: Aranda Editora, ano XXXII, número 356, p. 184, novembro 2003.

Rüther, Ricardo. *Edifícios solares fotovoltaicos*. Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004. 113 p.

Scheer, Hermann. *Economia solar global*. Rio de Janeiro: CRESESB – CEPEL, 2002.

Shayani, Rafael Amaral et Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. *Medição do rendimento global do sistema fotovoltaico isolado*. Dissertação de mestrado a ser apresentada ao departamento de engenharia elétrica da faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília. 2006.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL, 1999.

