



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

Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA

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

Raphael Barbosa Frederico

INPE
São Jose dos Campos
2017

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

Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. Enio Bueno Pereira, pela confiança e paciência ao longo da orientação desta pesquisa de iniciação científica.

Ao meu co-orientador, Dr. Fernando Ramos Martins, que me orienta desde o início da graduação na Unifesp. Obrigado pela paciência e por todo ensinamento passado.

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

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo espaço físico utilizado e por que me abriu as portas para a realização da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas.

À Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), que me proporcionou uma qualidade de ensino para a realização da pesquisa.

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

À minha namorada, Giovana Chiaradia, que tanto me apoia e consegue ter paciência nos períodos em que devo me ausentar devido os estudos que o Curso de Engenharia requer.

À minha irmã, Isabela Barbosa Frederico, que além de irmã, é minha melhor amiga. Obrigado por todo o carinho, apoio e ensinamento.

Aos meus pais, Paulo Sérgio Frederico e Seleta Maria Barbosa Frederico, pelo maior amor que existe, incentivo e apoio. Obrigado por serem os pilares da minha vida.

À Deus, que está sempre comigo, me guiando para o caminho certo e do bem da vida. Obrigado pela minha saúde e segurança.

RESUMO

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 apresentado 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, esse trabalho propôs o estudo dos métodos de tratamento e qualificação de dados observados em estações de coleta de dados em superfície, verificando sua consistência e apontando possíveis falhas. 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 da rede SONDA. Neste estudo foram revisados os algoritmos e posteriormente, propostas melhorias para incremento da confiabilidade da base de dados do recurso solar observados em superfície, e conseqüentemente no debate mais amplo da problemática energética e ambiental do país.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Matriz energética brasileira e (b) Matriz de energia elétrica brasileira.	2
Figura 2 - Representação gráfica da incidência de radiação solar na Terra em função da época do ano.	4
Figura 3 - Esfera celeste mostrando trajetória aparente e o ângulo de declinação do Sol.	5
Figura 4 - Representação dos dias de solstícios e equinócios.	6
Figura 5 - Espectro de radiação eletromagnética emitida pelo Sol e pela Terra.	7
Figura 6 - Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.	9
Figura 7 - (a) Piranômetros sem e com a banda de sombreamento e (b) Pireliômetro da Estação de Cachoeira Paulista.	10
Figura 8 - Fluxograma de execução do software de validação da rede SONDA V.3.5.	13
Figura 9 - Mapa do Brasil com as três estações de referência da rede SONDA utilizadas neste estudo.	14
Figura 10 - Gráfico de dispersão obtido para a estação localizada em São Martinho da Serra, utilizando dados de janeiro de 2010. O gráfico permite a comparação da consistência entre os valores observados da radiação direta horizontal, calculado através do produto da radiação direta normal (medido pelo pireliômetro) pelo cosseno do ângulo zenital; e os valores estimados da radiação direta horizontal, calculado através da diferença das observações da radiação global e radiação difusa (medidos pelo piranômetro). A linha contínua laranja representa o limite superior dos parâmetros de qualidade dos critérios estabelecidos e a cinza representa o limite inferior dos parâmetros de qualidade dos critérios estabelecidos.	15
Figura 11 - Gráfico de histograma obtido para a estação localizada em São Martinho da Serra, utilizando dados de janeiro de 2010. O gráfico permite a comparação entre as frequências dos dados validados como confiáveis e os validados como suspeitos, nos limites dos parâmetros de qualidade dos critérios estabelecidos. Nessa estação, de um total de 25395 dados qualificados, 4 estão acima da faixa do limite superior de aceitação, 93 estão abaixo da faixa do limite inferior de aceitação e 25298 dados estão entre as faixas do limite de aceitação.	16

Figura 12 - Gráfico de dispersão das relações de todos os meses de janeiro entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em São Martinho da Serra.	17
Figura 13 - Gráfico da comparação da média dos dados validados entre as três estações analisadas.	18
Figura 14 - Gráfico apresentando fração de dados suspeitos em cada ano de operação da estação em São Martinho da Serra	19
Figura 15 - Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em São Martinho da Serra no ano 2012. Através dos gráficos dos meses de março a julho, pode-se observar e analisar que apresentaram problemas de operação na estação, onde o rastreador com defeitos não estava realizando o movimento de posicionamento do sensor de radiação direta e difusa corretamente, inviabilizando a aquisição de dados de qualidade.	19
Figura 16 - Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em São Martinho da Serra no ano 2011.	20
Figura 17 - Gráfico apresentando fração de dados suspeitos em cada ano de operação da estação em Petrolina.	21
Figura 18 - Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em Petrolina no ano 2010.	22
Figura 19 - Gráfico apresentando fração de dados suspeitos em cada ano de operação da estação em Brasília.	23
Figura 20 - Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em Brasília no ano 2011.	23
Figura 21 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de janeiro entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.	26
Figura 22 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de abril entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.	28
Figura 23 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de julho entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.	30
Figura 24 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de novembro entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de códigos de avaliação objetiva dos dados.	12
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Dinâmica celeste	3
2.2 Energia solar	6
2.3 Balanço radioativo da atmosfera e seus efeitos	7
2.4 Equipamentos de medição da radiação solar e seu funcionamento	9
3 MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1 Rede SONDA	11
3.2 Processo de qualificação de dados	11
3.3 Análises dos algoritmos e dados	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
4.1 Estação de São Martinho da Terra	18
4.2 Estação de Petrolina	21
4.3 Estação de Brasília	22
4.4 Consistência, deficiência encontradas e melhorias propostas	24
4.5 Relações dos comportamentos dos dados entre os mesmos meses	25
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

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 a Idade Antiga 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 (MARTINS e PEREIRA, 2007). O uso de recursos fósseis como o petróleo e o carvão, representam aproximadamente, 79% da matriz de consumo final mundial (KUMAR et al., 2010). 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.

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 (BENTLEY, 2002 e GELLER, 2003).

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 para aproveitamento de fontes renováveis de energia venham a diminuir com o aumento dos estudos e aprimoramento das técnicas já conhecidas. O Brasil já possui uma matriz energética e uma matriz elétrica com participação ampla de fontes renováveis, principalmente o recurso hidroelétrico, conforme mostra a Figura 1.

Neste contexto, se destaca o uso da energia solar, que apresenta diversos benefícios, como a viabilização de atendimento de regiões remotas onde o custo é demasiadamente elevado

em termos de sistemas convencionais, regulação da oferta de energia em períodos de estiagem, além de permitir a diminuição do uso de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade (MARTINS et al., 2008).

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. 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.

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 métodos. As principais metodologias são a utilização de uma rede de radiômetros, que devem estar distribuídos de forma estratégica sobre uma região de interesse; ou o uso de modelos computacionais para parametrização dos processos radiativos e solução da equação da transferência radiativa na atmosfera.

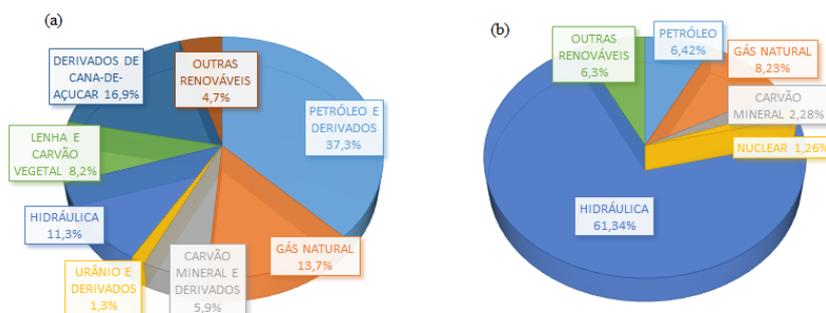


Figura 1 - (a) Matriz energética brasileira e (b) Matriz de energia elétrica brasileira. Fonte: MME e ANEEL (2016).

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 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 verificar e certificar a qualidade da base de dados, sinalizando possíveis inconsistências.

Este trabalho teve como objetivo geral o estudo dos métodos de tratamento e qualificação de dados meteorológicos e ambientais, utilizados na quantificação do recurso solar nacional. Foram revisados os critérios de qualificação atuais, ou seja, foi compreendido os critérios de qualificação hoje aplicados aos dados solarimétricos e aos dados espaciais, verificando sua consistência e analisando possíveis falhas. Foram realizadas também, avaliações dos pontos críticos e formulação de novos critérios, ou seja, foi 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° em relação ao plano da órbita elíptica de translação em torno do Sol.

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 (ciclo anual), da latitude e do ângulo horário (ciclo diário). Neste sentido, a geometria de iluminação na superfície terrestre, dependente dos ângulos solares (ângulo zenital solar e ângulo azimutal solar), é controlada pelos ciclos anual e diário. A Figura 2 ilustra a variação da geometria de incidência da radiação solar na Terra ao longo das diferentes estações do ano como consequência dos movimentos da Terra em torno do Sol.

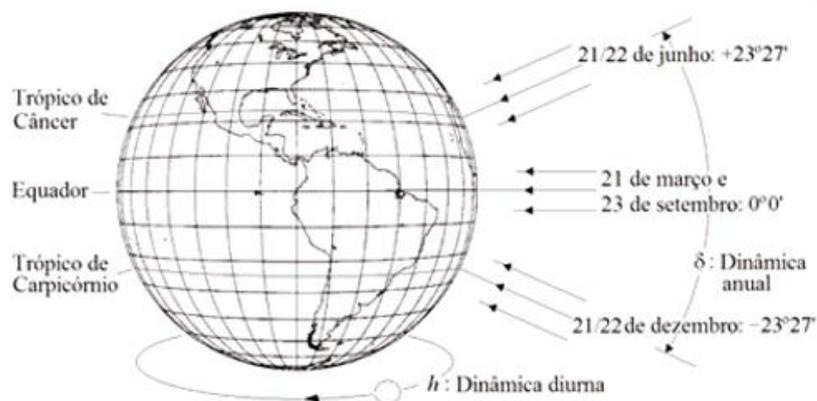


Figura 2 - Representação gráfica da incidência de radiação solar na Terra em função da época do ano.

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 solar, ou distância zenital solar, 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.

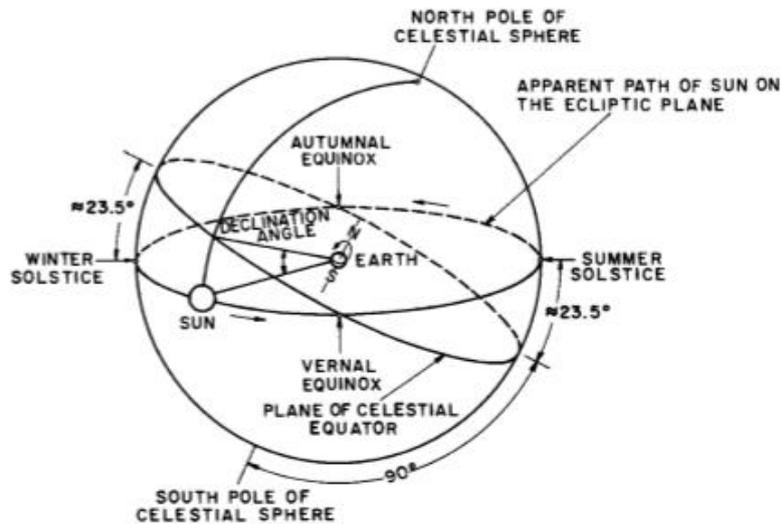


Figura 3 - Esfera celeste mostrando trajetória aparente e o ângulo de declinação do Sol.

As posições do Sol onde sua declinação é igual aos valores extremos ocorre sobre os trópicos de Câncer e Capricórnio, sendo denominadas de solstícios; e as posições de declinação nula, sobre a linha do Equador, são denominados de equinócios (vide Figura 3). Dessa forma, quando em determinada época do ano, a luz solar incide perpendicularmente sobre o hemisfério Norte e na outra parte do ano incide perpendicularmente 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.

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, conforme mostra a Figura 4. No hemisfério Norte, a data de início das estações do ano ocorre seis meses depois em relação ao hemisfério Sul.

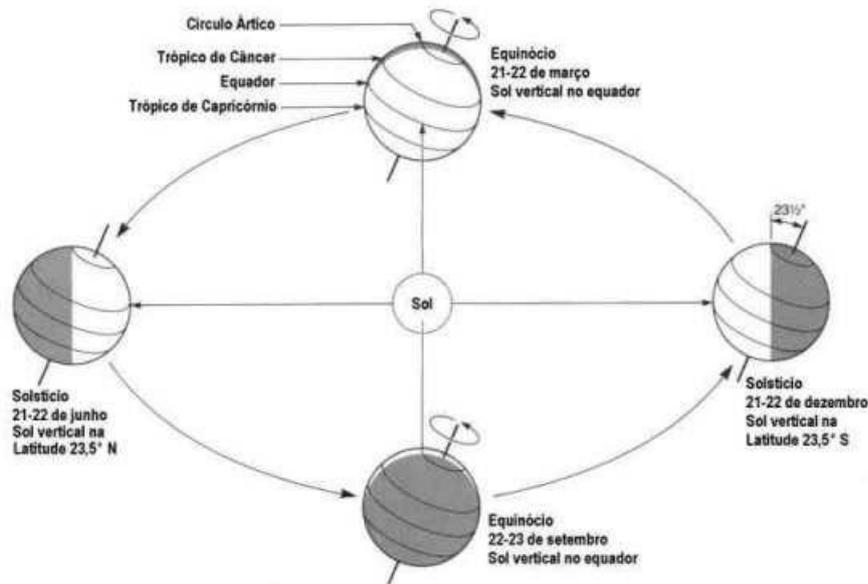


Figura 4 - Representação dos dias de solstícios e equinócios.

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 proveniente do Sol que chega até a superfície terrestre, propagando-se como energia radiante, é denominada de radiação solar. A energia solar é produzida através de reações químicas e nucleares (ou fusão nuclear), que consiste basicamente na reação de dois átomos de hidrogênio formando um átomo de hélio. A radiação solar apresenta um papel fundamental por constituir na principal força motriz para processos térmicos, dinâmicos e químicos da Terra, como a circulação geral da atmosfera.

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, 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. 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 em faixas específicas de comprimentos de onda. A razão entre a irradiância solar incidente 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 nomeada como “radiação de ondas curtas”, apresenta comprimentos de ondas entre 0 e 4 micrometros. Parte dessa radiação 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. A Figura 5 apresenta o espectro da radiação solar e da radiação terrestre de forma a facilitar a compreensão dos termos de radiação de ondas curtas e ondas longas, respectivamente.



Figura 5 - 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 presente no feixe de energia emitida pelo Sol e que não sofre processos de interação com os constituintes atmosféricos; a radiação difusa, que devido as interferências de fatores atmosféricos, faz com que parte da energia seja espalhada em diversas direções; 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 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 de volta para o espaço 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). A Figura 6 apresenta um diagrama simplificado para representação dos processos radiativos na atmosfera.

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 (O_3), o vapor d' água e o dióxido de carbono (CO_2) 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.

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.

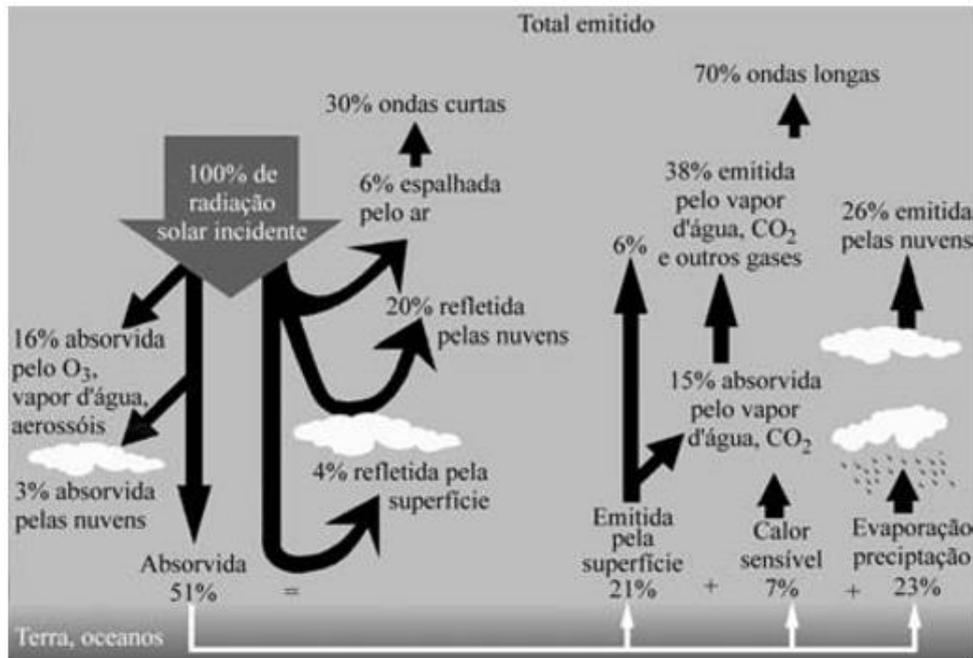


Figura 6 - Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.

2.4 Equipamentos de medição da radiação solar e seu funcionamento

Os dois principais equipamentos utilizados na medição da radiação solar, tanto da global como das componentes direta e difusa, na superfície terrestre foram o piranômetro e o pireliômetro, o primeiro para medidas de irradiação global e difusa; e o segundo para medidas da irradiação direta.

O piranômetro se diferencia em dois tipos: o piranômetro termoeletrico e o piranômetro fotovoltaico. O primeiro, utilizado para medir a irradiância solar global, normalmente no plano horizontal, tem como sensor uma termopilha colocada no interior de duas semiesferas de vidro concêntricas. A termopilha é construída com múltiplos termopares em série, que medem a diferença de temperatura entre as duas superfícies, uma pintada de preto e outra 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. Já o segundo, utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para coletar medidas solarimétricas. Os piranômetros fotovoltaicos tem como vantagem apresentar um custo bem menor, contudo tem como desvantagem o fornecimento de medidas com menor precisão.

O pireliômetro é um instrumento utilizado para medir a irradiância direta com incidência normal a superfície. A irradiância difusa é bloqueada instalando-se o sensor termoeletrico dentro de um tubo de colimação, com paredes enegrecidas e apontado diretamente ao Sol

(dispositivo de rastreamento). O instrumento caracteriza-se por apresentar uma pequena abertura de forma a “visualizar” apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento precisa estar acoplado a um sistema de rastreamento do movimento solar para que esteja constantemente ajustado para a direção do Sol.

O valor da irradiação difusa é medido com um piranômetro ao qual é acoplado uma banda ou um disco de sombreamento para bloquear a componente direta. Ao combinar os valores medidos pelo piranômetro bloqueado com o outro sem o dispositivo de bloqueio pode-se obter a componente direta pela subtração dos valores da irradiância global e da sua componente difusa. A banda de sombreamento necessita de ajuste manual de acordo com a declinação solar, diferentemente do disco de sombreamento, que é utilizado em conjunto com um rastreador solar. Em ambos os casos são necessárias correções das medições, que envolvam a compensação do sombreamento do céu causado pelo anel ou disco.

A Figura 7 apresenta os principais equipamentos utilizados na medição da radiação solar: (a) Piranômetros sem a banda de sombreamento e com a banda de sombreamento e (b) Pireliômetro, da estação localizada em Cachoeira Paulista.



Figure 7 - (a) Piranômetros sem e com a banda de sombreamento e (b) Pireliômetro da Estação de Cachoeira Paulista. Fonte: INPE (2016).

Os instrumentos de medição da radiação solar global, direta e difusa são classificados conforme a sua precisão. De acordo com a norma ISO 9060, os instrumentos são classificados em três categorias: padrão secundário, primeira classe e segunda classe. Segundo a WMO, os instrumentos podem ser classificados em alta qualidade (erro máximo de 2 %), boa qualidade (5 %) e qualidade razoável (10 %).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Rede SONDA

A rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) é um projeto executado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para a implementação de infraestrutura física e de recursos humanos destinados a instalar, operar e disponibilizar uma base de dados de superfície que atenda a demanda de informações sobre recursos de energia solar e eólica no Brasil.

Atualmente, a rede SONDA 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.

As estações coletam dados meteorológicos básicos, como temperatura, pressão atmosférica, umidade e cobertura de nuvens. As estações solarimétricas, também coletam dados relacionadas a energia solar, como as componentes global, direta e difusa do fluxo de radiação solar incidente. Já as estações anemométricas, coletam dados relacionadas a caracterização dos ventos, como direção e velocidade do vento em 10m, 25m e 50m de altura. Como este trabalho é direcionado a energia solar, o foco deste artigo é dado apenas nas estações solarimétricas.

Todos os instrumentos de coleta de dados utilizados na rede SONDA são de primeira classe, de modo a atender os padrões estabelecidos pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para a rede internacional BSRN (Baseline Surface Radiation Network). Todos os piranômetros e pirheliômetros são manufaturados por Eppley Lab. ou Kipp&Zonen. Quatro estações da rede SONDA, integram a BSRN e atendem todos os padrões de qualidade exigidos para a instrumentação instalada, operação/manutenção e controle de qualidade de dados. As demais estações não possuem instrumentação para aquisição de dados de irradiação solar direta e, por essa razão, não estão integradas a BSRN.

3.2 Processo de qualificação de dados

O processo de qualificação dos dados solarimétricos e espaciais, visa oferecer dados com maior confiabilidade para acesso e uso público e gratuito. Esse processo, consiste de 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 aceitos internacionalmente bastante

rigorosos com base na experiência nos testes de qualidade realizados da Baseline Solar Radiation Network (BSRN) e outros desenvolvidos pela experiência do grupo de Energias Renováveis do Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST).

A aprovação em cada etapa é requisito para a continuidade do processo. Logo, quando um dado é considerado aprovado numa etapa, o dado receberá o código de aprovado e a etapa seguinte será iniciada. Contudo, se o dado for considerado com qualidade suspeita, o processo será interrompido e o dado receberá o código equivalente a suspeito. No primeiro nível, são testados os limites fisicamente possíveis, onde são esperados valores dentro de um intervalo que atende os critérios estabelecidos por modelos teóricos e leis da física. No segundo nível, são filtrados os eventos extremamente raros, que podem ocorrer com frequência baixa em decorrência de condições atmosféricas bastante específicas como a geometria, Sol-Nebulosidade-Superfície. Já no terceiro nível, as variáveis são comparadas com outras variáveis coletadas na mesma estação, de modo a verificar a consistência do conjunto de dados observados na estação. Nesta etapa, o dado é suspeito se seu valor apresente uma inconsistência com valores observados para outras variáveis. No quarto e último nível, a radiação global, direta e difusa, são comparadas com o modelo numérico de transferência radiativa utilizado para estimar a irradiância solar em condições de céu claro. O modelo adotado nesta etapa é conhecido como Parametrization Model C (Iqbal, 1983). O dado é considerado suspeito caso a medida esteja inconsistente quando comparada com estimativas do modelo computacionais.

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 1.

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 1 - Parâmetros de códigos de avaliação objetiva dos dados.

O software de qualificação encontra-se na versão 3.5, totalmente desenvolvido pelos pesquisadores do LABREN/INPE na linguagem de programação JAVA. A versão 4.0

está em desenvolvimento. Ambas versões apresentam o esquema geral apresentado na Figura 8.

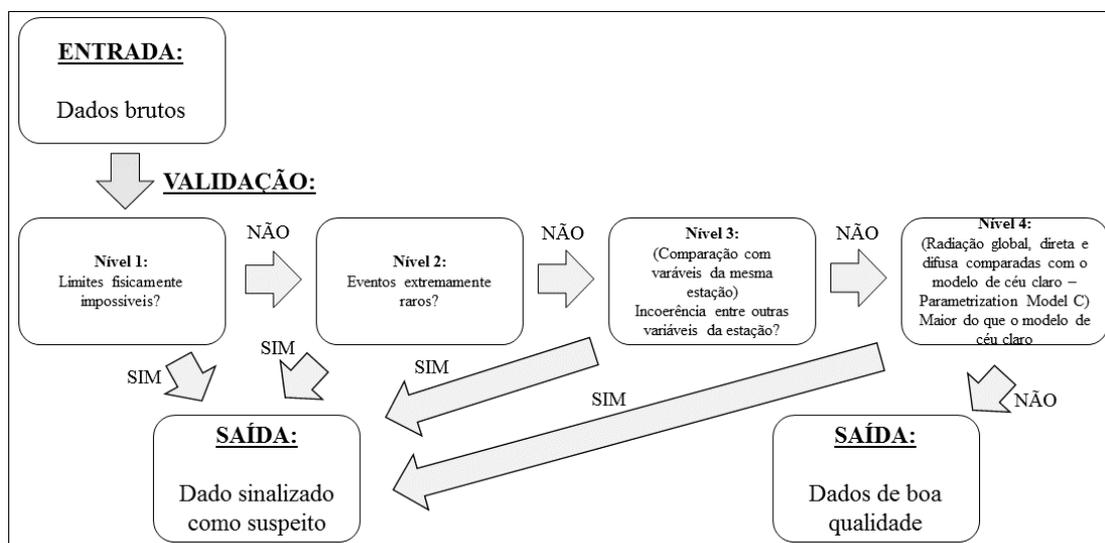


Figura 8 - Fluxograma de execução do software de validação da rede SONDA V.3.5.

3.3 Análises dos algoritmos e dados

Neste trabalho, foram analisados os algoritmos e a terceira etapa do processo de qualificação de dados de 3 estações solarimétricas integradas a rede BSRN. As estações analisadas neste estudo, foram as estações de referência: a Estação de São Martinho da Serra, localizada no estado do Rio Grande do Sul; a Estação de Brasília, localizada no Distrito Federal no Centro-oeste brasileiro; e a Estação de Petrolina, que se localiza no interior do estado de Pernambuco, região Nordeste do Brasil, respectivamente. A Figura 9 apresenta a localização geográfica das estações avaliadas.

O período de estudo dos dados das estações, compreenderam de janeiro de 2010 a março de 2016 para a Estação de São Martinho da Serra, de janeiro de 2010 a novembro de 2015 para a Estação de Brasília, e de janeiro de 2010 a março de 2016 para a Estação de Petrolina.

Para cada mês, de cada ano, de cada estação, foi criado uma tabela com 19 colunas, com informações, variáveis e equações físicas e matemáticas, que auxiliaram na obtenção dos valores para análise. As equações, variáveis e informações que formam as colunas são: Dia, Minuto, Radiação Global, Radiação Direta, Radiação Difusa, Constante Solar, Constante Solar ajustada pela distância Terra-Sol, Excentricidade, Latitude, Longitude, Declinação Solar, Minuto Corrigido, Hora Angular, Ângulo Dia, Equação do Tempo, Cosseno do Ângulo Zenital (μ_0), a diferença entre a Radiação Global e a Radiação Difusa,

conhecida como Radiação Direta Horizontal (medido pelo piranômetro); o produto da Radiação Direta Normal (medido pelo pireliômetro) pelo Cosseno do Ângulo Zenital, que fornece a Radiação Direta Horizontal.



Figura 9 - Mapa do Brasil com as três estações de referência da rede SONDA utilizadas neste estudo.

Foram filtrados somente os valores onde o cosseno do ângulo zenital solar era positivo para a análise, pois caracteriza o período diurno entre o nascer e pôr do Sol. Os valores observados da radiação direta horizontal, a partir do produto da radiação direta normal pelo cosseno do ângulo zenital, e os valores estimados da radiação direta horizontal, a partir da diferença dos dados observados da radiação solar global e difusa, foram plotados em gráficos de dispersão, como apresentado na Figura 10. As faixas de aceitação de qualidade, também estão representadas na Figura pelas linhas contínuas oblíquas. As faixas de aceitação indicadas referem-se à terceira etapa do processo de qualificação de dados, no qual é realizado uma comparação entre os dados coletados para diferentes variáveis, a fim de verificar a consistência da base de dados, conforme a Equação 1. Os

dados observados que aparecem na parte interna entre as duas linhas contínuas são dados com qualidade. Dados fora da região entre as duas linhas são dados suspeitos de pouca confiabilidade e necessitam de maior investigação.

$$\text{Máximo: (direta normal} \cdot \mu 0 - 50) \leq \text{direta horizontal (global - difusa)} \leq (\text{direta normal} \cdot \mu 0 + 50) \quad (1)$$

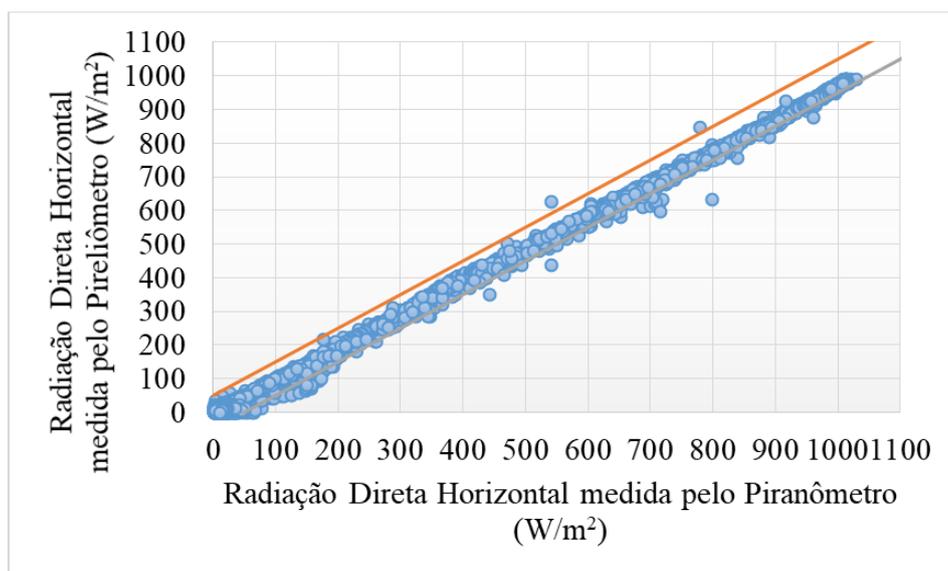


Figura 10 - Gráfico de dispersão obtido para a estação localizada em São Martinho da Serra, utilizando dados de janeiro de 2010. O gráfico permite a comparação da consistência entre os valores observados da radiação direta horizontal, calculado através do produto da radiação direta normal (medido pelo pireliômetro) pelo cosseno do ângulo zenital; e os valores estimados da radiação direta horizontal, calculado através da diferença das observações da radiação global e radiação difusa (medidos pelo piranômetro). A linha contínua laranja representa o limite superior dos parâmetros de qualidade dos critérios estabelecidos e a cinza representa o limite inferior dos parâmetros de qualidade dos critérios estabelecidos.

Para uma melhor análise e observação, foram realizados para cada estação, gráficos de histogramas, que relatam a quantificação das frequências dos registros de dados validados como suspeitos e daqueles validados como confiáveis, nos determinados limites dos parâmetros de qualidade, como apresentado na Figura 11.

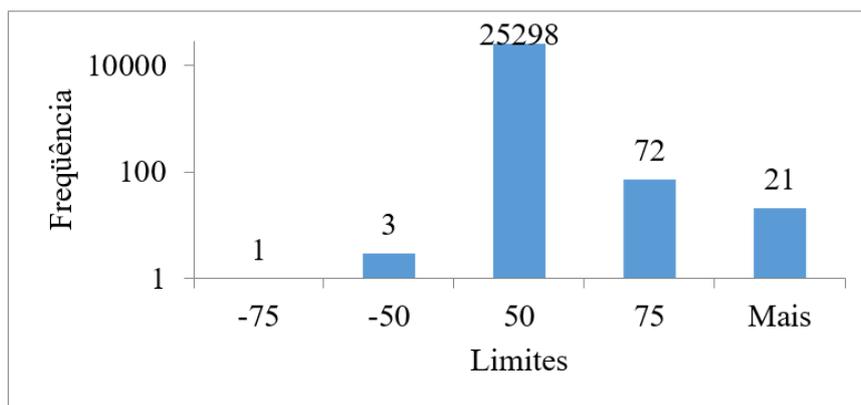


Figura 11 - Gráfico de histograma obtido para a estação localizada em São Martinho da Serra, utilizando dados de janeiro de 2010. O gráfico permite a comparação entre as frequências dos dados validados como confiáveis e os validados como suspeitos, nos limites dos parâmetros de qualidade dos critérios estabelecidos. Nessa estação, de um total de 25395 dados qualificados, 4 estão acima da faixa do limite superior de aceitação, 93 estão abaixo da faixa do limite inferior de aceitação e 25298 dados estão entre as faixas do limite de aceitação.

Posteriormente, para uma melhor compreensão e procurando entender o comportamento dos dados apresentado nos gráficos de dispersão das estações, foram realizadas relações dos gráficos de dispersão entre os mesmos meses analisados. Foram plotados todos os mesmos meses dos diferentes anos em um mesmo gráfico de dispersão, ou seja, todos os gráficos de dispersão de janeiro, que compreenderam desde o ano de 2010 até o ano de 2015 plotados num mesmo gráfico, como apresentado na Figura 12. Este procedimento foi realizado para todos os subsequentes meses e para as três estações analisadas. Dessa forma pode-se analisar de forma mais detalhada as relações dos comportamentos dos dados entre todos os anos avaliados de um mesmo mês nas estações.

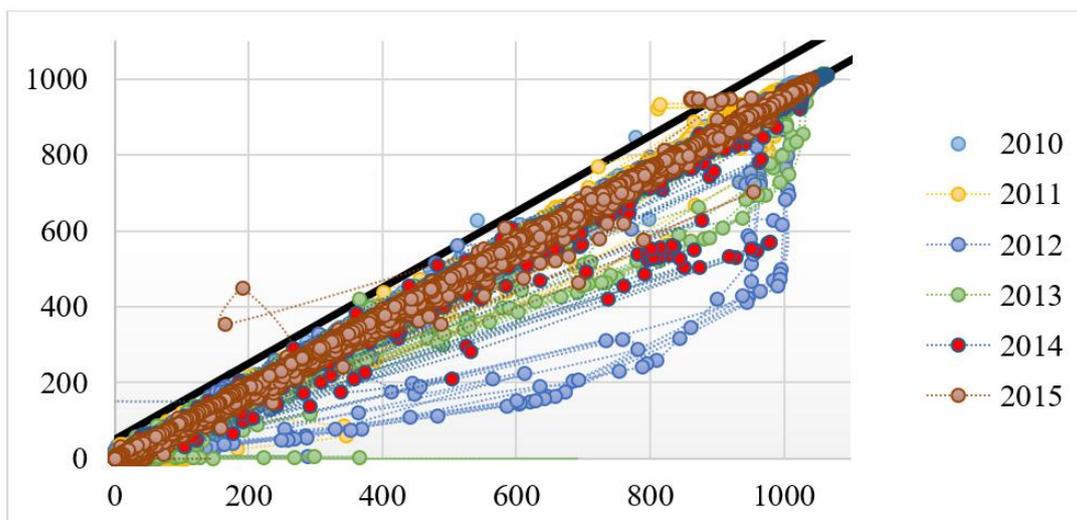


Figura 12 - Gráfico de dispersão das relações de todos os meses de janeiro entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em São Martinho da Serra.

Com os valores e dados das 3 estações, durante os meses e anos em estudo, foram analisados e discutidos os processos de qualificação de dados, as equações físicas e matemáticas, e os limites e critérios de aceitação utilizados, verificando sua consistência e apontando falhas e deficiências encontradas.

4. RESULTADOS E DICUSSÕES

Foram obtidos resultados importantes e relevantes para as 3 estações durante o período analisado.

Em uma comparação entre as médias dos dados validados entre as três estações analisadas, a Estação de São Martinho da Serra apresentou a maior média de dados validados como aprovados entre as três estações, com aproximadamente 82% da media dos dados aprovados. Enquanto que a Estação de Brasília apresentou a maior media de dados validados como suspeitos entre as três estações, com cerca de 43% da media dos dados validados como suspeitos, como apresentado na Figura 13.

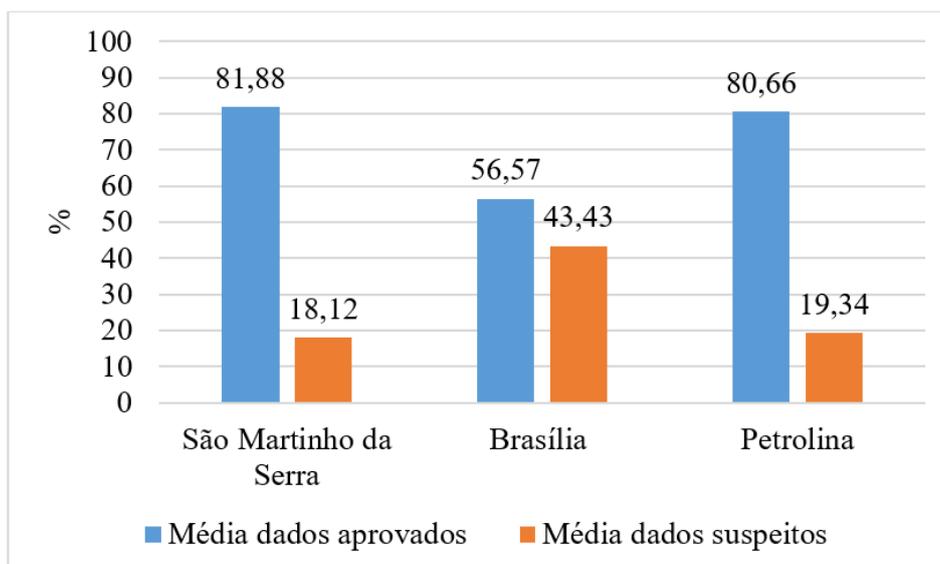


Figura 13 – Gráfico da comparação da média dos dados validados entre as três estações analisadas.

Segue abaixo, os resultados obtidos separados por estações. Logo em seguida, uma discussão da consistência do processo de qualificação de dados, das deficiências encontradas e das propostas para melhorias. Por fim, uma discussão sobre as relações dos comportamentos dos dados entre os mesmos meses dos diferentes anos analisados.

4.1 Estação de São Martinho da Serra

A estação localizada em São Martinho da Serra apresentou a melhor média de dados qualificados entre as 3 estações, com cerca de 82% dos dados apresentando boa qualidade. O ano que apresentou a maior quantidade de dados dentro dos parâmetros de qualidade estabelecidos foi 2012, com 92,02%. Nesse ano, o máximo de dados de boa qualidade foi no mês de junho, com 100% de aprovação, enquanto que o mínimo foi no mês de novembro, com 64,19%. Contudo, nos meses de março a julho, não houve uma quantificação coerente da radiação solar, obtendo valores próximo a zero, como pode-se observar na Figura 15 que apresenta os gráficos de dispersão de todos os meses na estação em São Martinho da Serra no ano 2012. Tal fato ocorreu em virtude de falha do rastreador solar que impossibilitou a coleta de dados de radiação solar direta e difusa de forma correta e consistente.

O ano que obteve a maior quantidade de dados suspeitos foi 2014, com 70,12% de dados de boa qualidade, como apresentado na Figura 14.

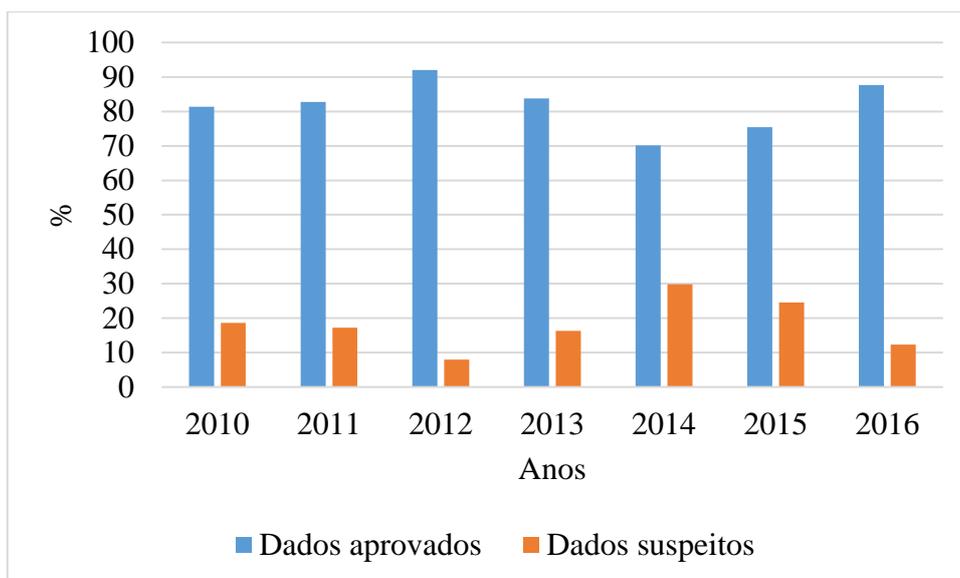


Figura 14 - Gráfico apresentando fração de dados suspeitos em cada ano de operação da estação em São Martinho da Serra.

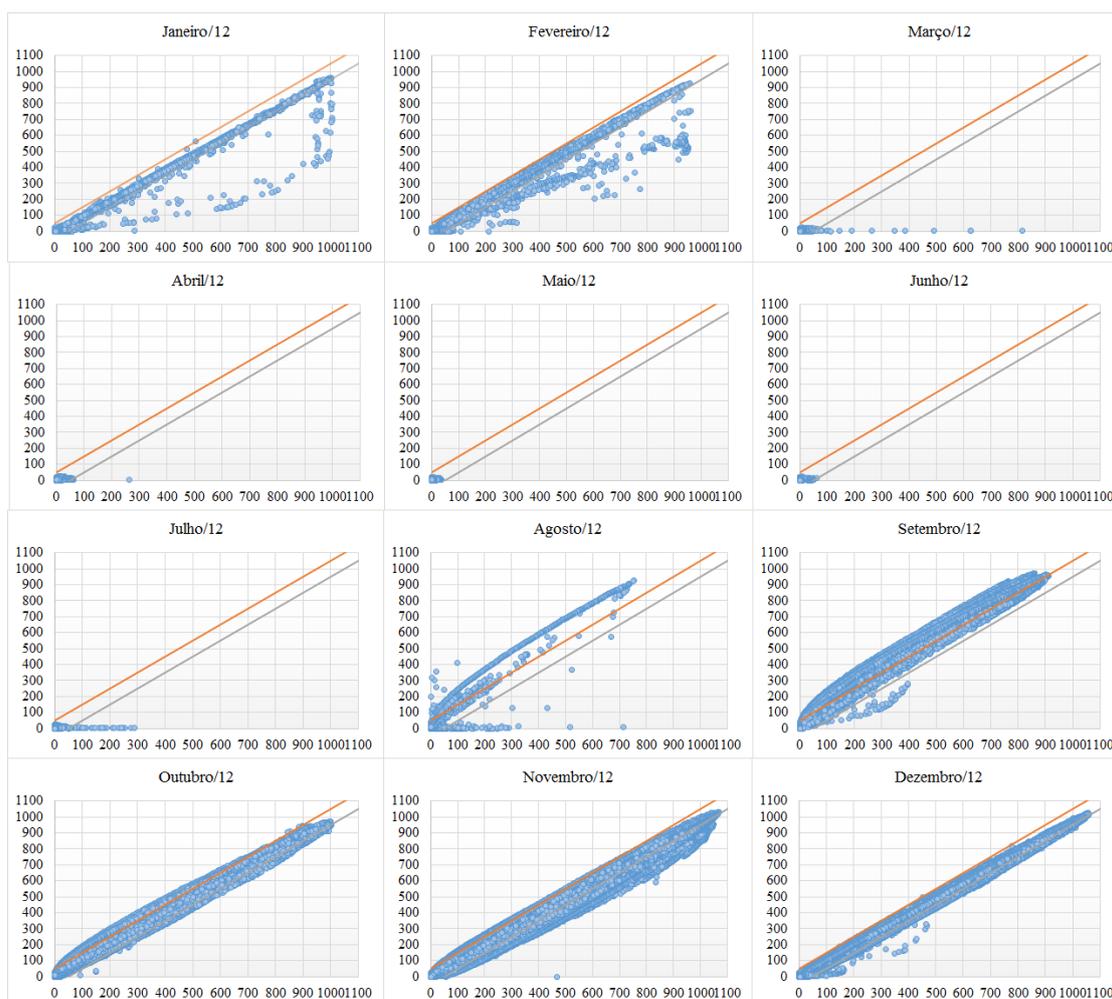


Figura 15 – Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em São Martinho da Serra no ano 2012. Através dos gráficos dos meses de março a julho, pode-se observar e analisar que apresentaram

problemas de operação na estação, onde o rastreador com defeitos não estava realizando o movimento de posicionamento do sensor de radiação direta e difusa corretamente, inviabilizando a aquisição de dados de qualidade.

Num panorama normal de quantificação da radiação solar, em 2011 foi o ano que obteve a maior quantidade de dados com qualidade, com 82,78%. Nesse ano, a média de dados de boa qualidade foi de 82,87%, obtendo o máximo em fevereiro, com 99,11% de aprovação, e o mínimo em setembro, com 59,76%. Segue a Figura 16 apresentando a comparação gráfica dos dados observados em todos os meses na estação em São Martinho da Serra no ano 2011.

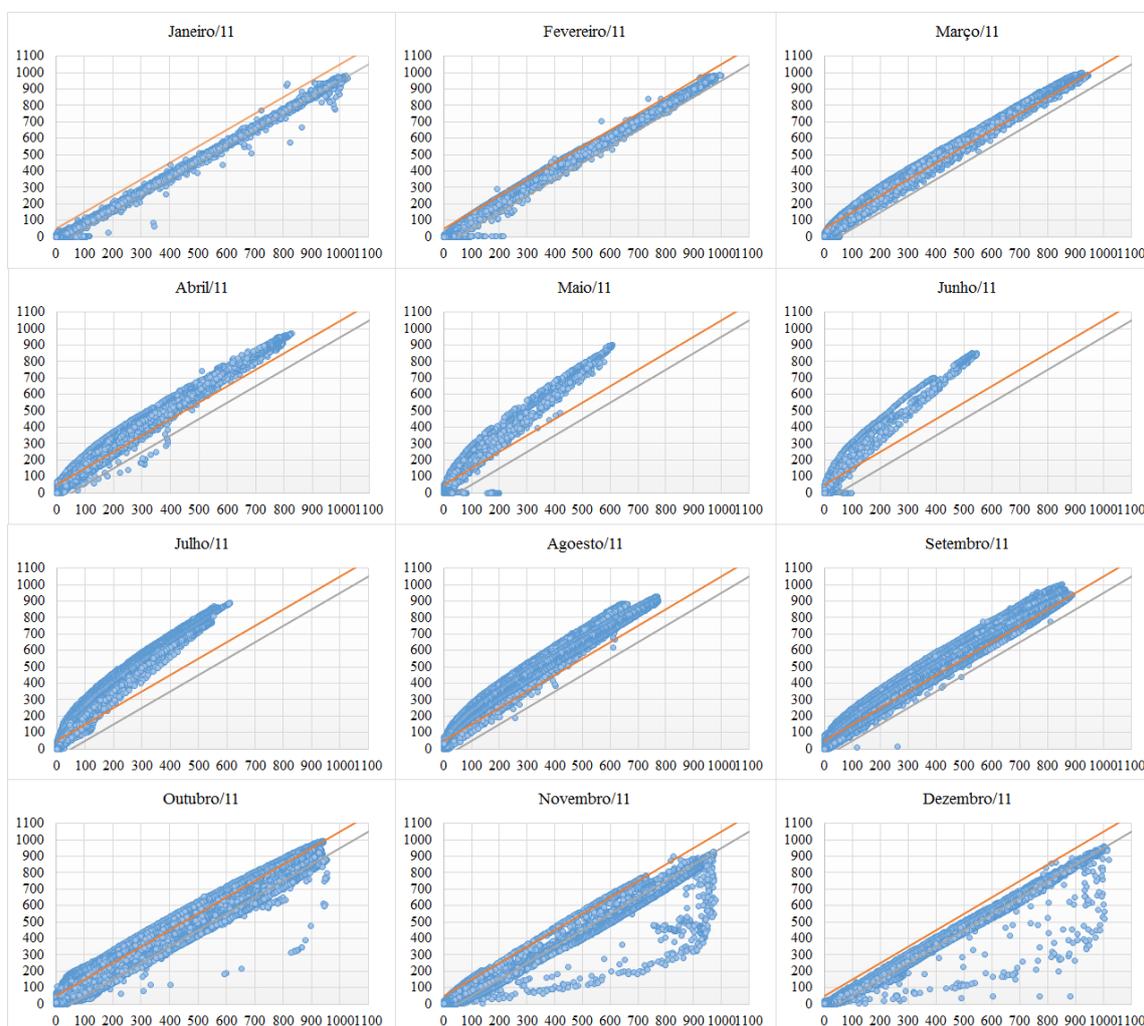


Figura 16 - Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em São Martinho da Serra no ano 2011.

4.2 Estação de Petrolina

A estação em Petrolina, obteve uma média de 80,66% de dados qualificados como de boa qualidade durante todo o período analisado.

O ano que apresentou a maior quantidade de dados com qualidade foi 2016, contudo nesse ano só foram qualificados de observações realizadas entre janeiro e março. Considerando um ano completo de dados, o ano 2010 obteve a maior quantidade de dados atendendo os critérios estabelecidos, com 84,51%. O valor máximo de dados de boa qualidade foi atingido no mês de janeiro, com 98,58%, enquanto que o mínimo foi no mês de maio, com apenas 48,97%.

O ano que obteve a maior quantidade de dados suspeitos foi 2012, com 75,65% de dados de boa qualidade, como apresentado na Figura 17.

Segue a Figura 18 apresentando a comparação gráfica dos dados observados em todos os meses na estação em Petrolina no ano 2010.

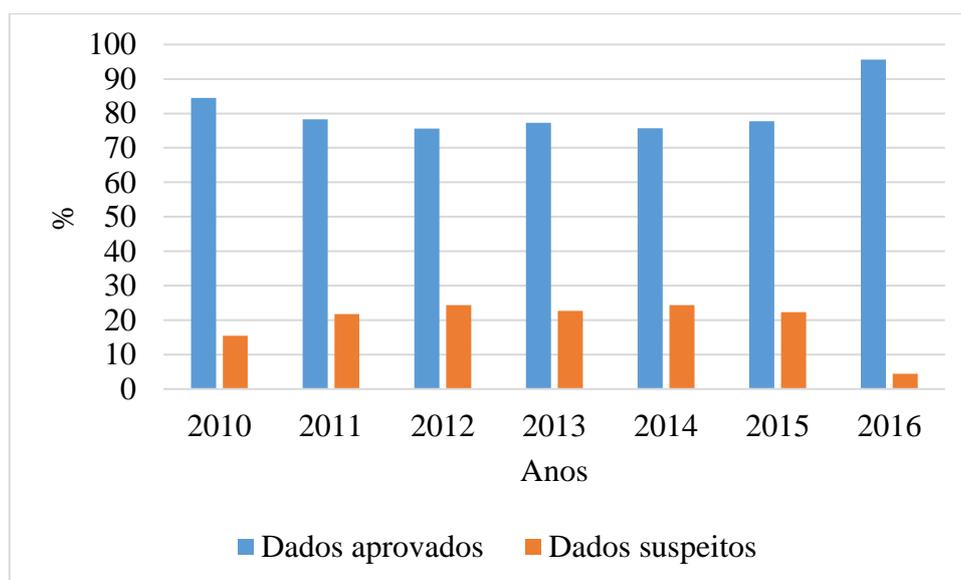


Figura 17 - Gráfico apresentando fração de dados suspeitos em cada ano de operação da estação em Petrolina.

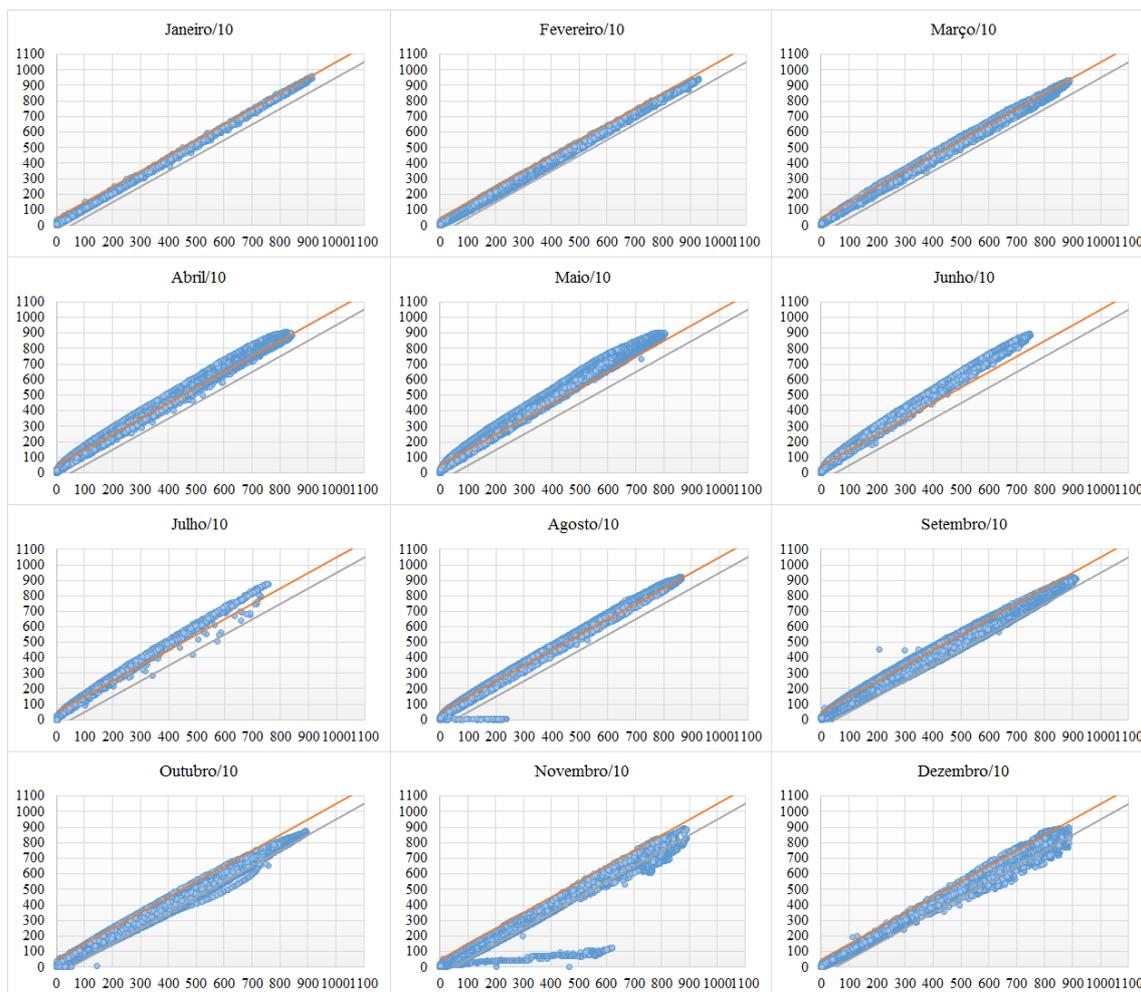


Figura 18 - Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em Petrolina no ano 2010.

4.3 Estação de Brasília

A estação em Brasília apresentou o menor índice de qualidade entre as 3 estações, com 56,57% de dados validados como de boa qualidade durante o período analisado.

O ano que a estação apresentou a maior quantidade de dados atendendo os critérios estabelecidos foi 2011, com 70,85%. Nesse ano, o máximo de dados de boa qualidade foi no mês de março, com 99,31% de aprovação, enquanto que o mínimo foi no mês de julho, com apenas 25,22%.

O ano que apresentou a maior quantidade de dados suspeitos foi 2015, com apenas 34,96% de dados de boa qualidade, como apresentado na Figura 19.

A Figura 20 apresenta os gráficos de dispersão de todos os meses na estação em Brasília no ano 2011.

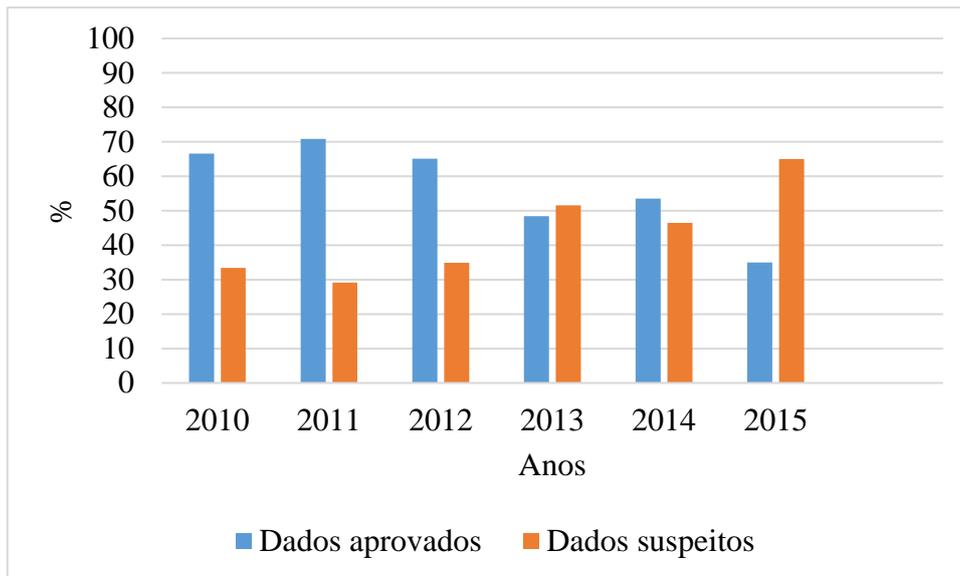


Figura 19 - Gráfico apresentando fração de dados suspeitos em cada ano de operação da estação em Brasília.

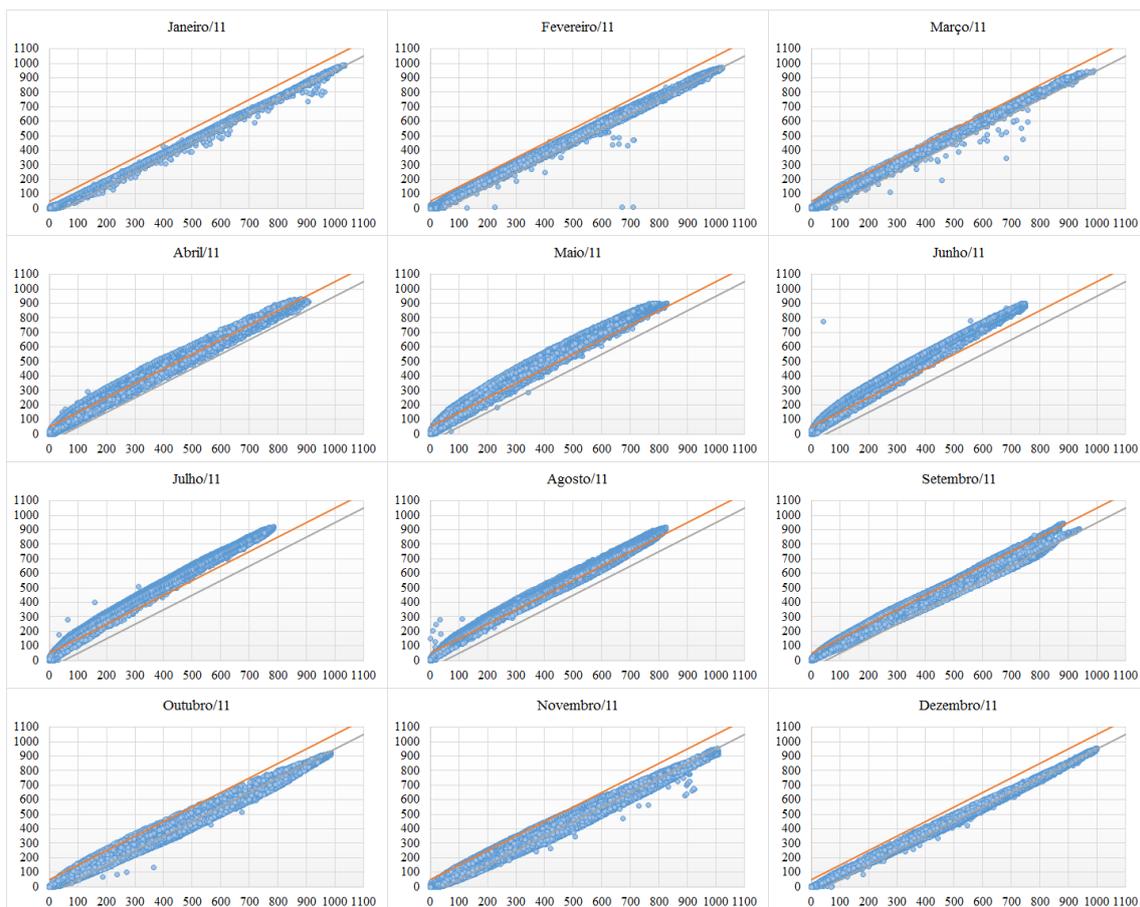


Figura 20 - Gráficos mensais de dispersão dos dados coletados na estação em Brasília no ano 2011.

4.4 Consistência, deficiências encontradas e melhorias propostas

Como pode-se observar nos gráficos, durante o período analisado, entre as 3 estações, a estação localizada em São Martinho da Serra foi a estação que obteve a melhor quantidade de dados validados como de boa qualidade, na terceira etapa do processo de qualificação de dados da rede SONDA. Já a estação que obteve as menores taxas de dados observados nos padrões de qualidade estabelecidos, foi a estação em Brasília. A estação localizada em Petrolina foi a estação que obteve os resultados mais consistentes, apresentando dados observados de radiação solar global, difusa e direta normal à superfície, coerentes de medição da radiação solar e classificados como de boa qualidade.

A estação em São Martinho da Serra obteve as maiores taxas de dados com qualidade, contudo no ano 2012, que foi o melhor ano, obteve mês com 100% de aprovação, mas com incoerências na quantificação da radiação solar, gerando valores próximo de zero durante alguns meses consecutivos. Essa situação equivaleria a condição de céu completamente encoberto durante todo o período, situação impossível. Esse tipo de erro não identificado nos testes de qualidade implementado e em operação se deve ao fato de que o rastreador apresentou defeitos e não estava realizando o movimento de posicionamento do sensor de radiação direta e difusa corretamente, inviabilizando a aquisição de dados de qualidade. Esse problema foi encontrado em outras estações e meses também, caracterizando problemas de operação das estações em algumas épocas. Dessa forma, este estudo constatou que se faz necessário uma nova etapa no processo de qualificação de dados, capaz de avaliar e identificar o mau funcionamento do rastreador solar.

Observa-se que em algumas épocas houveram problemas de desalinhamento nas estações, ou seja, não estarem com o alinhamento preciso em relação ao Sol. Em alguns casos ocorreram desalinhamentos totais e em outros desalinhamentos parciais, pois há consistência entre os dados, formando sequências de pontos. Para sanar esse problema, seria importante um acompanhamento e manutenção mais frequente das redes de estações solarimétricas.

Analisando os gráficos de dispersão, observou-se que em algumas épocas houveram influências de nebulosidade com efeito lente, onde a radiação solar é concentrada, não havendo atenuação da radiação solar pelas nuvens, caracterizando altas taxas de radiação direta normal.

Em alguns gráficos de dispersão, observou-se alguns poucos pontos fora das faixas de aceitação, de forma isolada, tanto acima, quanto abaixo do limite de aceitação, que ainda

não se sabe o real motivo de ocorrer, pois são casos isolados, não havendo sequência de pontos. Nesse caso, será necessário um estudo mais aprofundado para procurar saber e entender os reais motivos de ocorrer desses eventos.

4.5 Relações dos comportamentos dos dados entre os mesmos meses

Ao analisar de forma conjunta as relações num mesmo gráfico de dispersão dos dados dos mesmos meses de diferente anos, percebe-se que os comportamentos das sequências de dados entre os mesmos meses dos diferentes anos avaliados se assemelham.

Inicialmente, no mês de janeiro, há uma consistência dos dados entre e abaixo da faixa de aceitação, conforme apresenta a Figura 21.

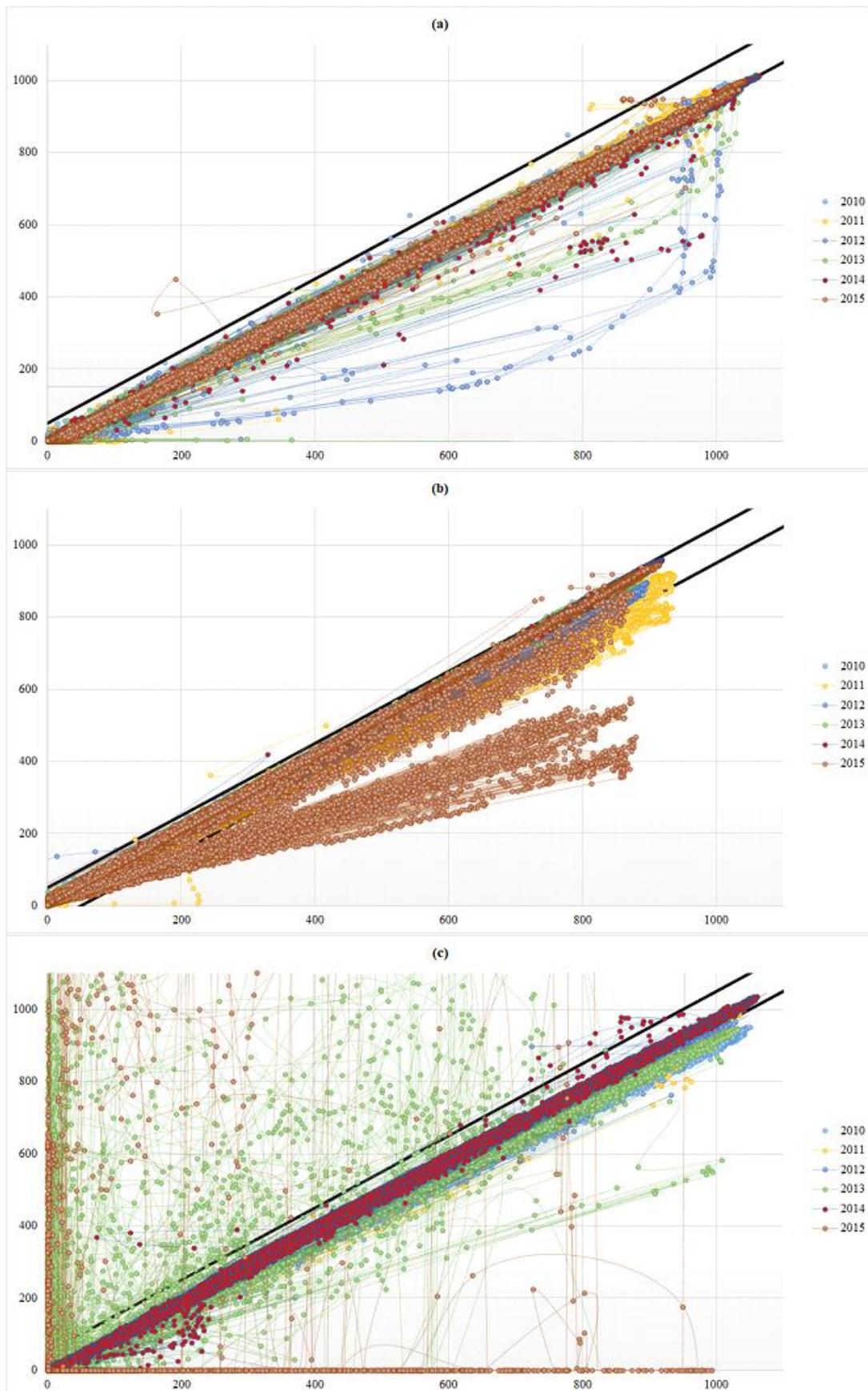


Figura 21 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de janeiro entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.

Confome o tempo passa, a consistencia da maioria dos dados vai subindo acima da faixa de aceitação, como apresentado na Figura 22.

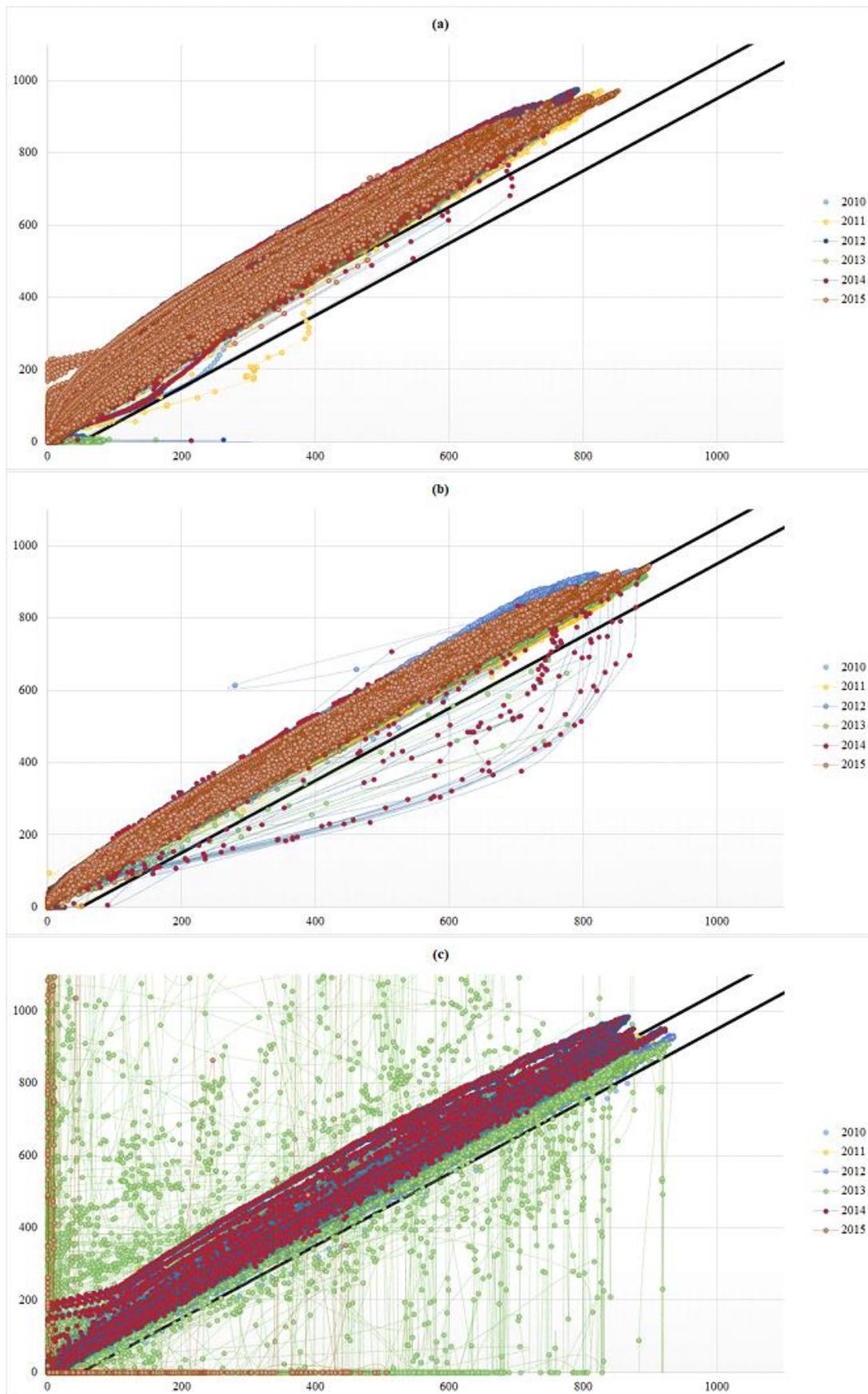


Figura 22 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de abril entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.

Este comportamento de subida da sequência dos dados prosegue até o mês de junho, onde a partir do mês de julho, a consistência dos dados começa a descer, como apresentado na Figura 23.

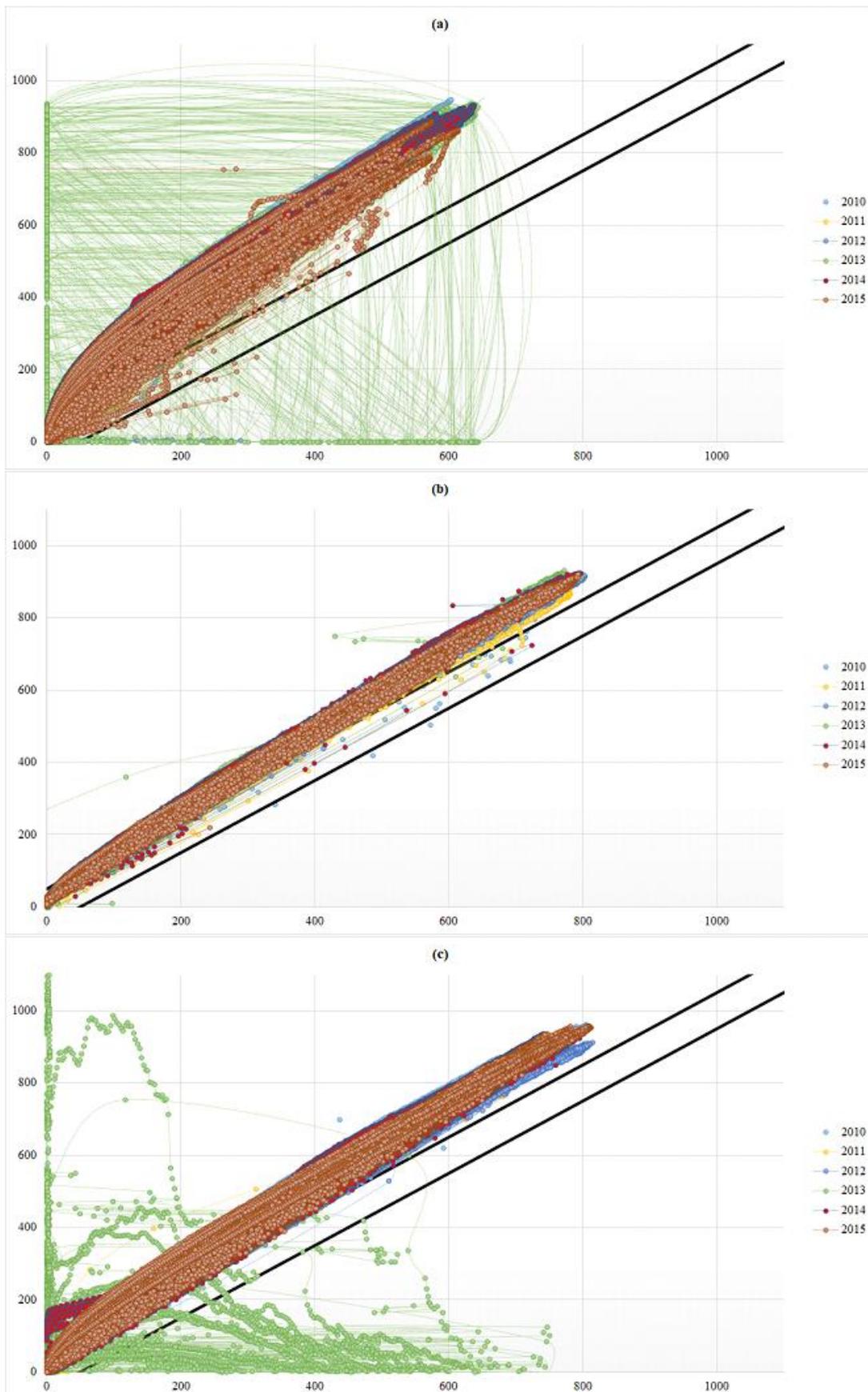


Figura 23 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de julho entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.

Este comportamento de descida da sequência dos dados prossegue até o mês de dezembro, onde posteriormente, no mês de janeiro do próximo ano, tende novamente a começar a subir. A Figura 24 apresenta a sequência de dados ficando novamente entre e abaixo da faixa de aceitação a partir do mês de novembro.

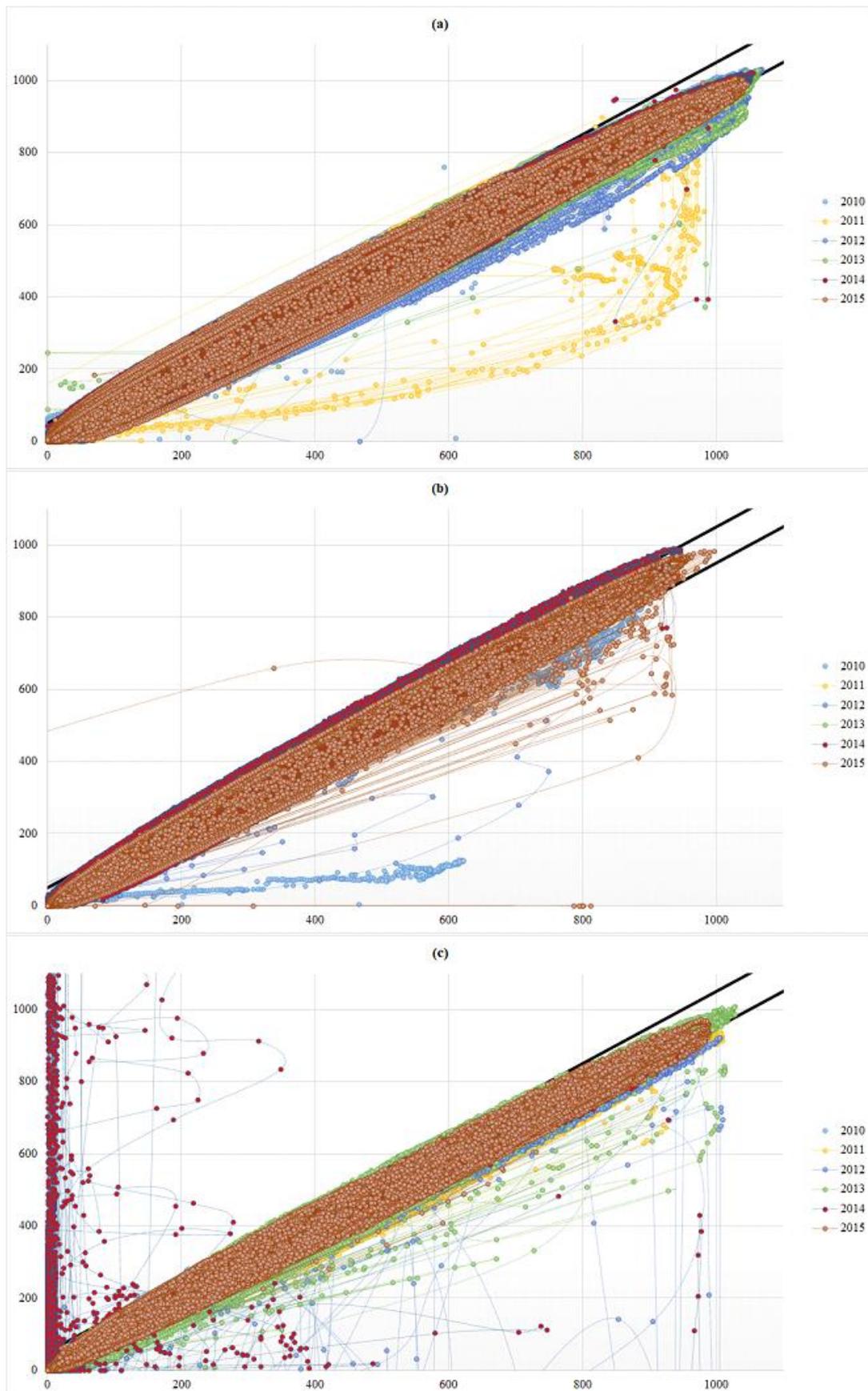


Figura 24 - Gráficos de dispersão das relações de todos os meses de novembro entre os anos de 2010 a 2015 obtidos para a estação localizada em (a) São Martinho da Serra, (b) Petrolina e (c) Brasília.

Observa-se também, que as alterações dos comportamentos dos dados se aplicam, principalmente, no coeficiente angular da sequência dos dados nos gráficos de dispersão conforme o período do ano. Além disso, outro aspecto que pode ser observado no estudo, é a semelhança deste comportamento dos dados nas três estações analisadas.

Dessa forma, acredita-se que esses comportamentos dos dados vem se alterando por estarem sendo determinados e influenciados pela sazonalidade. Provavelmente, se isso for concretizado, muitos dos dados que estão sendo validados como suspeitos, podem ser dados que sejam de boa qualidade, estando sob ação dos critérios adotados atualmente, havendo assim, que modificar e ajustar as equações e os limites dos critérios utilizados na qualificação de dados que se aplicam no país.

É importante destacar que a validação dos dados foi baseada nos testes da Baseline Solar Radiation Network (BSRN), da World Meteorological Organization (WMO), dessa forma os critérios de qualificação utilizados foram estabelecidos para regiões de clima temperado. Acredita-se que modificações e ajustes dos limites utilizados nos critérios de qualificação de dados para condições climáticas características do Brasil, o procedimento de qualificação de dados solarimétricos se tornará mais consistente e apurado.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho, realizou o estudo dos métodos de tratamento e qualificação de dados meteorológicos utilizados na quantificação do recurso solar nacional, revisando os algoritmos e os critérios de qualificação atuais. A pesquisa tem objetivo de verificar a consistência do procedimento e critérios, bem como, analisar possíveis falhas e pontos críticos.

Com os resultados do presente estudo, concluiu-se que o processo de qualificação de dados da rede SONDA tem um papel importante na disponibilização de dados para a comunidade do setor acadêmico e do setor de energia. O controle de qualidade de dados observados originou diversas publicações de impacto relacionados à energia solar e a metodologia adotada na Rede SONDA, apresentou resultados satisfatórios, e similares ao obtidos em outros estudos realizados internacionalmente.

Contudo, em algumas estações e épocas, apresentaram problemas de operação nas estações, devido a problemas nos rastreadores e sensores; problemas de desalinhamento,

além de valores de dados alterados devido as influências de nebulosidade com efeito lente.

Dessa forma, seria interessante adotar algumas medidas para a melhoria no processo de controle de qualidade dos dados, tais como: implementação de uma nova etapa no processo de qualificação de dados; maior frequência no acompanhamento e manutenção das redes de estações solarimétricas; estudos mais aprofundados para saber e entender os motivos dos pontos isolados classificados como suspeitos; e por fim, realizar ajustes dos limites utilizados nos critérios de qualificação de dados para condições climáticas características do Brasil.

Este trabalho desde o início vem sendo realizado em fases. A primeira fase contemplou uma revisão e análise geral de todas as quatro etapas do processo de qualificação de dados e as estações solarimétricas da Rede SONDA. Foi verificado que a terceira etapa do processo de qualificação de dados caracteriza-se por ser a etapa em que mais dados observados são sinalizados com erros, contudo é uma etapa de grande importância na qualificação de dados.

Sendo assim, na segunda e atual fase da pesquisa, foram avaliados de forma mais detalhada e aprimorada a terceira etapa do processo de qualificação de dados, com o intuito de avaliar e compreender as estações que apresentaram as maiores quantidades de dados validados como de boa qualidade e aquelas que apresentaram dados validados como suspeitos. O estudo procurou também identificar períodos que apresentaram problemas e erros identificados no processo de controle de qualidade, e assim propor algumas sugestões para aprimoramento do processo.

Percebeu-se que o comportamento entre os mesmos meses dos diferentes anos avaliados se assemelham muito, alterando principalmente o coeficiente angular da sequência dos dados conforme o período do ano. Além disso, outro aspecto considerável no estudo, foi a semelhança deste comportamento dos dados nas três estações analisadas. Dessa forma, acreditamos que esses comportamentos dos dados vem se alterando por estarem sendo determinados e influenciados pela sazonalidade.

Diante dessas considerações, entende-se como sendo importante e necessário a continuidade da pesquisa, visando a evolução do processo de qualificação de dados solarimétricos. Um foco dos trabalhos futuros será entender se realmente a sazonalidade determina o comportamento dos dados e, se sim, como esta influência deve ser contabilizada no processo de qualificação dos dados.

Sendo assim, nessa próxima etapa o aluno, juntamente com os pesquisadores do LABREN, avaliarão as influências que ocorrem nos comportamentos dos dados avaliados e procurarão as melhores formas de alteração e aperfeiçoamento das equações e limites dos critérios que se aplicam para a terceira etapa do processo de qualificação de dados da Rede SONDA no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

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.

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.

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.

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

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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

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

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

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.

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.

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.

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., PREREIRA, 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.

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.