

MARCUS VINÍCIUS CONTES CALÇA

**CONTROLE DE QUALIDADE E CONSISTÊNCIA NAS MEDIDAS DAS
IRRADIÂNCIAS SOLARES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA PARA CONSTRUÇÃO
DE UM BANCO DE DADOS**

Botucatu

2019

MARCUS VINÍCIUS CONTES CALÇA

**CONTROLE DE QUALIDADE E CONSISTÊNCIA NAS MEDIDAS DAS
IRRADIÂNCIAS SOLARES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA PARA CONSTRUÇÃO
DE UM BANCO DE DADOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Alexandre Dal Pai.

Botucatu

2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Calça, Marcus Vinicius Contes, 1996-
C144c Controle de qualidade e consistência nas medidas das irradiâncias solares global, difusa e direta para construção de um banco de dados / Marcus Vinicius Contes Calça. - Botucatu: [s.n.], 2019
78 p.: fots. color., grafs. color., ils. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2019
Orientador: Alexandre Dal Pai.
Inclui bibliografia

1. Radiação solar - Medição. 2. Radiação solar - Métodos estatísticos. 3. Banco de dados. I. Dal Pai, Alexandre. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

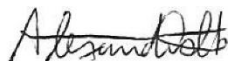
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: **“CONTROLE DE QUALIDADE E CONSISTÊNCIA NAS MEDIDAS DAS IRRADIÂNCIAS SOLARES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA PARA CONSTRUÇÃO DE UM BANCO DE DADOS”**

AUTOR: MARCUS VINICIUS CONTES CALCA

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

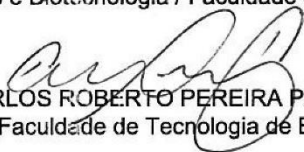
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI
Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. SÉRGIO AUGUSTO RODRIGUES
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO PEREIRA PADOVANI
Informática / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 01 de março de 2019.

*Dedico este estudo à minha mãe Símônia, meu pai Valdeir e ao
companheiro de minha mãe Laércio, por proporcionarem às
oportunidades necessárias e acreditarem em meu potencial.*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos, primeiramente, à Deus, por me conceder as oportunidades para a realização deste estudo. Destaco minha gratidão à minha mãe Simônia A. de Camargo Contes, ao meu pai Valdeir P. Humberto Calça e ao esposo de minha mãe Laércio Alves da Silva por todo o apoio, dedicação, investimento e conselhos ao longo de minha jornada. Deixo igualmente meus agradecimentos à Karina Burgos Anacleto por estar ao meu lado em momentos difíceis, pela compreensão e companheirismo.

Agradeço ao professor Alexandre Dal Pai pela oportunidade, conselhos e orientações prestadas ao longo dos anos. Aos professores João Francisco Escobedo, Enzo Dal Pai, Sérgio Augusto Rodrigues, Carlos Roberto Pereira Padovani e à professora Valéria Cristina Rodrigues Sarnighausen, deixo meu muito obrigado por todos os ensinamentos concedidos. Aos funcionários do Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia Firmo Sousa Campos, Marcelo Felipe Matias, José Eduardo Gomes Montanha e Raquel Francisco Rubio expresso minha gratidão pela amizade, orientações fornecidas e apoio no desenvolvimento dessa pesquisa.

Saliento minha gratidão à todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Energia na Agricultura, aos funcionários(as) da Seção Técnica de Pós-Graduação, da Biblioteca e da limpeza. Aos amigos e colegas de pesquisa expresso meus agradecimentos por se prestarem a me ouvir, aconselhar e apoiar no decorrer dessa experiência, tornando-a mais expressiva e valorosa.

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

As mudanças climáticas globais tem popularizado investigações da atividade solar, essencialmente, por meio de longas séries históricas de medidas da radiação solar em superfície terrestre. Este estudo apresenta um procedimento de análise de consistência e controle de qualidade de uma série histórica (1996 a 2017) de medidas das irradiâncias solares global (I_G), difusa (I_D) e direta (I_B) em superfície horizontal e direta (I_{BN}) em incidência normal para a construção de um banco de dados fundamentalmente integro, acessível e confidencial. A série histórica investigada foi obtida pelo Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) de Botucatu em uma estação experimental localizada em uma área rural (latitude $22,85^\circ$ sul, longitude $48,45^\circ$ oeste e altitude de 786 metros). O procedimento foi implementado com base em um conjunto de métodos que compreendem a combinação de diferentes análises (identificação de duplicidade, delimitação da elevação solar, demarcação dos limites inferiores e superiores fisicamente possíveis, comparação de medidas obtidas por diferentes sensores e intervalo de aceitação estatística) para aplicação em dados adquiridos com frequência sub-horária (escala temporal de 5 minutos), com foco na identificação de erros e incertezas em medidas. A análise de duplicidade removeu todas as linhas duplicadas da série histórica, impactando na rejeição de um total de 0,13%, 0,13% e 0,01% de medidas das irradiâncias global, difusa e direta, respectivamente. Incertezas causadas pela instrumentação foram eliminadas, descartando medidas obtidas em baixos ângulos de elevação solar. Um total de 0,43%, 0,82%, 1,54% e 0,13% das medidas das irradiâncias global, difusa e direta em superfície horizontal e direta em incidência normal, respectivamente, infringiram os limites inferiores e superiores fisicamente possíveis. A comparação das medidas obtidas pelos diferentes sensores apontou que 6%, 3%, 2,99% e 2,95% das medidas das irradiâncias global, difusa e direta em superfície horizontal e direta em incidência normal, respectivamente, continham incertezas. O intervalo estatístico, com nível de confiança de 99,5%, identificou uma quantidade equivalente a 0,72%, 1,25% e 1,67% de medidas estatisticamente isoladas (*outliers*) das demais medidas das irradiâncias global, difusa e direta em superfície horizontal. Em decorrência dos resultados, apontou-se que a desconsideração de medidas em baixos ângulos de elevação solar é fundamental e foi a etapa que teve maior representatividade no controle de qualidade. Considerou-

se que um total de 12,6%, 11,2%, 8,3% e 11,2% das medidas da irradiância global, difusa e direta em superfície horizontal e direta em incidência normal, respectivamente, continham incertezas. Justifica-se, dessa forma, a implementação computacional de um procedimento de análise de consistência e controle de qualidade de medidas solares para a construção de um banco de dados dos parâmetros obtidos historicamente pelo Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu no sentido de garantir a qualidade das medidas obtidas em investigações experimentais.

Palavras-chave: Radiação solar. Medidas solares. Controle de qualidade. Radiação global, difusa e direta. Análise de consistência.

ABSTRACT

Global climate change has popularized investigations of solar activity, essentially through long-term series of solar radiation measurements on land surface. This study presents a consistency analysis and quality control procedure of a long-term serie (1996 - 2017) of global (I_G), sky-diffuse (I_D) and direct-beam (I_B) solar irradiances measurements on horizontal surface and direct-beam (I_{BN}) solar irradiance in solar normal incidence for the construction of a database with integrity, accessibility and confidentiality. The serie was obtained by the Solar Radiometry Laboratory of the School of Agricultural Sciences (São Paulo State University - UNESP) of Botucatu in an experimental station located in a rural area (latitude 22.85° south, longitude $48,45^\circ$ west and altitude of 786 meters). The procedure was implemented based on a set of methods that include the combination of different analyzes (duplicity identification, errors identification due to low solar elevation, lower and upper physically possible limits, different sensors measurements comparison and statistical acceptance range) for application in data acquired with sub-hourly frequency (5 minute scale), focusing on the identification of measurements errors and uncertainties. Duplication analysis removed all duplicate lines from the long-term serie, impacting the rejection of a total of 0.13%, 0.13% and 0.01% of global, sky-diffuse and direct-beam irradiance measurements, respectively. Uncertainties caused by instrumentation were eliminated by discarding measurements obtained at low solar elevation angles. A total of 0.43%, 0.82%, 1.54% and 0.13% of the global, sky-diffuse and direct-beam irradiance measurements on horizontal surface and direct-beam irradiance at normal incidence, respectively, violated the physically possible upper and lower limits. The measurements comparison obtained by different sensors indicated that 6%, 3%, 2,99% and 2,95% of the global, sky-diffuse and direct-beam irradiance on horizontal surface and direct-beam irradiance in normal incidence, respectively, presented uncertainties. The statistical ranges, with a confidence level of 99.5%, identified an amount equivalent to 0.72%, 1.25% and 1.67% of measures outliers of the global, sky-diffuse and direct-beam irradiance on a horizontal surface. The results was pointed that the rejection of measurements acquired at low solar elevation angles is fundamental and was the stage that had the highest representativeness in consistency analysis and quality control procedure. A total of 12.6%, 11.2%, 8.3% and 11.2% of global, sky-diffuse and direct-beam irradiance measurements on horizontal surface

and direct-beam irradiance at normal incidence, respectively, contain uncertainties and were eliminated by the proposed procedure. Thus, the computational implementation of a consistency analysis and quality control procedure of solar measurements for the construction of a database of the historically parameters by the Solar Radiometry Laboratory of the School of Agricultural Sciences (São Paulo State University - UNESP) of Botucatu was necessary to ensure the quality of the parameters measured in experimental investigations.

Keywords: Solar radiation. Solar measurements. Quality control. Global, sky-diffuse and direct-beam radiation. Consistency analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes de Erros em Medidas Solares.....	27
Tabela 2 - Código de Sinalização do Método da BSRN.	29
Tabela 3 - Código de Indicação do Método da CIE.	32
Tabela 4 - Instrumentos de Medição das Irradiâncias Solares.	36
Tabela 5 - Classes do Intervalo de Aceitação das Medidas Solares.	46
Tabela 6 - Parâmetros do Intervalo de Aceitação Estatística.....	47
Tabela 7 - Equações de Qualidade e Consistência das Medidas Solares.....	48
Tabela 8 - Resultado Numérico da Validação da Série de Medidas.	52
Tabela 9 - Resultado da Validação Mensal da Irradiância Global Medida.....	55
Tabela 10 - Resultado da Validação Mensal da Irradiância Difusa Medida.	56
Tabela 11 - Resultado da Validação Mensal da Irradiância Direta Normal Medida.	57
Tabela 12 - Resultado da Validação Mensal da Irradiância Direta Medida.....	58
Tabela 13 - Resultado das Medidas Duplicadas.....	60
Tabela 14 - Resultado do Terceiro Nível de Qualificação.....	66
Tabela 15 - Resultado do Quarto Nível de Qualificação.....	68
Tabela 16 - Resultado do Quinto Nível de Qualificação.	69
Tabela 17 - Resultado do Sexto Nível de Qualificação.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro Eletromagnético da Radiação Solar.....	23
Figura 2 - Componentes da Radiação Solar.....	24
Figura 3 - Instrumentos de Mensuração da Radiação Solar.....	25
Figura 4 - Métodos de Sombreamento de Piranômetros.....	26
Figura 5 - Localização de Botucatu no Estado de São Paulo (Brasil).	34
Figura 6 - Série Climática de 1970 a 2008 da Cidade de Botucatu.....	35
Figura 7 - Fluxograma do Processo de Mensuração das Componentes Solares.....	38
Figura 8 - Mecanismo de Identificação de Duplicidade.	41
Figura 9 - Resultado Visual da Validação da Série de Medidas.....	51
Figura 10 - Resultado Visual da Validação da Série de Medidas por Mês.	54
Figura 11 - Resultado dos Desvios Relativos Percentuais.	62
Figura 12 - Histograma dos Desvios Relativos Percentuais.....	64
Figura 13 - Resultado das Rejeições do Terceiro Nível de Qualidade.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BSRN	Baseline Surface Radiation Network
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
D	Dia do Ano
DB	Dados Brutos
DD	Dados Duplicados
E	Ângulo de Elevação Solar
DR	Desvio Relativo Percentual
FC _{EXC}	Fator de Correção da Excentricidade da Órbita Terrestre
H _B	Irradiação Direta Diária em Superfície Horizontal
H _d	Hora e Décimo de Hora
G ₀	Radiação Extraterrestre Horizontal
G	Radiação Global Horizontal
G _{dif}	Radiação Difusa Horizontal
G _{dir}	Radiação Direta Horizontal
G _n	Radiação Direta Normal
H _{BN}	Irradiação Direta Diária em Incidência Normal
H _D	Irradiação Difusa Diária em Superfície Horizontal
H _E	Irradiação Extraterrestre Diária em Superfície Horizontal
H _G	Irradiação Global Diária em Superfície Horizontal
I/O	Input/Output
IS	Irradiância Solar
\bar{I}	Irradiância Solar Média
ISO	Organização Internacional de Padrões
I _B	Irradiância Direta em Superfície Horizontal
\bar{I}_B	Irradiância Direta em Superfície Horizontal Média
σ_B	Desvio Padrão da Irradiância Direta em Superfície Horizontal
I _{Bcc}	Irradiância Direta de Céu Claro.
I _{BN}	Irradiância Direta em Incidência Normal
\bar{I}_{BN}	Irradiância Direta em Incidência Normal Média
σ_{BN}	Desvio Padrão da Irradiância Direta em Incidência Normal
I _D	Irradiância Difusa em Superfície Horizontal
\bar{I}_D	Irradiância Global em Superfície Horizontal Média
σ_D	Desvio Padrão da Irradiância Difusa em Superfície Horizontal
I _{Dcc}	Irradiância Difusa de Céu Claro
I _G	Irradiância Global em Superfície Horizontal
\bar{I}_G	Irradiância Global em Superfície Horizontal Média
σ_G	Desvio Padrão da Irradiância Global em Superfície Horizontal

I_{Gcc}	Irradiância Global de Céu Claro
I_{sc}	Constante Solar
k	Multiplicador do Intervalo de Confiança
K_T	Índice de Transmissividade Atmosférica
N	Quantidade de Dados
RMIB	Instituto Meteorológico Real da Bélgica
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SQL	Linguagem de Consulta Estruturada
Z	Ângulo Zenital
WMO	Organização Internacional de Meteorologia
δ	Declinação Solar
ϕ	Latitude Geográfica
ω	Ângulo Horário
μ	Média
σ	Desvio Padrão
%	Quantidade Percentual de Dados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	Radiação Solar	22
2.1.2	Medidas	23
2.1.3	Instrumentos	24
2.1.4	Controle de Qualidade	26
2.1.4.1	Método da Rede de Radiação em Superfície Terrestre	28
2.1.4.2	Método do Instituto Meteorológico Real da Bélgica	30
2.1.4.3	Método da Comissão Internacional de Iluminação.....	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Localização e Clima	34
3.2	Instrumentação	35
3.3	Banco de Dados	37
3.4	Controle de Qualidade e Consistência	39
3.4.1	Duplicidade de Dados	40
3.4.2	Elevação Solar	41
3.4.3	Limites Inferiores Fisicamente Possíveis	43
3.4.4	Limites Superiores Fisicamente Possíveis	43
3.4.5	Comparação das Medidas	45
3.4.6	Intervalo de Aceitação Estatística	46
3.4.7	Equações	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Validação da Série de Medidas	50
4.2	Duplicidade de Dados	59
4.3	Elevação Solar	60
4.4	Limites Inferiores Fisicamente Possíveis	65
4.5	Limites Superiores Fisicamente Possíveis	66
4.6	Comparação das Medidas	68
4.7	Intervalo de Aceitação Estatística	70
5	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica de equipamentos eletrônicos tem proporcionado um elevado crescimento na oferta de sensores e dispositivos de aquisição de medidas. Não obstante, o progresso no desenvolvimento das termopilhas e dos sensores quânticos tem popularizado o monitoramento das componentes solares (radiações difusa e direta), principalmente com a colaboração de dispositivos digitais de gerenciamento de dados. Tais circunstâncias conduzem a geração de grandes volumes de parâmetros energéticos mensurados, que devidamente avaliados podem servir de subsídio à extração de conhecimento.

A correta avaliação de medidas solares possibilita que órgãos públicos, entidades acadêmicas e organizações não governamentais planejem e gerenciem, de maneira mais adequada, recursos energéticos renováveis. Isto ocorre por meio da investigação de sua influência na conversão de energia térmica, dimensionamento de infraestruturas fotovoltaicas, aproveitamento e geração de biomassa, aquecimento residencial e de edificações e em experimentos relacionados a incidência dos raios solares sobre cultivos agrícolas. Entretanto, mensurar a radiação solar não é uma tarefa fácil de ser realizada, em virtude das incertezas do processo.

Em sua essência qualquer tipo de medida contém incertezas, pois os instrumentos utilizados para a aquisição podem produzir erros sistemáticos e aleatórios. Com relação às medidas solares pode-se identificar incertezas causadas por adversidades na instrumentação (sensibilidade do sensor) ou por negligências operacionais no ambiente de aquisição e monitoramento dos parâmetros. Torna-se necessário, então, a implementação de processos para análise e validação das medidas, que devem ocorrer antes de sua submissão a procedimentos posteriores.

O objetivo deste estudo é implementar uma metodologia de controle de qualidade das irradiâncias solares global (I_G), difusa (I_D) e direta (I_B) em superfície horizontal e direta em incidência normal (I_{BN}). Também deve-se qualificar e analisar a consistência da série de medidas solares (1996 a 2017) em escala temporal sub-horária (média de 5 minutos) do Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu, no intuito de construir um banco de dados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Tratando-se do desenvolvimento de um método de avaliação de medidas solares é importante ter o conhecimento do que é a radiação solar (item 2.1), seus diferentes tipos de medidas (item 2.1.2) e os instrumentos aplicados em sua aquisição (item 2.1.3). Além de elucidar os principais métodos de controle de qualidade que estão sendo aplicados ao redor do mundo (item 2.1.4), expondo seus aspectos positivos e negativos de forma crítica.

2.1 Radiação Solar

Radiação Solar é a energia proveniente do sol que incide sobre a superfície terrestre por meio de um fenômeno de natureza eletromagnética, que se propaga por movimentos ondulatórios. É a energia que influencia os movimentos atmosféricos, o clima e as outras fontes energéticas do planeta. Sua radiação é decorrente das reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio para formar o hélio (IQBAL, 1983; VAREJÃO-SILVA, 2006; PEREIRA et al., 2017).

A distribuição espectral da radiação solar que chega a superfície é função da irradiância extraterrestre e dos elementos atmosféricos. Quando a radiação é interceptada pela atmosfera terrestre, seus diferentes comprimentos de onda (λ) interagem de formas distintas com os componentes atmosféricos, através dos processos físicos de reflexão, absorção e espalhamento. Essa interação tem grande importância em aplicações de concentradores fotovoltaicos, fotossíntese, ciclo hidrológico, refletividade de superfícies, dinâmica da atmosfera e oceanos, iluminação passiva e ativa e em processos fotoquímicos (IQBAL, 1983; PEREIRA et al., 2017).

O comprimento de onda (distância que separa duas cristas consecutivas) é o que caracteriza a radiação solar de acordo com a óptica ondulatória. Seu domínio cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético (Figura 1) e compreende a faixa espectral ultravioleta (λ inferior a 360nm), visível (λ de 360nm a 740nm) e infravermelho (λ superior a 740nm). Cerca de 81% da energia que chega ao sistema Terra/Atmosfera abrange a região do visível ao infravermelho próximo (VAREJÃO-SILVA, 2006; PEREIRA et al., 2017).

Figura 1 - Espectro Eletromagnético da Radiação Solar.

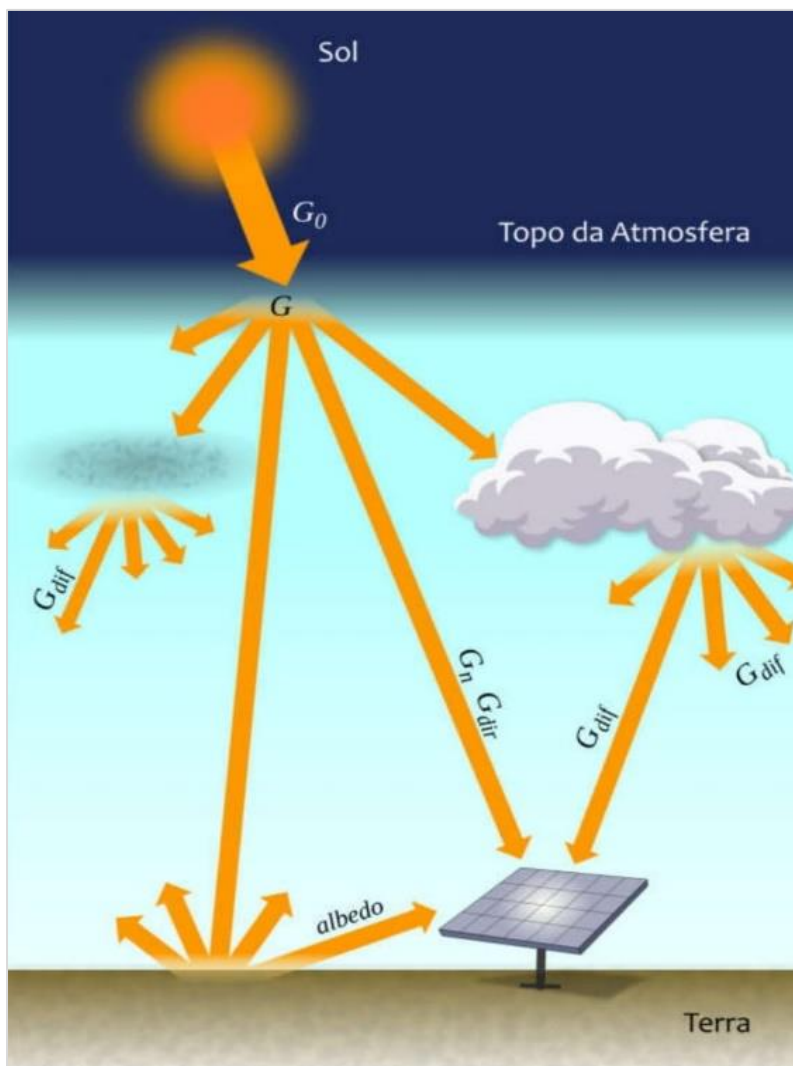
Fonte: Pereira et al., 2017 (p. 15).

2.1.2 Medidas

A mensuração da radiação solar e de suas componentes (Figura 2) é uma atividade essencial no sentido de avaliar a disponibilidade de energia solar em uma localidade específica da superfície terrestre, analisar as propriedades e a distribuição dos constituintes atmosféricos e verificar medidas oriundas de satélites (IQBAL, 1983; WMO, 2012). É uma ocupação que guarda grande interesse em estudos de climatologia da radiação solar, análises e avaliações de técnicas de aproveitamento da energia e modelagem estatística (PEREIRA et al., 2017).

A energia solar disponível em um plano imaginário no topo da atmosfera é conhecida como radiação extraterrestre (G_0). Tal como ao atravessar a atmosfera terrestre, essa energia, que em um determinado momento e espaço atinge uma superfície horizontal é conhecida como radiação global ou total (G), e pode ser particionada em duas componentes, a radiação direta (G_{dir} e G_n) e a radiação difusa (G_{dif}). A radiação direta é a parcela da radiação total que provém diretamente do disco solar e que não sofreu os processos de absorção e/ou espalhamento na atmosfera. A radiação difusa é a parcela da radiação total que resultou da ação de espalhamento pelos gases, partículas e outros constituintes atmosféricos (VAREJÃO-SILVA, 2006; WMO, 2012; PEREIRA et al., 2017).

Figura 2 - Componentes da Radiação Solar.



Fonte: Pereira et al., 2017 (p. 19).

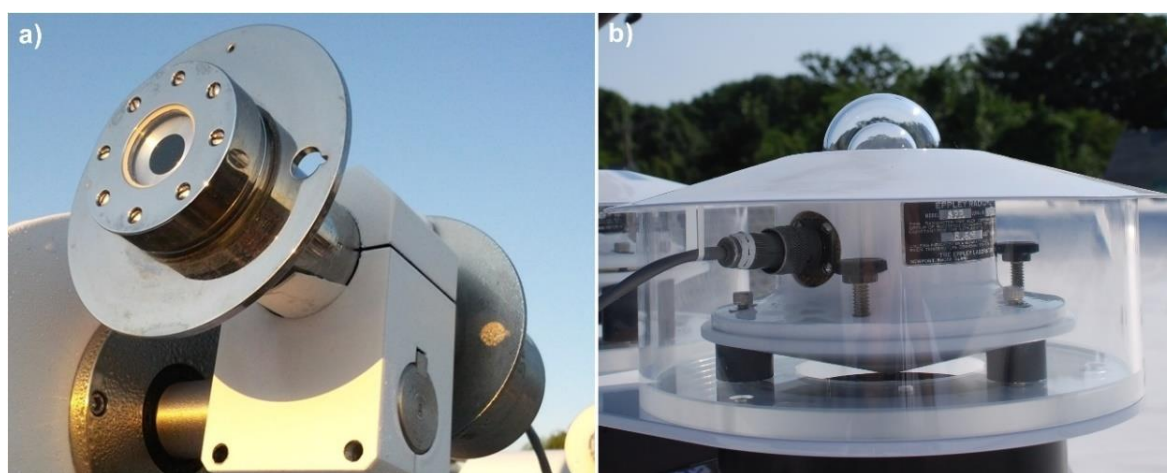
2.1.3 Instrumentos

Os instrumentos são dispositivos utilizados no processo de aquisição de medidas, compreendido pela obtenção de informações sobre um recurso físico por meio da mensuração de suas grandezas. Em muitos casos esses recursos são constituídos por variáveis meteorológicas que possuem variação temporal e espacial (temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, pressão atmosférica e outros). A radiação solar tem sua variação em consideração aos movimentos do planeta e pode ser afetada pelos constituintes atmosféricos (nuvens, vapor d'água, gases e aerossóis). Isto requer que a instrumentação utilizada para aquisição de suas medidas tenha sensibilidade suficiente a fim de detectar estas variabilidades (SHI, et al., 2008; PEREIRA et al., 2017).

A radiação direta (G_{dir}) é obtida por meio de pireliômetros (Figura 3a). Este instrumento tem uma estreita abertura que permite coletar apenas a radiação solar do feixe (oriunda direto do disco solar), com uma estrita contribuição da radiação circumsolar (região vizinha do disco solar). O pireliômetro é um equipamento que deve ser apontado diretamente para o sol acompanhando seu movimento ao longo do dia. Em consequência do sensor estar em posição normal ao feixe solar, a radiação direta pode ser comumente chamada de radiação direta em incidência normal (G_n), conforme representação anterior (GUEYMARD; MYERS, 2008; PEREIRA et al., 2017).

As radiações global (G) e difusa (G_{dif}) são obtidas por meio de piranômetros (Figura 3b). Este instrumento tem um campo de visão de 180° e geralmente cobre uma faixa espectral de 250 a 3000nm (DRIEMEL et al., 2018). É destinado a medir a radiação solar por meio de uma termopilha (sensor), que converte a energia térmica em energia elétrica. O piranômetro responsável por captar a radiação difusa deve ser utilizado junto de um mecanismo de sombreamento. Esse método é responsável pela supressão da incidência do feixe solar no sensor e obtenção da radiação solar oriunda dos fenômenos de espalhamento e reflexão pelos constituintes atmosféricos (GUEYMARD; MYERS, 2008; PEREIRA et al., 2017).

Figura 3 - Instrumentos de Mensuração da Radiação Solar.



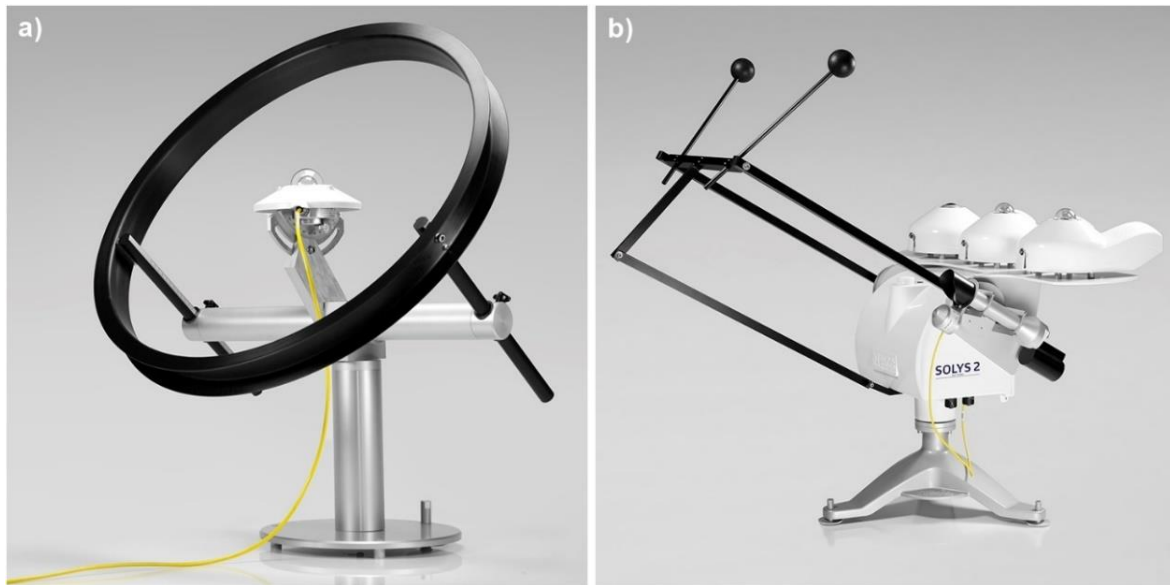
Fonte: Eppley, 2018.

Popularmente utiliza-se dois mecanismos para medir a radiação difusa, o método do anel de sombreamento (Figura 4a), que se constitui de uma faixa circular ou semi-circular ajustada a uma estrutura de suporte de um piranômetro, de maneira

que a sombra feita pelo anel esteja sempre sobre o sensor do instrumento durante a trajetória aparente do sol. Este anel tem de ser ajustado periodicamente no sentido de compensar a variação sazonal da declinação do sol durante o ano. E o método da esfera de sombreamento (Figura 4b), composto por um sistema de esferas pintadas de preto fosco acoplado a um rastreador solar.

O método da esfera de sombreamento contém maior precisão, pois evita a incidência do feixe solar diretamente sobre o sensor e contorna um problema causado pelo anel de sombreamento, que é o encobrimento parcial do equipamento (PEREIRA et al., 2017). Neste sentido, o método da esfera de sombreamento é mais custoso e comum em estações radiométricas com maiores aportes financeiros (OLEFS et al., 2016; PASHIARDIS; KALOGIROU, 2016; DRIEMEL et al., 2018), enquanto o método do anel de sombreamento é comumente utilizado em estações experimentais (CODATO et al., 2008; DAL PAI et al., 2016).

Figura 4 - Métodos de Sombreamento de Piranômetros.



Fonte: Kipp & Zonen, 2018.

2.1.4 Controle de Qualidade

As medidas solares obtidas em superfície terrestre tem cada vez mais se popularizado, especialmente em razão dos efeitos causados pelas mudanças climáticas globais e sua relação com a energia proveniente do sol. Tais mudanças podem ser investigadas por meio de longas séries temporais, onde erros e incertezas

nas medidas podem acarretar em diferentes inconsistências. Uma medida solar pode ter sua consistência afetada por adversidades instrumentais (imprecisões nos equipamentos) ou por negligências operacionais no ambiente (estação radiométrica) onde são dispostos os instrumentos de monitoramento da atividade solar (MUNEER; FAIROOZ, 2002).

A qualidade de uma medida solar pode ser avaliada por meio da determinação de sua incerteza (parâmetro quantitativo). Isto é, a análise de sua consistência deve ser realizada por meio da identificação das incertezas da instrumentação e incertezas do ambiente (Tabela 1). A principal fonte de incertezas na instrumentação é inerente aos sensores de captação da radiação solar e seu processo de fabricação. Com relação às incertezas do ambiente as principais inconsistências estão associadas à manutenção dos equipamentos, que deve ocorrer constantemente, por consequência de composições naturais (poeira, geada ou neve) e desgaste inerente às ações do tempo (WMO, 2012).

Tabela 1 - Fontes de Erros em Medidas Solares.

Incetezas da Instrumentação	Incetezas do Ambiente
Resposta do cosseno	Excremento de aves
Resposta da temperatura	Orvalho na cúpula dos sensores
Seletividade espectral	Nivelamento incorreto dos sensores
Desalinhamento do anel de sombreamento	Mal funcionamento do cabeamento
Estabilidade do instrumento	Desligamento da estação

Fonte: Muneer; Younes; Munawwar, 2007.

Das fontes descritas para a instrumentação a resposta do cosseno é a que implica na maior quantidade de incertezas em medidas solares. Ela representa o ângulo em que a radiação incidente atinge a área de detecção do sensor. Normalmente essa incerteza é ainda mais aparente nos instantes do nascer e pôr do sol, devido a baixa altitude solar e o longo caminho óptico percorrido pelos raios solares. A seletividade espectral é outro tipo de incerteza constantemente presente na instrumentação, ela diz respeito a tinta preta do sensor e as cúpulas utilizadas na construção do piranômetro. Esses objetos sofrem desgaste devido a ação do tempo (YOUNES; CLAYWELL; MUNEER, 2005).

Com relação as fontes descritas para o ambiente, o excremento de aves, funcionamento incorreto do cabeamento e desligamento da estação são os mais recorrentes. Aves na maioria das ocasiões procuram apoio nos instrumentos e estruturas auxiliares, ocasionando na possível evacuação de excremento sobre a área de detecção dos sensores. Os principais problemas no cabeamento são devido a sua deterioração e picos nas leituras, causados por fortes campos elétricos oriundos de estresse mecânico. O desligamento da estação radiométrica também é uma adversidade comum em locais sem redundância no fornecimento de energia, pois em sua ausência não há fonte de alimentação para os dispositivos eletroeletrônicos.

Uma vez que uma medida foi adquirida não há processo que possa ser aplicado para melhorar sua qualidade. Em vista disso identificar e quantificar incertezas em extensas séries solares é uma atividade que deve subsidiar processos de tomada de decisão e extração de conhecimento. Isto deve ocorrer por meio da aplicação de um procedimento de controle de qualidade e análise de consistência, que consiste em um conjunto de recursos implementados para gerar confiança e garantir que as medidas obtidas estejam de acordo com a qualidade exigida (WMO, 2013). Possibilitando, nesse ponto de vista, a consolidação/construção de um banco de dados computacional devidamente qualificado.

Diferentes métodos de controle de qualidade são propostos na literatura. Ambos implementados por meio de algoritmos e procedimentos implementados computacionalmente. Os mais completos e mais aplicados em todo o mundo são os da Rede de Radiação Solar em Superfície Terrestre da Organização Mundial de Meteorologia (item 2.1.4.1), criado no ano de 2002, o do Instituto Meteorológico Real da Bélgica (item 2.1.4.2), criado no ano de 2011 e o da Comissão Internacional de Iluminação (item 2.1.4.3), criado no ano de 1994.

2.1.4.1 Método da Rede de Radiação em Superfície Terrestre

A Rede de Radiação em Superfície Terrestre (BSRN) é uma rede radiométrica internacional estabelecida pelo Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP) dirigido pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO). Seu método de controle de qualidade de medidas consiste em um procedimento padronizado de verificação dos limites fisicamente possíveis e raros das irradiâncias solares global horizontal (I_G), difusa horizontal (I_D) e direta normal (I_{BN}), mensuradas em superfície terrestre (LONG;

DUTTON, 2002). Os limites devem ser impostos a medidas sub-horárias (média de 1 minuto em W/m^2) e tem base na constante solar (I_{sc}), correção da excentricidade da órbita terrestre (E_{xc}) e ângulo zenital (Z) em graus (DRIEMEL et al., 2018).

Cada etapa do procedimento é responsável por definir um código numérico de qualificação (Tabela 2) para as medidas solares (sinalizador). Ou seja, o método não corrige ou apaga medida da base de dados original, apenas sinaliza aquelas suspeitas de estarem incorretas. Essa estratégia é adotada para facilitar a leitura do resultado da validação das medidas por meio de gráficos dos sinalizadores.

Tabela 2 - Código de Sinalização do Método da BSRN.

Código	Significado
0	Nenhum procedimento foi executado
2	Medida suspeita de estar incorreta
5	Procedimento não pode ser executado
9	Medida de boa qualidade ou não suspeita

Fonte: INPE, 2018.

A primeira etapa do controle de qualidade baseia-se em verificar se as medidas se encontram dentro dos limites fisicamente possíveis (Equações 1, 2 e 3). A segunda etapa é utilizada para verificar se as medidas se encontram dentro de limites considerados extremamente raros (Equações 4, 5 e 6). Por fim, a terceira etapa é utilizada para verificar a relação entre as componentes solares medidas por diferentes sensores. Isto ocorre por meio da razão entre a irradiância global medida e a global calculada (soma da difusa com a direta) em diferentes ângulos de elevação solar (Equações 7 e 8). Além de verificar a razão entre as irradiâncias difusa e global medidas, também, em diferentes ângulos de elevação solar (Equações 9 e 10).

$$-4 \text{ W/m}^2 < I_G < I_{sc} E_{xc} 1,5 (\text{Cos}Z)^{1,2} + 100 \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

$$-4 \text{ W/m}^2 < I_D < I_{sc} E_{xc} 0,95 (\text{Cos}Z)^{1,2} + 50 \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

$$-4 \text{ W/m}^2 < I_G < I_{BN} E_{xc} \quad (3)$$

$$-2 \text{ W/m}^2 < I_G < I_{sc} E_{xc} 1,2 (\text{Cos}Z)^{1,2} + 50 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

$$-2 \text{ W/m}^2 < I_D < I_{sc} E_{xc} 0,75 (\text{Cos}Z)^{1,2} + 20 \text{ W/m}^2 \quad (5)$$

$$-2 \text{ W/m}^2 < I_G < I_{BN} E_{xc} 0,95 (\text{Cos}Z)^{0,2} \quad (6)$$

$$| I_G / (I_D + I_{BN} \text{Cos} (Z)) | < 1,08 \text{ quando } (Z < 75^\circ) \text{ e } (I_G > 50 \text{ W/m}^2) \quad (7)$$

$$| I_G / (I_D + I_{BN} \cos Z) | < 1,15 \text{ quando } (93^\circ < Z < 75^\circ) \text{ e } (I_G > 50 \text{ W/m}^2) \quad (8)$$

$$I_D/I_G < 1,05 \text{ quando } (Z < 75^\circ) \text{ e } (I_G > 50 \text{ W/m}^2) \quad (9)$$

$$I_D/I_G < 1,10 \text{ quando } (93^\circ < Z < 75^\circ) \text{ e } (I_G > 50 \text{ W/m}^2) \quad (10)$$

Todo o procedimento é realizado de forma sequencial. Portanto, para uma medida ser validada pela segunda etapa é condição necessária que tenha sido positivamente sinalizada na primeira (estar dentro dos limites), conseqüentemente, para ser validada pela terceira etapa, também, é condição necessária que tenha sido positivamente sinalizada nas duas etapas anteriores.

Este método é vastamente aplicado em estações independentes, ou seja, não se restringe apenas as incorporadas à BSRN, no sentido de avaliar a exatidão de diferentes componentes solares medidas. Uma rede radiométrica Austríaca aprimorou esse procedimento implementando diferentes modelos de inspeção visual (gráficos horários e diários) dos sinalizadores de qualificação (OLEFS et al., 2016). Cientistas do Qatar modificaram o método para ser aplicado as médias diárias das irradiâncias solares (PEREZ-ASTUDILLO; BACHOUR; MARTIN-POMARES, 2018). Outros pesquisadores aplicaram o controle de qualidade em estudos específicos da área, principalmente, voltados a avaliação e modelagem de medidas solares em superfície terrestre (GUEYMARD; RUIZ-ARIAS, 2016; PASHIARDIS; KALOGIROU, 2016).

2.1.4.2 Método do Instituto Meteorológico Real da Bélgica

O Instituto Meteorológico Real da Bélgica (RMIB) é uma organização dirigida pelo Gabinete Federal de Políticas Científicas da Bélgica (BELSPO). Seu método de controle de qualidade consiste na verificação da razão física (detecção de eventos fisicamente impossíveis) e da variabilidade estatística (detecção de eventos raros) das irradiâncias global (I_G), difusa (I_D) e direta (I_B) em superfície horizontal (Equações de 11 a 24). Essas verificações devem classificar medidas sub-horárias (médias de 10 e 30 minutos em Wh/m^2) em válidas, suspeitas ou errôneas, com base na irradiância solar extraterrestre (I_E), ângulo de elevação solar (E) e estimativas das irradiâncias solares global (I_{Gcc}), difusa (I_{Dcc}) e direta (I_{Bcc}) de céu claro em superfície horizontal obtidas pelo modelo do Atlas Europeu de Radiação Solar (RIGOLLIER; BAUER; WALD, 2000; JOURNÉE; BERTRAND, 2011).

$$I_G/I_E < 1 \text{ se } E > 2^0 \quad (11)$$

$$I_B/I_E < 1 \quad (12)$$

$$I_D/I_E < 1 \text{ se } E > 2^0 \quad (13)$$

$$I_G/I_{Gcc} \leq 1,1 \text{ se } E > 2^0 \quad (14)$$

$$I_G/I_{Gcc} \leq 2 \text{ se } E > 2^0 \quad (15)$$

$$I_B/I_{Bcc} \leq 1 \quad (16)$$

$$I_D/I_{Dcc} \geq 1 \quad (17)$$

$$I_G/I_E \geq 10^{-4} (E - 10) \text{ se } E > 10^0 \quad (18)$$

$$I_G \geq 0 \text{ se } E \leq 10^0 \quad (19)$$

$$I_B \geq 0 \quad (20)$$

$$\mu(I_G/I_E) \geq 0,03 \quad (21)$$

$$I_B/I_G \leq 0,95 \text{ se } E > 2^0 \quad (22)$$

$$I_B/I_G < 1 \text{ se } E < 2^0 \quad (23)$$

$$I_D/I_G \leq 1 \quad (24)$$

Do ponto de vista estatístico o método do Instituto Meteorológico Real da Bélgica é o mais completo, pois analisa a evolução temporal das medidas para um mesmo dia (do nascer ao pôr do sol), no intuito de detectar a variabilidade, picos irrealistas, saltos anormais ou constância demasiada nas medições. Essa análise é feita por meio de limites inferiores e superiores (Equações 25, 26 e 27) estipulados a partir da evolução da média (μ) e do desvio padrão (σ) para um determinado período do dia (JOURNÉE; BERTRAND, 2011).

$$\frac{1}{8} \mu\left(\frac{I_G}{I_E}\right) \leq \sigma\left(\frac{I_G}{I_E}\right) \leq 0,35 \quad (25)$$

$$\frac{1}{6} \mu\left(\frac{I_D}{I_E}\right) \leq \sigma\left(\frac{I_D}{I_E}\right) \leq 0,20 \quad (26)$$

$$\gamma \leq \sigma\left(\frac{I_B}{I_E}\right) \leq 0,30 \quad (27)$$

O limite inferior (γ) demarcado para a irradiância direta (Equação 27), pode ser obtido em função da média da razão entre a irradiância direta e a irradiância extraterrestre (Equações 28, 29 e 30).

$$\text{Se } \mu_{\left(\frac{I_G}{I_E}\right)} \leq 0,01 \text{ então } \gamma = 0 \quad (28)$$

$$\text{Se } 0,01 < \mu_{\left(\frac{I_G}{I_E}\right)} \leq 0,20 \text{ então } \gamma = \frac{1}{2} \mu_{\left(\frac{I_B}{I_E}\right)} \quad (29)$$

$$\text{Em outra situação } \gamma = 0,1 + \frac{1}{20} \left(\mu_{\left(\frac{I_B}{I_E}\right)} - 0,20 \right) \quad (30)$$

2.1.4.3 Método da Comissão Internacional de Iluminação

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE) é uma entidade independente reconhecida pela Organização Internacional de Normalização (ISO) como uma instituição internacional de caráter normativo. Seu método de controle de qualidade consiste em um procedimento automatizado, que deve ser realizado logo após a coleta das medidas, com foco na verificação da consistência entre as irradiâncias solares global (I_G), difusa (I_D) e direta (I_B) em superfície horizontal (Equações de 31 a 36). Essa verificação deve ser feita por meio da determinação de limites baseados na irradiância solar extraterrestre (I_E), ângulo zenital (Z) e ângulo de elevação solar (E). Sua aplicação tem de ser efetuada em medidas sub-horárias (média de 10 minutos em W/m^2) por meio de três etapas (TREGENZA et al., 1994).

Cada etapa do procedimento é responsável por definir um código alfabético de qualificação para as medidas (indicador). Ou seja, o método não apaga as medidas da base de dados original, apenas indica aquelas suspeitas de estarem incorretas (Tabela 3). Essa estratégia é adotada para facilitar a leitura do diagnóstico das medidas por meio de gráficos dos indicadores.

Tabela 3 - Código de Indicação do Método da CIE.

Código	Diagnóstico
M	Medida perdida
U	Procedimento não pôde ser executado
I	Procedimento inconclusivo
V	Medida validada pelo procedimento
Q	Medida questionável pelo procedimento

Fonte: Tregenza et al., 1994.

A primeira etapa do controle de qualidade é delimitar todo o procedimento a atuar apenas em medidas com elevação solar maior que 4° e onde a irradiância global for maior que 20 W/m^2 (Equação 31). A segunda etapa consiste em verificações absolutas que visam garantir que maiores problemas não existam, é uma triagem das medidas (Equações 32, 33 e 34). Por fim a terceira etapa é utilizada para verificar a consistência por meio da redundância existente entre as irradiâncias global, difusa e direta e suas relações geométricas (Equações 35 e 36).

$$(E > 4^\circ) \text{ e } (I_G \geq 20 \text{ W/m}^2) \quad (31)$$

$$0 < I_G < (1,20 I_E) \quad (32)$$

$$0 < I_D < (0,80 I_E) \quad (33)$$

$$0 \leq I_B < I_E \quad (34)$$

$$I_G = (I_B + I_D) \pm (15\% \text{ mais restritivo) ou } (25\% \text{ menos restritivo)} \quad (35)$$

$$I_D < I_G + 10\% \quad (36)$$

Este método não é considerado 100% efetivo, pois não identifica incertezas causadas por estreitos erros de desalinhamento do rastreador solar ou do dispositivo de sombreamento da irradiância difusa. O controle de qualidade de medidas solares implementado pela CIE necessita de inspeções visuais exploratórias (verificação manual) da distribuição das leituras, atuando como um complemento das equações.

3 METODOLOGIA

3.1 Localização e Clima

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Radiometria Solar (latitude 22,85° sul, longitude 48,45° oeste e altitude de 786 metros) da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu - SP. Situado no departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, o laboratório em questão atua no monitoramento das componentes solares há mais de 20 anos. Os sensores que realizam a captação da atividade solar estão localizados em uma estação experimental posicionada em uma área rural rodeada por grama verde curta horizontalmente homogênea (ROSSI et al., 2018).

Botucatu (Figura 5) é uma cidade situada na região centro-sul do estado de São Paulo (SP) distante 235 km da capital. Tem 1482.642 km² de área territorial e população estimada em 144 mil habitantes no ano de 2018 (IBGE, 2017). É um município caracterizado principalmente por atividades agrícolas intensas, com grandes plantações de cana-de-açúcar e eucalipto, e atividades industriais moderadas (CODATO et al., 2008; DAL PAI et al., 2016).

Figura 5 - Localização de Botucatu no Estado de São Paulo (Brasil).



Fonte: Moulin, 2011.

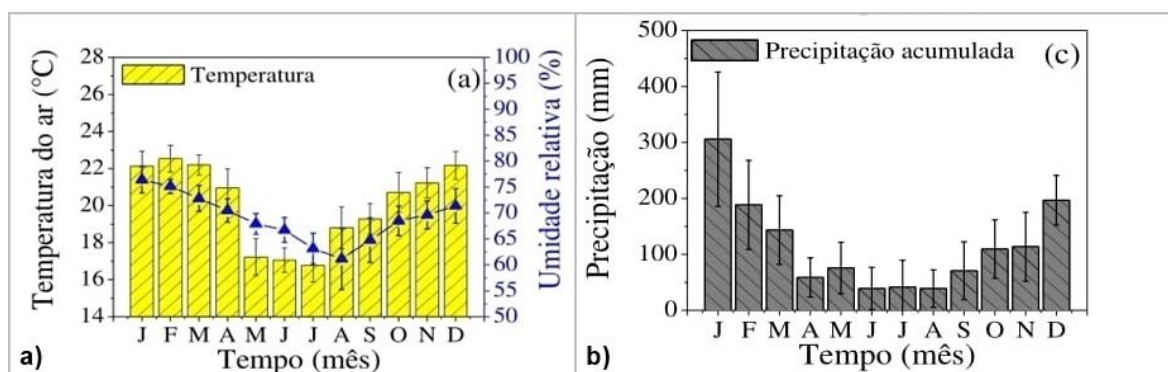
De acordo com os critérios climáticos de Köppen, Botucatu é uma cidade classificada como Cwa (mesotérmico) com clima temperado quente e estações bem definidas. Compreende inverno seco (junho a agosto) e verão quente e úmido (dezembro a fevereiro). Devido ao extenso gradiente de altitude, entre 400 e 500

metros na região baixa e 700 e 900 metros na região alta, amplas variações na temperatura podem ser observadas ao longo do ano (SILVA et al., 2017; ROSSI et al., 2018).

Mediante a série climática de 1970 a 2008 para a cidade de Botucatu - SP, a temperatura média do ar para o mês mais frio (julho) se registra em torno de 17 °C e para o mês mais quente (fevereiro) próximo a 23 °C. A umidade relativa média do ar se registra para o mês menos úmido (agosto) em torno de 61% e para o mês mais úmido (janeiro) perto de 76% (Figura 6a).

A precipitação atinge seus maiores valores no verão e primavera (estação úmida), com ocorrência máxima no mês de janeiro (em torno de 300 mm), devido à grande evaporação de superfícies molhadas e aquecidas. Os menores valores de precipitação são obtidos no inverno e outono (estação seca), com ocorrência mínima no mês de agosto (em torno de 40 mm), devido ao encontro de massas frias e secas vindas do sul com as massas quentes e úmidas vindas do norte (Figura 6b). Conseqüentemente a estação úmida é a que detém maior índice de nebulosidade, em virtude das características da cobertura de céu no período (CODATO et al., 2008; DAL PAI et al., 2016).

Figura 6 - Série Climática de 1970 a 2008 da Cidade de Botucatu.



Fonte: Silva et al., 2017.

3.2 Instrumentação

Rotineiramente o Laboratório de Radiometria Solar mede as irradiâncias solares global, difusa e direta desde o início de suas atividades em meados de 1996. A irradiância solar global (onda curta) em superfície horizontal (I_G) foi obtida por meio de um piranômetro Eppley PSP e a difusa (onda curta) em superfície horizontal (I_D),

também, por meio de um piranômetro Eppley PSP, com auxílio de um anel de sombreamento com proporções de 0,40 metros de raio e 0,10 metros de largura (OLIVEIRA; MACHADO; ESCOBEDO, 2002). Tal como a irradiância direta (onda curta) em incidência normal (I_{BN}), foi obtida por meio de um pireliômetro Eppley NIP acoplado a um dispositivo de rastreamento solar Eppley modelo ST3.

O método do anel de sombreamento apresenta uma desvantagem de bloquear, além da irradiância direta, uma estreita parcela da irradiância difusa. Neste sentido as medidas da irradiância solar difusa, obtidas pelo anel de sombreamento, tem de ser corrigidas a partir do fator isotrópico que tem variação de acordo com o dia, e do fator anisotrópico, que tem variação de acordo com a cobertura do céu (DAL PAI et al., 2016).

As atividades de obtenção das medidas solares seguem as diretrizes de instrumentação meteorológica e métodos de observação estipulados pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2008). Conseqüentemente, os piranômetros (Eppley PSP) e o pireliômetro (Eppley NIP) utilizados na mensuração das irradiâncias (Tabela 4), são diariamente verificados, conservados e mantidos pelos observadores, pois são considerados instrumentos de alta qualidade de acordo com as especificações internacionais de classificação de instrumentos para medição da energia solar (ISO, 2018). Requerendo cuidados especializados.

Tabela 4 - Instrumentos de Medição das Irradiâncias Solares.

Características	Irradiância		
	Global	Difusa	Direta Normal
Sigla	I_G	I_D	I_{BN}
Tipo	Piranômetro	Piranômetro	Pireliômetro
Fabricante	Eppley	Eppley	Eppley
Modelo	PSP	PSP	NIP
Intervalo Espectral (nm)	295 - 2800	295 - 2800	250 - 3000
Fator Original de Calibração	8,13 $\mu\text{Vm}^2/\text{W}$	8,17 $\mu\text{Vm}^2/\text{W}$	7,73 $\mu\text{Vm}^2/\text{W}$
Classificação ISO 9060:2018	Alta Qualidade	Alta Qualidade	Alta Qualidade

Fonte: Eppley (2018).

A aquisição das medidas para o período de 1996 a 2012 foi realizada por meio do CR23X Micrologger®, e para o período de 2013 a 2017 por meio do CR3000

Micrologger®, ambos com taxa de escaneamento de 100 Hz. Os dispositivos de aquisição de dados são produzidos pela *Campbell Scientific* e foram substituídos ao longo dos anos devido a descontinuação dos modelos. Os dados foram armazenados na memória interna dos dispositivos e, posteriormente, descarregados a partir de um módulo USB (*Flash Memory Drive*) com interface serial de entrada e saída (I/O) uma vez a cada dez dias.

3.3 Banco de Dados

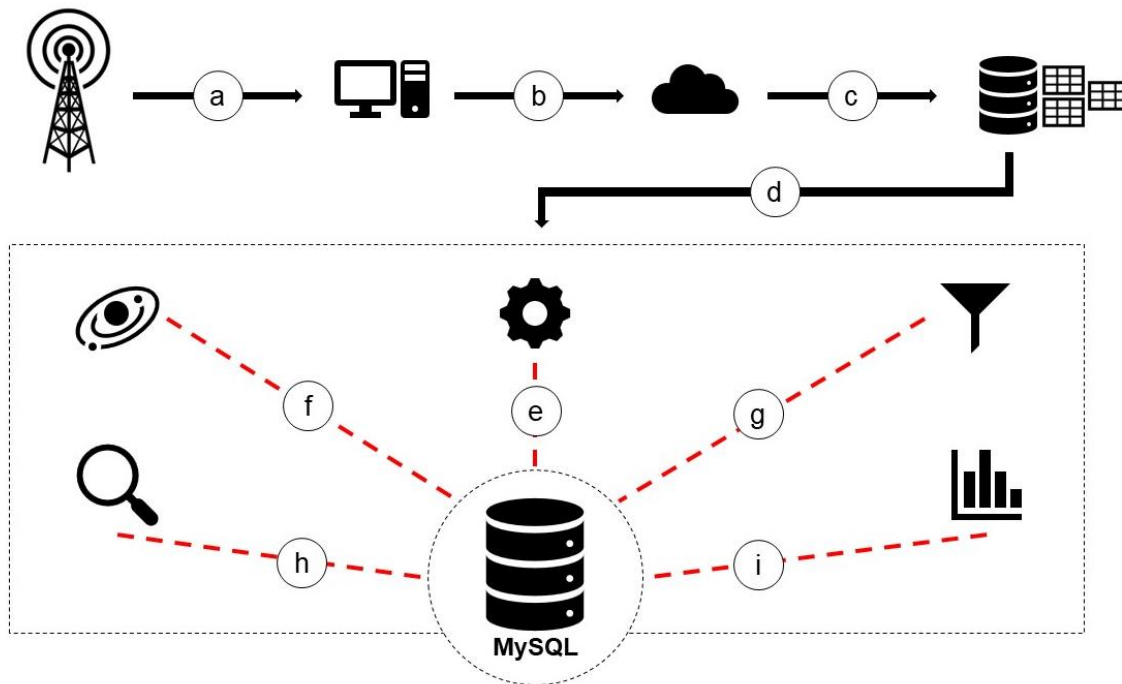
O conjunto de dados do Laboratório de Radiometria Solar compreende uma série histórica de medidas (22 anos), em superfície terrestre, das irradiâncias solares (I_G , I_D , I_{BN} e I_B) para o período de 1996 a 2017 em escala de tempo sub-horária de 5 minutos (unidade de W/m^2). Isto é, cada medida representa uma média de 60 leituras de cada 5 segundos do dia. Originalmente essa série era subdividida em arquivos anuais no formato ASCII (texto separado por vírgulas), devido a facilidade de manuseio e processamento das informações.

No sentido de aprimorar e automatizar procedimentos as medidas foram importadas para um banco de dados baseado na tecnologia MySQL 5.7 SE. Esse recurso computacional permite armazenar, processar, correlacionar e pesquisar as informações dispostas em suas estruturas (tabelas lógicas) por meio da linguagem de consulta estruturada estendida (SQL). Essa linguagem é compreendida por um conjunto de instruções declarativas, de alto nível, com base na álgebra relacional e na teoria dos conjuntos, abrangendo funções relacionadas a união, diferença, intersecção e produto cartesiano (PUGA; FRANÇA; GOYA, 2013).

O banco de dados aplicado a rotina do Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu (Figura 7) pode ser visto como um aparato tecnológico, que tem como finalidade assegurar que as informações estejam consolidadas em um ambiente confidencial (acessível somente as pessoas autorizadas), íntegro (protegido de alterações indevidas) e disponível (utilizável em qualquer momento). Três mecanismos foram aplicados e se encontram em funcionamento no intento de suprir a demanda de armazenamento e processamento do volume de informações solares da série histórica. O mecanismo MyISAM (estrutura em formato de tabela) para armazenar dados, a *Stored Procedure* (estrutura para

construir rotinas) para processar informações e a SQL (linguagem de consulta de informações) para implementar algoritmos.

Figura 7 - Fluxograma do Processo de Mensuração das Componentes Solares.



Rotineiramente, nos dias de hoje, na estação experimental as medidas são adquiridas e enviadas para um microcomputador em laboratório (Figura 7a), onde é realizado o pré-processamento das informações para posterior importação no servidor de banco de dados alocado na nuvem (Figura 7b). O servidor armazena as medidas em estruturas lógicas de tabelas por meio de linhas e colunas (Figura 7c). Internamente diferentes rotinas são executadas paralelamente (Figura 7d), fornecendo suporte para os procedimentos que podem ser realizados (processamento, controle de qualidade, integração numérica, visualização e descarregamento de medidas). Essas rotinas atuam para identificar pontos duplicados nas medidas (Figura 7e), calcular as efemérides solares (Figura 7f), aplicar os procedimentos de filtragem (Figura 7g), buscar de acordo com um período pré-especificado (Figura 7h) e por fim interpretar e analisar estatisticamente de acordo com o tempo (Figura 7i).

As efemérides solares são variáveis que apoiam o processo de investigação das medidas, e são compreendidas pela elevação solar em graus (Equação 37), ângulo zenital, também conhecido como distância zenital, em graus (Equação 38),

declinação solar em graus (Equação 39), ângulo horário solar (Equação 40) em graus, fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (Equação 41) e irradiância solar extraterrestre em superfície horizontal (Equação 42) na unidade de W/m².

$$E = 90 - Z \quad (37)$$

$$Z = \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) + \text{cos}(\delta) \text{cos}(\phi) \text{cos}(\omega) \quad (38)$$

$$\delta = \begin{aligned} &0,3964 + 3,631 \text{sen}(F) - 22,97 \text{cos}(F) + 0,03838 \text{sen}(2F) - \\ &0,3885 \text{cos}(2F) + 0,07659 \text{sen}(3F) - 0,1587 \text{cos}(3F) - \\ &0,01021 \text{cos}(4F) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\omega = (12 - Hd) 15 \quad (40)$$

$$E_{XC} = \begin{aligned} &1 - 0,0009467 \text{sen}(F) - 0,01671 \text{cos}(F) - 0,0001489 (2F) - \\ &0,00002917 \text{sen}(3F) - 0,0003438 \text{cos}(4F) \end{aligned} \quad (41)$$

$$I_E = 1367 E_{XC} \text{cos}(Z) \quad (42)$$

Nas equações ϕ é a latitude geográfica e F representa $360 D/365$, onde D é o dia do ano (decorrido do 1º ao 365º). Tal como Hd é a hora e décimo de hora do dia (hora no formato decimal). Os cálculos foram obtidos na literatura (IQBAL, 1983), e implementados por meio de algoritmos SQL, obtendo resultados de acordo com a localização geográfica da cidade de Botucatu - SP no intervalo temporal de aquisição das medidas (cada 5 minutos do dia).

3.4 Controle de Qualidade e Consistência

No intuito de analisar as incertezas nas medidas solares foi implementada uma metodologia de controle de qualidade e análise de consistência. Esse procedimento foi aplicado nos dados coletados pelo Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu e consiste em uma sequência de filtros baseados em processos computacionais de renomadas

instituições da área de energia solar e análises estatísticas. Os filtros foram adaptados para atuar em acordo com as condições de mensuração das componentes solares.

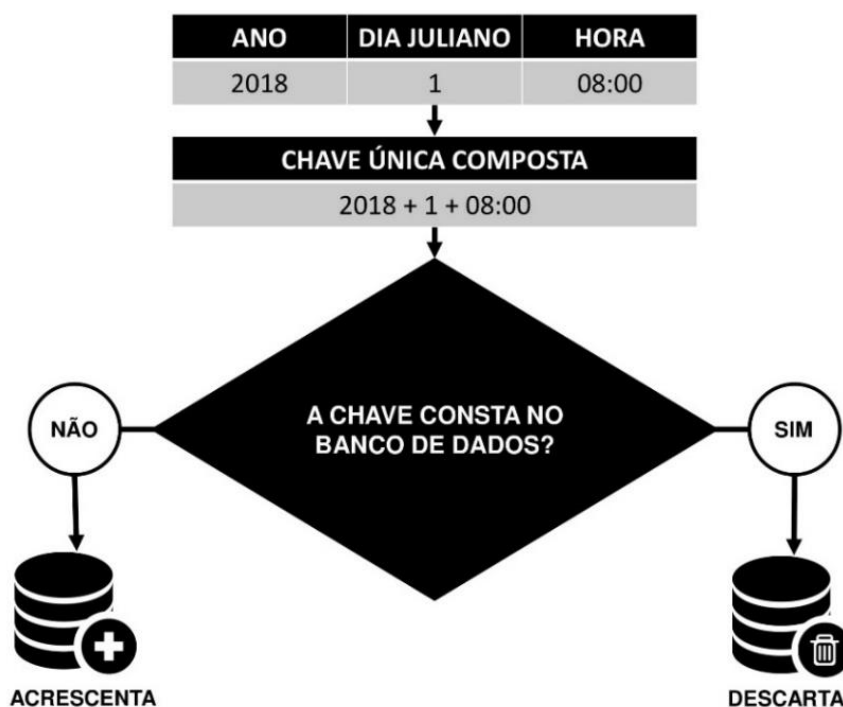
O controle de qualidade e análise de consistência proposta consiste em submeter as medidas solares a uma sequência de análises computacionais em seis níveis. As análises tem como objetivo identificar a consistência por meio da eliminação de duplicidade nos dados (item 3.4.1), determinar o ângulo de elevação solar onde as medidas estejam livres de incertezas (item 3.4.2), estabelecer limites inferiores (item 3.4.3) e superiores (item 3.4.4) fisicamente possíveis, comparar as componentes solares mensuradas por diferentes sensores com valores calculados (item 3.4.5) e determinar o intervalo de aceitação estatística (3.4.6) de acordo com o perfil de cobertura do céu do dia.

Todos os níveis de qualificação realizam análises por meio de condições de aprovação das medidas. Essas condições verificam se as medidas estão de acordo com o padrão definido pelas análises e as selecionam a compor um conjunto composto apenas de dados positivamente qualificados. No caso de uma medida ser rejeitada por uma condição ela é desconsiderada, isto é, não é selecionada a compor o conjunto de qualidade. Portanto o procedimento desenvolvido se distingue dos demais por não sinalizar as medidas incertas, mas selecioná-las a compor uma estrutura (tabela) de medidas consideradas qualificadas logicamente separada daquela onde são acondicionadas as medidas da série em formato de dados brutos.

3.4.1 Duplicidade de Dados

O MySQL possibilitou a criação de um mecanismo, com recursos nativos, que permitiu a identificação de registros duplicados na série de dados. Esse mecanismo foi criado por meio de uma restrição do tipo SQL UNIQUE, que garante a exclusividade de um registro na base de dados. Simplificadamente o mecanismo atua por meio da concatenação das variáveis de ano, dia juliano (dia decorrido no ano) e hora, transformando-as em uma chave única composta (Figura 8). Essa chave única garante que somente um registro, com as propriedades descritas, possa existir na estrutura de dados qualificados (tabela).

Figura 8 - Mecanismo de Identificação de Duplicidade.



Esse é o primeiro nível do procedimento de controle de qualidade, considerado uma análise da consistência do banco de dados, a partir do qual é criado um índice com todas as chaves da série de medidas. Quando uma chave, referente a uma linha com medidas, é identificada em consulta ao índice, automaticamente o mecanismo a descarta, pois ela é considerada duplicada. Isto é, os registros são rejeitados a compor a estrutura com medidas de qualidade. Este índice, quando criado em uma base com grande volume de dados gera uma carga extensa de processamento. Consequentemente o mecanismo de armazenamento MyISAM, citado anteriormente, tem alto desempenho no acesso a dados em disco no MySQL e não causa lentidão no processo.

3.4.2 Elevação Solar

O segundo nível do controle de qualidade das medidas foi responsável pela delimitação do período diurno (espaço de tempo onde há presença do sol) por meio do ângulo de elevação solar (E). A elevação solar compreende um intervalo de 0° a 90°, onde seu menor ângulo representa o sol no horizonte (0°) e o maior o sol ao meio dia (90°). O método de controle de qualidade da RMIB e do CIE especificam que

medidas acima de 2° e 4°, respectivamente, estão livres de incertezas (ver itens 2.1.4.2 e 2.1.4.3). Isto se dá pela maioria das adversidades ocorrerem em baixos ângulos, próximos aos instantes de nascer e pôr do sol. Quanto mais agudo esse ângulo, maior é a influência das incertezas nas medidas (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007).

Considera-se, então, a delimitação do ângulo de elevação solar um dos processos mais importantes para rejeitar medidas que contém aspectos espúrios. Não há um ângulo onde se possa considerar as medidas livres de incertezas. Diferentes investigações apontam que ângulos entre 2° e 10° podem ser delimitados como ponto mínimo de qualidade. No entanto, essa delimitação rejeita de 10 a 40 minutos de medidas no início e no fim do dia, representando até 1 hora e 20 minutos de leituras desconsideradas (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007). Esse fator pode influenciar no valor diário de radiação solar, obtido a partir do método de integração numérica.

Contemplando os aspectos abordados é proposto realizar uma comparação entre duas amostras. Uma delas (X) foi composta por medidas obtidas em ângulos de elevação solar maiores a 5° (rejeitando medidas onde $E \leq 5^\circ$) e a outra (Y) compreendendo todas as medidas obtidas no período diurno (onde $E \geq 0^\circ$). Tais amostras devem conter valores diários (integrados) das radiações solares global (H_G), difusa (H_D) e direta (H_B) em superfície horizontal, além da direta em incidência normal (H_{BN}). Essa comparação será feita por meio de uma análise do desvio relativo percentual (Equação 43) entre a amostra com medidas obtidas acima de 5° de elevação solar e a amostra com medidas obtidas para todo o período diurno em consideração aos resultados obtidos para cada dia do ano (onde i representa o dia decorrido do 1° ao 365°, referente ao período utilizado no estudo).

$$DR_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_i - Y_i|}{|Y_i|} \right) 100 \quad (43)$$

Em ambas as amostras deverão ser aplicadas todas as condições de controle de qualidade, garantindo a veracidade das medidas. O desvio relativo percentual (DR) permitirá determinar a magnitude da diferença dos valores da primeira amostra com relação aos valores da segunda amostra para cada dia do período selecionado como amostra (ARENALES; DAREZZO, 2008). Isto é, possibilitará analisar se rejeitar

medidas em baixos ângulos de elevação solar é uma iniciativa viável para o controle de qualidade de medidas solares.

3.4.3 Limites Inferiores Fisicamente Possíveis

O terceiro nível do controle de qualidade é compreendido pelas condições relacionadas aos limites inferiores fisicamente possíveis das irradiâncias. Esses limites são responsáveis por especificar os valores mínimos aceitos para as medidas de cada componente solar. No período noturno é possível que os sensores capturem valores negativos, devido a perda de calor por meio da irradiância infravermelha no piranômetro (LONG; SHI, 2008; MORENO-TEJERA; RAMÍREZ-SANTIGOSA; SILVA-PÉREZ, 2015). Em geral esses valores são mantidos em bases de dados. No entanto, neste estudo serão consideradas somente medidas diurnas.

Estipulou-se que a irradiância global deve apresentar dois limites mínimos. Primeiramente deve ser sempre positiva, apresentando uma medida maior que zero quando a elevação solar se dispõe entre 0° e 10° . Posteriormente deve-se obter outro limite com relação a transmissividade atmosférica (I_G/I_E) quando o ângulo de elevação solar se dispõe acima de 10° (JOURNÉE; BERTRAND, 2011). A irradiância difusa em superfície horizontal deve apresentar medidas acima de zero, e as irradiâncias direta em superfície horizontal e em incidência normal devem apresentar medidas iguais ou acima de zero, pois suas medidas podem estar ausentes em dias nebulosos. Assume-se que a global e difusa tenham de ser maior que zero, pois mesmo em condições de céu fortemente nublado, se tem a presença ínfima de raios difusos.

3.4.4 Limites Superiores Fisicamente Possíveis

O quarto nível do controle de qualidade compõe as condições relacionadas aos limites superiores fisicamente possíveis das irradiâncias, responsáveis por especificar os valores máximos para as medidas solares em cada instante do dia em condições ideais. Foram baseadas no procedimento de controle de qualidade da BSRN (ver item 2.1.4.1) do Programa de Pesquisa Climática Mundial da Organização Mundial de Meteorologia e no método da Comissão Internacional de Iluminação (ver item 2.1.4.3).

Foi estipulado que a irradiância global em superfície horizontal tem de ser menor que 120% da extraterrestre. Este limite foi determinado pela possibilidade da irradiância global ser maior que a extraterrestre por um curto período de tempo, devido aos efeitos difusivos das nuvens que não estão no caminho dos raios solares (SHI et al., 2008). Este efeito é conhecido como lupa e ocorre quando nuvens dispersas, próximas da localização aparente do sol, refletem parte da radiação solar no sensor do equipamento (MORENO-TEJERA; RAMÍREZ-SANTIGOSA; SILVA-PÉREZ, 2015).

Foi estabelecido que a irradiância difusa em superfície horizontal obtida por meio do método do anel de sombreamento teria de ser menor ou igual a 80% da irradiância extraterrestre. Este limite foi considerado uma verificação absoluta para triagem das medidas. Em semelhança ao efeito lupa, descrito para a irradiância global, este limite, também assegura que não existam maiores problemas para a irradiância difusa, devido ao espalhamento ou reflexão dos raios solares por curtos períodos de tempo (TREGENZA et al., 1994; GUEYMARD; RUIZ-ARIAS, 2016).

Foi determinado que a irradiância direta em incidência normal deve ser menor ou igual a constante solar (1367 W/m^2) corrigida pelo fator de excentricidade da órbita terrestre (Equação 41). Isto é, sua medida tem de ser menor que a constante solar ajustada pela distância Terra-Sol para cada dia do ano (LONG; DUTTON, 2002). Com relação a irradiância direta em superfície horizontal duas condições devem ser aplicadas para verificar os limites superiores. Sua medida deve ser menor ou igual a 95% da irradiância global, além de ser menor que a irradiância extraterrestre, fator que deve ser checado por meio da relação com a energia que atinge o topo da atmosfera (I_B/I_E).

Essa redundância de limites para a irradiância direta em superfície horizontal foi estabelecida no caso de haver ausência da irradiância global para comparação de medidas, acarretando em uma falha na condição imposta. O primeiro, e principal limite, é baseado na relação geométrica entre as componentes direta e difusa e a irradiância global ($I_D + I_B = I_G$). Pois, especificar que a irradiância direta tem de ser menor que a global é excessivamente restritivo, por conta da difusa não chegar a zero durante o dia, ainda que se tenha condições de céu ideais (alta transmissividade atmosférica), se terá minimamente medidas difusas (JOURNÉE; BERTRAND, 2011).

3.4.5 Comparação das Medidas

O quinto nível do controle de qualidade contém condições relacionadas às comparações das medidas entre os diferentes sensores. Tais condições verificam a relação entre as componentes da irradiância solar (I_D e I_B) e a total (I_G) por meio de três etapas. São baseadas no método de controle de qualidade da BSRN, considerado o nível mais restritivo de todos devido às condições impostas (LONG; DUTTON, 2002). Devem haver medidas para todas as irradiâncias (I_G , I_D e I_B) no período de tempo em que esse nível será aplicado. No caso de haver ausência de ao menos uma das medidas não se deve aplicar esse nível de qualidade.

A primeira etapa consiste em comparar a irradiância global medida com a soma das componentes difusa e direta em superfície horizontal, a tolerância para o resultado obtido tem relação com o ângulo de elevação solar. Deste modo, o valor absoluto da razão entre a global medida e a calculada tem de ser menor que 1,10 para ângulos de elevação solar maiores que 15° , ou menor que 1,15 para ângulos entre 0° e 15° . Essa condição somente poderá ser aplicada quando a soma das componentes ($I_D + I_B$) for maior que 50 W/m^2 (MORENO-TEJERA; RAMÍREZ-SANTIGOSA; SILVA-PÉREZ, 2015).

A segunda etapa consiste em verificar se a quantidade de irradiância difusa, com relação a global, atinge a tolerância determinada, também, pelo ângulo de elevação solar. Sendo assim a razão entre a difusa e a global tem de ser menor que 1,05 para ângulos de elevação solar maiores que 15° , ou menor que 1,10 para ângulos entre 0° e 15° . Essa condição somente poderá ser aplicada quando a irradiância global medida for superior a 50 W/m^2 (MORENO-TEJERA; RAMÍREZ-SANTIGOSA; SILVA-PÉREZ, 2015).

A terceira etapa consiste em verificar se a irradiância direta obtida pela diferença da global e difusa ($I_G - I_D$) em superfície horizontal é maior ou igual a irradiância direta medida menos 50 W/m^2 e menor ou igual a irradiância direta medida mais 50 W/m^2 . Essa condição é utilizada nas estações solarimétricas integradas à BSRN no Brasil, conhecida como SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais). É uma etapa que faz parte do processo de validação dos dados medidos (INPE, 2018).

3.4.6 Intervalo de Aceitação Estatística

O sexto nível do controle de qualidade é composto de uma análise das irradiâncias solares de acordo com seus intervalos de aceitação estatísticos. O intervalo de aceitação é uma faixa de variação admissível para uma medida. Seus limites extremos representam os valores máximos e mínimos que uma mensuração pode atingir, atestando sua confiabilidade. Essa faixa de variação é denominada de zona de aceitação e deve ser obtida por meio da média (μ), do desvio padrão (σ) e do nível de confiança (BONAFARI, 2012; ALBERTAZZI, 2018).

O intervalo de aceitação para as medidas solares deve ser segmentado para os quatro diferentes tipos de cobertura de céu (Tabela 5). A cobertura de céu é obtida por meio do índice de transmissividade atmosférica (K_T), mediante a razão entre a irradiância global e a extraterrestre em superfície horizontal (I_G/I_E). Em vista disso deve-se obter os parâmetros requeridos de acordo com as coberturas de céu em função de cada dia de medidas da série histórica.

Tabela 5 - Classes do Intervalo de Aceitação das Medidas Solares.

Classe	Cobertura de Céu	Transmissividade Atmosférica
1	Nublado	$0 \leq K_T < 0,35$
2	Parcialmente Nublado	$0,35 \leq K_T < 0,55$
3	Parcialmente Aberto	$0,55 \leq K_T < 0,65$
4	Aberto	$0,65 \leq K_T < 1$

Fonte: Escobedo et al. (2009).

Primeiro deve-se obter a classificação da cobertura de céu por meio do índice de transmissividade, posteriormente deve-se encontrar a média (\bar{I}_G , \bar{I}_D , \bar{I}_B e \bar{I}_{BN}), o desvio padrão (σ_{I_G} , σ_{I_D} , σ_{I_B} e $\sigma_{I_{BN}}$) e o multiplicador (k) do nível de confiança das irradiâncias solares. O nível de confiança é o parâmetro que indica a probabilidade da medida estar dentro da zona de aceitação (BONAFARI, 2012; ALBERTAZZI, 2018). Os mais comuns são 68,20% ($k = 1$), 95,40% ($k = 2$) e 99,50% ($k = 3$). Os limites do intervalo de aceitação das medidas solares deverão ser definidos utilizando o nível de confiança de 99,50% ($k = 2,57$), pois não é tão restritivo ou abrangente quanto os de 99,70% e 95,40% de confiança, respectivamente (Tabela 6). Este parâmetro pode ser definido aplicando o método e obtendo o percentual de rejeições, quando maior que

5% devem ser usados níveis de confiança mais abrangentes, quando menor pode-se utilizar os níveis de confiança de 95,40%, 99,50% ou 99,70% (YOUNES; CLAYWELL; MUNEEER, 2005; PASHIARDS; KALOGIROU, 2016; OLEFS et al., 2016).

Tabela 6 - Parâmetros do Intervalo de Aceitação Estatística.

Intervalo	Nível de Confiança
$\mu \pm 1\sigma$	68,20%
$\mu \pm 2\sigma$	95,40%
$\mu \pm 2,57\sigma$	99,50%
$\mu \pm 3\sigma$	99,70%

Fonte: Carrilho; Galo (2017).

Sendo assim definiu-se um intervalo de aceitação estatística para as medidas da irradiância global ($\bar{I}_G \pm 2,57 \sigma_{I_G}$), difusa ($\bar{I}_D \pm 2,57 \sigma_{I_D}$) e direta ($\bar{I}_B \pm 2,57 \sigma_{I_B}$) em superfície horizontal e direta em incidência normal ($\bar{I}_{BN} \pm 2,57 \sigma_{I_{BN}}$), exclusivamente para cada dia de mensuração, em função do tipo de cobertura de céu.

3.4.7 Equações

O controle de qualidade para as medidas da irradiância global (I_G), difusa (I_D) e direta (I_B) em superfície horizontal e irradiância direta (I_{BN}) em incidência normal são aplicados por meio de algoritmos implementados em SQL (instruções procedurais no banco de dados MySQL). Nos algoritmos uma série de condições (regras) validam a qualidade das medidas de acordo com cada nível do controle de qualidade. Tais condições implicam na aprovação de uma medida obtida. Isto é, uma medida é considerada suspeita de estar incorreta quando é rejeitada por uma das condições do procedimento de controle de qualidade.

O processo tem início criando uma tabela temporária no MySQL com as medidas que serão verificadas. Essa tabela é uma estrutura, formada por linhas e colunas, que armazena temporariamente as informações na memória do servidor de banco de dados. É amplamente utilizada para o processamento de dados e destruída dinamicamente quando a conexão lógica com o servidor é interrompida. Portanto, quando uma medida não é aprovada no controle de qualidade ela é descartada da tabela temporária. Contudo é mantida no servidor em sua tabela de armazenamento

dos dados brutos, pois pode fornecer valiosas informações a respeito da fonte de incerteza através de suas características.

É importante destacar, perante as colocações anteriores, que para cada requisição de verificação da qualidade das medidas solares um novo processo é iniciado no servidor de banco de dados MySQL. Portanto, as medidas ficam armazenadas em uma tabela efetiva em seu formato bruto, quando o procedimento de controle de qualidade é acionado elas são automaticamente enviadas a uma tabela temporária, onde são aplicadas todas as equações de qualidade (Tabela 7).

Tabela 7 - Equações de Qualidade e Consistência das Medidas Solares.

Nível	Descrição	Irradiância	Condição de Aprovação	Fonte
1	Duplicidade de Dados	I_G, I_D, I_B e I_{BN}	Ver item 3.4.1	Autor
2	Elevação Solar	I_G, I_D, I_B e I_{BN}	$E > 5^\circ$	CIE
3	Limites Inferiores Fisicamente Possíveis	I_G	$I_G/I_E \geq 10^{-4}$ ($E - 10$) quando ($E \geq 10^\circ$)	RMIB
		I_G	$I_G > 0$ quando ($0^\circ \leq E < 10^\circ$)	RMIB
		I_D	$I_D > 0$	CIE
		I_{BN}	$I_{BN} \geq 0$	CIE
		I_B	$I_B \geq 0$	CIE
4	Limites Superiores Fisicamente Possíveis	I_G	$I_G < (1,20 I_E)$	CIE
		I_D	$I_D \leq (0,80 I_E)$	CIE
		I_{BN}	$I_{BN} \leq (I_{SC} + FC_{EXC})$	BSRN
		I_B	$I_B/I_E < 1$	RMIB
		I_B	$I_B \leq (0,95 I_G)$	RMIB
5	Comparação das Medidas	I_G	$ I_G/(I_D + I_B) \leq 1,10$ quando ($E > 15^\circ$)	BSRN
		I_G	$ I_G/(I_D + I_B) \leq 1,15$ quando ($0^\circ \leq E \leq 15^\circ$)	BSRN
		I_D	$I_D/I_G \leq 1,05$ quando ($E > 15^\circ$)	BSRN
		I_D	$I_D/I_G \leq 1,10$ quando ($0^\circ \leq E \leq 15^\circ$)	BSRN
		I_B e I_{BN}	$(I_B - 50) \leq (I_G - I_D) \leq (I_B + 50)$	BSRN
6	Intervalo de Aceitação Estatística	I_G	$\bar{I}_G - (2,57 \sigma_{I_G}) \leq I_G \leq \bar{I}_G + (2,57 \sigma_{I_G})$	Autor
		I_D	$\bar{I}_D - (2,57 \sigma_{I_D}) \leq I_D \leq \bar{I}_D + (2,57 \sigma_{I_D})$	Autor
		I_B	$\bar{I}_B - (2,57 \sigma_{I_B}) \leq I_B \leq \bar{I}_B + (2,57 \sigma_{I_B})$	Autor
		I_{BN}	$\bar{I}_{BN} - (2,57 \sigma_{I_{BN}}) \leq I_{BN} \leq \bar{I}_{BN} + (2,57 \sigma_{I_{BN}})$	Autor

Cada critério da sequência de condições de aprovação do controle de qualidade é denominada de equação. No esquema anterior elas são apresentadas por níveis, onde pode-se ver sua descrição, a irradiância em que as condições são aplicadas, a condição de aprovação propriamente dita e a fonte de onde se originou a condição. No caso onde a fonte esta indicada como BSRN a condição foi obtida no método de controle de qualidade da Rede de Radiação em Superfície Terrestre (ver item 2.1.4.1), onde for indicada como RMIB foi retirada do método do Instituto Meteorológico Real da Belgica (ver item 2.1.4.2), quando for indicada como CIE foi selecionada do método da Comissão Internacional de Iluminação (ver item 2.1.4.3), por fim, pode ser que a condição tenha sido desenvolvida neste estudo (marcada como Autor).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O controle de qualidade foi implementado sequencialmente por níveis (Tabela 7). O item 4.1 apresenta em números a validação da série histórica de medidas do Laboratório de Radiometria Solar (1996 a 2017). O item 4.2 apresenta detalhadamente a análise de duplicidade de dados. O item 4.3 descreve o processo de delimitação da elevação solar e a análise das amostras das radiações diárias (integração numérica). Os itens 4.4 e 4.5 exibem, respectivamente, o resultado da definição dos limites inferiores e superiores fisicamente possíveis. O item 4.6 apresenta os resultados das comparações das medidas. Por fim, o item 4.7 mostra o comportamento das medidas perante o intervalo de aceitação estatística.

4.1 Validação da Série de Medidas

A série histórica do Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) de Botucatu compreende aproximadamente 23 anos de medidas das irradiâncias global e difusa em superfície horizontal, e cerca de 16 anos de medidas das irradiâncias direta em superfície horizontal e em incidência normal. Há uma lacuna no ano de 2010 e no período de 2013 a 2017 da irradiância direta, causada por adversidades técnicas no rastreador solar, dispositivo utilizado na obtenção das medidas. A global é a que compreende a maior quantidade de medidas, seguida da difusa e da direta respectivamente.

O controle de qualidade foi aplicado subdividido em seis níveis de análises. Os níveis foram desenvolvidos para atuar de maneira sequencial, uma vez que, as primeiras análises são genéricas a todas as irradiâncias e as últimas são específicas a cada componente solar. Todo processo foi segmentado de maneira a relatar os resultados da análise de duplicidade (1), delimitação do ângulo de elevação solar (2), definição dos limites fisicamente possíveis inferiores (3) e superiores (4), comparação das medidas das componentes solares (5) e determinação dos intervalos de aceitação estatística (6).

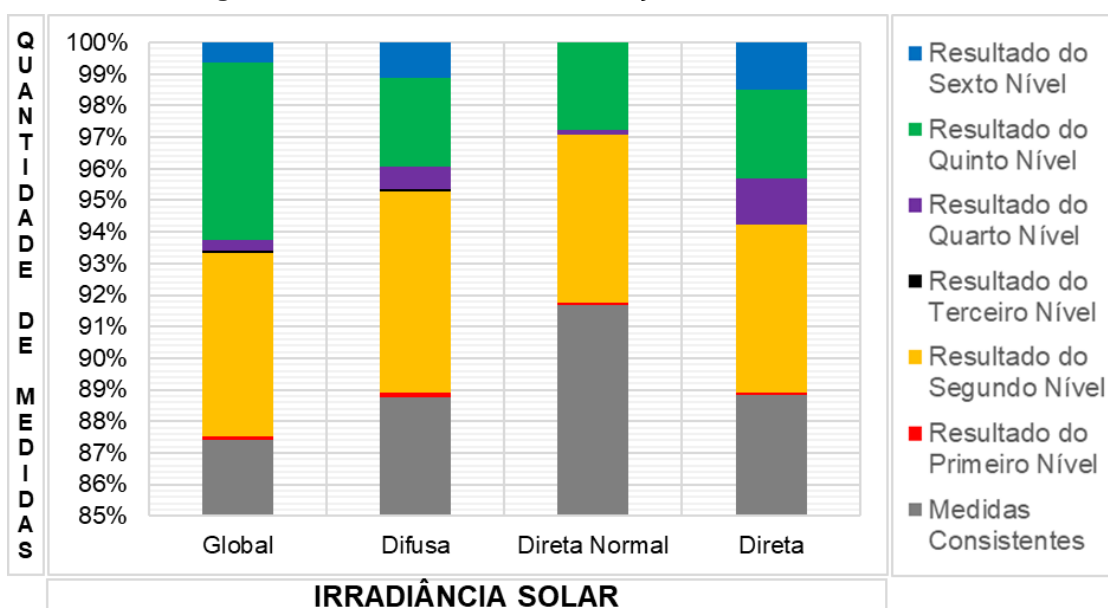
Para a irradiância global o nível de controle de qualidade que apresentou maior rejeição de medidas foi o segundo, contemplando um total de 5,8%, enquanto o primeiro e o terceiro nível tiveram uma quantidade similar de rejeições, atingindo um total de 0,1% cada. No total 12,6% de suas medidas foram rejeitadas. Para a

irradiância direta atribui-se a maior rejeição no segundo nível, contemplando um total de 6,4%. A menor rejeição foi obtida no primeiro e terceiro nível, similarmemente, atingindo 0,1%. No total 11,2% de suas medidas foram rejeitadas.

Para as irradiâncias direta em superfície horizontal e em incidência normal os três primeiros níveis obtiveram o mesmo resultado. Com maiores rejeições no segundo nível, atingindo um total de 5,3%. Para a direta em incidência normal os níveis três e seis não obtiveram rejeições. No total 8,3% das medidas foram rejeitadas. Para a direta em superfície horizontal o terceiro nível não teve rejeição de medidas. Acumulando no final um total de 11,2% de rejeições.

Visto isso, a irradiância direta em incidência normal foi a que obteve maior quantidade de medidas consistentes (91,7%) e a global a menor (88,8%). Em referência a validação de todas as irradiâncias o segundo nível de controle de qualidade (delimitação da elevação solar) foi o que obteve a maior parcela na quantidade final de medidas rejeitadas (média de 5,7%), enquanto o terceiro nível a menor representação (média de 0,05%). Os resultados podem ser observados na ilustração a seguir (Figura 9), onde é importante se atentar a escala do gráfico, uma vez que a irradiância com maior taxa de medidas rejeitadas (considerada incorretas) continha um total de 88,8% de medidas qualificadas.

Figura 9 - Resultado Visual da Validação da Série de Medidas.



O resultado numérico do controle de qualidade (Tabela 8) apontou, no primeiro nível, uma média de 0,1% (em torno de 1.060 pontos) de medidas duplicadas

com relação à todas as componentes solares (I_G , I_D , I_B e I_{BN}). O segundo nível demonstrou a maior quantidade de rejeição de medidas. Em média 5,7% (em torno de 51.301 pontos) das medidas foram rejeitadas com relação ao total. O terceiro nível permitiu identificar uma média de 0,08% (em torno de 839 pontos) de medidas incertas das irradiâncias global e difusa horizontal. Neste caso, as irradiâncias direta horizontal e em incidência normal não apresentaram incertezas.

O quarto nível de controle de qualidade permitiu identificar uma média de 0,6% (em torno de 4.233 pontos) de medidas incertas para todas as irradiâncias. Em que a irradiância direta em superfície horizontal foi a que demonstrou maior quantidade de aspectos espúrios. O quinto nível identificou e descartou 3,5% (em torno de 32.388 pontos) das medidas solares. A irradiância global em superfície horizontal foi a que apresentou a maior quantidade de medidas desconsideradas. Por fim, o sexto nível identificou uma média de 0,8% (em torno de 7.344 pontos) de medidas consideradas discrepantes com relação aos intervalos estatísticos. Neste caso a irradiância direta em incidência normal não teve medida alguma rejeitada.

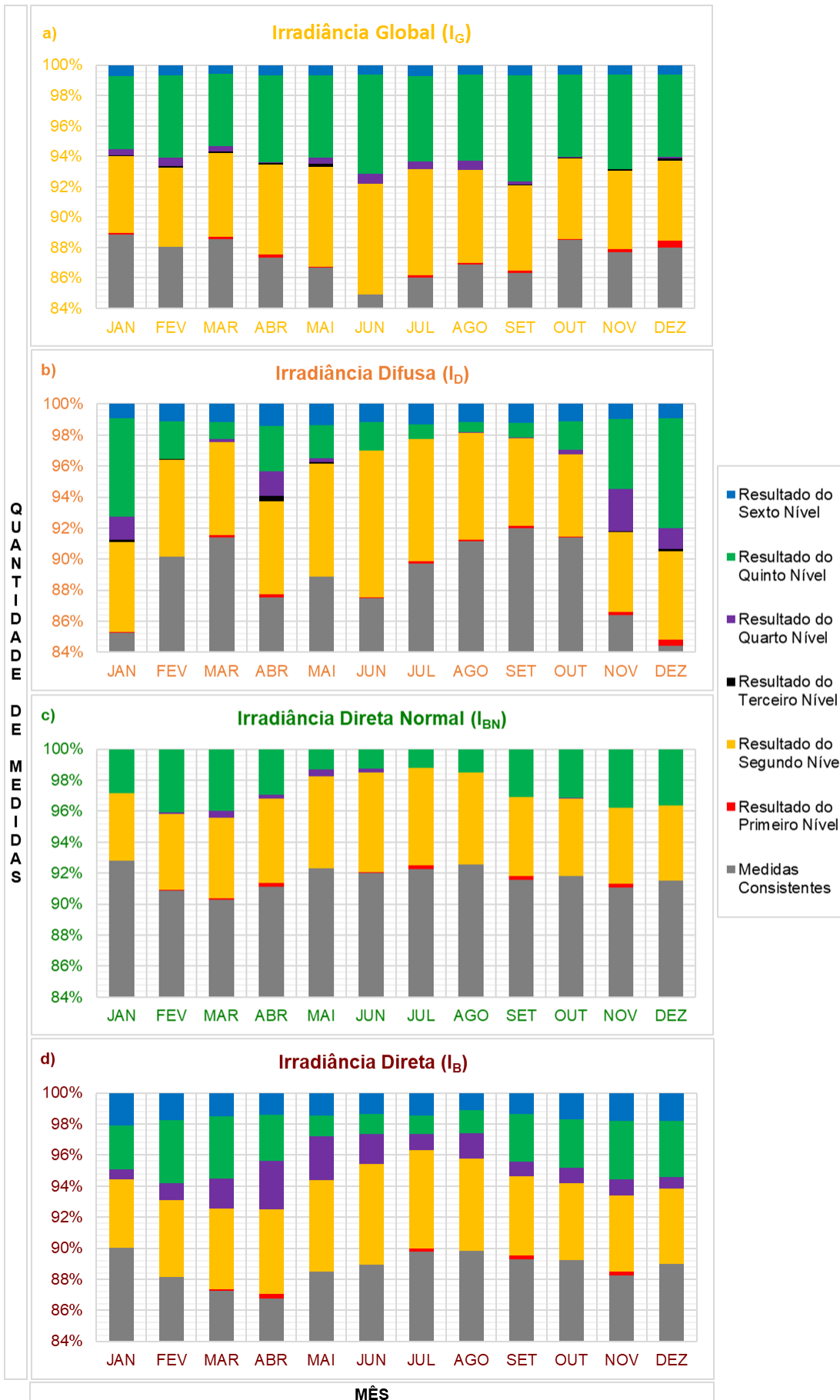
Tabela 8 - Resultado Numérico da Validação da Série de Medidas.

IS	Nível do Controle de Qualidade							
	DB		1		2		3	
	N	%	N	%	N	%	N	%
I_G	1.067.441	100	1.066.011	99,9	1.004.195	94,1	1.003.301	94,0
I_D	1.051.378	100	1.049.955	99,9	982.720	93,5	981.935	93,4
I_{BN}	715.587	100	714.893	99,9	676.816	94,6	676.816	94,6
I_B	715.587	100	714.893	99,9	676.816	94,6	676.816	94,6
\bar{I}	887.498	100	886.438	99,9	614.024	94,2	834.717	94,1
IS	DB		4		5		6	
	N	%	N	%	N	%	N	%
	I_G	1.067.441	100	999.867	93,7	939.730	88,0	932.944
I_D	1.051.378	100	974.632	92,7	945.054	89,9	933.275	88,8
I_{BN}	715.587	100	675.937	94,5	656.018	91,7	656.018	91,7
I_B	715.587	100	666.356	93,1	646.437	90,3	635.632	88,8
\bar{I}	887.498	100	829.198	93,5	796.810	90,0	789.465	89,0

Legenda: IS - Irradiância Solar; DB - Dados Brutos; N - Quantidade de Medidas; % - Quantidade de Dados em Percentual com Relação ao Total (Dados Brutos); I_G - Irradiância Global; I_D - Irradiância Difusa; I_B - Irradiância Direta; I_{BN} - Irradiância Direta Normal; \bar{I} - Irradiância Média.

Um comportamento sazonal foi constatado com relação as medidas rejeitadas (inconsistentes) pelos níveis de qualidade para todas as componentes solares (I_G , I_D , I_{BN} e I_B). Percebe-se que os maiores percentuais de rejeições, em comparação a quantidade total de medidas (1996 a 2017), para a irradiância global (Figura 10a) ocorreu no mês de Junho, somando um total de 12,7% de medidas desconsideradas. Para a irradiância difusa (Figura 10b) a maior rejeição ocorreu no mês de Dezembro, somando um total de 15,6% de medidas desconsideradas. Para as irradiâncias direta em incidência normal (Figura 10c) e em superfície horizontal (Figura 10d) a maior rejeição ocorreu nos meses de Março e Abril, somando um total de 9,74% e 13,19%, respectivamente, de medidas desconsideradas.

Figura 10 - Resultado Visual da Validação da Série de Medidas por Mês.



A irradiância global (Tabela 9) teve um percentual de rejeições similar para todos os meses com relação ao primeiro nível, obtendo uma média de 0,13%. O segundo nível teve a maior rejeição em Junho (7,2%) e a menor em Janeiro (5,1%), totalizando uma média de 5,8%. O terceiro nível não apresentou grandes rejeições. O quarto nível teve a maior rejeição em Junho (0,68%) e a menor em Novembro (0,01%), totalizando uma média de 0,33%. O quinto nível teve a maior rejeição em Junho (6,53%) e a menor em Março (4,73%), totalizando uma média de 5,66%. O sexto nível teve a maior rejeição em Julho (0,74%) e a menor em Março (0,59%). No final do procedimento foi totalizada uma média de 12,7% de medidas rejeitadas.

Tabela 9 - Resultado Numérico da Validação Mensal da Irradiância Global Medida.

Irradiância Global (I_G)								
Mês	DB		Nível do Controle de Qualidade					
	N	%	1		2		3	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	100.570	100	100.503	99,9	95.394	94,9	95.327	94,8
Fev	87.898	100	87.873	99,9	83.319	94,8	83.209	94,7
Mar	93.141	100	92.993	99,8	87.877	94,3	87.750	94,2
Abr	89.165	100	88.975	99,8	83.720	93,9	83.645	93,8
Mai	85.401	100	85.381	99,9	79.764	93,4	79.595	93,2
Jun	80.241	100	80.221	99,9	74.411	92,7	74.400	92,7
Jul	82.367	100	82.245	99,9	76.485	92,9	76.482	92,9
Ago	83.565	100	83.510	99,9	78.390	93,8	78.384	93,8
Set	84.675	100	84.530	99,8	79.806	94,2	79.744	94,2
Out	94.604	100	94.566	99,9	89.538	94,6	89.470	94,6
Nov	87.169	100	86.998	99,8	82.495	94,6	82.433	94,6
Dez	98.645	100	98.224	99,6	92.996	94,3	92.862	94,1
Mês	DB		4		5		6	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	100.570	100	94.941	94,4	90.092	89,6	89.405	88,9
Fev	87.898	100	82.738	94,1	77.994	88,7	77.395	88,1
Mar	93.141	100	87.440	93,9	83.031	89,1	82.483	88,6
Abr	89.165	100	83.560	93,7	78.481	88,0	77.893	87,4
Mai	85.401	100	79.242	92,8	74.597	87,3	74.043	86,7
Jun	80.241	100	73.854	92,0	68.616	85,5	68.140	84,9
Jul	82.367	100	76.045	92,3	71.444	86,7	70.855	86,0
Ago	83.565	100	77.860	93,2	73.130	87,5	72.621	86,9
Set	84.675	100	79.583	94,0	73.642	87,0	73.101	86,3
Out	94.604	100	89.421	94,5	84.318	89,1	83.723	88,5
Nov	87.169	100	82.421	94,6	76.970	88,3	76.454	87,7
Dez	98.645	100	92.762	94,0	87.415	88,6	86.831	88,0

Legenda: DB - Dados Brutos; N - Quantidade de Dados; % - Quantidade de Dados Percentuais em Relação ao Total (Dados Brutos).

No primeiro nível a irradiância difusa (Tabela 10) teve um maior percentual de rejeições em Dezembro (0,5%) e menor em Fevereiro (0,03%), totalizando uma média de 0,13%. O segundo nível teve a maior rejeição em Julho (6,1%) e a menor em Janeiro (4,3%), totalizando uma média de 5,05%. O terceiro nível não apresentou grandes rejeições. O quarto nível teve a maior rejeição em Novembro (2,7%) e não teve rejeições em Julho, totalizando uma média de 0,7%. O quinto nível teve a maior rejeição em Dezembro (7,07%) e a menor em Agosto (0,6%), totalizando uma média de 2,7%. O sexto nível teve a maior rejeição em Abril (1,43%) e a menor em Janeiro (0,9%), totalizando uma média de 1,2%. No final do procedimento uma média de 11,2% de medidas rejeitadas pelo controle de qualidade foi obtida.

Tabela 10 - Resultado Numérico da Validação Mensal da Irradiância Difusa Medida.

Irradiância Difusa (I_b)								
Mês	DB		Nível do Controle de Qualidade					
	N	%	1		2		3	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	98.642	100	98.575	99,9	92.856	94,1	92.739	94,0
Fev	86.885	100	86.860	99,9	81.437	93,7	81.423	93,7
Mar	90.514	100	90.358	99,8	84.955	93,9	84.940	93,8
Abr	87.426	100	87.238	99,7	82.024	93,8	81.704	93,5
Mai	85.219	100	85.199	99,9	78.988	92,7	78.912	92,6
Jun	81.322	100	81.302	99,9	73.607	90,5	73.594	90,5
Jul	81.195	100	81.076	99,8	74.690	92,0	74.690	92,0
Ago	82.237	100	82.182	99,9	76.488	93,0	76.487	93,0
Set	83.031	100	82.886	99,8	78.195	94,2	78.188	94,2
Out	92.845	100	92.807	99,9	87.864	94,6	87.858	94,6
Nov	85.315	100	85.146	99,8	80.760	94,7	80.721	94,6
Dez	96.747	100	96.326	99,5	90.856	93,9	90.679	93,7
Mês	DB		4		5		6	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	98.642	100	91.244	92,5	84.986	86,2	84.109	85,3
Fev	86.885	100	81.404	93,7	79.286	91,3	78.345	90,2
Mar	90.514	100	84.749	93,6	83.767	92,5	82.754	91,4
Abr	87.426	100	80.303	91,9	77.780	89,0	76.575	87,6
Mai	85.219	100	78.683	92,3	76.873	90,2	75.744	88,9
Jun	81.322	100	73.578	90,5	72.108	88,7	71.183	87,5
Jul	81.195	100	74.689	92,0	73.917	91,0	72.883	89,8
Ago	82.237	100	76.470	93,0	75.951	92,4	74.992	91,2
Set	83.031	100	78.173	94,1	77.378	93,2	76.400	92,0
Out	92.845	100	87.587	94,3	85.913	92,5	84.871	91,4
Nov	85.315	100	78.376	91,9	74.555	87,4	73.749	86,4
Dez	96.747	100	89.376	92,4	82.540	85,3	81.670	84,4

Legenda: DB - Dados Brutos; N - Quantidade de Dados; % - Quantidade de Dados Percentuais em Relação ao Total (Dados Brutos).

A irradiância direta normal (Tabela 11) teve a maior rejeição, para o primeiro nível, em Abril (0,3%) e um valor igual em diferentes meses (0,01%), obtendo uma média de 0,1%. O segundo nível teve a maior rejeição em Junho (6,5%) e a menor em Janeiro (4,4%). O terceiro nível não apresentou rejeições. O quarto nível teve a maior rejeição em Março (0,475%) e diversos meses não tiveram rejeições, totalizando uma média de 0,13%. O quinto nível teve a maior rejeição em Fevereiro (4,1%) e a menor em Julho (1,2%), totalizando uma média de 2,7%. O sexto nível não teve rejeições. No final do procedimento foi totalizada uma média de 8,3% de medidas rejeitadas pelo controle de qualidade.

Tabela 11 - Resultado Numérico da Validação Mensal da Irradiância Direta Normal Medida.

Irradiância Direta Normal (I_{BN})								
Mês	DB		Nível do Controle de Qualidade					
	N	%	1		2		3	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	66.674	100	66.670	99,9	63.743	95,6	63.743	95,6
Fev	55.782	100	55.775	99,9	53.022	95,1	53.022	95,1
Mar	60.235	100	60.166	99,9	57.046	94,7	57.046	94,7
Abr	56.741	100	56.578	99,7	53.494	94,3	53.494	94,3
Mai	56.545	100	56.538	99,9	53.190	94,1	53.190	94,1
Jun	51.082	100	51.072	99,9	47.768	93,5	47.768	93,5
Jul	54.060	100	53.944	99,8	50.529	93,5	50.529	93,5
Ago	56.723	100	56.721	99,9	53.346	94,0	53.346	94,0
Set	59.988	100	59.844	99,8	56.782	94,7	56.782	94,7
Out	63.926	100	63.921	99,9	60.741	95,0	60.741	95,0
Nov	64.901	100	64.740	99,8	61.576	94,9	61.576	94,9
Dez	68.930	100	68.924	99,9	65.579	95,1	65.579	95,1
Mês	DB		4		5		6	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	66.674	100	63.743	95,6	61.864	92,8	61.864	92,8
Fev	55.782	100	52.971	95,0	50.701	90,9	50.701	90,9
Mar	60.235	100	56.760	94,2	54.368	90,3	54.368	90,3
Abr	56.741	100	53.365	94,1	51.691	91,1	51.691	91,1
Mai	56.545	100	52.926	93,6	52.189	92,3	52.189	92,3
Jun	51.082	100	47.653	93,3	47.009	92,0	47.009	92,0
Jul	54.060	100	50.528	93,5	49.881	92,3	49.881	92,3
Ago	56.723	100	53.345	94,0	52.505	92,6	52.505	92,6
Set	59.988	100	56.781	94,7	54.925	91,6	54.925	91,6
Out	63.926	100	60.711	95,0	58.692	91,8	58.692	91,8
Nov	64.901	100	61.575	94,9	59.111	91,1	59.111	91,1
Dez	68.930	100	65.579	95,1	63.082	91,5	63.082	91,5

Legenda: DB - Dados Brutos; N - Quantidade de Dados; % - Quantidade de Dados Percentuais em Relação ao Total (Dados Brutos).

A irradiância direta (Tabela 12), no primeiro nível, teve o maior percentual de rejeição em Abril (0,3%) e o menor em Agosto (0,004%), totalizando uma média de 0,1%. O segundo nível teve a maior rejeição em Junho (6,5%) e a menor em Janeiro (4,4%), totalizando uma média de 5,4%. O terceiro nível não apresentou rejeições. O quarto nível teve a maior rejeição em Abril (3,2%) e a menor em Janeiro (0,7%), totalizando uma média de 1,5%. O quinto nível teve a maior rejeição em Fevereiro (4,1%) e a menor em Julho (1,2%), totalizando uma média de 2,7%. O sexto nível teve a maior rejeição em Janeiro (2,1%) e a menor em Agosto (1,1%), totalizando uma média de 1,6%. No final uma média de 11,2% das medidas foram.

Tabela 12 - Resultado Numérico da Validação Mensal da Irradiância Direta Medida.

Irradiância Direta (I_b)								
Mês	DB		Nível do Controle de Qualidade					
	N	%	1		2		3	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	66.674	100	66.670	99,9	63.743	95,6	63.743	95,6
Fev	55.782	100	55.775	99,9	53.022	95,1	53.022	95,1
Mar	60.235	100	60.166	99,9	57.046	94,7	57.046	94,7
Abr	56.741	100	56.578	99,7	53.494	94,3	53.494	94,3
Mai	56.545	100	56.538	99,9	53.190	94,1	53.190	94,1
Jun	51.082	100	51.072	99,9	47.768	93,5	47.768	93,5
Jul	54.060	100	53.944	99,8	50.529	93,5	50.529	93,5
Ago	56.723	100	56.721	99,9	53.346	94,0	53.346	94,0
Set	59.988	100	59.844	99,8	56.782	94,7	56.782	94,7
Out	63.926	100	63.921	99,9	60.741	95,0	60.741	95,0
Nov	64.901	100	64.740	99,8	61.576	94,9	61.576	94,9
Dez	68.930	100	68.924	99,9	65.579	95,1	65.579	95,1
Mês	DB		4		5		6	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Jan	66.674	100	63.301	94,9	61.422	92,1	60.118	90,0
Fev	55.782	100	52.411	94,0	50.141	89,9	49.241	88,3
Mar	60.235	100	55.857	92,7	53.465	88,8	52.577	87,3
Abr	56.741	100	51.702	91,1	50.028	88,2	49.255	86,8
Mai	56.545	100	51.591	91,2	50.854	89,9	50.045	88,5
Jun	51.082	100	46.773	91,6	46.129	90,3	45.468	89,0
Jul	54.060	100	49.975	92,4	49.328	91,2	48.573	89,9
Ago	56.723	100	52.428	92,4	51.588	90,9	50.958	89,8
Set	59.988	100	56.219	93,7	54.363	90,6	53.593	89,3
Out	63.926	100	60.130	94,1	58.111	90,9	57.089	89,3
Nov	64.901	100	60.896	93,8	58.432	90,0	57.322	88,3
Dez	68.930	100	65.073	94,4	62.576	90,8	61.393	89,0

Legenda: DB - Dados Brutos; N - Quantidade de Dados; % - Quantidade de Dados Percentuais em Relação ao Total (Dados Brutos).

Foi considerado que 87,3% das medidas da irradiância global em superfície horizontal estavam positivamente qualificadas. Para a irradiância difusa em superfície horizontal o percentual foi de 87,66% do total. Para a irradiância direta, também em superfície horizontal, o percentual foi de 88,22%. Logo, para a irradiância direta em incidência normal, constatou-se um percentual de 86,91% de medidas devidamente qualificadas em consideração ao total.

A seguir (item 4.2) será apresentada uma análise aprofundada da qualificação de primeiro nível, responsável pela identificação de pontos duplicados nas medidas das irradiâncias solares ao longo dos anos.

4.2 Duplicidade de Dados

Uma análise visual realizada no pré-processamento das medidas (etapa de preparação dos dados para importação no MySQL), permitiu identificar duplicidades de medidas com relação a alguns períodos em que foram registradas. Conseqüentemente, a análise de duplicidade (primeiro nível) do controle de qualidade, implementada por meio de um mecanismo de exclusividade na tecnologia MySQL, permitiu constatar que 0,13% (equivalente a 1430 pontos) das medidas da irradiância global estavam duplicadas. Com relação a irradiância difusa a percentagem de medidas duplicadas foi de 0,13% (correspondente a 1423 pontos). A duplicidade de pontos da irradiância direta em superfície horizontal e em incidência normal foi de 0,10% (equivalente a 694 pontos) das medidas.

Os pontos duplicados para as irradiâncias solares tiveram origem de adversidades técnicas nos dispositivos de aquisição das medidas (CR23X Micrologger® e CR3000 Micrologger®). Tais contratemplos ocorreram, principalmente, devido a interrupção no fornecimento de energia. No entanto, podem estar relacionados também a imprecisões nas atividades de processamento de grandes volumes de dados, sobretudo, em processos de conversão de horas e datas.

O mecanismo de identificação de duplicidade permitiu avaliar, em função do ano, o resultado obtido (Tabela 10). O ano de 2013 continha a maior quantidade de dados duplicados para as irradiâncias global e difusa (cerca de 0,94% e 0,95% do total, respectivamente). Para a irradiância direta o ano de 2011 foi o que apresentou a maior quantidade de dados duplicados (cerca de 0,44% do total).

Tabela 13 - Resultado Numérico das Medidas Duplicadas.

Ano	Quantidade de Medidas Duplicadas								
	I _G			I _D			I _{BN} e I _B		
	DB	DD		DB	DD		DB	DD	
	N	N	%	N	N	%	N	N	%
1996	48.675	006	0,01	49.891	006	0,01	39.479	005	0,01
1997	51.404	182	0,35	50.990	181	0,35	49.129	181	0,37
1998	51.230	016	0,03	50.789	016	0,03	49.527	016	0,03
1999	48.947	000	0,00	48.321	000	0,00	47.609	000	0,00
2000	51.967	001	0,00	51.315	001	0,00	49.867	001	0,00
2001	51.588	149	0,29	48.771	149	0,31	47.760	148	0,31
2002	50.573	000	0,00	50.203	000	0,00	49.067	000	0,00
2003	51.725	000	0,00	51.390	000	0,00	48.902	000	0,00
2004	51.302	003	0,01	50.988	003	0,01	49.113	003	0,01
2005	51.470	116	0,23	51.174	113	0,22	48.399	116	0,24
2006	51.643	008	0,02	51.788	008	0,02	50.647	008	0,02
2007	47.890	001	0,00	47.206	001	0,00	45.982	001	0,00
2008	50.519	001	0,00	46.770	000	0,00	48.168	000	0,00
2009	50.883	035	0,07	45.748	035	0,08	43.912	035	0,08
2010	50.691	050	0,10	50.465	050	0,10	-	-	-
2011	51.218	279	0,54	50.253	277	0,55	41.178	180	0,44
2012	45.955	007	0,02	46.048	007	0,02	06.848	000	0,00
2013	48.483	458	0,94	48.107	458	0,95	-	-	-
2014	51.205	012	0,02	51.519	012	0,02	-	-	-
2015	51.494	076	0,15	51.494	076	0,15	-	-	-
2016	26.299	030	0,11	26.299	030	0,11	-	-	-
2017	32.280	000	0,00	31.849	000	0,00	-	-	-
Total	1.067.441	1430	0,13	1.051.378	1423	0,13	715.587	694	0,01

Legenda: DB - Dados Brutos; DD - Dados Duplicados; N - Quantidade de Dados; % - Percentual de Dados Duplicados; I_G - Irradiância Global; I_D - Irradiância Difusa; I_B e I_{BN} - Irradiância Direta.

A seguir (item 4.3) será apresentada a qualificação de segundo nível. Em que poder-se-á compreender que as medidas obtidas nos instantes posteriores ao nascer e antecessores ao pôr do sol, podem conter incertezas.

4.3 Elevação Solar

Em consequência as incertezas relatadas (ver item 3.4.2), foi demarcado que medidas com elevação solar abaixo ou igual a 5° (qualificação de segundo nível) deveriam ser desconsideradas, por causa dos aspectos espúrios que as tomam nesse

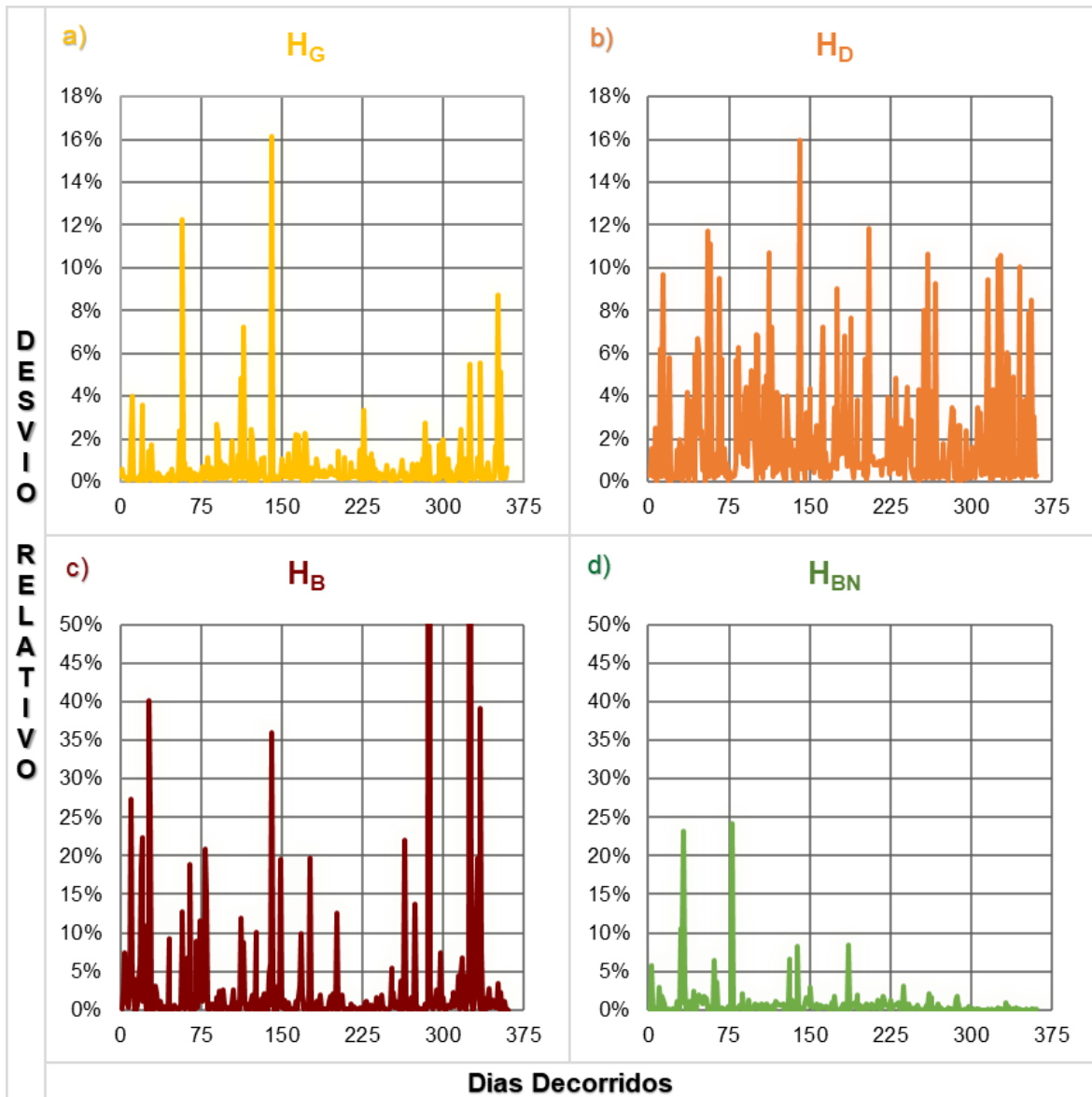
período do dia. Essa demarcação foi a responsável pela maior rejeição das medidas solares, pelo fato de desconsiderar medidas dos 20 minutos após o nascer e 20 minutos antes do pôr do sol.

Neste nível do controle de qualidade a irradiância global teve 5,8% (equivalente a 61.816 pontos) de suas medidas descartadas. A irradiância difusa teve 6,4% (equivalente a 67.235 pontos) de suas medidas descartadas. Tal que as irradiâncias direta em superfície horizontal e em incidência normal tiveram 5,3% (equivalente a 38.077 pontos) de medidas desconsideradas.

Uma análise estatística do desvio relativo percentual (ver item 3.4.2 com referência na Equação 48) permitiu obter a magnitude da diferença entre duas amostras, uma com medidas acima do ângulo de elevação solar em 0° (período diurno completo) e a outra com medidas acima do ângulo de elevação solar em 5° (período diurno com desconsideração de valores incertos). Portanto, selecionou-se duas amostras com medidas do ano de 2005, cada uma contendo 361 valores diários (MJ/m^2). Em ambas foram aplicados os seis níveis de controle de qualidade. Esse período foi considerado uma vez que possui medidas concomitantes para todas as irradiâncias solares ao longo do ano.

Na Equação 48 (item 3.4.2) a amostra denominada de X representa os 361 valores diários das radiações global (H_G), difusa (H_D) e direta (H_B) em superfície horizontal e direta em incidência normal (H_{BN}) com medidas obtidas acima de 5° de elevação solar. Enquanto a amostra denominada de Y representa os 361 valores diários com medidas obtidas em todo o período diurno. Essa análise possibilitou determinar o quão próximos estão os valores de uma amostra com relação a outra ao longo dos dias do ano (Figura 11).

Figura 11 - Resultado dos Desvios Relativos Percentuais.



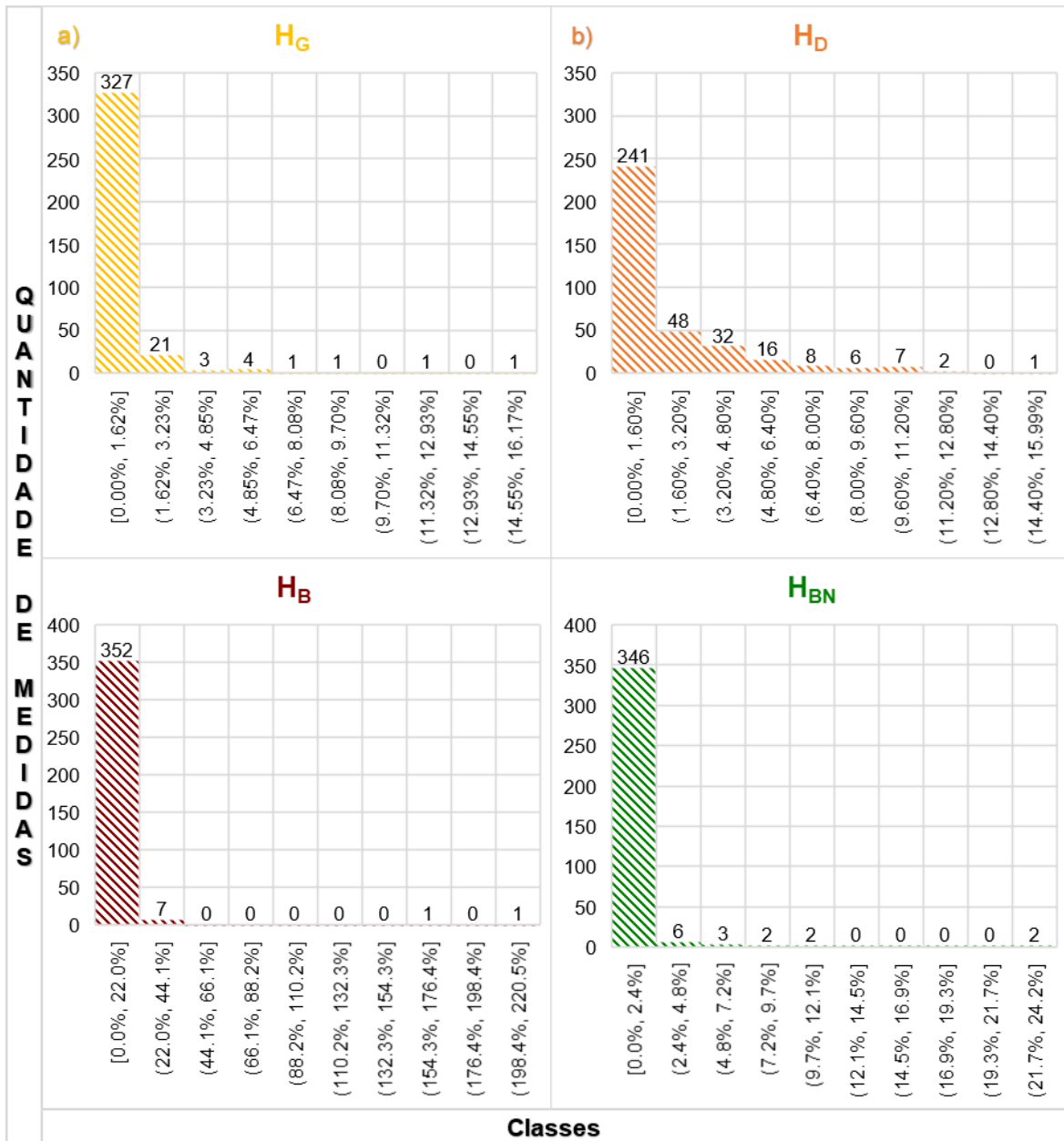
O maior desvio relativo obtido para a radiação global (H_G) foi de 16,17%, representando uma diferença de 0,3682 MJ/m² entre as amostras (Figura 11a). Pode-se perceber que a radiação difusa (H_D) apresenta uma maior oscilação dos desvios (Figura 11b), em comparação as demais radiações. Seu maior desvio foi de 15,99%, representando uma diferença de 0,3558 MJ/m² entre as amostras. O desvio relativo da radiação direta em superfície horizontal (H_B) foi expressivamente maior que os demais desvios (Figura 11c), ultrapassando a marca dos 100% e representando uma diferença de 0,0426 MJ/m² entre as amostras. Por fim, o desvio da radiação direta em incidência normal (H_{BN}) foi o que apresentou menor variação em relação aos demais,

atingindo um máximo de 24,16%, que representa uma diferença total de 0,0777 MJ/m² entre as amostras (Figura 11d).

Os pontos da radiação direta onde foram observados os maiores desvios, são justamente onde obteve-se valores menores que 1 MJ/m² no dia. Isto representa que essas ocorrências se deram em dias compreendidos por maior presença da radiação difusa, que caracteriza um dia nebuloso. Neste sentido os picos do desvio relativo percentual para a direta ocorreram por consequência do descarte dos 20 primeiros e últimos minutos de medidas, onde se teve maior presença de leituras oriundas diretamente do disco solar.

Com relação aos valores obtidos ao longo do ano foram constatados desvios médios de 0,63%, 1,89%, 3,30% e 0,66%, representando uma diferença média de 0,0725 MJ/m², 0,0948 MJ/m², 0,0402 MJ/m² e 0,0637 MJ/m² para as radiações global, difusa e direta em superfície horizontal e direta em incidência normal, respectivamente. Visto isso a radiação direta foi a que apresentou o maior desvio relativo percentual, enquanto a radiação global o menor.

Figura 12 - Histograma dos Desvios Relativos Percentuais.



Constatou-se que 91% dos valores da radiação global apresentaram um desvio entre 0,00% e 1,62%. Tal como 6% dos valores apresentaram um desvio entre 1,62% e 3,23%. Enquanto que o restante (3%) apresentou um desvio maior que 3,23% (Figura 12a). Foi constatado que 67% dos pontos da radiação difusa apresentaram um desvio relativo entre 0,00% e 1,60%. Tal como 13% dos pontos apresentaram um desvio entre 1,60% e 3,20%. Enquanto que o restante (20%) apresentou um desvio maior que 3,20% (Figura 12b).

Constatou-se, ainda, que 97% dos valores da radiação direta em superfície horizontal apresentaram um desvio entre 0,00% e 22,00%. Com duas ocorrências

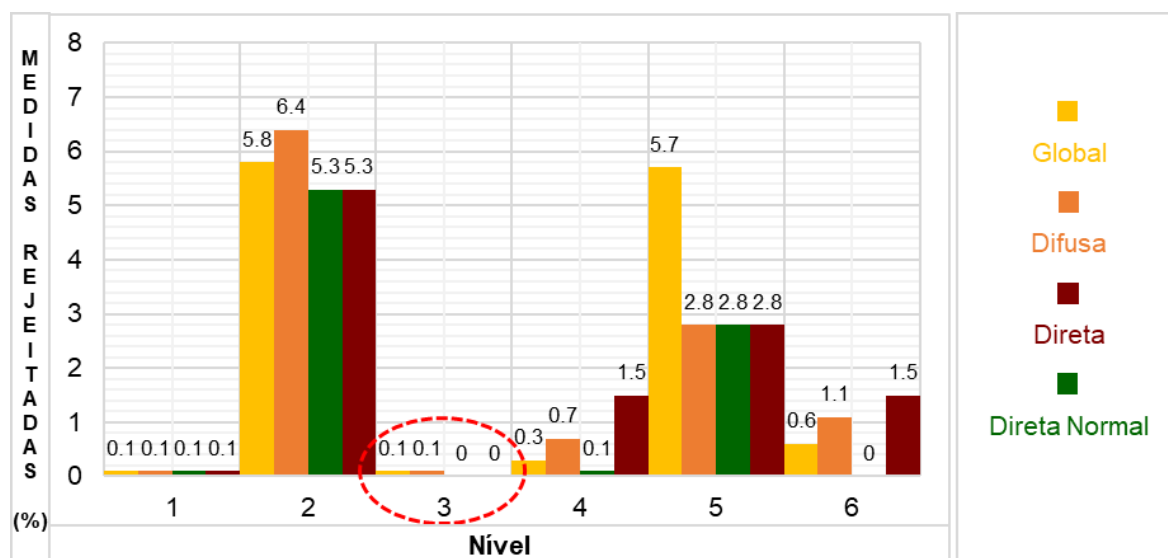
demasiadas, acima dos 154,3%. Foi constatado que 96% dos pontos da radiação direta em incidência normal apresentaram um desvio entre 0,00% e 2,40%. Com duas ocorrências maiores das demais entre 21,70% e 24,20%.

A seguir (item 4.4) será apresentada detalhadamente a qualificação de terceiro nível, relacionada aos valores inferiores que as irradiâncias podem atingir. Juntamente de seus resultados perante aplicação na série de medidas do Laboratório de Radiometria Solar.

4.4 Limites Inferiores Fisicamente Possíveis

Os limites inferiores fisicamente possíveis (qualificação de terceiro nível) forneceram valores mínimos para as irradiâncias poderem ser consideradas confiáveis pelo controle de qualidade. Independente do local e do clima, a superfície terrestre sempre receberá alguma radiação durante o dia (SHI et al., 2008). Seja ela diretamente, por meio do feixe solar, ou após sofrer espalhamento por algum constituinte atmosférico. Foi um dos níveis que apresentou menores quantidades de medidas rejeitadas (Figura 13).

Figura 13 - Resultado das Rejeições do Terceiro Nível de Qualidade.



Este nível é importante no sentido de descartar medidas negativas obtidas no período noturno e causadas, principalmente, pela perda de radiação infravermelha por

meio do sensor dos piranômetros (LONG; SHI, 2008). Essa questão afeta, além dos valores obtidos no período noturno, algumas leituras nas primeiras horas do dia.

Percebe-se, na ilustração anterior, que as irradiâncias direta em superfície horizontal e em incidência normal não tiveram medida alguma rejeitada. Este resultado para tais irradiâncias pode ser atribuído devido ao diferente processo de fabricação e operação do instrumento de mensuração (pireliômetro) em comparação com o instrumento de obtenção das medidas das irradiâncias global e difusa (piranômetro). Sendo assim, nessa qualificação a irradiância global teve 894 pontos rejeitados, de acordo com os limites inferiores estipulados. Enquanto que a difusa teve 785 pontos rejeitados (Tabela 14).

Tabela 14 - Resultado do Terceiro Nível de Qualificação.

IS	Nível				Resultado	
	2		3		N	%
	N	%	N	%		
I _G	1.004.195	94,1	1.003.301	94,0	894	0,09
I _D	982.720	93,5	981.935	93,4	785	0,08
I _{BN}	676.816	94,6	676.816	94,6	0	0,00
I _B	676.816	94,6	676.816	94,6	0	0,00

Legenda: IS - Irradiância Solar; N - Quantidade de Medidas; % - Quantidade de Dados em Percentual; I_G - Irradiância Global; I_D - Irradiância Difusa; I_B - Irradiância Direta; I_{BN} - Irradiância Direta Normal.

O resultado do terceiro nível de qualificação é obtido por meio da diferença das medidas que restaram após sua aplicação. Neste sentido, os indicativos foram obtidos em comparação com as medidas aprovadas no segundo e no terceiro nível de qualidade. Para a irradiância global 0,09% das medidas foram rejeitadas no terceiro nível, enquanto que para a irradiância difusa 0,08% das medidas foram rejeitadas.

A seguir (item 4.5) será apresentada a qualificação de quarto nível, relacionada aos valores superiores que as irradiâncias podem atingir. Juntamente de seus resultados perante aplicação nas medidas do Laboratório de Radiometria Solar.

4.5 Limites Superiores Fisicamente Possíveis

Os limites superiores fisicamente possíveis das irradiâncias solares (qualificação de quarto nível), foram obtidos, principalmente, em função da irradiância

extraterrestre (I_E). Assim como os limites inferiores fisicamente possíveis, essas foram as demarcações fundamentais no processo de controle de qualidade, pois garantiram que as irradiâncias solares (I_G , I_D , I_B e I_{BN}) estavam dentro de valores fisicamente aceitáveis para cada instante do dia e época do ano.

É possível que a irradiância global em superfície horizontal, em medições sub-horárias (neste caso, médias de 5 minutos), seja maior que a irradiância extraterrestre durante curtos períodos de tempo (JOURNÉE; BERTRAND, 2011). Investigações indicam que isto pode ocorrer com maior frequência em regiões mais altas, na presença de nuvens convectivas (grande extensão vertical), que implicam no aumento do processo de reflexão da radiação solar (YANG et al., 2010). Ou seja, a irradiância incidente sobre o sensor de um pirâmetro é composta pelo feixe solar (oriunda diretamente do disco solar) e pela irradiância provinda de múltiplos processos de reflexão, que provocam um efeito de ampliação da irradiância global (TREGENZA et al., 1994).

Nesta etapa de qualificação a irradiância direta em superfície horizontal foi a que apresentou maior rejeição de suas medidas. Cerca de 10.460 pontos das medidas foram rejeitadas por extrapolarem os limites superiores impostos (Tabela 15). Neste caso foi necessário impor dois limites distintos. O primeiro ($I_B/I_E < 1$) teve como objetivo garantir que não haviam problemas maiores na relação entre a irradiância direta e a extraterrestre. O segundo ($I_B \leq (0,95 I_G)$), foi um limite imposto devido a relação geométrica entre as componentes solares, pois mesmo em um dia totalmente limpo (céu aberto), ainda há presença da irradiância difusa. Considera-se então, neste caso, que no mínimo 5% da irradiância global seja composta pela componente difusa, e o restante seja composto pela componente direta.

Em seguida a irradiância difusa foi a que apresentou o maior percentual de rejeição de suas medidas. Nesse sentido, a qualificação de quarto nível apontou um total de 7.303 pontos de medidas rejeitadas. Por fim se tem 3.443 e 879 pontos de medidas das irradiâncias global e direta em incidência normal rejeitadas, respectivamente, pela determinação de seus limites superiores fisicamente aceitos.

Tabela 15 - Resultado do Quarto Nível de Qualificação.

IS	Nível				Resultado	
	3		4		N	%
	N	%	N	%		
I _G	1.003.301	94,0	999.867	93,7	3.434	0.3
I _D	981.935	93,4	974.632	92,7	7.303	0.7
I _{BN}	676.816	94,6	675.937	94,5	879	0.1
I _B	676.816	94,6	666.356	93,1	10.460	1.5

Legenda: IS - Irradiância Solar; N - Quantidade de Medidas; % - Quantidade de Dados em Percentual; I_G - Irradiância Global; I_D - Irradiância Difusa; I_B - Irradiância Direta; I_{BN} - Irradiância Direta Normal.

O resultado do quarto nível de qualificação é obtido por meio da diferença das medidas que restaram após sua aplicação. Neste sentido, os indicativos foram obtidos em comparação com as medidas aprovadas no terceiro e quarto nível de qualidade. O quarto nível apontou 0,3%, 0,7%, 0,1% e 1,5% de medidas rejeitadas das irradiâncias global e difusa em superfície horizontal, direta em incidência normal e em superfície horizontal, respectivamente.

A seguir (item 4.6) será apresentada detalhadamente a qualificação de quinto nível, relacionada a comparação das componentes solares (difusa e direta) com a irradiância global, captadas por diferentes sensores. Juntamente de seus resultados perante aplicação na série de medidas do Laboratório de Radiometria Solar.

4.6 Comparação das Medidas

Este é um dos níveis de controle de qualidade mais restritivos (qualificação de quinto nível). Somente pode ser realizado quando existem medidas concomitantes para as irradiâncias global, difusa e direta em superfície horizontal em um mesmo período de tempo. O Laboratório de Radiometria Solar, responsável por fornecer as medidas para a realização deste estudo, compreende uma lacuna de medidas da irradiância direta no ano de 2010 e no período de 2013 a 2017, totalizando 6 anos sem operação do pireliômetro devido a adversidades técnicas no rastreador solar. Neste caso, a qualificação de quinto nível não pôde ser aplicada em uma boa parcela de medidas.

Em uma primeira comparação para a irradiância global em superfície horizontal, pode-se constatar que somente 597.060 medidas poderiam ser submetidas

à esse nível do controle de qualidade. Isto significa que das 999.867 medidas da irradiância global aprovadas nas condições anteriores, aproximadamente 40,30% (402.807 leituras) ficaram de fora desse nível. Pois 349.417 medidas da global não continham leituras correspondentes da difusa e direta, além de 53.390 não atingir o requisito estipulado (50 W/m^2) para a soma das componentes ($I_D + I_B$).

O impacto desse nível de qualificação sobre as medidas da irradiância global é com certeza mais expressivo do que com relação às demais irradiâncias. Isto significa que, de acordo com os resultados obtidos (Tabela 16), esse nível é mais rigoroso com a global, principalmente, quanto se tem valores baixos, obtidos em dias nublados. É recomendado que neste caso o piranômetro de aquisição das medidas da irradiância global esteja corretamente calibrado para aprovação das medidas nesse tipo de controle de qualidade (MORENO-TEJERA; RAMÍREZ-SANTIGOSA; SILVA-PEREZ, 2015).

Os resultados apontam (Tabela 16) que a irradiância global teve 60.137 pontos de medidas rejeitados pelo quinto nível do controle de qualidade. Em sequência, a irradiância difusa teve 29.578 pontos de medidas rejeitados. Seguida das irradiâncias direta em superfície horizontal e em incidência normal que obtiveram 19.919 pontos de medidas rejeitados. É importante destacar que as condições de aprovação das medidas aplicadas nesse nível foram baseadas no método da BSRN (ver item 2.1.4.1). No entanto, atualizações implementadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais foram agregadas, no sentido de oferecer melhores resultados (INPE, 2019).

Tabela 16 - Resultado do Quinto Nível de Qualificação.

IS	Nível				Resultado	
	4		5		N	%
	N	%	N	%		
I_G	999.867	93,7	939.73	88,0	60.137	6,0
I_D	974.632	92,7	945.054	89,9	29.578	3,0
I_{BN}	675.937	94,5	656.018	91,7	19.919	2,9
I_B	666.356	93,1	646.437	90,3	19.919	3,0

Legenda: IS - Irradiância Solar; N - Quantidade de Medidas; % - Quantidade de Dados em Percentual; I_G - Irradiância Global; I_D - Irradiância Difusa; I_B - Irradiância Direta; I_{BN} - Irradiância Direta Normal.

O resultado do quinto nível de qualificação é obtido por meio da diferença das medidas que restaram após sua aplicação. Neste sentido, os indicativos foram obtidos em comparação com as medidas aprovadas no quarto e quinto nível de qualidade. O quinto nível apontou 6,0%, 3,0%, 2,9% e 3,0% de medidas rejeitadas das irradiâncias global e difusa em superfície horizontal, direta em incidência normal e em superfície horizontal, respectivamente.

A seguir (item 4.7) será apresentada detalhadamente a qualificação de sexto nível, relacionada a obtenção de intervalos estatísticos de aceitação das medidas solares para cada dia. Juntamente de seus resultados perante aplicação nas medidas do Laboratório de Radiometria Solar.

4.7 Intervalo de Aceitação Estatística

O intervalo de aceitação estatística (qualificação de sexto nível) é um método de identificação de medidas discrepantes (*outliers*) de acordo com outras mensurações realizadas para o mesmo período. Foi implementado com base nos diferentes tipos de cobertura de céu (nublado, parcialmente nublado, parcialmente aberto e aberto). Uma vez que esse fator influencia diretamente todas as componentes solares. É importante destacar que no caso de ausência de medidas da irradiância global não é possível a aplicação desse nível de qualidade, pois a cobertura de céu é obtida por meio do índice de transmissividade atmosférica (I_G/I_E).

Esse nível de qualificação foi implementado para ser aplicado nas medidas obtidas em um intervalo de um dia. No caso, após o término de mensuração das irradiâncias, os parâmetros estatísticos devem ser obtidos (médias e desvios padrões de todas as medidas daquele dia). Neste caso a irradiância difusa teve 11.779 pontos de medidas identificados como discrepantes e rejeitados pelo sexto nível do controle de qualidade (Tabela 17). Em sequência, a irradiância direta em superfície horizontal teve 10.805 pontos de medidas rejeitados. Seguida da irradiância global com 6.786 pontos de medidas rejeitadas. Por fim a irradiância direta em incidência normal destacou-se das demais, uma vez que não apresentou medida alguma discrepante.

Tabela 17 - Resultado do Sexto Nível de Qualificação.

IS	Nível				Resultado	
	5		6		N	%
	N	%	N	%		
I _G	939.730	88,0	932.944	87,4	6.786	0,7
I _D	945.054	89,9	933.275	88,8	11.779	1,2
I _{BN}	656.018	91,7	656.018	91,7	0	0,0
I _B	646.437	90,3	635.632	88,8	10.805	1,7

Legenda: IS - Irradiância Solar; N - Quantidade de Medidas; % - Quantidade de Dados em Percentual; I_G - Irradiância Global; I_D - Irradiância Difusa; I_B - Irradiância Direta; I_{BN} - Irradiância Direta Normal.

O resultado do sexto nível de qualificação é obtido por meio da diferença das medidas que restaram após sua aplicação. Neste sentido, os indicativos foram obtidos em comparação com as medidas aprovadas no quinto e sexto nível de qualidade. O sexto nível apontou 0,7%, 1,2%, 0,0% e 1,7% de medidas rejeitadas das irradiâncias global e difusa em superfície horizontal, direta em incidência normal e em superfície horizontal, respectivamente.

É importante destacar que antes de definir o nível de confiança de 99,50% (ver item 3.4.6) foram realizadas análises com 95,40%, onde se demonstrou demasiadamente rígido, rejeitando um alto número de irradiâncias e 95,70%, que se demonstrou razoavelmente insuficiente, uma vez que não identificou medidas discrepantes, que eram perceptíveis por meio de análise visual.

5 CONCLUSÃO

Em decorrência do processo de qualificação da série histórica de medidas do Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu, pôde-se concluir que:

- O proporcional a 12,6%, 11,2%, 8,3% e 11,2% das medidas da irradiância global, difusa e direta em superfície horizontal e direta em incidência normal, respectivamente, continham incertezas identificadas pelos diferentes níveis do controle de qualidade;
- O primeiro nível do controle de qualidade (análise de consistência do banco de dados) foi um procedimento que removeu completamente as linhas duplicadas na série histórica de medidas. Essa etapa afetou diretamente a quantidade de pontos medidas da irradiância difusa em superfície horizontal.
- O segundo nível de controle de qualidade identificou maiores incertezas nas medidas da irradiância difusa em superfície horizontal. O terceiro e o quarto nível identificaram maiores incertezas nas medidas das irradiâncias global e direta em superfície horizontal, respectivamente. O quinto e o sexto nível identificaram maiores incertezas, também, nas medidas das irradiâncias global e direta em superfície horizontal, respectivamente;
- Os meses de Julho e Janeiro, com relação a série histórica, continham a maior quantidade de medidas incertas da irradiância global e difusa em superfície horizontal, respectivamente. Tal que os meses de Abril e Março continham a maior quantidade de medidas incertas das irradiâncias direta em superfície horizontal e em incidência normal, respectivamente;
- O equivalente a 0,13%, 0,13% e 0,01% de medidas das irradiâncias global, difusa e direta, estavam duplicadas. Isto se deu por adversidades na rotina de mensuração das irradiâncias solares (desligamento do dispositivo de aquisição de medidas e imprecisões no processamento dos dados);
- Desconsiderar medidas obtidas em baixos ângulos de elevação solar é um processo fundamental em bases de dados sub-horárias. Em consequência das incertezas presentes nos instantes subsequentes ao nascer e antecedentes ao pôr do sol;

- Essa desconsideração não teve influência energética nos valores diários integrados (MJ/m^2). Pois está dentro da tolerância de 3,5% de incertezas estipulada pelo ISO 9060:2018. Tal que 97%, 80% e 96% dos desvios relativos das irradiâncias global e difusa em superfície horizontal e direta em incidência normal, atingiram uma diferença de 3,23%, 3,20% e 2,40%, respectivamente;
- Os níveis de controle de qualidade que mais impactaram na identificação de incertezas foram o segundo e o primeiro, respectivamente;
- Dessa forma, justifica-se a implementação do processo de controle de qualidade de medidas solares, computacionalmente, após a obtenção das medidas, de forma que atue permanentemente no Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial**. 2. ed. Barueri: Manole, 2018.
- ARENALES, S. DAREZZO, A. **Cálculo Numérico: Aprendizagem com Apoio de Software**. São Paulo: Thomson Learning, 2008.
- BONAFARI, F. C. **Estatística**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.
- CARRILHO, A. C.; GALO, M. Remoção de Ponto Espúrios em Dados LiDAR Aerotransportado a Partir da Análise Estatística das Altitudes. In: Simpósio Brasileiro de Geomática, 4., 2017. **Anáís...** Presidente Prudente: Unesp, 2017, p. 323-327.
- CODATO, G. *et al.* Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, p. 57-73, 2008.
- DAL PAI, A. *et al.* MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, v. 99, p. 754-763, 2016.
- DRIEMEL, A. *et al.* Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992-2017). **Earth System Science Data**, v. 10, p. 1491-1501, 2018.
- ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Sistemas de Banco de Dados**. 6. ed., São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- EPPLEY. **Scientific Instrumentation for Precision Measurements**. 2018. Disponível em: <http://www.eppleylab.com/>. Acesso em 10 out. 2018.
- ESCOBEDO, J. F. *et al.* Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, p. 299-309, 2009.
- ESTAÇÃO METEOROLÓGICA LAGEADO. **Série Climática de Botucatu**. 2018. Disponível em: <http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.html>. Acesso em 18 dez. 2018.
- GUEYMARD, C. A.; MYERS, D. R. Solar Radiation Measurement: Progress in Radiometry for Improved Modeling. **Modeling Solar Radiation at the Earth Surface**, p. 1-27, 2008.
- GUEYMARD, C. A.; RUIZ-ARIAS, J. A. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global Irradiance. **Solar Energy**, v. 128, p. 1-30, 2016.
- IBGE. **Panorama do município de Botucatu - SP**. Cidades: IBGE, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 08 ago. 2018.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Ontario: Academic Press Canada, 1983.

ISO. **Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation**. Geneva: ISO 9060, 2018. 18 p.

INPE. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. 2018. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html>. Acesso em: 17 jan. 2019.

JOURNÉE, M.; BERTRAND, C. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. **Solar Energy**, v. 85, p. 72-86, 2011.

KIPP & ZONEN. **Solar Radiation Measurement**. 2018. Disponível em: <https://www.kippzonen.com/>. Acesso em 30 nov. 2018.

KUDISH, A. I.; EVSEEV, E. G. The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel. **Solar Energy**, v. 82, p. 144-156, 2008.

LONG, C. N.; DUTTON, E. G. **BSRN Global Network Recommended Quality Control Tests**. BSRN Technical Report, v. 2, 2002. Disponível em: https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf. Acesso em: 26 out. 2018.

LONG, C. N.; SHI, T. An Automated Quality Assessment and Control Algorithm for Surface Radiation Measurements. **The Open Atmospheric Science Journal**, v. 2, p. 23-37, 2008.

MORENO-TEJERA, S.; RAMÍREZ-SANTIGOSA, L.; SILVA-PERÉZ, M. A. A proposed methodology for quick assessment of timestamp and quality control results of solar radiation data. **Renewable Energy**, v. 78, p. 531-537, 2015.

MOULIN, R. **Mapa do Brasil Vetorizado**. 23 fev. 2011. Disponível em: <http://www.robsonmoulin.com.br/artigos/design/mapa-do-brasil-vetorizado/>. Acesso em: 08 set. 2018.

MUNEER, T.; YOUNES, S.; MUNAWWAR. Discourses on solar radiation modeling. **Renewable and Sustainable Energy**, v. 11, p. 551-602, 2007.

MUNEER, T.; FAIROOZ, F. Quality control of solar radiation and sunshine measurements – lessons learnt from processing worldwide databases. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 23, p. 151-166, 2002.

OLEFS, M. *et al.* The Austrian radiation monitoring network ARAD - best practice and added value. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 9, p. 1513-1531, 2016.

OLIVEIRA, A. P.; MACHADO, A. J.; ESCOBEDO, J. F. A New Shadow-Ring Device for Measuring Diffuse Solar Radiation at the Surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p. 698-708, 2002.

PASHIARDIS, S.; KALOGIROU, S. A. Quality control of solar shortwave and terrestrial longwave radiation for surface radiation measurements at two sites in Cyprus. **Renewable Energy**, v. 96, p. 1015-1033, 2016.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed., São José dos Campos: INPE, 2017.

PEREZ-ASTUDILLO, D; BACHOUR, D; MARTIN-POMARES, L. Improved quality control protocols on solar radiation measurements. **Solar Energy**, v. 169, p. 425-433, 2018.

POLO, J.; ZARZALEJO, L. F.; RAMÍREZ, L. Solar Radiation Derived from Satellite Images. **Modeling Solar Radiation at the Earth Surface**, p. 449-462, 2008.

PUGA, S.; FRANÇA, E.; GOYA, M. **Banco de Dados: Implementação em SQL, PL/SQL e Oracle 11g**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013, 328 p.

RIGOLLIER, C.; BAUER, O.; WALD, L. On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. **Solar Energy**, v. 68, p. 33-48, 2000.

ROSSI, T. J. *et al.* Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu / SP / Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 448-459, 2018.

SENGUPTA, M. *et al.* The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 51-60, 2018.

SHI, G. *et al.* Data Quality Assessment and the Long-Term Trend of Ground Solar Radiation in China. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 17, p. 1006-1016, 2008.

INPE. **Validação dos Dados (Rede SONDA)**. 2018. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html>. Acesso em: 05 dez. 2018.

SILVA, M. B. P.; *et al.* Performance of the Angstrom-Prescott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 160, p. 11-23, 2017.

SOUTOU, C. Modeling relationships in object-relational databases. **Data & Knowledge Engineering**, v. 36, p. 79-107, 2001.

TREGENZA, P. R. *et al.* **Guide to recommended practice of daylight measurement**. Vienna: Cimmission Internationale de l'éclairage (CIE), 1994. Disponível em: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:103820>. Acesso em: 06 nov. 2018.

URRACA, R. *et al.* Quality Control of Global Solar Radiation Data With Satellite-Based Products. **Solar Energy**, v. 158, p. 49-62, 2017.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. 2. ed., Recife: 2006.

Disponível em:

http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em: 08 set. 2018.

WMO. **Climate Data Management System Specifications**. Geneva: World Meteorological Organization, v. 1, 2014.

WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**.

Geneva: World Meteorological Organization, n. 8, 2012.

WMO. **Update of the Technical Plan for BSRN Data Management**. World Climate Research Programme: Global Climate Observing System, out. 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2D5sapl>>. Acesso em: 25 out. 2018.

YANG, K. *et al.* On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 38-46, 2010.

YOUNES, S.; CLAYWELL, T.; MUNEER, T. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. **Energy**, v. 30, p. 1533-1549, 2005.