

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**ESTUDO DO EFEITO LENTE PRODUZIDO POR
NUVENS NA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL
MEDIDO NO NORDESTE DO BRASIL**

RICARDO CESAR DE ANDRADE

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba

Co-orientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich

Recife, PE

Julho, 2016

RICARDO CESAR DE ANDRADE

**ESTUDO DO EFEITO LENTE PRODUZIDO POR
NUVENS NA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL
MEDIDO NO NORDESTE DO BRASIL**

Tese, submetido ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, para obtenção do título de Doutor em Ciências. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba

Co-orientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich

Recife, PE

Julho, 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

A553e Andrade, Ricardo Cesar de.
 Estudo do efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global medido no Nordeste do Brasil. / Ricardo Cesar de Andrade. - Recife: O Autor, 2016.
 103 f. : il., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.
 Coorientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich.

 Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2016.
 Inclui referências bibliográficas e apêndice.

 1. Irradiância solar. 2. Efeito lente produzido por nuvens. 3. Nordeste do Brasil. I. Tiba, Chigueru, orientador. II. Fraidenraich, Naum, coorientador. III. Título.

CDD 621.47 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2016-26

ESTUDO DO EFEITO LENTE PRODUZIDO POR NUVENS NA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MEDIDO NO NE DO BRASIL

Ricardo Cesar de Andrade

APROVADA EM: 20.07.2016

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chigueru Tiba

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Naum Fraidenraich

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE

Prof. Dr. Alcides Codeceira Neto – UPE

Profa. Dra. Elielza Moura de Souza Barbosa – DEN/UFPE

Prof. Dr. Sérgio da Silva Leal – IFPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

À minha mãe, Maria José da Conceição,
verdadeiro exemplo de força, dignidade e esperança

Minha homenagem e
minha gratidão

À minha linda esposa Ricássia e a minha querida avozinha Dadai,
pelo amor e encorajamento.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo caminho, pela verdade e pela vida.

À Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em especial ao Departamento de Energia Nuclear, pela oportunidade.

Ao Prof. Chigueru Tiba, pela orientação, competência e paciência.

Aos Professores Naum Fraidenaich, Alcides Codeceira, Alberto Brayner, Sérgio Leal, Elielza Moura, José Bione, Carlos Dantas pelas valiosas sugestões e correções.

Ao meu pai, pelo apoio e por ser para mim um exemplo de homem trabalhador.

Aos meus irmãos, Hugo Cezar, Cezar Augusto e Daniela Fernanda, pelo carinho, amizade e momentos divertidos que sempre passamos juntos.

Aos meus queridos amigos, Sérgio Trajano, Jair, Caetano, Perinaldo, Arnóbio, Mardson, Mário, Marcus Gameiro, Fernandão, Tarcísio, André, Netinho, Suellen, Ricart, Marcelo, Henriques, Lucas, Erms, Gustavo Cariello, Josenildo, Rafael e Nilvânia pelos incentivos e amizade.



(Giseli Cristina)

ESTUDO DO EFEITO LENTE PRODUZIDO POR NUVENS NA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MEDIDO NO NORDESTE DO BRASIL

Autor: Ricardo Cesar de Andrade

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba
Co-orientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich

RESUMO

A radiação extraterrestre é atenuada pela atmosfera em diferentes proporções, dependendo, principalmente do ângulo zenital solar e da altitude no ponto de medição. Neste trabalho, são apresentados valores da radiação solar total acima da condição de céu claro, que, em alguns dias, superou a constante solar corrigida pela distância Sol-Terra (CSC). Assim, esta pesquisa relata uma análise detalhada do efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global medido no Nordeste do Brasil, nas cidades de Água Branca, Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, Laje, Pão de Açúcar, Arapiraca, Coruripe e Maceió, no período de janeiro a dezembro de 2008, e, para a cidade de Recife, nos meses de outubro e novembro de 2015. Foram feitas medições com 1 minuto de intervalo, usando o piranômetro B&W da Eppley com incerteza estimada de 5%. Verificou-se que: a) o fenômeno não é incomum; b) a duração do efeito pode atingir 34 minutos; c) a existência de um efeito sazonal, com maior probabilidade de ocorrência nos meses de abril e outubro; d) valores medidos da radiação solar superiores à radiação solar extraterrestre na ordem de 300 W/m^2 ; e e) uma forte assimetria foi detectada no perfil de ocorrência do fenômeno entre o período da manhã e à tarde. Os dados aferidos demonstraram que a radiação extrema, acima do valor extraterrestre, com duração de até 30 minutos, pode significar índices UV (IUV) muito elevados e potencialmente perigosos.

PALAVRAS CHAVE: Efeito lente produzido por nuvens, Irradiância solar, Nordeste do Brasil.

LENS EFFECT STUDY PRODUCED BY CLOUDS IN THE GLOBAL SOLAR RADIATION MEASURED IN NORTHEAST OF BRAZIL

ABSTRACT

The extraterrestrial radiation is attenuated by the earth atmosphere in different proportions depending mainly on the solar zenith angle and the altitude of the measurement point. This work presents the total solar radiation values above clear-sky conditions that in some days surpassed the Solar constant corrected by the Sun-Earth distance (CSC). Thus, this research reports a detailed analysis of lens effect produced by clouds in the global solar radiation measured in the Northeast of Brazil. Therefore in the cities of Água Branca, Santana de Ipanema, Palmeiras dos Índios, Laje, Pão de Açúcar, Arapiraca, Coruripe and Maceió, was measured between January and December of 2008, and in Recife from October and November of 2015. Measurements have been taken with one-minute intervals using Eppley and B&W pyrometers with an uncertainty estimated of 5%. It has been found that a) the phenomenon is not unusual; b) the duration of the effect can reach 34 minutes; c) the existence of a seasonal effect with greater probability of occurrence in April and October; d) the measurement values of extraterrestrial solar radiation in the order of 300 W/m² above normal condition; and e) a strong asymmetry was detected in the occurrence phenomenon profile between the span of the morning and in the afternoon. Accessed data indicates that the extreme solar radiation, above the extraterrestrial solar radiation, lasting up to 30 minutes, might indicate a very high and potentially dangerous UV index.

Keywords: Lens effect produced by clouds; Solar irradiance, NE Brazil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	Espectro eletromagnético.....	13
FIGURA 2	Diagrama Esquemático de Efeito de espalhamento e absorção na radiação Total..	15
FIGURA 3	a) Espalhamento Rayleigh, b) Forma do espalhamento Mie, c) Espalhamento Mie em função do tamanho da partículas.....	17
FIGURA 4	Função de fase Mie em escala logarítmica.....	17
FIGURA 5	Posição relativa do Sol no céu em coordenadas locais.....	18
FIGURA 6	Efeito da latitude no nível de radiação.....	19
FIGURA 7	Influência da altitude no nível de radiação.....	19
FIGURA 8	Percentual da variação diária do índice da radiação UV e do ozônio, em Cmte. Ferraz, durante a passagem do “buraco de ozônio”, em 2003.....	20
FIGURA 9	Componentes da radiação solar visto por um observador na superfície terrestre.....	21
FIGURA 10	Valores de Albedo.....	21
FIGURA 11	Piranômetro do tipo Black & White da Eppley.....	22
FIGURA 12	Piranômetro do tipo PSP da Eppley.....	23
FIGURA 13	Mapa Mundi com classificação de Köppen-Geiger sinalizando eventos de radiação extrema em diversas localidades do mundo.....	26
FIGURA 14	Perfil de irradiância em um dia parcialmente nublado (azul) e de um dia de céu claro (vermelho).....	27
FIGURA 15	Irradiância solar total medida na cidade de Recife em 28 de março de 2008.....	28
FIGURA 16	Geometria Terra-Sol, coordenadas locais.....	34
FIGURA 17	Classificação de nuvens segundo altura e forma.....	37
FIGURA 18	Sky Imager modelo TSI-880.....	40
FIGURA 19	Exemplo de imagem obtida através do Sky Imager TSI-880.....	40
FIGURA 20	Irradiância extrema em Maio de 2012.....	41
FIGURA 21	Distribuição de duração das irradiâncias extremas com valor de 1100W/m ² registrados no ano de 2011.....	42
FIGURA 22	Os maiores eventos de irradiância extrema no ano de 2011.....	42
FIGURA 23	Percentual dos eventos por faixa de energia registrados no ano de 2011.....	42

FIGURA 24	Localidades do Estado de Alagoas com estações solarimétricas: Coruripe, Água Branca, Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, Maceió, São José da Laje, Pão de Açúcar e Arapiraca.....	46
FIGURA 25	Exemplo das principais variáveis coletadas em uma estação solarimétrica.....	47
FIGURA 26	Tela de apresentação do software.....	48
FIGURA 27	Exemplo da variação temporal da irradiância solar ao longo do dia 3 de agosto de 2008.....	49
FIGURA 28	Exemplo da planilha gerada pelo software, apresentando a variação temporal da irradiância solar ao longo do mês de agosto de 2008.....	50
FIGURA 29	Exemplo da planilha gerada pelo software, apresentando a variação temporal das ocorrências do efeito lente ao longo do mês de agosto de 2008....	50
FIGURA 30	Exemplo da planilha gerada pelo software para análise da variação temporal das ocorrências do efeito lente ao longo do dia 03 de agosto de 2008..	51
FIGURA 31	Irradiância solar total, extraterrestre, modelo de céu claro e medido para o dia 4 de fevereiro do ano de 2008 para a localidade de Água Branca – AL.....	52
FIGURA 32	Espectro de emissão de LED azul, verde, amarelo e vermelho.....	53
FIGURA 33	Espectro de absorção de LED azul, verde, amarelo e vermelho.....	53
FIGURA 34	Circuito esquemático do fotômetro.....	54
FIGURA 35	Vista frontal do fotômetro.....	54
FIGURA 36	Vista traseira do fotômetro.....	55
FIGURA 37	Vistas do fotômetro: (A) Raio solar que será alinhado, (B) Raio solar paralelo ao raio alinhado, (C) Colimadores com Sensores LED, (D) Ajuste da inclinação e (E) Circuitos de controle do fotômetro.....	56
FIGURA 38	Vista interna da caixa de controle com os circuitos do fotômetro: (A) Bateria de alimentação, (B) Drive de controle do servo motor, (C) Circuito de amplificação, (D) Arduino, (E) Banco de baterias para amplificação do sinal dos sensores, (F) SD card e (G) Relógio digital.....	57
FIGURA 39	Exemplo da aplicação do método de Langley aos dados de radiação solar direta.....	58
FIGURA 40	Perfil de irradiância total para Água Branca: (a) dia de céu claro, (b) dia parcialmente nublado e (c) dia nublado.....	60
FIGURA 41	Duração média dos eventos para os meses de 2008 para as oito estações.....	64
FIGURA 42	Comparação da duração média dos eventos em função das coordenadas geográficas.....	65
FIGURA 43	Comportamento sazonal dos eventos extremos da irradiação solar.....	66

FIGURA 44	Comportamento diário dos eventos da irradiação solar extrema.....	66
FIGURA 45	Comportamento mensal da duração média do fenômeno com valores de todas as localidades.....	67
FIGURA 46	Valores mensais de horas acumuladas de brilho de sol em Maceió para os anos de 1961-1990.....	67
FIGURA 47	Perfil diário (anual) dos eventos da radiação solar extrema para a localidade de Água Branca.....	68
FIGURA 48	Perfil diário típico (anual) da velocidade do vento para a localidade de Água Branca (2008).....	69
FIGURA 49	Perfil diário (anual) dos eventos da radiação solar extrema para a localidade de Maceió.....	69
FIGURA 50	Perfil diário típico (anual) da velocidade do vento para a localidade de Maceió (2008).....	70
FIGURA 51	Distribuição da diferença entre a radiação solar extrema e a irradiação extraterrestre para Água Branca em março de 2008.....	71
FIGURA 52	Perfil diário para o dia 2 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).....	73
FIGURA 53	Perfil diário para o dia 10 de novembro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).....	74
FIGURA 54	Perfil diário para o dia 11 de novembro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).....	74
FIGURA 55	Configuração de nuvens no céu para o dia 10 de novembro de 2015 às 13:00h.....	75
FIGURA 56	Histograma do tempo de duração do fenômeno para todos os dias medidos nos meses de outubro e novembro de 2015.....	77
FIGURA 57	Relatório estatístico resumido para o tempo de duração das ocorrências do fenômeno.....	77
FIGURA 58	Relatório estatístico resumido da variável Delta (diferença entre o valor medido e o valor simulado para a condição de céu claro).....	78
FIGURA 59	Relatório estatístico resumido das ocorrências em relação à condição de céu claro.	79
FIGURA 60	Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Máxima irradiância registrada durante eventos da radiação extrema em diversas localidades do mundo.....	25
TABELA 2	Modelos de radiação solar.....	29
TABELA 3	Tipos básicos de nuvens.....	38
TABELA 4	Localização das estações para as medições de radiação solar no estado de AL...	45
TABELA 5	Medidas realizadas no dia 07 de outubro de 2015 para a região de Recife-PE....	57
TABELA 6	Estatísticas Básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global: Estação Solarimétrica de Água Branca.....	62
TABELA 7	Estatísticas Básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global: Estação Solarimétrica de Maceió.....	63
TABELA 8	Estatísticas Básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global: Estação Solarimétrica de Laje.....	63
TABELA 9	Estatísticas Básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global: Estação Solarimétrica de Coruripe.....	64
TABELA 10	Profundidade óptica de aerossóis, Fator de turbidez de Linke e observação da cobertura de nuvens para a localidade de Recife-PE.....	72
TABELA 11	Tipo de atmosfera e sua classe de turbidez.....	72
TABELA 12	Estatísticas Básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global: Estação Solarimétrica em Recife-PE.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOD	Profundidade óptica de aerossóis (Aerosol Optical Depth)
ATI	Índice de Turbidez atmosférica (Atmospheric Turbidity Index)
α	Expoente do comprimento de onda de Angstrom
B&W	Piranômetro tipo branco e preto
β	Coefficiente de turbidez de Angstrom
CFC	Clorofluorcarbonos
CS	Cirrostratos
CSC	Constante solar corrigida pela distância Terra-Sol
Dc	Irradiância solar difusa
dx	Diferencial
$\delta_R(m)$	Profundidade ótica de Kasten – Rayleigh
Δ	Diferença entre o valor medido e o valor teórico
Δ_{cda}	Profundidade ótica pancromática de uma atmosfera límpida e seca
Δ_w	Profundidade ótica devido à água precipitável
ESRA	European Solar Radiation Atlas (Atlas europeu de radiação solar)
E_λ	Irradiância monocromática
E_λ^0	Irradiância espectral extraterrestre
FC	Fractocumulus
$F_d(\gamma_s)$	Função do ângulo de elevação solar
FS	Fractostratus
H	Altitude (m)
I_0	Constante solar
INCA	Instituto Nacional do Câncer
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
I_{ET}	irradiância solar extraterrestre
I_{cs}	Irradiância solar direta numa superfície horizontal para um dia de céu claro
I_G	Irradiância total
IUV	Índice Ultravioleta

j	Dia juliano
κ_{λ}	Coefficiente de absorção volumétrica
Lat.	Latitude
LED	Diodo emissor de luz (Light-Emitting Diode)
Long	Longitude
m	Massa de ar
$N(x)$	Densidade superficial de átomos ou moléculas [partículas/cm ²]
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OMS	Organização Mundial de Saúde
p	Pressão local
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
ppmv	Partes por milhão por volume
PV	Fotovoltaico
PSP	Piranômetro de precisão da Eppley
RGB	Sistemas de Cores aditivas formado por Vermelho (Red), Verde (Green) e Azul (Blue)
RH	Umidade relativa
RMSE	Erro médio quadrático (Root-Mean-Square-Error)
Ro	Distância média Sol-Terra
s	Segundo
SD card	Secure Digital Card (Cartão de memória não voláteis)
τ_a	Profundidade óptica de aerossóis
T	Temperatura ambiente (°C)
Td	Temperatura de orvalho (°C)
T_{LK}	Fator de turbidez de Linke
$Tn(T_{LK})$	Função de transmissão difusa
TSI	Total Sky Imager (equipamento fabricado pela companhia Yankee Environmental System)
UV	Irradiação Ultravioleta
UVA	Radiação ultravioleta tipo A
UVB	Radiação ultravioleta tipo B
UVC	Radiação ultravioleta tipo C
u0	Abundância total de ozônio

u_{ns}	Abundância de dióxido de nitrogênio estratosférico
u_{nt}	Abundância de dióxido de nitrogênio troposférico
u_n	Abundância total de dióxido de nitrogênio
UT	Tempo universal (Universal Time)
w	Quantidade de água precipitável (cm)
WRC	World Radiation Center
ζ_s	Ângulo zenital
γ_s	Ângulo de elevação solar
σ_λ	Seção transversal de extinção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1. Importância do conhecimento da radiação solar.....	13
2.2. Informações sobre radiação solar na superfície terrestre.....	15
2.2.1. Principais processos que atenuam a radiação solar através da atmosfera....	15
2.2.2. Fatores ambientais que interferem com o nível de radiação solar.....	18
2.2.3. Piranômetro.....	22
2.2.4. Fenômeno da Radiação Extrema.....	23
2.2.5. Medidas realizadas no Brasil.....	27
2.3. Modelos de irradiância direta.....	28
2.3.1. ESRA (European Solar Radiation Atlas).....	30
2.3.1.1. Irradiância solar no plano horizontal.....	30
2.3.1.2. Irradiância solar difusa.....	32
2.3.1.3. Irradiância solar total para uma superfície horizontal.....	33
2.3.2. Lei de Beer e método de Langley.....	33
2.3.2.1. Derivação da Lei de Beer.....	33
2.3.2.2. Obtenção da espessura óptica a partir do método de Langley.....	35
2.4. Nuvens.....	36
2.4.1. Tipos de nuvens.....	36
2.4.2. Sky Imager.....	39
2.5. Irradiação Extrema devido à contribuição das Nuvens.....	40
2.6. Efeitos nocivos causados pela Radiação Extrema.....	43
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1. Procedimentos metodológicos.....	44
3.2. Base de Dados.....	45
3.3. SunCloud-E: Software para localização do efeito lente.....	46
3.3.1. Parâmetros de entrada.....	46
3.3.2. Medidas da Irradiância solar total.....	47
3.3.3. Tela de apresentação do Software.....	47
3.3.4. Geração dos gráficos para localização e do efeito lente.....	48
3.3.5. Geração das planilhas para localização e análise do efeito lente.....	49

3.4. Utilização do SunCloud-E para obtenção do modelo de céu claro.....	51
3.5. Cálculo do fator de turbidez de Linke obtida através da profundidade óptica de aerossóis (AOD).....	52
3.5.1. Profundidade óptica de aerossol.....	52
3.5.2. Obtenção da profundidade óptica de aerossóis diária.....	57
3.5.3. Cálculo do fator de turbidez de Linke obtido através da AOD.....	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.1. Estatística do Fenômeno para as Ocorrências acima da Irradiância Extraterrestre.....	60
4.1.1. Sazonalidade.....	65
4.1.2. Perfil diário.....	68
4.1.3. Distribuição das diferenças entre os valores medidos e Extraterrestres.....	70
4.2. Modelagem do evento extremo utilizando determinação local do AOD.....	71
5. CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE.....	90

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar incidente na superfície da Terra é de fundamental importância em muitos aspectos de climatologia, hidrologia e arquitetura. Ademais, ela é um importante parâmetro em aplicações em energia solar, em previsão da produção de biomassa e produção da iluminação natural (SANTAMOURIS et al, 1999). Então, para certa localidade, conhecer a radiação solar é essencial para propor projetos de sistemas solares, sistemas de energia e uma boa avaliação do ambiente térmico em edifícios (WONG, 2001).

A radiação solar existente na superfície terrestre é função de muitas variáveis tais como o ângulo solar zenital, a altitude em relação ao nível do mar, o ozônio total, a coluna atmosférica de aerossóis e o albedo superficial (KIRCHHOFF et al. 2000).

Ela também tem uma distribuição não-homogênea entre as diferentes regiões geográficas da Terra em certos momentos do dia, devido a um grande número de fatores: o movimento aparente do Sol, a distância Sol-Terra, coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude), o estado atmosférico e refletividade do solo. Além destas, tem-se as nuvens: um conjunto de partículas minúsculas de água líquida ou de gelo, ou de ambos, ao mesmo tempo, em suspensão na atmosfera.

Além disso, ao contrário do que a intuição comum possa levar a crer, a radiação solar na superfície da Terra, em condições de céu parcialmente nublado, pode apresentar valores de irradiância solar acima dos valores esperados em relação a dias de céu claro. Isso ocorre pela correlação positiva dessas diferentes configurações geométricas do céu, que podem dar lugar a valores de irradiância na ordem ou mesmo maior do que a radiação extraterrestre durante períodos de tempo relativamente curtos e em ângulos zenitais de 30 a 0 graus (MIMS; FREDERICK, 1994; PIACENTINI et al, 2003; PIACENTINI et al., 2011).

Mas, embora os artigos mencionados acima descrevam bem o fenômeno, eles apresentam somente poucos dados quantitativos. Assim, o objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo quantitativo detalhado, usando um banco de dados de medições de oito localidades diferentes, obtidos em intervalos de 1 minuto e medidos durante um ano. Com esse banco de dados robusto, a quantificação e análise do fenômeno foi realizada com uma alta confiabilidade estatística.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi o de *estudar o efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global medido no Nordeste do Brasil.*

Para tanto, como objetivos secundários, este trabalho se direcionou:

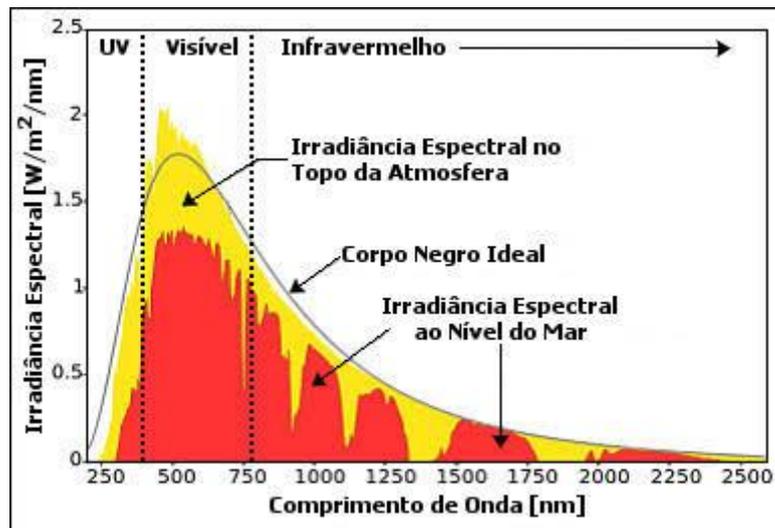
1. à construção de um software para filtrar a base de dados composta com informações das oito cidades de Alagoas;
2. ao cálculo do tempo médio de duração do fenômeno e à verificação do caráter sazonal do fenômeno;
3. à verificação da influência de variáveis geográficas, tais como: altitude, longitude e latitude no fenômeno;
4. à construção de um fotômetro para medir a profundidade óptica de aerossóis (AOD);
5. à análise estatística detalhada do fenômeno da amplificação da radiação no estado de Alagoas;
6. ao uso do fotômetro para medição da AOD, sua utilização para geração dos modelos de irradiação solar na condição de céu claro e comparação com os resultados experimentais para a localidade de Recife.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância do conhecimento da radiação solar

O espectro solar que atinge a superfície do nosso planeta é composto por radiação ultravioleta, luz visível e radiação infravermelha (Fig.1).

Figura 1: Espectro eletromagnético



Fonte: GEODESIGN (2016)

O espectro da irradiação ultravioleta (UV) abrange comprimentos de onda de 100 a 400nm e, normalmente, é subdividido em três subintervalos: UVA: entre 320 e 400nm; UVB: entre 280 e 320nm; e UVC: entre 100 e 280nm.

A UVC é potencialmente o mais danoso aos tecidos biológicos, por possuir maior quantidade de energia. Porém essa radiação é totalmente absorvida pelo oxigênio e ozônio presentes nas camadas superiores da atmosfera. A radiação UVB é absorvida parcialmente pelo vapor de água, oxigênio, dióxido de carbono e ozônio presentes na estratosfera. Atinge a superfície terrestre em quantidades pequenas, porém suficientes para provocar efeitos biológicos. Por fim, a UVA é pouco absorvida pelos gases presentes na atmosfera e atinge a superfície terrestre em maiores quantidades, porém tem menor efeito agressivo do ponto de vista biológico (CORRÊA, 2004). Toda essa radiação ultravioleta que incide na superfície terrestre se caracteriza por grandes quantidades de UVA e pequena porção de UVB (OLIVEIRA et al., 2005).

O espectro visível abrange comprimentos de onda de 400 a 700nm. Esse espectro é que torna os objetos visíveis para os olhos dos seres humanos. Também a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) compreende a faixa espectral da radiação solar de comprimento de onda de 400 a 700nm. Apresenta grande importância em estudos sobre taxa de crescimento vegetal, taxa fotossintética e condutância estomatal por ser a radiação que excita as moléculas de clorofila das plantas, iniciando o fluxo de energia durante o processo de fotossíntese (FRISINA, 2003).

Já o espectro infravermelho próximo abrange comprimentos de onda de 700 a 2500nm. Essa faixa do espectro é invisível aos olhos humanos, tendo aplicações na área de imageamento. As imagens de “visão noturna” e o mapeamento de temperaturas de um corpo são exemplos de aplicações utilizadas na área militar e na medicina, respectivamente (DANIEL et al, 2011).

Okuno et al., (1986) menciona que há duas maneiras de aproveitar mais eficientemente a energia solar incidente: coletores térmicos e células fotovoltaicas. A primeira constitui dispositivos capazes de transformar a luz do Sol em calor. Esse calor pode ser usado diretamente no aquecimento de água que, por sua vez, pode ser utilizado na produção da energia elétrica ou, simplesmente, para consumo doméstico. Já o segundo dispositivo converte diretamente a energia solar em energia elétrica, utilizando material semicondutor. Ao absorver luz, esse dispositivo produz uma pequena corrente elétrica, que pode ser aproveitada.

Deve-se ter em vista que o uso direto da energia solar para produção de energia comercial tem três atrativos principais:

- A. Renovabilidade quase infinita (para a escala de tempo humana). Portanto, ela pode ser usada durante bilhões de anos;
- B. Menores impactos ambientais, quando comparada com aqueles provenientes da exploração e do uso das energias fóssil e nuclear;
- C. Aplicação regional, diminuindo a necessidade de transporte através de grandes distâncias.

Pelo que foi mencionado, percebe-se porque é tão importante estudar a radiação solar incidente na superfície terrestre.

2.2. Informações sobre radiação solar na superfície terrestre

2.2.1. Principais processos que atenuam a radiação solar através da atmosfera

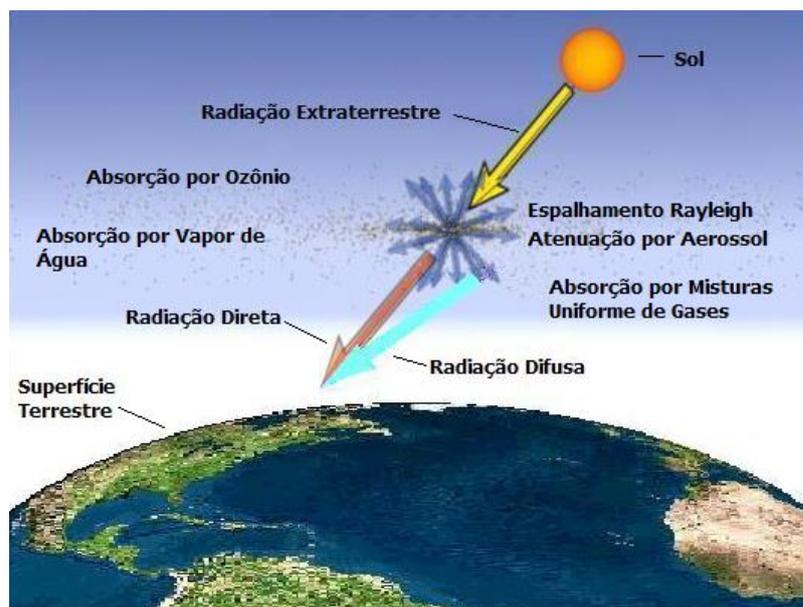
GUGLIELMO et al., (2009) relata que a radiação solar que atravessa a atmosfera é atenuada por dois tipos de processos: *espalhamento* e *absorção*.

Na figura 2, estão esquematizados os principais fenômenos de espalhamento e absorção da irradiância solar na atmosfera, até que ela atinja a superfície terrestre. Ao atravessar a atmosfera, a radiação extraterrestre sofre processo de absorção devido ao ozônio, vapor de água e mistura uniforme de gases presentes na atmosfera, assim como no processo de espalhamento de tipo Rayleigh, que dá origem à componente difusa da radiação solar que atinge a superfície terrestre.

Daí que as diversas componentes da radiação solar na superfície terrestre podem ser expressas pela equação (1), na qual a irradiância total, I_G , é a soma das irradiâncias normal direta, I_{CS} e da difusa, D_C . Estes são os valores de saída, obtidos através das simulações para um plano horizontal.

$$I_G = I_{CS} + D_C \quad (1)$$

Figura 2: Diagrama esquemático de efeito de espalhamento e absorção na radiação total



A compreensão dos fenômenos de interação da radiação solar com a atmosfera é essencial para o desenvolvimento de métodos matemáticos e computacionais utilizados nos modelos de irradiância solar espectral para o cálculo da radiação solar que atinge a superfície terrestre. Essa compreensão dá origem aos códigos computacionais citados na seção 2.3.

Espalhamento Rayleigh e Mie

Na atmosfera, o espalhamento é causado por moléculas, partículas de aerossol e nuvens contendo gotas e cristais de gelo. O azul do céu, a coloração branca das nuvens, arco-íris e halos são exemplos de fenômenos gerados por espalhamento de radiação eletromagnética, em particular da região do visível.

O processo de espalhamento tratado aqui é aquele no qual a radiação é espalhada ou desviada da orientação original de propagação para uma outra orientação qualquer, sem que o seu comprimento de onda seja alterado. Dessa forma, a descrição do processo de espalhamento baseia-se fundamentalmente em determinar a probabilidade de a radiação incidente ser desviada para uma orientação qualquer.

O padrão de espalhamento não ocorre de forma aleatória, isto é, a distribuição da radiação emergente em diferentes orientações depende de algumas características das partículas que constituem o meio no qual a radiação se propaga. Uma dessas características é a razão entre o tamanho da partícula espalhadora e o comprimento de onda da radiação incidente.

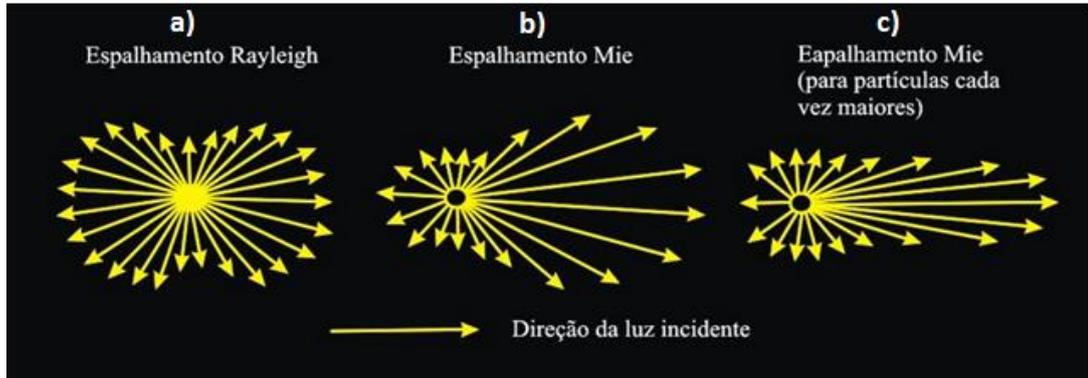
Há, basicamente, dois modelos matemáticos que descrevem o espalhamento. Quando as partículas são muito menores que o comprimento de onda da radiação incidente, o espalhamento é denominado espalhamento Rayleigh ou espalhamento molecular, visto que na atmosfera é promovido basicamente pelas moléculas de N_2 e O_2 , por serem as mais abundantes. Para partículas cujo tamanho é comparável ou maior que o comprimento de onda da radiação incidente, o fenômeno é denominado espalhamento Mie (AKEMI, 2013).

O espalhamento causado por uma partícula esférica de tamanho arbitrário foi descrito analiticamente por Mie, em 1908, a partir das equações de Maxwell, deduzindo como ondas eletromagnéticas de comprimento de onda λ são perturbadas ao interagirem com esferas homogêneas de raio r . É utilizado para descrever a interação das partículas de aerossol e gotas de nuvens com a radiação eletromagnética, em particular, no espectro solar.

Na figura 3, vê-se à esquerda, a forma do espalhamento Rayleigh, em que uma partícula muito pequena espalha radiação nas direções frontal e traseira na mesma proporção; no centro,

a forma do espalhamento Mie; e, à direita, a forma do espalhamento Mie para partículas cada vez maiores. Percebe-se que, à medida que a partícula se torna maior, a radiação espalhada se concentra cada vez mais nas direções frontais, apresentando padrões cada vez mais complexos.

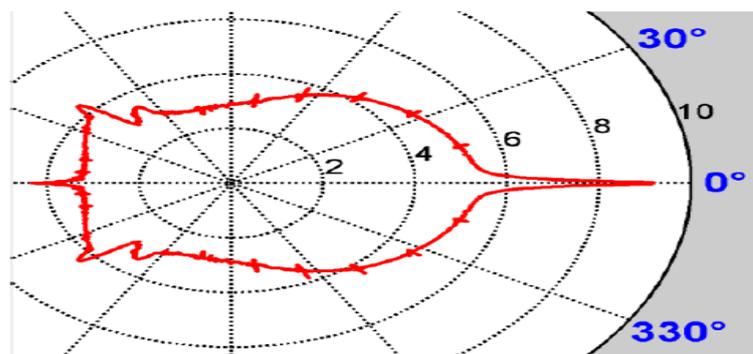
Figura 3: a) Espalhamento Rayleigh, b) forma do espalhamento Mie e c) espalhamento Mie, em função do tamanho das partículas



Fonte: http://www.on.br/pequeno_cientista/conteudo/revista/pdf/cores_ceu.pdf

O que pode aparecer como reflexões nas nuvens, pode ser explicado tanto como dispersão para a frente ou espalhamento para trás. Enquanto nuvens podem aumentar a componente difusa da luz solar que atinge a superfície da terra, aberturas estreitas entre nuvens adjacentes podem aumentar a componente direta (feixe), que está limitada dentro de 5° em torno do disco solar. A função de fase Mie é fortemente anisotrópica, com um pico acentuado na direção para frente (ver figura 4). Assim, quase a metade de todos os fótons são espalhados em ângulos dentro de apenas 5° , tendo em vista que a figura 4 é apresentada em escala logarítmica.

Figura 4: Função de fase Mie em escala logarítmica



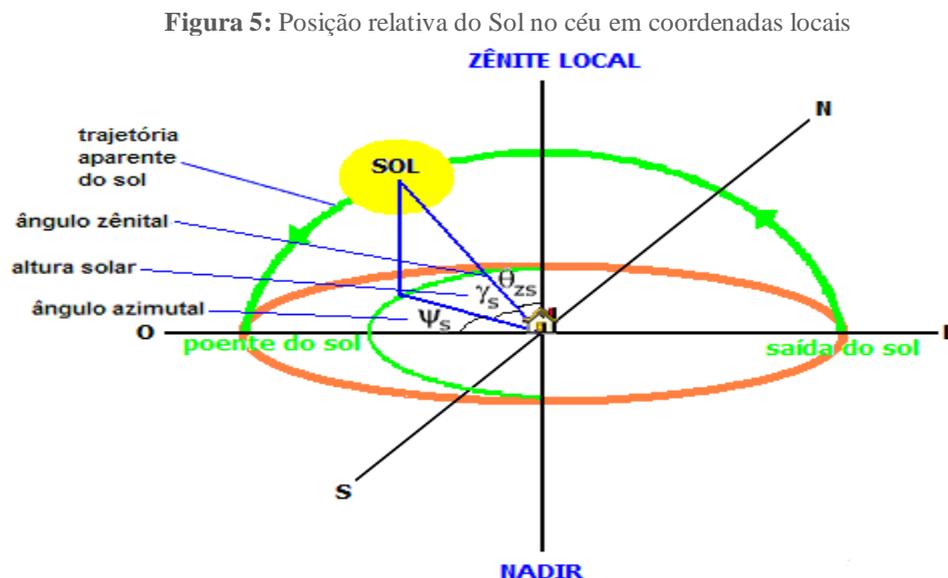
Fonte: Yordanov et al. (2012)

2.2.2. Fatores ambientais que interferem com o nível de radiação solar na superfície terrestre

Ângulo de incidência solar

A incidência da irradiação solar, em qualquer localidade do planeta, depende da posição instantânea do sol no céu, conforme pode ser visto na figura 5. O ângulo azimutal é formado entre a projeção horizontal do raio solar e é medido no sentido horário, a partir do norte geográfico (azimute igual a 0°). Já o ângulo vertical, formado entre essa projeção e o raio de sol, é a altura solar, a qual é medida a partir do plano horizontal e varia de 0° até 90° . A altura do sol é máxima quando atinge o ponto mais elevado no céu ao meio dia solar. Essa posição é conhecida como zênite.

Quando o sol está no zênite, a irradiação solar que atinge a superfície é máxima porque, nessa situação, a sua trajetória através da atmosfera é a mais curta. Isso pode ser melhor expresso através da definição da massa de ar, um conceito geométrico dado pelo inverso do cosseno do ângulo zenital. A massa de ar é igual a 1, ao meio dia solar, e maior que 1, para horários diferentes do meio dia solar.

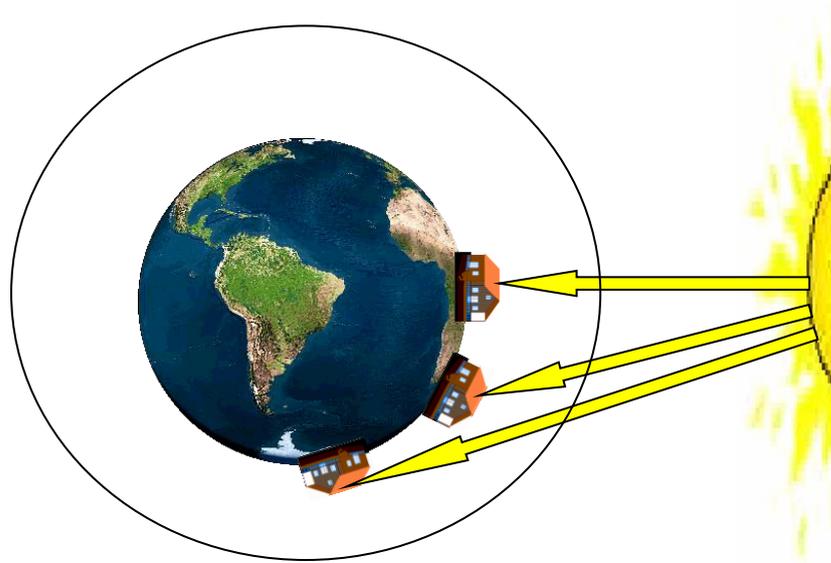


Latitude

Para um mesmo dia e horário solar, os níveis de radiação solar se tornam maiores quanto mais próximos estiverem do equador, pois os raios solares atingem a Terra, nesta faixa, com maior elevação média em relação ao plano do horizonte. Desse modo, os raios solares

atravessam uma camada mínima de atmosfera antes de atingir a superfície terrestre. Porém, à medida que o local é mais afastado do equador, a elevação solar sobre o horizonte se reduz e os raios solares percorrem um trajeto mais longo na atmosfera antes de chegar ao solo, conforme pode ser visto na figura 6.

Figura 6: Efeito da latitude no nível de radiação



Altitude

Em altitudes mais elevadas, a radiação solar percorre uma distância menor através da atmosfera e, por isso, os níveis de irradiação são maiores em se considerando locais adjacentes e em condições de céu claro (figura 7).

Figura 7: Influência da altitude no nível de radiação

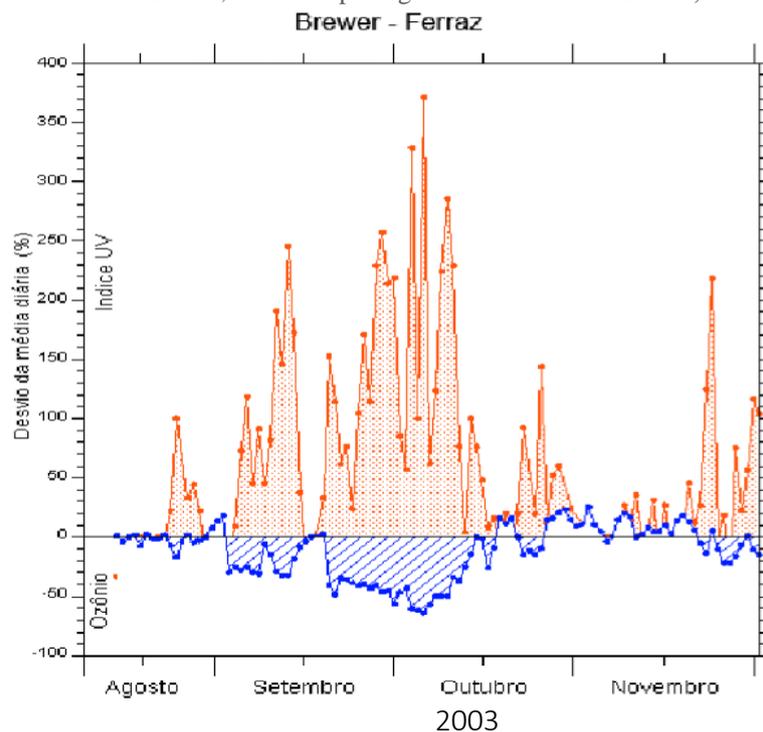


Camada de Ozônio

A camada de ozônio se situa na estratosfera, região da atmosfera, numa faixa de 15 a 50 km de altitude, que varia conforme a época do ano e, ou, até mesmo do dia, e de acordo com os padrões de circulação (OLIVEIRA et al., 2005). Nela, a concentração de ozônio chega a 10 ppmv, servindo de um gigantesco “filtro solar” natural, o qual é responsável pela absorção parcial das radiações UVA e UVB vindas do Sol.

Cientistas alertam, desde 1970, para uma queda acentuada no ozônio estratosférico na região Antártica. Esse fenômeno é conhecido como “buraco de ozônio”. Mas, estudos recentes mostraram um decréscimo da camada de ozônio em todas as latitudes (LEME, 2016). A figura 8 mostra o percentual da variação diária do índice UV e do ozônio na estação Comte. Ferraz, na Antártida, durante a passagem do “buraco de ozônio”, em 2003. Observa-se, nessa mesma figura, um aumento de 400% na radiação UV durante esse período.

Figura 8: Percentual da variação diária do índice da radiação UV e do ozônio, em Cmte. Ferraz, durante a passagem do “buraco de ozônio”, em 2003



Reflexão especular

Os raios solares que chegam à superfície terrestre provenientes das componentes direta ou difusa podem dar origem à reflexão, a qual ocorre na interface entre dois meios diferentes, quando parte da radiação que atinge esta interface é enviada de volta (figura 9). Nessa interface, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (lei da reflexão). A fração da radiação incidente que é refletida por uma superfície é conhecida como albedo.

A reflexão da radiação solar pelo mar tem albedo de (0,25), pela neve (0,8), pela areia (0,17). Portanto, dependendo do meio ambiente, o efeito da reflexão da radiação solar pode ser muito intensificado, como por exemplo, no Ártico ou no Antártico. Na figura 10 podem ser vistos valores de albedo para diversas superfícies.

Figura 9: Componentes da radiação solar visto por um observador na superfície terrestre

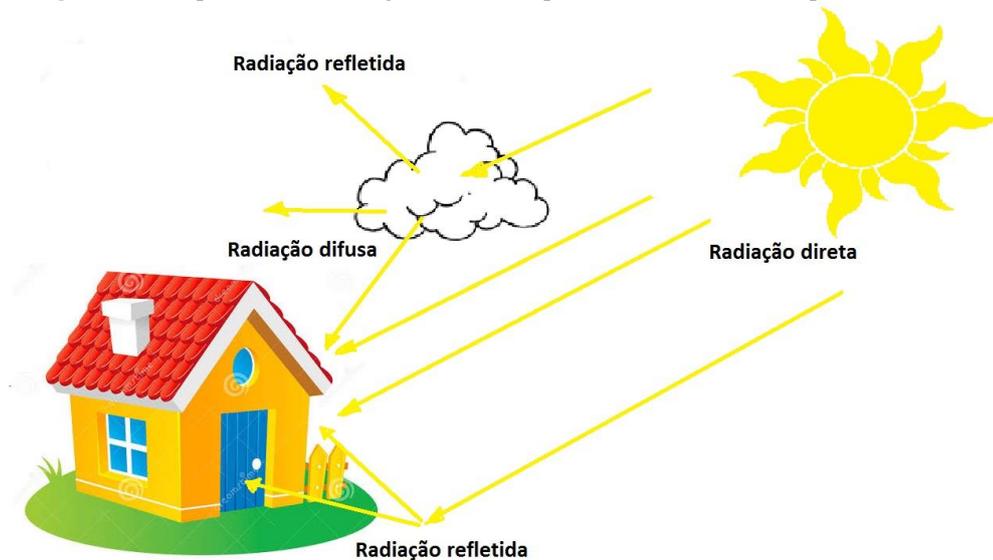
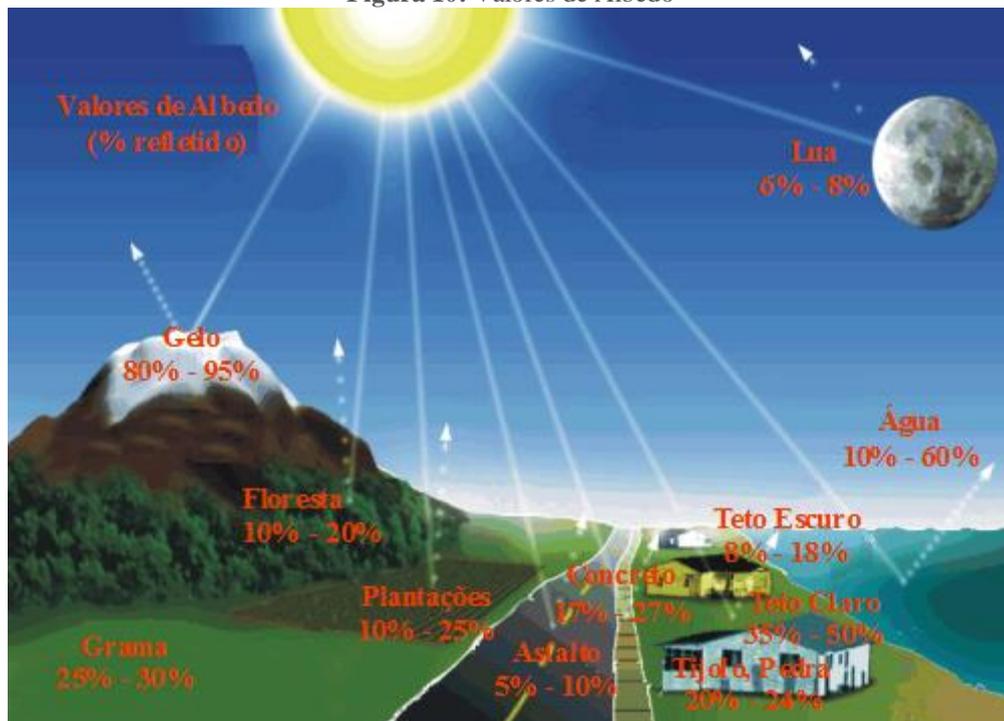


Figura 10: Valores de Albedo



Fonte: GEO (2016)

Nuvens

Devido à sua importância na amplificação da radiação solar, esse tema será tratado com mais detalhes no item 2.4.

2.2.3. Piranômetro

O Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA, 2001) cita dois tipos de piranômetros termoelétricos existentes, sendo eles:

- Piranômetro com o detector pintado de branco e preto, isto é, o receptor apresenta, alternativamente, superfícies brancas e pretas, dispostas em coroas circulares concêntricas, ou com outros formatos, tais como estrela ou quadriculados. Nestes instrumentos, as juntas quentes das termopilhas estão em contato com as superfícies negras, altamente absorventes, e as frias, em contato com as superfícies brancas, de grande refletividade. Os mais difundidos dentro do tipo Black & White são *Eppley 8-48*, e são considerados de segunda classe (figura 11);
- Piranômetros com a superfície receptora totalmente enegrecida em contato térmico com as juntas quentes e as frias, associadas a um bloco de metal de grande condutividade térmica, colocadas no interior do instrumento, resguardadas da radiação solar e tendo, aproximadamente, a temperatura do ar. Dentre os piranômetros com superfície receptora totalmente preta, os mais usados são os *Eppley PSP*. Esses piranômetros possuem compensação de temperatura, sendo um instrumento de precisão e considerado de primeira classe (figura 12).

Figura 11: Piranômetro do tipo Black & White da Eppley



Fonte: Tiba et al. (2001)

Figura 12: Piranômetro do tipo PSP da Eppley.



Fonte: Tiba et al. (2001)

Outro modelo de piranômetro é aquele que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino. Estes piranômetros são largamente utilizados, pois apresentam custos bem menores do que os equipamentos tradicionais. Pelas características da célula fotovoltaica, este aparelho possui limitações por apresentar sensibilidade espectral, que corresponde a apenas 60% da radiação solar incidente, ou seja, sua sensibilidade compreende até 1.100 nm.

2.2.4. Fenômeno da Radiação Extrema

Trabalhos realizados por Piacentini et al. (2011) mostraram que, em condições especiais, o tipo, a densidade e as coberturas de nuvens (entre 50% a 90% do céu), em conjunto a regiões de céu claro, resultam em aumento da radiação solar acima das condições previstas para céu claro, aqui denominado como radiação extrema.

Yordanov et al. (2012) afirmam que certos tipos de nuvens podem aumentar a luz do sol mais de 1,5 vezes, mesmo em altas latitudes. Valores de Irradiância solar total superiores a 1800 W/m² foram observados na África Equatorial e América do Sul. Esta concentração natural de luz solar é atribuída, principalmente, ao espalhamento de fótons, nas nuvens opticamente finas, em um intervalo de poucos graus em torno do disco solar. Em outras palavras, suas propriedades ópticas podem ser explicadas a partir da teoria Mie. Esse efeito pode durar de alguns segundos a minutos, dependendo da velocidade das nuvens.

As condições específicas envolvidas para o aumento da irradiância solar, devido à contribuição das nuvens, foram observadas por Piacentini et al. (2003), na região de Cerro Tres Cruces (23.30° S, 65.30° W, 3.900 m de altitude), no deserto intertropical de Puna de Atacama, Argentina. Vários valores mais elevados do que a constante solar, com um valor máximo extremo de 1528 W/m², foram obtidos às 12:09 hora local (UT = - 3h) com um ângulo zenital de 16°, em 16 de dezembro de 1997. Este valor de irradiância foi medido em condições

excepcionais, em que as nuvens cumulus foram observadas e estavam presentes ao redor da linha de visão, mas não cobrindo o sol (confirmado com registro fotográfico). A associação entre os seguintes fenômenos pode ser identificada como causa desse efeito especial:

- A. Reflexões na fronteira das nuvens cumulus para o ponto de observação;
- B. Espalhamento múltiplo nesta camada de nuvem particular, produzindo uma grande fração da radiação transmitida na direção do observador – na verdade, todas as nuvens que cercam a linha de visão do sol contribuíram para essa transmissão reforçada;
- C. Irradiação direta do sol sob as condições de uma atmosfera muito clara, uma vez que as nuvens não interferem com a irradiância vinda diretamente a partir do sol.

Em Almeida et al. (2014) é apresentada uma tabela que resume a máxima irradiância registrada durante eventos da radiação extrema em diversas localidades do mundo (tabela 1). Efeitos deste tipo foram registrados em: Albuquerque, Novo México (HANSEN et al., 2010); San Diego, Califórnia (LUOMA et al., 2012); as montanhas dos Andes do sul do Equador (EMCK e RICHTER, 2008); Lauder, Nova Zelândia (PFISTER et al., 2003); sul da Noruega (YORDANOV et al., 2012); Kisumu, Quênia (YORDANOV et al., 2013a); São Paulo, Brasil (ALMEIDA et al., 2014); Chipre (TAPAKIS et al., 2014); Puna de Atacama, Argentina (PIACENTINI et al., 2003); Honolulu, Estados Unidos (WEIGI et al., 2012); Recife, Brasil (PIACENTINI et al., 2011); Rondônia, Brasil (GU et al., 2001); Granada, Espanha (PIEDEHIERRO et al., 2014).

A mesma tabela apresenta a irradiância máxima (W/m^2), altitude (m) do local de ocorrência do efeito lente, plano de medição, duração da medição (anos), instrumento de medição, resolução de medida (s) e tempo de resposta do instrumento para 95% do(s) valor(es) final(s). A máxima irradiância de $1832 W/m^2$ foi registrada nos Andes (Equador), com uma altitude de 3400m acima do nível do mar, além de outros eventos reportados na tabela 1. Na mesma tabela, constam três ocorrências no Brasil acima de $1400 W/m^2$: São Paulo ($1590 W/m^2$), Recife ($1477 W/m^2$) e Rondônia ($>1400 W/m^2$).

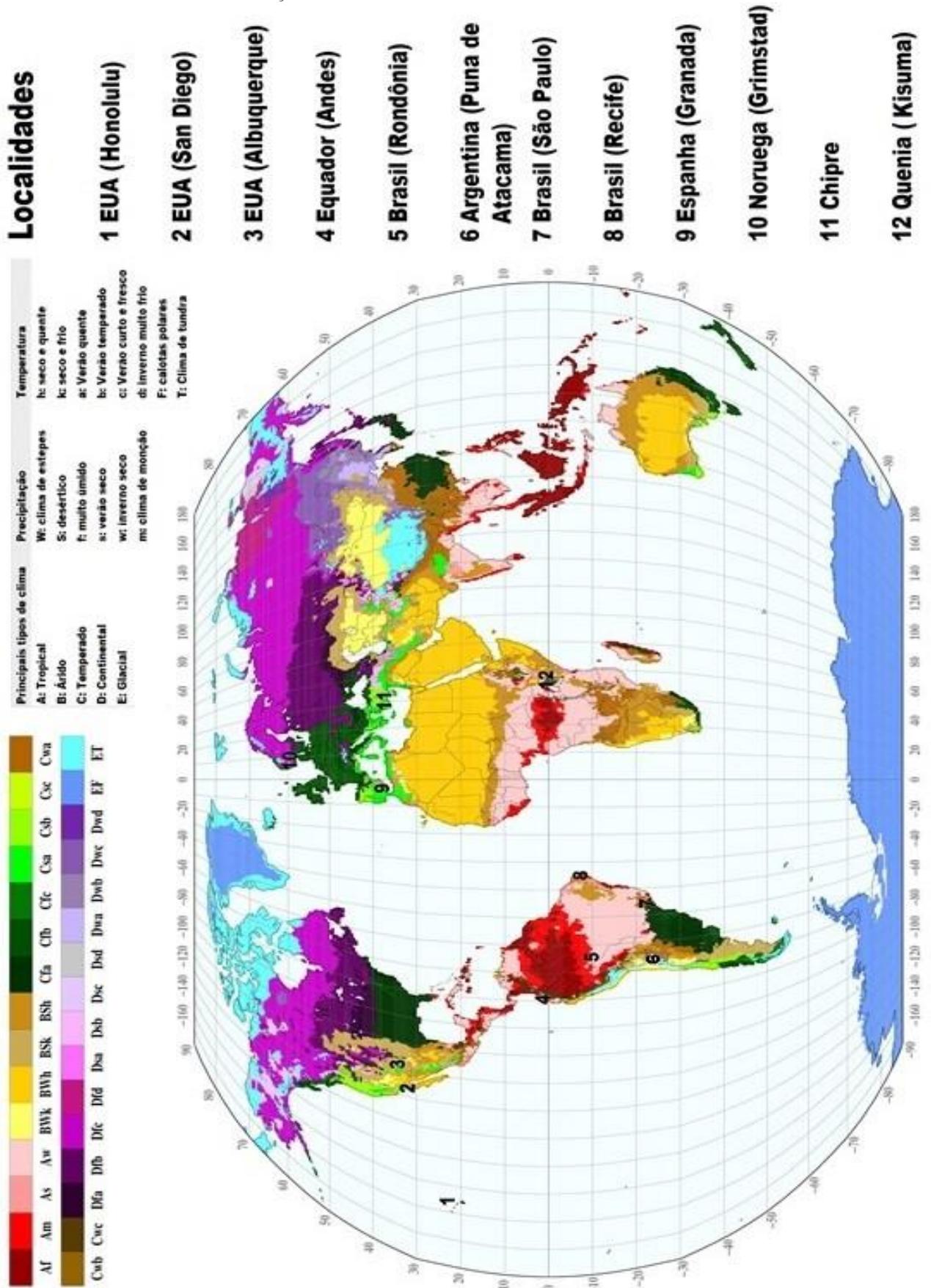
Tabela 1: Máxima irradiância registrada durante eventos da radiação extrema em diversas localidades do mundo

Referências	Irradiância Máxima (W/m ²)	Altitude (m)	Local	Plano de medição	Duração da medição	Instrumento de medição	Resolução de medida (s)	Tempo de resposta do instrumento, 95% do valor final (s)
Emck e Rítcher (2008)	1832	3400	Equador (Andes)	Horizontal	4 anos	Piranômetro (CM3)	300	≤18
Yordanov et al. (2013a)	>1800	1131	Kenya (Kisumu)	-	-	-	-	-
Almeida et al. (2014)	1590	760	Brasil (São Paulo)	Horizontal	< 1 ano	Modulo PV (MSX-10)	1	≤10 ⁻⁵
Tapakis & Charalambides (2014)	1533	360	Cyprus	Horizontal	1 ano	Piranômetro (MS-802)	<60	≤5
Piacentini et al. (2003)	1528	3900	Argentina (Puna de Atacama)	Horizontal	< 1 ano	Piranômetro (PSP Eppley)	5	≤15
Yordanov et al. (2013a)	1528	60	Norway (Grimstad)	(39°)	< 1 ano	Célula PV mc-Si	10 ⁻²	≤0,025
Weigl et al. (2012)	>1500	<10	EUA (Oahu)	Horizontal	< 1 ano	Piranômetro (LICOR LI-200)	1	≤10 ⁻⁵
Piacentini et al. (2011)	1477	4	Brasil (Recife)	Horizontal	1 ano	Piranômetro (PSP Eppley)	≤60	≤15
Hansen et al. (2010)	>1400	1620	EUA (Albuquerque)	Horizontal	< 1 ano	Piranômetro (CM-21)	60 (média)	≤5
Gu et al. (2001)	>1400	<400	Brasil (Rondônia)	Horizontal	< 1 ano	Piranômetro (PSP Eppley)	60 (média)	≤15
Luoma et al. (2012)	>1300	22	EUA (San Diego)	Horizontal	-	Piranômetro (LICOR LI-200)	1	≤10 ⁻⁵
Piedehierro et al. (2014)	1244	680	Espanha (Granada)	Horizontal	5 anos	Piranômetro (CM-21)	60	≤15

Fonte: Almeida et al (2014)

A figura 13, a seguir, apresenta o mapa Mundi com a classificação climática de Köppen-Geiger. Nela, observa-se uma enorme diversidade climática para as localidades mencionadas na tabela 1. Condições climáticas tipo Tropical (Honolulu-EUA, Rondônia-BR, Recife-BR, São Paulo-BR, Kisumu-Quenia), Árido (San Diego-EUA, Albuquerque-EUA), Temperado (Chipre, São Paulo-BR, Granada-ESP), Continental (Grimstad-NO) e Glacial tipo Tundra (Andes-EC, Punta de Atacama-AR).

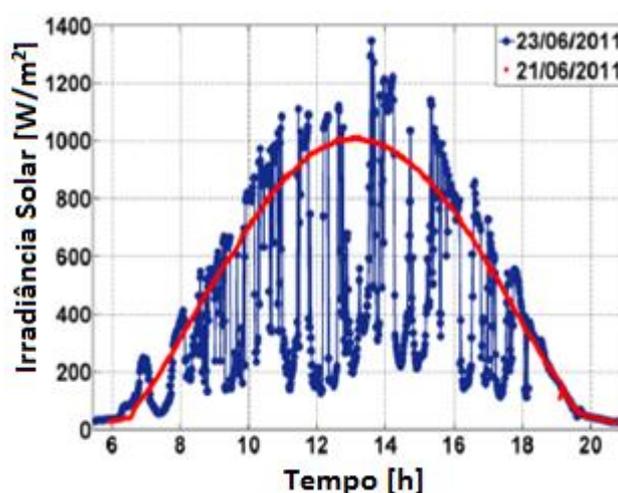
Figura 13: Mapa Mundial com classificação de Köppen-Geiger sinalizando eventos de radiação extrema em diversas localidades do mundo



Assim, percebe-se que o fenômeno da radiação extrema pode ocorrer de forma generalizada em diferentes latitudes, altitudes e condições climáticas.

A figura 14, é um exemplo do fenômeno. Nela, é mostrada, em vermelho, uma curva modelada para um típico dia de céu claro, e em azul, os valores medidos para o mesmo dia. Em alguns períodos, os valores medidos ultrapassam os valores esperados para o dia de céu claro (Yordanov et al., 2012).

Figura 14: Perfil de irradiância em um dia parcialmente nublado (azul) e de um dia de céu claro (vermelho)

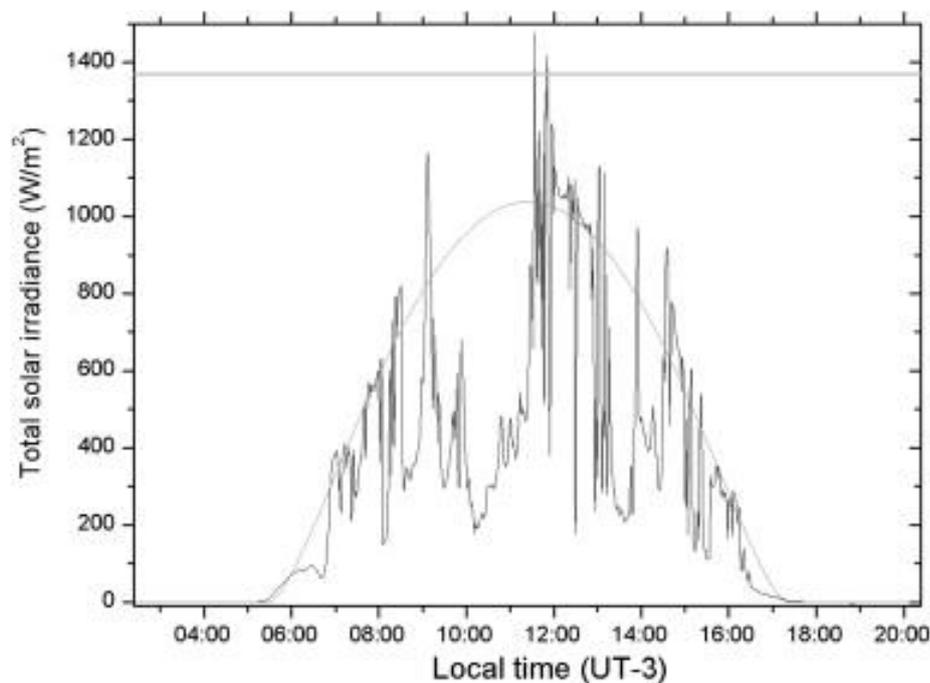


Fonte: Yordanov et al. (2012)

2.2.5. Medidas realizadas no Brasil

Piacentini (2011) relatou que valores muito elevados da irradiância solar global foram medidos na cidade de Recife, região Nordeste do Brasil. Esses valores de irradiância ultrapassaram a constante solar corrigida pela distância Terra-Sol (CSC), em alguns dias no período de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009. Foram medidos durante 3,4% dos dias do período total registrado. Esta percentagem aumentou para 7,4% para a irradiância solar global dentro de 95,1-100% da CSC e para 15,3% dentro de 90,1-95% da CSC. O maior valor de irradiância solar total extrema, 1477 ± 30 W/m², foi registrado no dia 28 de março de 2008 às 11:34 hora local (UT - 3h). Tal valor supera a constante solar corrigida em 7,9%, 1369,4 W/m² para este dia e por 42,3% do valor estimado para céu-claro utilizando o modelo de radiação de Iqbal (1037,7 W/m²). A figura 15 mostra um exemplo dos valores de irradiância que ultrapassaram os valores estimados pelo modelo.

Figura 15: Irradiância solar total medida na cidade de Recife em 28 de março de 2008



Fonte: Piacentini et al (2011)

2.3. Modelos de irradiância direta

Modelos de irradiância solar espectral são necessários para muitas aplicações e disseminadas em diferentes disciplinas, tais como ciências atmosféricas, biologia, física médica e tecnologias energéticas (sistemas fotovoltaicos, iluminação natural, sistemas para aquecimento de água e ar, dentre outros). Os modelos desenvolvidos podem ser categorizados em dois tipos: códigos computacionais rigorosos e sofisticados, que exigem muitos parâmetros de entrada, e modelos paramétricos simples (GUEYMARD, 1993).

A família LOWTRAN é um exemplo bem conhecido do primeiro tipo, criado há mais de 20 anos atrás. Ele foi, recentemente, superado por um código mais detalhado chamado MODTRAN (ANDERSON et al., 1993; BERK et al., 1989). Este modelo considera a atmosfera constituída de diferentes camadas e usa medidas do perfil vertical de gases e aerossóis constituintes. Este código requer entradas de dados detalhadas. Além disso, o tempo de execução e algumas limitações de entrada o tornam um instrumento não-apropriado para certas aplicações, particularmente em engenharia. A alternativa são modelos de parametrização simples em comparação ao modelo MODTRAN, porque apresentam simplicidade de uso, precisão e fácil adequação com dados meteorológicos disponíveis.

Desde os anos 80, apareceram, na literatura, diversos modelos simples (BIRD, 1984; BIRD ; RIORDAN, 1986; BRINE ; IQBAL, 1983; GUEYMARD, 1993; JUSTUS ; PARIS, 1985; MATTHEWS et al., 1987; NANN ; RIORDAN, 1991 e SMARTS2 (GUEYMARD, 1993).

Em Gueymard (2003) são apresentadas discussões detalhadas dos 21 modelos de radiação solar, os quais podem ser vistos na tabela 2. Nesta tabela, são mostradas, para cada modelo as variáveis de entrada utilizadas: p , pressão local; w , água precipitável; u_0 , abundância total de ozônio; u_{ns} , abundância de dióxido de nitrogênio estratosférico; u_{nt} , abundância de dióxido de nitrogênio troposférico; u_n , abundância total de dióxido de nitrogênio; τ_a , profundidade óptica de aerossóis; β , coeficiente de turbidez de Angstrom; α , expoente do comprimento de onda de Angstrom. Pontos pretos indicam entradas requeridas; pontos vermelhos indicam parâmetros de entrada alternativa.

Nesse estudo, apenas 7 dos 21 modelos tiveram valores de RMSE (erro médio quadrático) abaixo de 8%, são eles: MMAC, METSTAT, MLWT1, CPC2, MLWT2, REST e Yang. Os últimos 4 modelos mencionados podem ser recomendados por causa de seus altos desempenhos em todos os testes teóricos realizados por Gueymard (2003). Esses modelos foram testados, sendo comparados a modelos de transmitância espectral (SMARTS).

Tabela 2: Modelos de radiação solar

MODELO	ρ	w	u_0	u_{ns}	u_{nt}	u_n	τ_a	β	α
Bird	•	•	•					•	•
CEM	•	•					•		
Choudhury	•	•	•					•	
CPCR2	•	•	•					•	•
Dogniaux	•	•						•	
Iqbal C	•	•	•					•	•
King and Buckius	•	•						•	•
METSTAT	•	•	•				•		
MLWT1	•	•	•	•	•		•	•	
MLWT2	•	•	•	•	•		•	•	
MMAC	•	•					•		
Molineaux	•	•						•	
MRM	•	•	•						
Perrin	•	•	•					•	
Power	•	•	•			•		•	
Psiloglou	•	•	•						
PSIM	•	•						•	
REST	•	•	•			•	•	•	
Rodgers	•	•					•		
Santamouris	•	•	•					•	•
Yang	•	•	•				•	•	

Fonte: Gueymard et al (2003)

Em Ineichen (2006), são comparados oito modelos de céu claro, os quais foram validados com 16 bancos de dados com localidade de diversas latitudes, altitudes e climas.

Estes modelos foram: Solis, CPC2, REST2, Kasten, ESRA, Ineichen, Molineaux e Bird. A comparação com medições foi realizada de forma dinâmica, para avaliar a sua capacidade para seguir a forma diurna da radiação incidente, e os bancos de dados anuais que cobriram as quatro estações do referido ano de pesquisa.

A primeira conclusão foi de que, dentre os parâmetros de entrada, o que tem a maior influência sobre os resultados é a turbidez. O uso do índice de turbidez de Linke dos bancos de dados, em vez do parâmetro medido localmente, leva à subestimação sistemática de ambas as componentes da radiação solar. A segunda conclusão é que a precisão não é altamente dependente do modelo utilizado. Assim, os critérios de seleção do modelo devem se basear na simplicidade de implementação (ESRA, Molineaux), disponibilidade de parâmetro de entrada (turbidez de Linke ou profundidade óptica de aerossóis) ou a capacidade do modelo de reproduzir a radiação espectral (Solis).

Devido aos critérios mencionados acima, foi escolhido para o presente estudo o modelo ESRA. Este modelo está comentado em detalhes, em seguida, no item 2.3.1.

2.3.1. ESRA (European Solar Radiation Atlas)

O ESRA (European Solar Radiation Atlas), é um exemplo bastante conhecido de modelo paramétrico simples, criado há mais de 27 anos atrás (KASTEN et al., 1984) e que foi atualizado em 1994 para o Novo Atlas Solar Europeu (SCHARMER, 1994). O ESRA é um algoritmo baseado em um modelo simples que utiliza os seguintes parâmetros de entrada para a estimativa da irradiância solar no plano horizontal e direta: longitude, latitude, altitude, constante solar, ângulo zenital e fator de turbidez Linke. Este modelo é inteiramente baseado em expressões algébricas (SCHARMER, 1994), que estão descritos detalhadamente a seguir.

2.3.1.1. Irradiância solar no plano horizontal

A irradiância solar direta recebida por uma superfície horizontal, para um dia de céu claro, é dada por

$$I_{cs} = I_0 \varepsilon \exp[-0.8662 m T_{LK} \delta_R (m)] \cos \zeta_S \quad (2)$$

em que I_0 é a constante solar, ε a excentricidade da órbita terrestre, T_{LK} é o fator de turbidez de Linke, $\delta_R(m)$ é a profundidade óptica de Kasten – Rayleigh, m é a massa de ar e ζ_s é o ângulo zenital.

A massa de ar m , $\Delta\gamma_{ref}$, $\delta_R(m)$ e ε são expressas respectivamente por:

$$m = \left(1 - \frac{z}{10^4}\right) / \left[\sin \gamma_s^{true} + 0.50572 \left(57.29578 \gamma_s^{true} + 6.07995\right)^{-1.6364} \right] \text{ para } z < 4000 \text{ metros} \quad (3)$$

em que, z é a altitude em relação ao nível do mar, γ_s^{true} e $\Delta\gamma_{ref}$ são:

$$\gamma_s^{true} = \gamma_s + \Delta\gamma_{ref} \quad (4)$$

$$\Delta\gamma_{ref} = 0.061359 \frac{0.1594 + 1,1203\gamma_s + 0.06565\gamma_s^2}{1 + 28.9344\gamma_s + 277.3971\gamma_s^2} \quad (5)$$

e γ_s é o ângulo de elevação solar.

A profundidade óptica de Kasten – Rayleigh, $\delta_R(m)$ é dada por

$$\delta_R(m) = \begin{cases} 1 / (6.62960 + 1.75130m - 0.12020m^2 + 0.00650m^3 - 0.00013m^4) & \text{para } m \leq 20 \\ 1 / (10.4 + 0.718m) & \text{para } m > 20 \end{cases} \quad (6)$$

$$\varepsilon = 1 + 0.03344 \cos\left(\frac{2\pi j}{365.25}\right) \quad (7)$$

em que j é o dia juliano.

A irradiância solar extraterrestre I_{ET} pode ser estimada a partir da seguinte expressão:

$$I_{ET} = I_0 \varepsilon \cos \zeta_s \quad (8)$$

2.3.1.2. Irradiância solar difusa

A irradiância solar difusa recebida numa superfície horizontal aos raios solares, para um dia de céu claro, é dada por

$$D_c = I_0 \varepsilon F_d(\gamma_s) Tn(T_{LK}) \quad (9)$$

em que $F_d(\gamma_s)$ é chamada de função de elevação solar, pois depende apenas da elevação solar γ_s , $Tn(T_{LK})$ é chamada de função de transmissão difusa, a qual depende exclusivamente do fator de turbidez de Linke T_{LK} .

A função de elevação solar $F_d(\gamma_s)$, e a função de transmissão difusa $Tn(T_{LK})$, são expressas respectivamente por:

$$Tn(T_{LK}) = -0.015843 + 0.030543T_{LK} + 0.0003797T_{LK}^2 \quad (10)$$

$$F_d(\gamma_s) = A_0 + A_1 \sin \gamma_s + A_2 \sin^2 \gamma_s \quad (11)$$

em que, A_0 , é expresso a partir da condição estabelecida pelo produto de A_0^* e $Tn(T_{LK})$

$$A_0^* = 0.26463 - 0.061581T_{LK} + 0.0031408T_{LK}^2 \quad (12)$$

$$\text{Se } A_0^* Tn(T_{LK}) < 0.0022, \quad A_0 = 0.0022 / Tn(T_{LK})$$

$$\text{Se } A_0^* Tn(T_{LK}) \geq 0.0022, \quad A_0 = A_0^*$$

em que, A_1 e A_2 são dadas por:

$$A_1 = 2.04020 + 0.018945T_{LK} - 0.011161T_{LK}^2 \quad (13)$$

$$A_2 = -1.3025 + 0.039231T_{LK} - 0.0085079T_{LK}^2 \quad (14)$$

2.3.1.3. Irradiância solar total para uma superfície horizontal

Na equação 15, podem ser vistas as partes constituintes da irradiância total, I_G , sendo ela a soma da irradiância direta, I_{cs} , com a difusa, D_c .

$$I_G = I_{cs} + D_c \quad (15)$$

2.3.2. Lei de Beer e método de Langley

O grande número de variáveis físicas da atmosfera torna o estudo da transmitância da radiação solar na atmosfera um processo complexo e de difícil descrição. Contudo, a transmitância da radiação monocromática através da atmosfera terrestre pode ser determinada pela lei de Beer. Essa lei demonstra que um feixe de luz monocromático, ao atravessar um meio opticamente ativo, sofrerá atenuação de forma exponencial. O coeficiente de atenuação é determinado a partir dos processos de espalhamento e absorção da radiação solar, os quais dependem do tipo de gases e aerossóis presentes na atmosfera. Portanto, com boa aproximação, a lei de Beer é usada como ferramenta física para descrever a atenuação da radiação solar em seu trajeto na atmosfera terrestre. Ademais, aplicando o método de Langley pode-se obter a espessura óptica de aerossóis (ECHER; SOUZA, 2001).

2.3.2.1. Derivação da lei de Beer

A espessura óptica indica a quantidade de material absorvedor e espalhador opticamente ativos, encontrados no caminho atravessado pelo feixe de radiação, sendo adimensional. É expressa como a integral, ao longo do caminho óptico do produto da quantidade total de moléculas presentes no meio, e a seção transversal de extinção para cada comprimento de onda. A espessura óptica é expressa por

$$\tau_\lambda = \int \sigma_\lambda N(x) dx \quad (16)$$

em que σ_λ é a seção transversal de extinção, dx o caminho de integração e $N(x)$ a densidade superficial de átomos ou moléculas opticamente ativos [partículas/cm²].

Se a irradiância monocromática que ingressa no meio é E_λ e, após atravessar uma espessura ds do meio, a intensidade que sai é $E_\lambda + dE_\lambda$, a atenuação da radiação pode ser expressa na forma

$$dE_\lambda = -\kappa_\lambda E_\lambda ds \quad (17)$$

sendo κ_λ o coeficiente de absorção volumétrica [cm^{-1}]. Esta expressão indica que o feixe radiativo sofre atenuação proporcional à intensidade do próprio feixe e à quantidade de matéria opticamente ativa no caminho. Isto indica que a atenuação da radiação solar depende linearmente da quantidade total de atenuadores no caminho.

O coeficiente de absorção volumétrico relaciona-se à seção transversal de extinção através de

$$\kappa_\lambda = \sigma_\lambda N \quad (18)$$

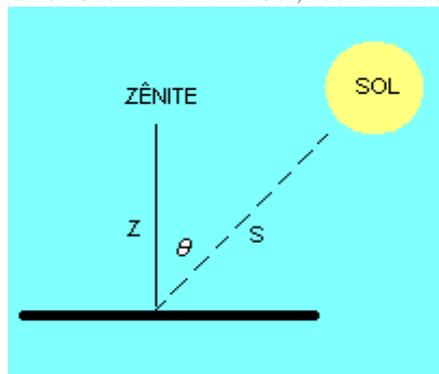
Integrando-se a Eq. 17 e utilizando-se a Eq. 18, obtém-se

$$E_\lambda = E_\lambda^0 \exp\left(-\int \sigma_\lambda N ds\right) \quad (19)$$

Na Eq. (19), E_λ^0 pode representar a irradiância espectral extraterrestre ou no topo da atmosfera terrestre. De acordo com a figura 16, conclui-se que

$$ds = dz \sec(\theta) \quad (20)$$

Figura 16: Geometria Terra-Sol, coordenadas locais



Fonte: autoria própria

Substituindo a Eq. 20 na Eq. 19, obtém-se

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \exp\left(-\sec(\theta) \int \sigma_{\lambda} N dz\right) \quad (21)$$

em que m é definida como a massa de ar óptica que é dada por

$$m = \sec(\theta) \quad (22)$$

Substituindo a Eq.(16) e a Eq.(22) na Eq.(21) obtém-se

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \exp(-\tau_{\lambda} m) \quad (23)$$

em que a Eq.(23) é conhecida como lei de Beer.

2.3.2.2. Obtenção da espessura óptica a partir do método de Langley

Aplicando-se o operador (ln) na Eq.(23) obtém-se

$$\ln(E_{\lambda}) = \ln(E_{\lambda}^0) - \tau_{\lambda} m \quad (24)$$

que é da mesma forma que a equação da reta

$$Y = A + B * X \quad (25)$$

em que $E_{\lambda}^0 = e^A$ e $\tau_{\lambda} = -B$. O processo de linearização para a obtenção da estimativa da irradiância no topo da atmosfera e da espessura óptica de aerossol é conhecido como método de Langley. Para sua aplicação, é preciso medir a radiação direta, de banda estreita, quase monocromática, ao longo de um mesmo dia, para evitar grandes variações na transparência atmosférica. As medidas da intensidade da luz do sol, ao longo do dia (massas de ar diferenciadas), plotadas em um gráfico, permitem extrapolar o valor da ordenada para massa de ar igual a zero. Esse valor é a constante solar.

2.4. Nuvens

Nuvem é um conjunto de partículas minúsculas de água líquida ou de gelo, ou de ambas ao mesmo tempo, em suspensão na atmosfera. Este conjunto pode também conter partículas procedentes de vapores industriais, fumaças ou poeiras. Os principais fatores que intervêm na descrição do aspecto de uma nuvem são suas dimensões, sua forma, sua estrutura e sua textura, assim como sua luminância e cor. Estes fatores serão levados em consideração na descrição de cada uma das formas características das nuvens. Elas são o principal atenuador da irradiação solar na atmosfera e a tornam de caráter estocástica.

2.4.1. Tipos de Nuvens

De acordo com o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) as nuvens são classificadas com base em dois critérios: aparência e altitude. Com base na aparência, distinguem-se três tipos: cirrus, cumulus e stratus.

- **Cirrus ou Cirriformes**

Nuvens de desenvolvimento horizontal. São fibrosas, brancas, de aspecto frágil e ocupam as altas atmosferas. São formadas por cristais de gelo minúsculos e não originam a precipitação, porém elas são fortes indicativos de precipitação.

- **Cumulus ou Cumuliformes**

São nuvens de desenvolvimento vertical, com aparência de domos salientes, as quais têm grande extensão; surgem isoladas; associam-se à precipitação forte, em pancadas e localizadas.

- **Stratus ou Estratiformes**

Nuvens de desenvolvimento horizontal, cobrindo grande parte do céu ou todo o céu; de pouca espessura; associam-se à precipitação de caráter leve e contínuo.

Toda nuvem se apresenta em uma destas formas básicas, ou em uma combinação delas. De acordo com o Atlas Internacional de Nuvens da OMM (Organização Meteorológica Mundial), existem três categorias de nuvens quanto à sua localização em termos de altura:

- **Nuvens Altas**

Têm base acima de 6 km de altura – sólidas (constituídas por cristais de gelo).

- **Nuvens Médias**

Têm base entre 2 a 4 km de altura nos pólos, entre 2 a 7 km em latitudes médias, e entre 2 a 8 km no equador - líquidas e mistas (constituídas por gotículas de água e cristais de gelo).

- **Nuvens Baixas**

Têm base até 2 km de altura – líquidas (constituídas por gotículas de água).

A figura 17 apresenta os diferentes tipos de nuvens combinados às suas altitudes médias.



Fonte: http://www.avlan.net/web/Menu_Dicas_meteorologia.htm

Em Grimm (2012), é comentado que estes números não são fixos. Há variações sazonais e latitudinais. Em altas latitudes, ou, durante o inverno, em latitudes médias, as nuvens altas são, geralmente, encontradas em altitudes menores.

Devido às baixas temperaturas e a pequenas quantidades de vapor d'água, em altas altitudes, todas as nuvens altas são finas e formadas de cristais de gelo. Como há mais vapor d'água disponível em altitudes mais baixas, as nuvens médias e baixas são mais densas.

Nuvens com desenvolvimento vertical estão relacionadas com ar instável. As correntes convectivas associadas ao ar instável podem produzir nuvens cumulus, cumulus congestus e cumulonimbus. Como a convecção é controlada pelo aquecimento solar, o desenvolvimento de nuvens cumulus, frequentemente, segue a variação diurna da insolação. Num dia de bom tempo, as nuvens cumulus começam a se formar do meio para o final da manhã, após o sol ter aquecido o solo. A cobertura de cumulus no céu é maior à tarde - usualmente no período mais quente do

dia. Se as nuvens cumulus apresentam algum crescimento vertical, estas normalmente são chamadas de nuvens de "bom tempo" e podem produzir chuva leve. Ao aproximar-se do pôr-do-sol, a convecção se enfraquece e as nuvens cumulus começam a se dissipar (elas evaporam).

Na tabela 3, encontram-se os tipos básicos de nuvens, mostrando-se sua família, altura e características elementares.

Tabela 3: Tipos básicos de nuvens

FAMÍLIA DE NUVENS E ALTURA	TIPO DE NUVEM	CARACTERÍSTICAS
NUVENS ALTAS base acima de 6km de altura – são sólidas	Cirrus (Ci)	Aspecto delicado, sedoso ou fibroso, cor branca brilhante.
	Cirrocumulus (Cc)	Delgadas, compostas de elementos muito pequenos em forma de grânulos e rugas. Indicam base de corrente de jato e turbulência.
	Cirrostratus (Cs)	Véu transparente, fino e esbranquiçado, sem ocultar o sol ou a lua, apresentam o fenômeno de halo (fotometeoro).
NUVENS MÉDIAS base entre 2 a 4 km de altura nos pólos, entre 2 a 7 km em latitudes médias, e entre 2 a 8 km no equador - líquidas e mistas	Altostratus (As)	Camadas cinzentas ou azuladas, muitas vezes associadas a altocumulus; compostas de gotículas superesfriadas e cristais de gelo; não formam halo, encobrem o sol; precipitação leve e contínua.
	Altostratus (As)	Camadas cinzentas ou azuladas, muitas vezes associadas a altocumulus; compostas de gotículas superesfriadas e cristais de gelo; não formam halo, encobrem o sol; precipitação leve e contínua.
NUVENS BAIXAS base até 2km de altura - líquidas	Stratocumulus (Sc)	Lençol contínuo ou descontínuo, de cor cinza ou esbranquiçada, tendo sempre partes escuras. Quando em vôo, há turbulência dentro da nuvem.
	Stratus (St)	Muito baixas, em camadas uniformes e suaves, cor cinza; coladas à superfície, é o nevoeiro; apresenta topo uniforme (ar estável) e produz chuvisco (garoa). Quando se apresentam fracionadas são chamadas fractostratus (FS).
	Nimbostratus (Ns)	Aspecto amorfo, base difusa e baixa, muito espessa, escura ou cinzenta; produz precipitação intermitente e mais ou menos intensa.
NUVENS COM DESENVOLVIMENTO VERTICAL	Cumulus (Cu)	Contornos bem definidos, assemelham-se a couve-flor; máxima frequência sobre a terra de dia e sobre a água de noite. Podem ser orográficas ou térmicas (convectivas); apresentam precipitação em forma de pancadas; correntes convectivas. Quando se apresentam fracionadas são chamadas fractocumulus (FC). As muito desenvolvidas são chamadas cumulus congestus.
	Cumulonimbus (Cb)	Nuvem de trovoadas; base entre 700 e 1.500 m, com topos chegando a 24 e 35 km de altura, sendo a média entre 9 e 12 km; são formadas por gotas d'água, cristais de gelo, gotas superesfriadas, flocos de neve e granizo. Caracterizadas pela "bigorna": o topo apresenta expansão horizontal devido aos ventos superiores, lembrando a forma de uma bigorna de ferreiro, e é formado por cristais de gelo, sendo nuvens do tipo Cirrostratus (CS).
OBSERVAÇÃO: <i>nimbostratus</i> e <i>cumulonimbus</i> são as nuvens responsáveis pela maior parte da precipitação		

Fonte: Grimm (2012)

2.4.2. Sky Imager

O método usual para a realização do trabalho de mapeamento das nuvens no céu é a sua inspeção visual, realizada por técnicas em superfície. A observação da nebulosidade do céu é realizada visualmente, como operação de rotina nos aeroportos e estações meteorológicas da rede meteorológica nacional. O mapeamento das nuvens pode também ser realizado através do emprego da análise espacial/temporal das imagens de satélites meteorológicos.

Os métodos atualmente existentes podem ser agrupados da seguinte forma: a) métodos que estabelecem valores limiares para a detecção de nuvens e avaliam pixel a pixel da imagem de um ou mais canais espectrais fornecidos pelo satélite; b) técnicas e métodos que analisam as propriedades estatísticas das radiancias visível e/ou infravermelha em grupos de píxeis ou em parte de imagens (MARIZA et al, 2005).

Instrumentos que realizam medidas de radiação solar como espectrofotômetro e fotômetro são utilizados para estudos de física e química da atmosfera. Entretanto, em dias em que há presença de nuvens ocorre um ruído inserido nesses dados devido a essa presença. A informação sobre a cobertura de nuvens nos sítios de coleta de dados desses instrumentos é de extrema relevância para a garantia da confiabilidade dos dados oriundos desses instrumentos.

Trabalhos desenvolvidos por Santos (1957), Holle e Mackay (1975) entre outros, mostram a persistência na busca de obter informações através de imagens de todo o céu, adquiridas com câmeras e lente grande angular do tipo “olho de peixe” e chapas fotográficas. Após a revelação das chapas fotográficas, a fração da cobertura de nuvem era realizada com o auxílio de uma grade para planificação das imagens e posterior mapeamento das nuvens.

Shields et al. (1988) e Feister et al. (2000) propuseram metodologias para determinação da cobertura de nuvens utilizando câmera digital e algoritmos que utilizam a razão entre o vermelho e o azul do sistema RGB de cores. Pelos esforços empregados por diversos grupos de pesquisa para obtenção da fração de cobertura de nuvens em superfície, percebe-se a importância desse tipo de informação para a comunidade científica internacional (MARIZA et al., 2005).

Em termos de instrumentação para fornecer a fração de nuvens em superfície, existe um equipamento fabricado pela companhia Yankee Environmental System, chamado Total Sky Imager (TSI) em duas versões 440 e 880. O sistema possui uma calota convexa polida sobre uma base aquecida que evita a condensação de água. Junto à base, existe um braço que sustenta uma câmera apontando para o centro da calota que reflete em sua parte convexa todo o

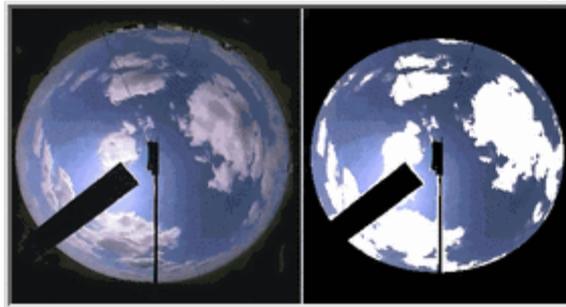
hemisfério visível. A câmera, que está apoiada sobre o braço fixo à base, captura as imagens. O sistema do TSI-880 permite o armazenamento de imagens, enquanto o TSI-440 necessita da transferência das imagens capturadas para outro dispositivo. O custo desse tipo de equipamento é bastante elevado para que entre em rotinas nas estações de superfície. A figura 18 mostra o modelo TSI-880. Já na figura 19, tem-se um exemplo de uma imagem obtida pelo modelo TSI-880.

Figura 18: Sky Imager modelo TSI-880



Fonte: YES (2016)

Figura 19: Exemplo de imagem obtida através do Sky Imager TSI-880



Fonte: YES (2016)

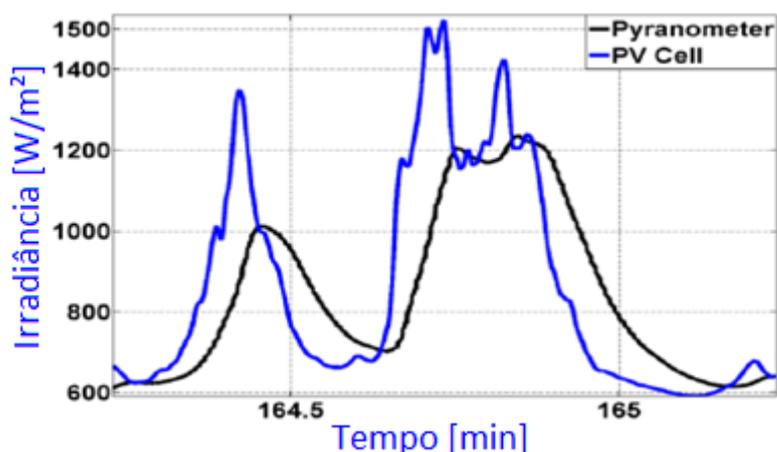
2.5. Irradiação Extrema devido à contribuição das Nuvens

Yordanov et al. (2012) explicaram que valores de irradiância de pico registrados anteriormente, no local de ensaio (Sul da Noruega, latitude de $58^{\circ}21'N$), presente em um plano inclinado, voltado para o sul, atingiu apenas cerca de 1150 W/m^2 , devido à má-resolução temporal de 20 segundos de seus instrumentos de medição (piranômetro de termopilha). Neste mesmo estudo, mostra-se que a frequência de amostragem ideal depende da aplicação.

Na análise das variações de irradiância que acontecem em escala de tempo de sub-minuto, 1 segundo de resolução é vantajoso em relação à amostragem a cada minuto. No entanto, muito poucos laboratórios no mundo parecem gravar irradiância com resoluções menores que 1 minuto. Eventualmente, o tempo de resposta do sensor torna-se um fator limitante.

Assim, Piranômetros de Termopilha não são recomendados para estudos detalhados de irradiância extrema, enquanto que os dispositivos de fotodiodos baseados em PV podem ter tempos de resposta satisfatórios, na ordem de milissegundos. Na figura 20, pode-se perceber que o piranômetro, por ser um sensor considerado lento, apresenta além de um atraso, uma suavização na curva de resposta, perdendo informações mais detalhadas do efeito de amplificação da irradiância pelas nuvens.

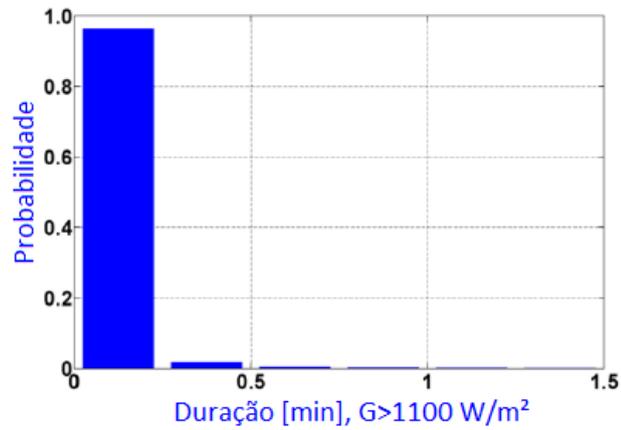
Figura 20: Irradiância extrema em Maio de 2012



Fonte: Yordanov et al. (2012)

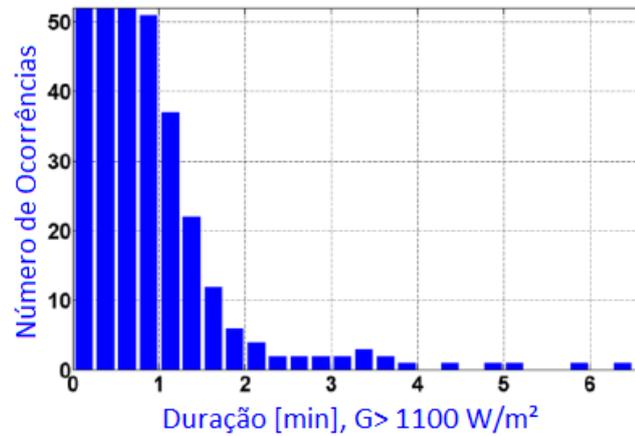
O máximo anual e alguns dos máximos mensais para a localidade de Grimstad, sul da Noruega (latitude 58°21'N), no ano de 2011, foram registrados com um piranômetro de termopilha. A figura 21 apresenta a distribuição de duração das irradiâncias extremas com valor de 1100 W/m² registrados neste ano. A figura 22 mostra os maiores eventos registrados de irradiância extrema no ano de 2011. Já na figura 23, vê-se o percentual de energia registrado para o ano de 2011. Devido ao local de teste ser em uma área costeira, as velocidades normalmente elevadas do vento resultaram em nuvens que se movem rapidamente e, portanto, na sua grande maioria, os eventos foram de curta duração.

Figura 21: Distribuição de duração das Irradiâncias extremas com valor de 1100 W/m^2 registrados no ano de 2011



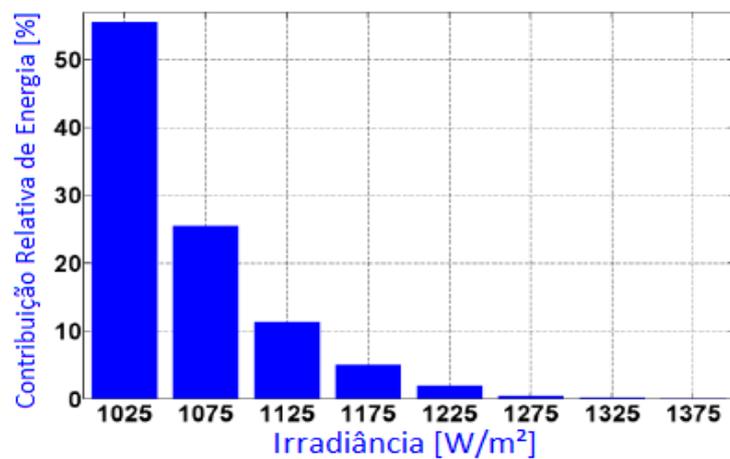
Fonte: Yordanov et al. (2012)

Figura 22: Os maiores eventos registrados de irradiância extrema no ano de 2011



Fonte: Yordanov et al. (2012)

Figura 23: Percentual dos eventos por faixa de energia registrados no ano de 2011



Fonte: Yordanov et al. (2012)

2.6. Efeitos nocivos causados pela Radiação Extrema

Em pequenas instalações, a ocorrência do fenômeno da irradiância extrema pode iniciar arcos elétricos em módulos e provocar o dano parcial de células FV. Estudos anteriores, realizados por Yordanov et al. (2012) sobre estes efeitos, indicam que estas condições severas de funcionamento dos módulos fotovoltaicos podem ocorrer naturalmente em todas as latitudes dentro de $\pm 60^\circ$ latitude em torno do equador.

Diversos efeitos nocivos à saúde podem ser causados pelo excesso de exposição à radiação ultravioleta (UV) solar, tais como queimaduras, sardas, debilitação do sistema imunológico, envelhecimento precoce, catarata e câncer de pele (CORRÊA, 2004). Estimativas da Organização Mundial de Saúde (OMS) apontam que a catarata é a causa mais prevalente de perda visual mundialmente e a responsável por metade de todos os indivíduos cegos. Segundo levantamentos do início da década de 90, estimava-se haver cerca de 350 mil cegos decorrentes da catarata no Brasil (WHO, 2016).

O Instituto Nacional do Câncer (INCA, 2016) previu o surgimento de 175.760 novos casos de câncer de pele não-melanoma para 2016. Yordanov et al. (2012) comenta que, possivelmente, esses efeitos nocivos podem estar associados também à contribuição das nuvens em relação ao aumento da radiação UV solar sobre os organismos vivos. Além disso, estudos do fenômeno de amplificação UV por nuvens (SABBURG et al., 2000; CEDE et al., 2002) mostraram que certas configurações geométricas de nuvens resultam num aumento da irradiação UV solar de até 20%. Esse fato deve ser considerado e estudado detidamente perante ocorrências da amplificação da radiação solar de longa duração, observada durante mais de 30 minutos em Gladstone, Austrália.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Procedimentos Metodológicos

A presente secção está estruturada para explicar o conjunto de procedimentos metodológicos organizados, a partir dos objetivos traçados, que ajudaram na investigação do problema apresentado nesta tese. Apresentam-se nesta secção de forma qualitativa: os principais procedimentos, a abordagem, os instrumentos de coleta de dados e análise dos resultados.

Para melhor compreensão dos procedimentos metodológicos, retoma-se o objetivo da tese, que tem como foco principal, estudar o efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global medido no Nordeste do Brasil. Para tanto, utilizou-se um banco de dados robusto de medições de oito localidades diferentes, o qual será detalhada na secção 3.2 (Base de Dados). De posse das medidas da irradiância solar global, houve a necessidade de selecionar os valores que ultrapassaram a condição de céu claro e/ou a extraterrestre. Assim, surgiu a necessidade de construção de um software para filtrar esses dados. Seus parâmetros de entrada, medidas da irradiância solar total, tela de apresentação e suas características gerais são abordados na secção 3.3 (SunCloud-E: Software para localização do efeito lente). Este software compara os valores do banco de dados com o modelo de céu claro e/ou extraterrestre, modelos estes baseados no Atlas Solar Europeu (ESRA). O software necessita basicamente das coordenadas geográficas e do fator de turbidez de Linke. Este último pode ser estimado via software, secção 3.4 (Utilização do SunCloud-E para obtenção do modelo de céu claro), ou medido por um dos dois fotômetros construídos, secção 3.5 (Cálculo do fator de turbidez de Linke obtido através da profundidade óptica de aerossóis AOD). De posse do fator de turbidez de Linke, o software construído gerou planilhas que possibilitaram o cálculo do tempo médio de duração do fenômeno e a verificação do caráter sazonal do fenômeno, assim como a verificação da influência de variáveis geográficas, tais como: altitude, longitude e latitude no fenômeno. Por fim, devemos ter em vista que a secção 4 (Resultados e Discussão) foi dividida em duas partes: 4.1(Estatística do Fenômeno para as Ocorrências acima da Irradiância Extraterrestre) e 4.2 (Modelagem do evento extremo utilizando determinação local do AOD). A primeira parte faz a análise estatística detalhada do fenômeno da amplificação da radiação no estado de Alagoas para os valores de irradiância que ultrapassaram a condição extraterrestre. Neste caso o fator de turbidez de Linke é igual a zero. Já a segunda parte faz uso do fotômetro para medição da AOD,

sua utilização para geração da irradiação solar em condição de céu claro e comparação com os resultados experimentais para a localidade de Recife. Filtrar as medidas em relação à condição de céu claro fez-se necessário, devido ao pequeno número de medições da profundidade óptica de aerossóis (AOD) para a localidade de Recife. Toda a análise estatística dos resultados encontrados na tese foram feitos com o uso do software Minitab. É o software mais utilizado em estatística aplicada, devido à facilidade de uso, precisão e quantidade de métodos disponíveis (Campos, 2003).

3.2. Base de Dados

Oito estações foram instaladas, em 2007, no estado de Alagoas, para medições da radiação solar global diária. A tabela 4 mostra as estações de medição da radiação solar global, as suas coordenadas geográficas, as condições climáticas e o período de tempo de medição. Durante o período estudado, a constante solar variou menos de 0,015%, passando de 1.365,4 W/m² para 1.365,2 W/m², dada pela World Radiation Center (WRC) em Davos, Suíça (2009).

Para esta análise, serão empregados esses valores, mas deve-se notar que a SORCE / NASA (2009) apresentam dados de satélite para o mesmo período, os quais variaram de 1360,98 W/m², em 1 de fevereiro de 2008, a 1360,80 W/m², no último dia do período, 31 de Janeiro de 2009. Deve-se notar que o valor médio dado pela WRC é de 1365,3 W/m² e que o valor médio dado pela SORCE 1360,89 W/m², que difere de 0,32%. A figura 24 mostra os locais das estações solarimétricas no estado de Alagoas.

Tabela 4: Localização das estações para as medições de radiação solar no estado de AL

Estações	Coordenadas Geográficas			Clima	Período
	Lat.	Long.	H(m)		
Água Branca	9°15'15''S	37°56'15''W	593	Tropical – Semi-arido	Jan-Nov 2008
Santana do Ipanema	9°22'31''S	37°13'54''W	279	Tropical – Semi-arido	Jan-Dez 2008
Palmeira dos Índios	9°24'20''S	36°39'23''W	328	Tropical – Semi-arido	Jan-Nov 2008
Maceió	9°28'29''S	35°49'44''W	127	Tropical – Marítimo	Jan-Set 2008
Laje	9°00'35''S	36°03'30''W	256	Tropical – Semi-arido	Jan-Dez 2008
Pão de Açúcar	9°44'54''S	37°26'12''W	19	Tropical – Semi-arido	Jan-Dez 2008
Arapiraca	9°45'09''S	36°39'40''W	264	Tropical – Semi-arido	Jan-Dez 2008
Coruripe	10°07'32''S	35°49'44''W	16	Tropical – Marítimo	Jan-Dez 2008

Figura 24: Localidades do Estado de Alagoas com estações solarimétricas: Coruripe, Água Branca, Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, Maceió, São José da Laje, Pão de Açúcar e Arapiraca



A medição da radiação solar em cada estação foi realizada utilizando-se um piranômetro Black & White (B&W) da Eppley. O procedimento de controle de qualidade adotado no presente trabalho atende às diretrizes da Organização Mundial de Meteorologia (WMO - CIMO GUIDE, 2008). O piranômetro B&W é de classe 2 e sua calibração anual foi feita em conformidade com a norma ISO 9847, que preconiza a calibração de campo do piranômetro em comparação com um piranômetro de referência. A irradiância foi medida com 1 segundo de resolução e registrada como um valor médio de 1 minuto.

3.3. SunCloud-E: Software para a localização do efeito lente

Esta secção tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um software para a localização espaço-temporal da irradiância solar acima da condição de céu claro e/ou extraterrestre. O programa foi desenvolvido em Java, utilizando o modelo de céu claro do ESRA e apresenta facilidade de uso, porque necessita de poucos parâmetros de entrada.

3.3.1. Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada requeridos pelo modelo do ESRA, o qual foi utilizado na implementação do software, para a estimação da irradiância solar total, em um plano horizontal na superfície terrestre, em condição de céu claro são: latitude, longitude e altitude do local especificado, dia Juliano, hora solar e fator de Linke para massa de ar 2.

3.3.2. Medidas da Irradiância solar total

As medidas da irradiância solar total foram importadas dos arquivos das medições realizadas com piranômetro B&W da Eppley, as quais foram salvas em arquivo do tipo *.xlsx. O programa lê os valores contidos nessa planilha Excel e salva os mesmos em um banco de dados. A figura 25 apresenta um exemplo de um arquivo Excel para os valores medidos pelo piranômetro. Pode-se destacar a coluna A da planilha, em que se encontram o Timestamp, ou seja, o minuto de um certo dia de um determinado ano. Já na coluna H tem-se os valores de radiação horizontal total em W/m^2 . Nas outras colunas, tem-se: velocidade do vento, temperatura e umidade do ar, e restantes dos parâmetros meteorológicos.

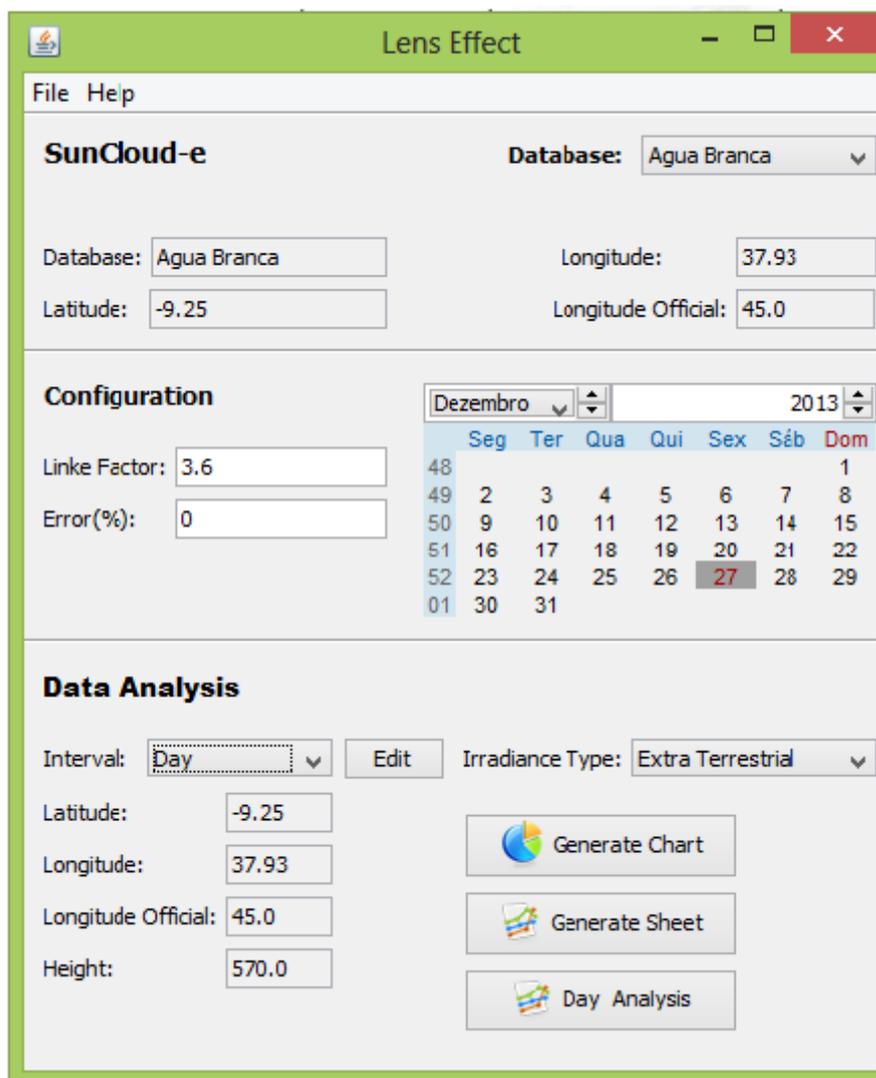
Figura 25: Exemplo das principais variáveis coletadas de uma estação solarimétrica

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	TOA5	EST A B	CR1000	6428	CR1000.St	CPU:EST A	32272	Dados							
2	TIMESTAMP	RECORD	CR1000_B	VelVento	DirVento	TempAR	RH_Max	RadHZtot	RadPAR_A	IlumHZ_A	IlumNORT	IlumSUL	IlumLESTE	IlumOESTE	Avg
3	TS	RN	Volts	m/s	Deg	Deg C	%	Wm-2	umol/s/m	klux	klux	klux	klux	klux	
4			Avg	WVc	WVc	Avg	Max	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	
5	01/01/2008 15:07	244708	13,12	4,845	104,4	29,92	36	846	1586	87	44,99	51,26	18,18	96,9	
6	01/01/2008 15:08	244709	13,12	5,373	104,5	29,9	36,27	851	1593	87,4	45,3	51,37	18,31	97	
7	01/01/2008 15:09	244710	13,12	6,173	103,6	29,89	36,47	849	1588	87,1	45,35	51,27	18,44	96,6	
8	01/01/2008 15:10	244711	13,12	5,296	104,5	29,92	36,78	832	1552	85,2	44,93	50,44	18,31	94,9	
9	01/01/2008 15:11	244712	13,12	4,589	102,3	29,74	36,64	796,5	1490	81,8	44,48	48,94	17,94	91,9	
10	01/01/2008 15:12	244713	13,12	3,765	107,5	29,64	37,21	622,1	1123	61,42	43,15	36,72	16,46	66,58	
11	01/01/2008 15:13	244714	13,12	6,173	104,8	29,68	36,64	522,2	1009	55,11	42,5	33,24	16,03	59,66	
12	01/01/2008 15:14	244715	13,12	5,012	111,9	29,66	36,84	651,8	1217	66,72	42,91	40,6	16,5	76,68	
13	01/01/2008 15:15	244716	13,12	4,449	118,3	29,7	36,88	404,2	707,5	38,42	41,04	23,4	14,74	41,32	
14	01/01/2008 15:16	244717	13,12	5,328	106,9	29,65	36,64	274,3	516,8	27,86	39,77	17,42	13,82	28,78	
15	01/01/2008 15:17	244718	13,12	5,041	114,5	29,54	37,21	261,7	498,9	26,9	39,09	17,05	13,75	27,8	
16	01/01/2008 15:18	244719	13,12	3,954	118,8	29,45	37,18	253	490,7	26,45	38,42	17,09	13,9	26,99	
17	01/01/2008 15:19	244720	13,12	4,46	111,7	29,42	37,28	286,8	592,9	32,19	38,74	20,74	14,77	34,8	
18	01/01/2008 15:20	244721	13,12	2,707	110,8	29,35	37,35	385,9	708,1	38,62	39,5	24,75	15,15	44,3	
19	01/01/2008 15:21	244722	13,12	3,359	104,7	29,33	37,82	304,3	616,2	33,47	39,04	22,16	14,72	38,21	
20	01/01/2008 15:22	244723	13,13	4,139	119,6	29,37	37,65	371,7	673,8	36,68	39,15	23,3	14,9	42,58	
21	01/01/2008 15:23	244724	13,13	4,733	120,5	29,36	37,38	235,9	448,8	24,13	38,27	15,6	13,94	25,77	
22	01/01/2008 15:24	244725	13,13	3,963	128,6	29,34	37,45	223,4	433,6	23,3	37,92	15,64	13,77	25,08	
23	01/01/2008 15:25	244726	13,13	3,808	129,2	29,33	37,45	222,4	435,1	23,41	37,63	16,19	13,68	25,15	
24	01/01/2008 15:26	244727	13,13	5,165	144	29,3	37,35	238,8	452	24,35	37,42	17,07	13,68	25,0	

3.3.3. Tela de apresentação do Software

Na figura 26, é vista a tela de apresentação do software, a qual é dividida em três partes distintas: Database, Configuration e Data Analysis. No Database, tem-se uma barra de rolagem para se escolher uma localidade armazenada no banco de dados, no qual seus parâmetros geográficos já foram pré-configurados. Em Configuration, pode-se inserir o fator de Linke, o erro, o dia, o mês e o ano, que se deseja analisar. No Data Analysis, permite-se modificar (editar) a pré-configuração, caso seja necessária, e escolher o intervalo de análise, o qual pode ser: diário, mensal ou anual. Além disso, o software tem a possibilidade de gerar gráficos e planilhas para visualizações e análises do efeito lente.

Figura 26: Tela de apresentação do software

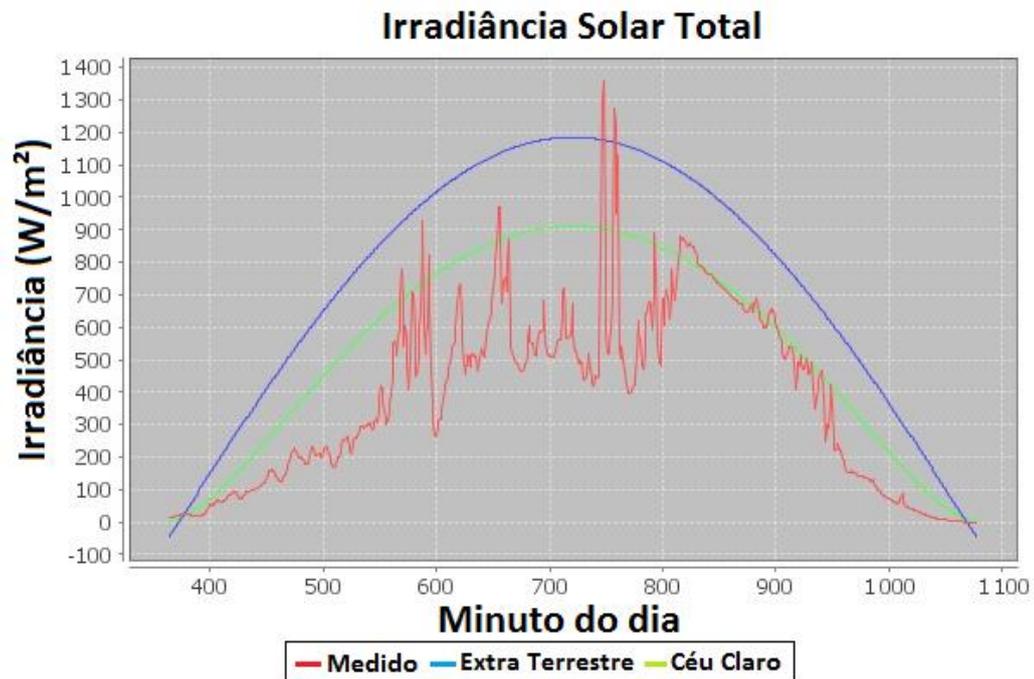


3.3.4. Geração dos gráficos para localização do efeito lente

Para a geração dos gráficos deve-se, primeiramente, escolher o intervalo de geração que pode ser: diário, mensal ou anual. Então, aperta-se o botão Generate Chart. Automaticamente, o software colherá os valores de irradiância medidos e salvos no banco de dados e confrontará com os valores calculados pelo modelo físico ESRA.

A figura 27 apresenta um exemplo da simulação feita para o dia 3 de agosto de 2008, mostrando a variação temporal da irradiância solar. Nela, vê-se, em vermelho, os valores medidos; em azul, os valores estimados para a irradiância extraterrestre; em verde, os valores estimados para a irradiância na condição de céu claro.

Figura 27: Exemplo da variação temporal da irradiância solar ao longo do dia 3 de agosto de 2008



3.3.5. Geração das planilhas para localização e análise do efeito lente

Outra opção encontrada no software é a possibilidade de gerar planilhas em Excel com a identificação da ocorrência do efeito lente, Fig. 28 e Fig. 29. Na Fig. 28, tem-se como exemplo uma planilha gerada para o mês de agosto do ano de 2008, para a localidade de Água Branca-AL. A coluna A desta planilha contém o minuto da ocorrência e na coluna D, está destacado em amarelo o valor da irradiância em W/m^2 para o dia 3 de agosto de 2008. Já para a Fig. 29, no lugar de irradiância em W/m^2 , foi colocado o valor 1 para indicar a ocorrência do efeito lente. Nas duas figuras, o valor 0 (zero) representa a não ocorrência do efeito lente.

Figura 28: Exemplo da planilha gerada pelo software, apresentando a variação temporal da irradiância solar ao longo do mês de agosto de 2008

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	SOLAR MI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	381	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	382	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	383	0	0	1273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	384	0	0	1297	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	385	1187	0	1360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	386	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	388	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	389	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	390	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	391	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	393	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	394	0	0	1275	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	395	0	0	1218	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	396	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	397	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	398	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	399	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	401	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	402	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	403	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	405	0	0	0	0	0	0	0	1202	0	0	0	0	0	0
28	406	0	0	0	0	0	1172	0	0	0	0	0	0	0	0
29	407	0	0	0	0	0	1202	0	0	0	0	0	0	1215	0
30	408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 29: Exemplo da planilha gerada pelo software, apresentando a variação temporal das ocorrências do efeito lente ao longo do mês de agosto de 2008

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	SOLAR MI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	381	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	382	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	383	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	384	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	385	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	386	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	388	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	389	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	390	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	391	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	393	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	394	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	395	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	396	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	397	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	398	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	399	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	401	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	402	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	403	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	405	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
28	406	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
29	407	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
30	408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A Fig. 30 apresenta um exemplo de planilha gerada pelo software, caso o usuário deseje fazer uma análise coletando os valores da irradiância horizontal total, velocidade do vento, direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação PAR, iluminância.

Figura 30: Exemplo da planilha gerada pelo software para análise da variação temporal das ocorrências do efeito lente ao longo do dia 03 de agosto de 2008

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	MINUTE	RadHZtot	CR1000	B_VelVento	Dir_Vento	TempAR	/RH_Max	RadPAR	/IllumHZ_Avg	IllumNORT	IllumSUL	/IllumLES	/IllumOESTE_Avg		
2	744	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	746	1273	13,23	0,848	31,39	22,95	81,1	2371	141,7	104,4	23,99	20,71	47,85		
5	747	1297	13,23	1,063	46,51	23,19	81,6	2399	143,2	103,1	23,6	21,52	48,68		
6	748	1360	13,23	1,347	58,01	23,44	79,85	2523	150,5	107,4	23,08	21,65	50,35		
7	749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8	750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
9	751	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
10	752	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
11	753	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
12	754	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
13	755	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
14	756	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
15	757	1275	13,22	2,29	62,34	23,89	82,5	2378	142,3	104,9	22,91	22,36	49,95		
16	758	1218	13,22	2,036	58,22	24,04	82,4	2169	129,3	94,7	21,88	20,93	46,72		
17	759	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
18	760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
19	761	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20	762	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
21	763	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
22	764	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
23	765	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
24	766	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25	767	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
26	768	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
27	769	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
28	770	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
29	771	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30	772	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

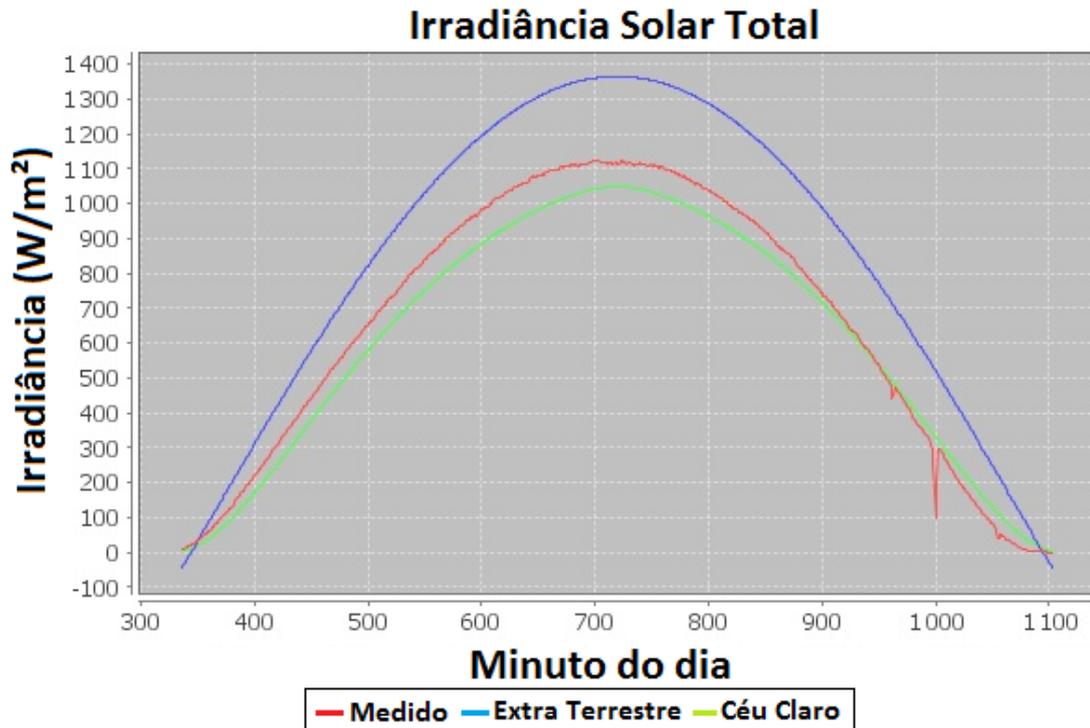
3.4. Utilização do SUNCLOUD-E para obtenção do modelo de céu claro

Os dados de entrada requeridos pelo modelo ESRA para a estimaco da irradiância solar total, em um plano horizontal, na superfície terrestre, em condio de céu claro, so: latitude, longitude e altitude do local especificado, dia Juliano, hora solar e ndice de Linke para massa de ar 2.

Para determinar o ndice de Linke, considerando-se o dia mais claro de cada mês, variou-se o ndice de turbidez de Linke até que a curva simulada pelo modelo ESRA (Em verde) coincidissem com a curva dos dados medidos (em vermelho).

Na Fig. 31, vê-se, como exemplo, um gráfico de céu claro, gerado pelo software para o dia 4 de fevereiro do ano de 2008, no qual, em azul, apresenta-se a irradiância solar total simulada para a condio extraterrestre; em verde, para a condio de céu claro; em vermelho, os dados medidos. No eixo das ordenadas, so apresentados os valores de irradiância, em W/m², e, no eixo das abcissas, o tempo de ocorrência, em minutos, para o dia simulado. Percebe-se que este dia foi um dia típico de céu límpido, com pouquíssimas ocorrências de nuvens, as quais ocorreram por volta do minuto 960 e 1000.

Figura 31: Irradiância solar total, extraterrestre, modelo de céu claro e medido para o dia 4 de fevereiro do ano de 2008 para a localidade de Água Branca – AL



3.5. Cálculo do fator de Linke obtida através da Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD)

3.5.1. Profundidade óptica de aerossol

Como foi visto na secção 3.3, para utilização do SunCloud-E, é necessário o índice de Turbidez de Linke, estimado ou medido para a estimação da profundidade óptica dos aerossóis. Com esse objetivo, foi construído um aparelho que possibilitasse a medição local da profundidade óptica dos aerossóis. A medição foi utilizada para o cálculo do índice de Turbidez de Linke do local, utilizado no SunCloud-E, e os resultados foram comparados com as observações experimentais do fenômeno de amplificação da irradiação solar.

A profundidade óptica de aerossóis foi medida com um aparelho construído com um sensor LED (Light-Emitting Diode) de banda estreita, centrada em 555nm, que mede a transmitância da radiação monocromática, através da atmosfera terrestre, a qual pode ser descrita pela lei de Beer.

A utilização de LED como sensores de radiação vem sendo empregada, em fotômetros solares, desde 1992, mas a versão construída é devida a Brooks et al. (2001). Observa-se,

experimentalmente, que a maior sensibilidade de absorção de um LED ocorre num comprimento de onda menor em relação ao comprimento de onda de máxima emissão do LED. Por exemplo, um LED verde que emite sua intensidade máxima em 555nm, tem sua resposta em absorção máxima em 525nm. Sua resposta espectral tem largura da ordem de 10 a 35nm, permitindo selecionar adequadamente o comprimento de onda da radiação a ser analisada (CAVALCANTI; HAAG, 2005). A figura 32 apresenta o espectro de emissão de alguns LED e a Figura 33, os espectros de absorção de LED, que são usados como sensores de radiação.

Figura 32: Espectro de emissão de LED azul, verde, amarelo e vermelho

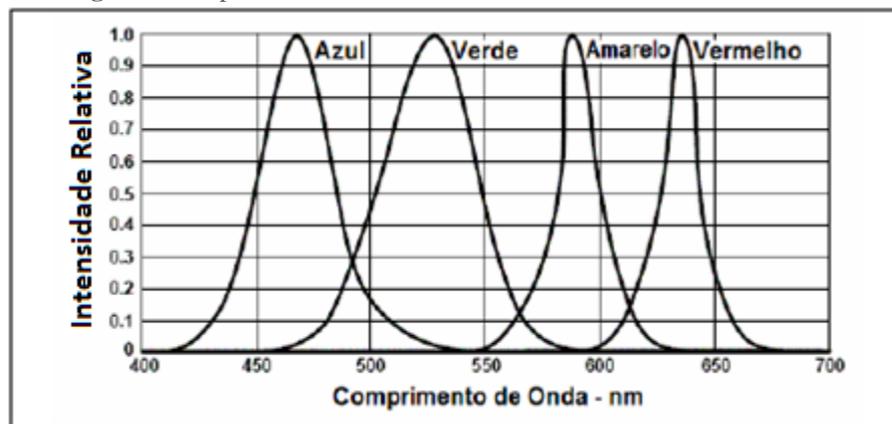
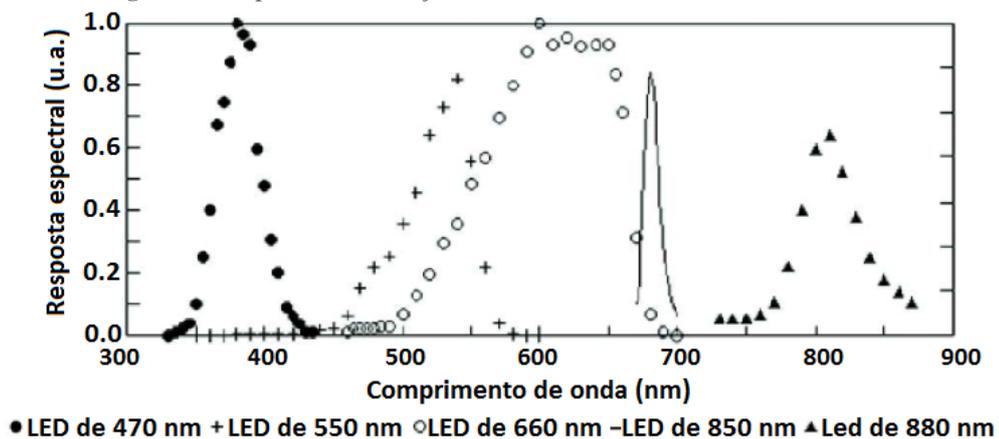


Figura 33: Espectro de absorção de LED azul, verde, amarelo e vermelho

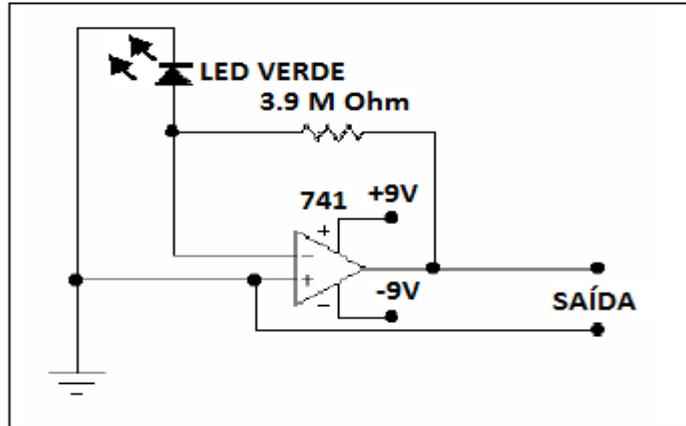


Fonte: CAVALCANTI et al. (2005)

Quando o sensor LED fica perpendicular ao raio do sol, gera uma corrente elétrica, em seus terminais, que é linearmente proporcional à intensidade da radiação recebida. No fotômetro, foi utilizado um conversor "corrente \times tensão", em que a corrente gerada pelo LED é convertida em tensão por um amplificador operacional, que é conectado a um display de

crystal líquido que tem a função de voltímetro. O circuito esquemático do aparelho pode ser visto na figura 34.

Figura 34: Circuito esquemático do fotômetro

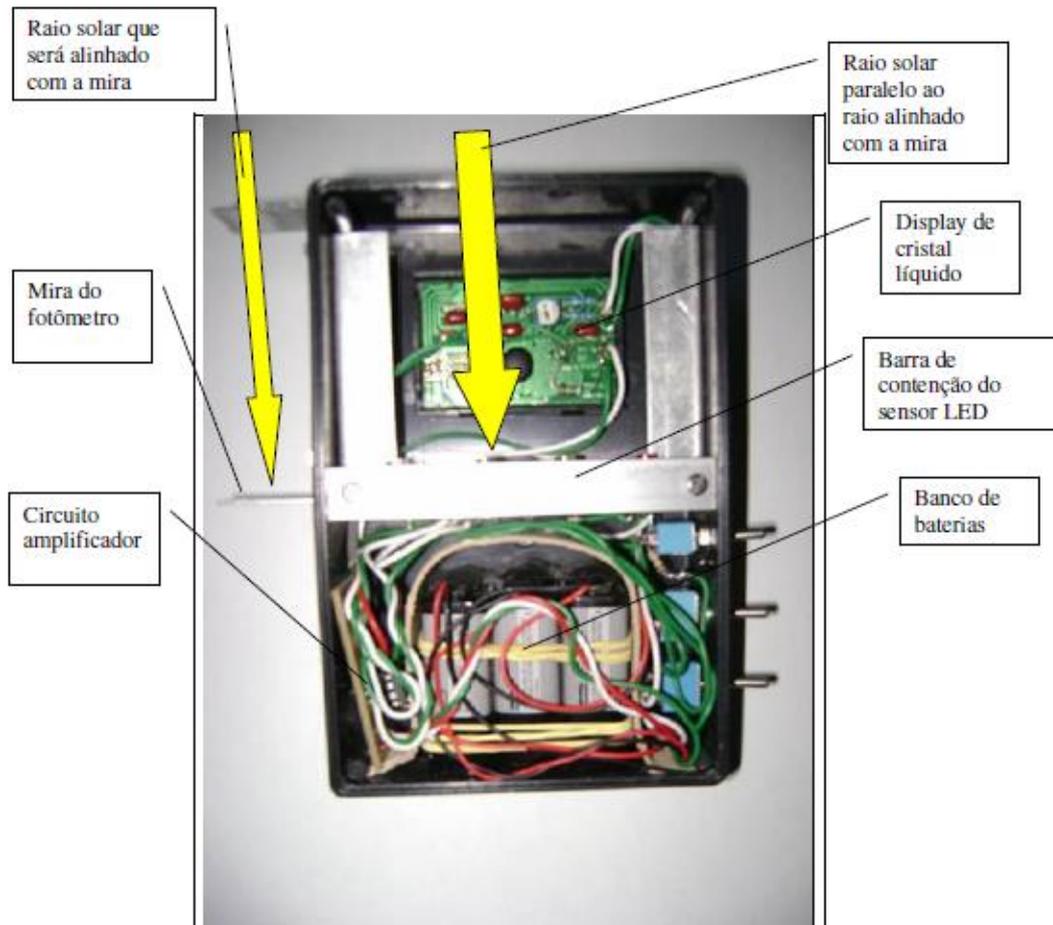


Na figura 35 é apresentada a vista frontal do fotômetro. Já na figura 36 podem ser observados detalhes do fotômetro montado, tais como: mira do fotômetro, barra de contenção do sensor LED, display de cristal líquido, banco de baterias, circuito amplificador e finalmente os raios solares, um que será alinhado com a mira do fotômetro e outro que chega ao sensor LED, o qual é paralelo ao primeiro raio, dando a certeza do alinhamento do segundo raio com o sensor LED.

Figura 35: Vista frontal do fotômetro



Figura 36: Vista traseira fotômetro



Deve-se ter em vista que o fotômetro utilizou componentes de baixo custo e ampla comercialização, tornando-o um equipamento de fácil construção e simplicidade de uso. Mais detalhes sobre a construção do fotômetro podem ser encontrados em Brooks (2001).

Também foi construído um fotômetro automático que rastreia o sol e armazena os dados em um cartão de memória (figura 37). Ele utiliza o sistema embarcado Arduino, o qual foi programado para comandar um servo motor para fazer incidir os raios solares em um LED verde, que serve de sensor para medir a irradiância direta e armazena os dados coletados em um SD card (cartão de memória).

Também na figura 37 (lado direito) podem ser observados detalhes do fotômetro automatizado montado, tais como: mira do fotômetro, ajuste da inclinação, circuito de controle, e, finalmente os raios solares, um que será alinhado com a mira do fotômetro e outro que chega ao sensor LED, o qual é paralelo ao primeiro raio, dando a certeza do alinhamento do segundo raio com o sensor LED. Já na figura 38 podem ser observados os detalhes da vista interna da caixa de controle com os circuitos do fotômetro, tais como: drive de controle do servo, circuito

de amplificação, a placa arduino, o banco de baterias, o SD card, o relógio digital e a bateria de alimentação do arduino e do servo motor.

Figura 37: Vistas do fotômetro – (A) Raio solar alinhado com a mira; (B) Raio solar paralelo ao raio alinhado, (C) Colimadores com sensores LED; (D) Ajuste da inclinação; (E) Circuitos de controle do fotômetro

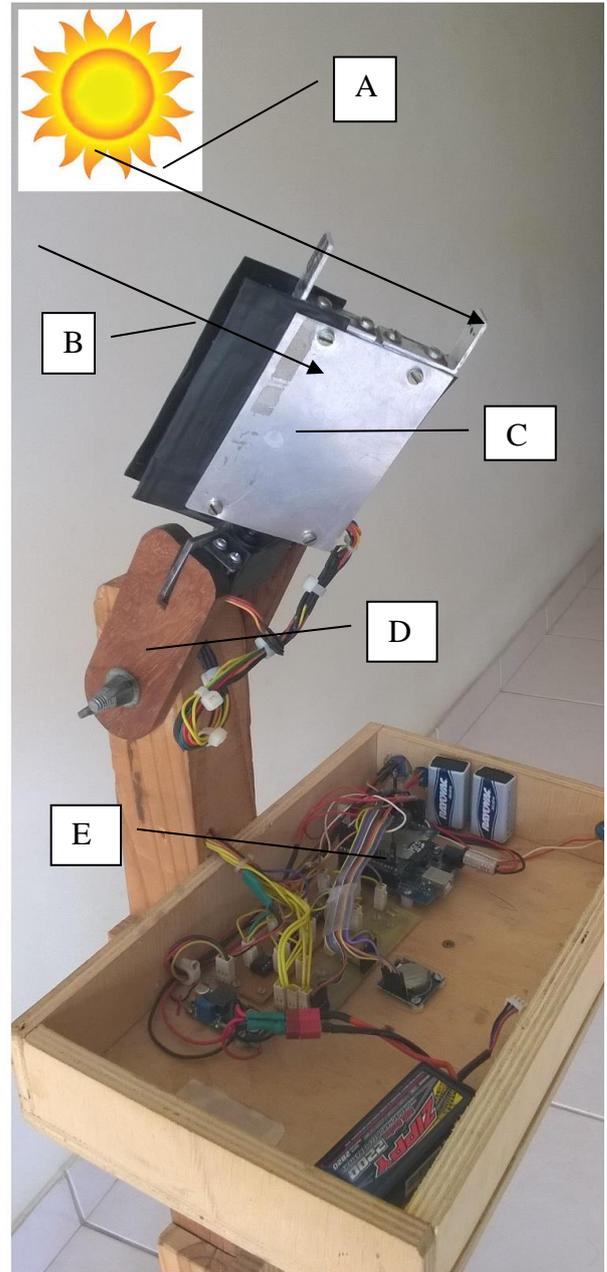
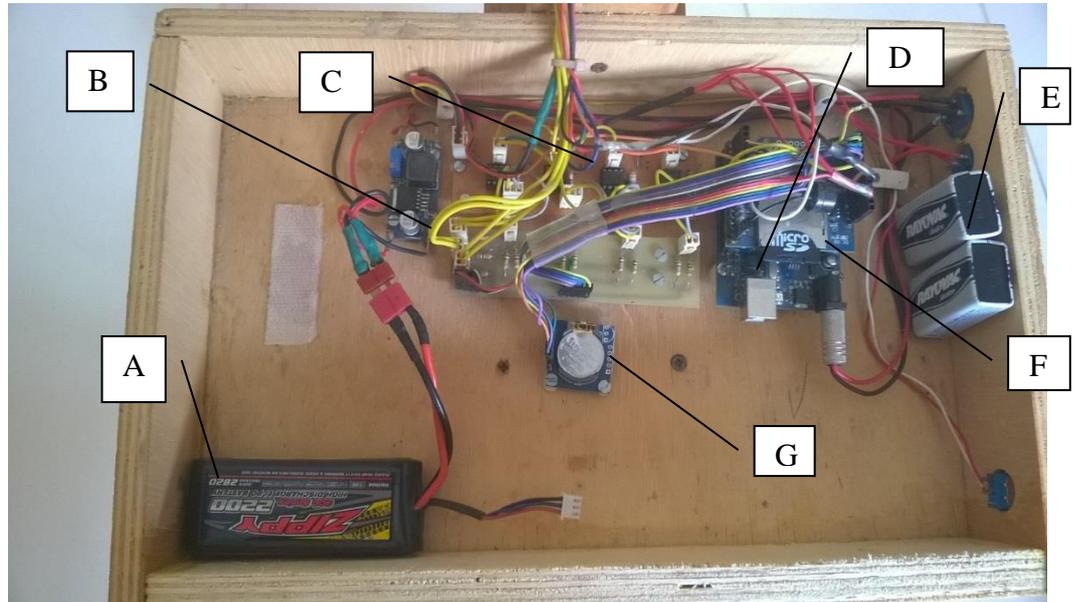


Figura 38: Vista interna da caixa de controle com os circuitos do fotômetro – (A) Bateria de alimentação; (B) Drive de controle do servo motor; (C) Circuito de amplificação; (D) Arduino; (E) Banco de baterias para amplificação do sinal dos sensores; (F) SD card; (G) Relógio digital



3.5.2. Obtenção da profundidade óptica de aerossóis diária

A determinação da profundidade óptica dos aerossóis foi feita utilizando-se os dados obtidos pelo fotômetro. Foram realizadas medidas com os fotômetros durante os meses de outubro e novembro de 2015 para Recife-PE (longitude de -34.72° e latitude de -8.03°), região metropolitana de Pernambuco, em intervalos de 60 em 60 minutos.

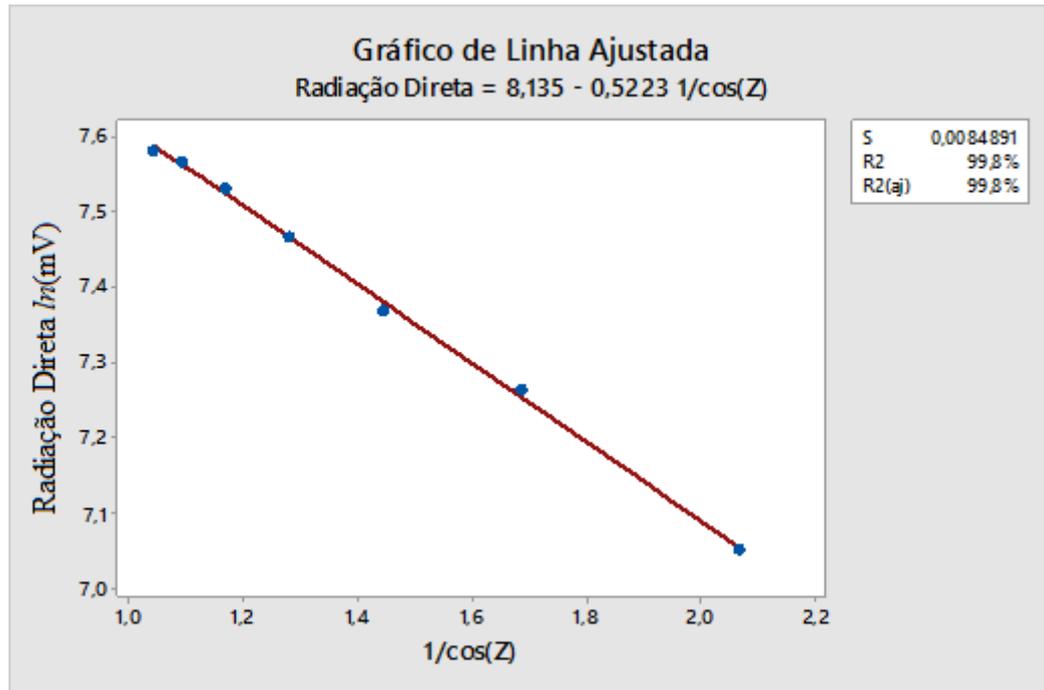
Realizou-se a coleta dos valores medidos com os aparelhos a partir das 12:30h até as 16:40h. Os valores medidos das tensões para cada massa de ar foram linearizados conforme pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5: Medidas realizadas no dia 07 de outubro de 2015 para a região de Recife-PE

mV	$\ln(\text{mV})$	$1/\cos(Z)$
1960,5	7,58	1,04
1932,0	7,57	1,09
1865,0	7,53	1,17
1749,0	7,47	1,28
1586,5	7,37	1,44
1426,5	7,26	1,69
1154,0	7,05	2,07

Na figura 39, é mostrado, como exemplo, a aplicação do método de Langley aos dados de radiação solar direta, medidos pelo fotômetro, no dia 07 de outubro de 2015, em função da massa de ar, para determinação da profundidade óptica de aerossóis. O valor obtido para a AOD neste dia foi de 0,52.

Figura 39: Exemplo da aplicação do método de Langley aos dados de radiação solar direta



3.5.3. Cálculo do fator de turbidez de Linke obtido através da AOD

Conforme Ineichen (2006), o índice de turbidez de Linke para massa de ar 2, T_{LK} pode ser escrito como:

$$T_{LK} = -(9.4 + 0.9m) * (\Delta_{cda} + \Delta_w + \tau_a) \quad (26)$$

em que m é a massa de ar 2, τ_a é a profundidade óptica de aerossóis,

Δ_{cda} , profundidade óptica pancromática de uma atmosférica límpida e seca dada por:

$$\Delta_{cda} = -0.101 + 0.235 * m^{-0.16} \quad (27)$$

Δ_w , profundidade óptica devido a água precipitável da forma:

$$\Delta_w = 0.112 * m^{-0.55} * w^{0.34} \quad (28)$$

sendo w a quantidade de água precipitável.

A partir da equação 26, pode-se calcular o TL_K , em termos do fator da profundidade óptica de aerossóis, da massa de ar e da quantidade de água precipitável w . A quantidade média horária de água precipitável foi calculada utilizando as equações 29, 30 e 31 (PAROSCIENTIFIC, 2004). A temperatura média horária e a umidade relativa foram obtidas na localizado na Cidade de Recife-PE.

$$\beta(T, RH) = \frac{aT}{(b+T)} + \ln(RH) \quad (29)$$

$$T_d = \frac{b \cdot \beta(T, RH)}{a - \beta(T, RH)} \quad (30)$$

em que T é a temperatura ambiente e RH é a umidade relativa, com $a=17.27$ e $b=237.7$

$$W = \exp[0,07 \cdot T_d - 0,075] \quad (31)$$

sendo W a quantidade de água precipitável (cm) e T_d a temperatura de orvalho ($^{\circ}\text{C}$).

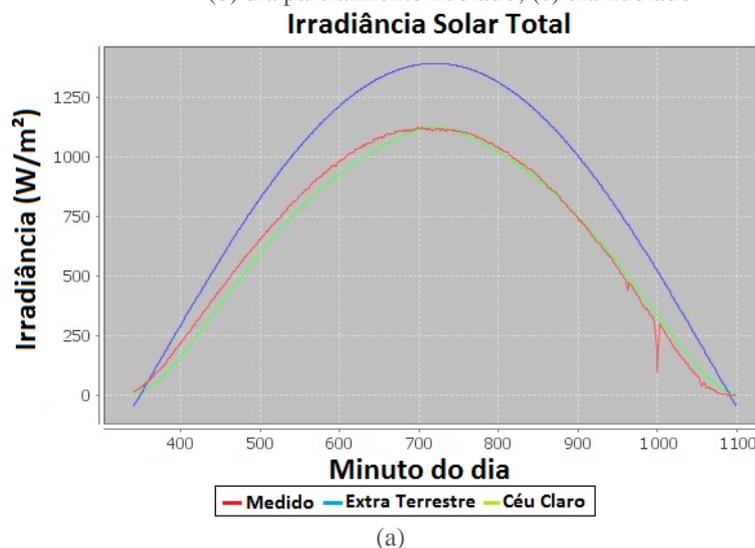
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

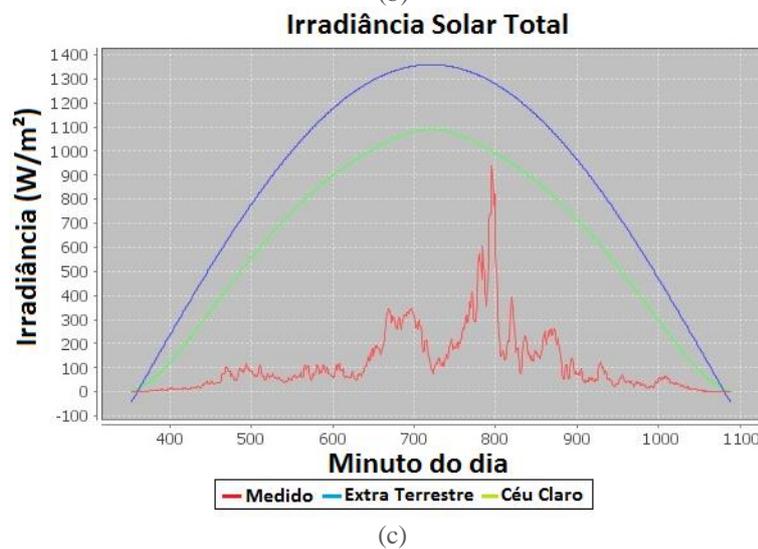
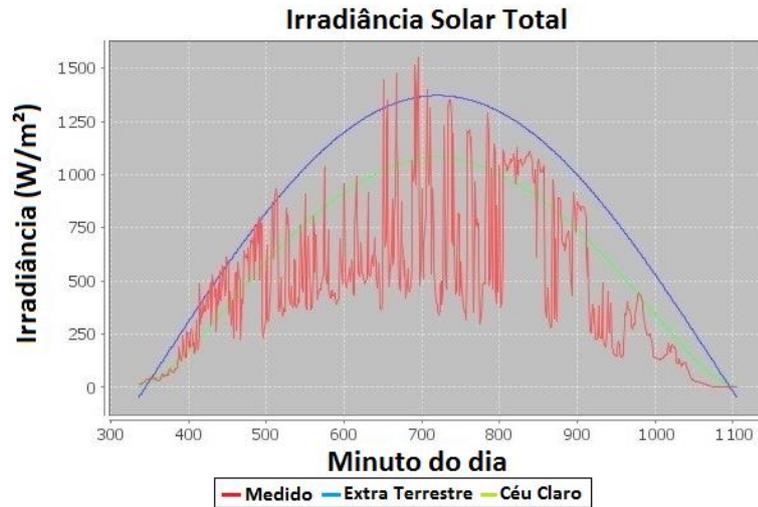
4.1. Estatística do Fenômeno para as Ocorrências acima da Irradiância Extraterrestre

A situação climática específica desta região intertropical do nordeste do Brasil, com sua cobertura diária predominantemente de nuvens do tipo cumulus, aumenta a possibilidade do fenômeno de amplificação da radiação, devido às reflexões nas bordas das nuvens e também aos múltiplos espalhamentos na superfície delas. A radiação solar total (linha vermelha), medida durante um dia, em Água Branca, é mostrada na Fig. 40. As linhas verde e azul são, respectivamente, a irradiação de céu claro, calculada pelo modelo ESRA (SCHARMER et al, 1994.; RIGOLLIER et al, 2001), e irradiação solar extraterrestre.

A primeira curva (Fig. 40a, de 4 de fevereiro), mostra um dia do céu quase claro, quando a radiação solar se aproximou bastante do modelo ESRA; a segunda (Fig. 40b, de 1 de janeiro), é de um dia com alguma variabilidade na cobertura de nuvens; e a terceira (Fig. 40c, de 20 de março), é de um dia muito nublado (encoberto). Os dias com céu limpo, ou em condições nubladas, não produzem o efeito de amplificação da irradiação solar, em contraste com o dia com um céu com nebulosidade variável, para os quais vários picos de amplificação puderam ser observados no período de 11:00h-12:00h (minutos 600-700), com picos de radiação solar acima dos níveis calculados para a condição de céu claro e para a irradiação extraterrestre.

Figura 40: Perfil de irradiância total para Água Branca – (a) dia de céu claro; (b) dia parcialmente nublado; (c) dia nublado





A contagem foi feita para todos os eventos com valores acima da irradiação extraterrestre. Como é visto na Fig. 40b, a radiação solar extraterrestre pode superar a radiação solar de céu claro por mais de 40% ao meio-dia, e, até mesmo, às 8:30h am; a diferença entre a irradiação extraterrestre e céu claro equivalente ainda é mais do que 200 W/m². Estes valores são muito maiores do que a resolução do instrumento (50 W/m²), o que garante, com grande confiabilidade, que tais eventos estão acima do nível de irradiação de céu claro e, em alguns casos, acima da irradiação extraterrestre. Portanto, ocorre o fenômeno de contribuição das nuvens.

A tabela 6 mostra os parâmetros estatísticos relativos às ocorrências do fenômeno de irradiação solar global devido à contribuição das nuvens durante vários meses do ano para a estação de Água Branca. A tabela apresenta o valor médio da duração do evento, o desvio padrão, a duração máxima (minutos consecutivos), os valores máximos medidos da irradiação solar, os números de dias no mês com ocorrências, o número total de ocorrências no mês

(número total de eventos de 1 minuto), o valor correspondente da radiação solar extraterrestre e, finalmente, a diferença entre a radiação solar extrema e a irradiação extraterrestre (Delta).

Tabela 6: Estatísticas básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global - Estação Solarimétrica de Água Branca

Meses	Duração Média (min)	Desvio Padrão (min)	Duração Máxima (min)	Irradiância Máxima (W/m^2)	Número de Dias	Duração Mensal (min)	Delta (W/m^2)
JAN	1,41	0,78	5	1551	18	149	187,0
FEV	1,61	1,10	6	1497	11	79	106,6
MAR	2,11	1,94	14	1489	21	304	174,2
ABR	2,01	1,51	12	1446	26	438	223,9
MAIO	2,00	1,63	11	1308	23	308	199,1
JUN	1,78	1,42	10	1251	25	258	307,0
JUL	1,70	1,20	8	1231	24	247	54,8
AGO	1,68	1,20	7	1473	29	253	238,4
SET	1,91	1,20	6	1407	18	155	75,7
OUT	1,86	1,35	9	1455	27	426	105,9
NOV	1,44	0,78	4	1405	16	75	96,2
DEZ	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Em Água Branca, a duração média do evento (ocorrências de 1 minuto) é entre 1 e 2 minutos para vários meses do ano. A duração de minutos consecutivos atingiu 14 minutos (março) e foram detectados vários eventos superiores com diferenças em relação à irradiação extraterrestre de mais do que $307 W/m^2$ (essas diferenças são muito mais elevadas do que o erro instrumental de 5%). Também pode ser visto que os eventos foram muito frequentes, com um mínimo de 11 dias para tais eventos (fevereiro) e até 29 dias em agosto. O valor do tempo mensal acumulado é significativo, atingindo um máximo de 438min ou 7,3h (Abril).

A tabela 7 mostra os parâmetros estatísticos relativos às ocorrências do fenômeno de contribuição de nuvens na irradiação solar global durante vários meses do ano para a estação de Maceió. A mudança de um clima tropical semi-árido (Água Branca) para um clima tropical marítimo produz uma mudança climática notável nos resultados: a duração média do evento é mais de 2 minutos, a duração acumulativa em minutos consecutivos atinge 29 minutos (mais que o dobro de Água Branca) e o número de dias em que o fenômeno ocorre torna-se maior do que 20. O tempo mensal acumulado também é bastante significativo e atinge 588 minutos ou 9,8 h (abril). Em resumo, um local tropical marítimo aumenta dramaticamente o fenômeno,

especialmente a duração, o número de acontecimentos consecutivos e o total de dias de ocorrência mensais.

Tabela 7: Estatísticas básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global – Estação Solarimétrica de Maceió

Meses	Duração Média (min)	Desvio Padrão (min)	Duração Máxima (min)	Irradiância Máxima (W/m ²)	Número de Dias	Duração Mensal (min)	Delta (W/m ²)
JAN	2,30	2,19	20	1554	27	428	195,6
FEV	2,23	2,08	16	1451	24	257	171,7
MAR	2,44	1,99	14	1648	24	366	296,2
ABR	2,83	2,64	23	1453	26	588	177,5
MAIO	2,54	2,07	11	1265	21	244	81,3
JUN	2,39	2,27	17	1235	26	397	172,1
JUL	2,29	2,10	13	1309	25	359	195,0
AGO	2,47	2,57	22	1367	22	446	192,2
SET	2,56	2,94	29	1446	26	501	188,8
OUT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
NOV	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DEZ	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

A tabela 8 mostra os parâmetros estatísticos relativos às ocorrências do fenômeno de contribuição de nuvens na irradiação solar global durante vários meses do ano para a estação de São José da Laje.

Tabela 8: Estatísticas básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global – Estação Solarimétrica de Laje

Meses	Duração Média (min)	Desvio Padrão (min)	Duração Máxima (min)	Irradiância Máxima (W/m ²)	Número de Dias	Duração Mensal (min)	Delta (W/m ²)
JAN	2,25	1,97	13	1541	24	286	156,7
FEV	2,29	174	9	1440	18	117	64,2
MAR	2,02	130	6	1485	22	160	140,0
ABR	2,32	220	12	1283	22	234	50,9
MAIO	2,10	195	10	1266	19	261	107,9
JUN	2,06	155	8	1191	24	348	82,1
JUL	1,67	131	10	1275	19	130	125,5
AGO	1,61	1,00	5	1312	21	164	65,1
SET	1,44	0,67	3	1343	15	62	1,4
OUT	1,95	1,22	6	1391	29	255	174,5
NOV	2,79	3,19	21	1258	28	379	55,1
DEZ	2,15	2,12	15	1312	23	146	0,1

A tabela 9 mostra os parâmetros estatísticos relativos às ocorrências do fenômeno de contribuição de nuvens, na irradiação solar global, durante vários meses do ano, para a estação de Coruripe.

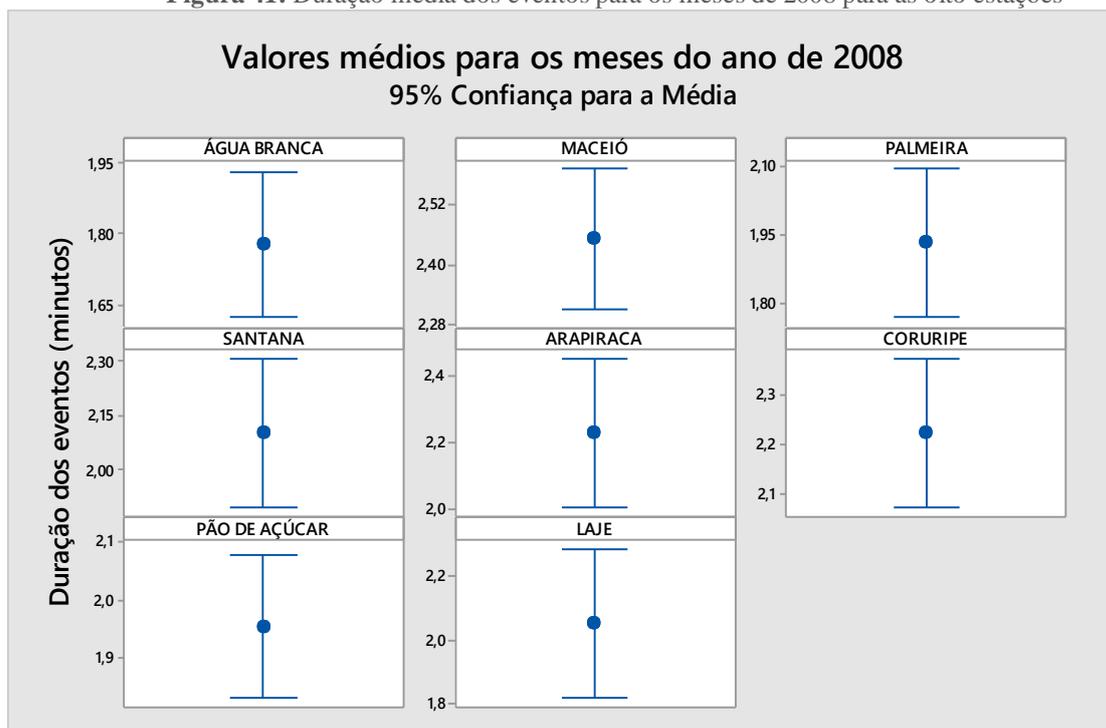
Tabela 9: Estatísticas básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global – Estação Solarimétrica de Coruripe.

Meses	Duração Média (min)	Desvio Padrão (min)	Duração Máxima (min)	Irradiância Máxima (W/m^2)	Número de Dias	Duração Mensal (min)	Delta (W/m^2)
JAN	2,03	1,52	8	1439	20	150	60,6
FEV	2,30	1,98	8	1382	10	46	16,7
MAR	2,10	2,60	15	1380	19	84	31,8
ABR	2,53	1,99	9	1119	16	187	1,1
MAIO	2,30	1,91	13	1277	21	230	145,3
JUN	2,38	3,07	30	1173	24	309	74,2
JUL	2,42	2,22	13	1295	26	305	139,3
AGO	1,95	1,53	10	1423	28	232	212,5
SET	1,68	1,18	6	1241	20	114	29,2
OUT	2,30	2,52	21	1454	28	564	145,9
NOV	2,39	2,11	16	1367	30	551	86,3
DEZ	2,27	1,94	11	1360	26	261	22,8

As localidades de Santana do Ipanema e Palmeira dos Índios tiveram valores intermediários entre aqueles de Maceió e Água Branca, com a maior tendência encontrada em Maceió. Isso é explicado pelas altitudes próximas das três primeiras localidades.

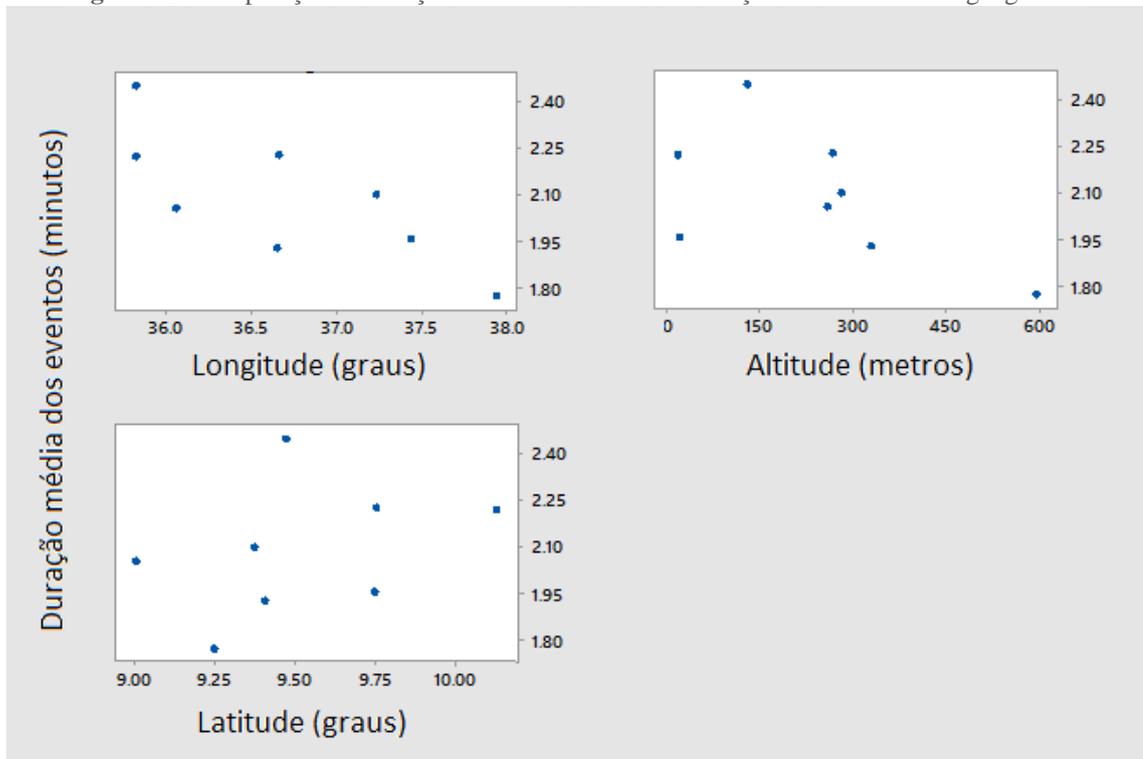
A figura 41 apresenta a duração média dos fenômenos para as oito localidades estudadas, bem como os desvios para um intervalo de confiança de 95%. A duração média do fenômeno é de aproximadamente 2 minutos para todas as oito localidades.

Figura 41: Duração média dos eventos para os meses de 2008 para as oito estações



A figura 42 apresenta a duração média do evento como função da longitude, latitude e altitude. A duração média aumenta claramente com a diminuição da longitude. A precipitação varia de 2000-600 mm/ano, a partir da costa para o interior (longitude crescente). A estação chuvosa no litoral é de 6 meses de duração e no sertão é de no máximo 4 meses de duração. Assim, pode-se concluir que, na costa, a variabilidade do clima é maior e de longa duração, com maior probabilidade, pois, de ocorrência de configurações do céu que causam o efeito de contribuição das nuvens. No entanto, nenhuma tendência para a latitude ou altitude é observada. A explicação para esses achados é que as variações da latitude e altitude são relativamente pequenas.

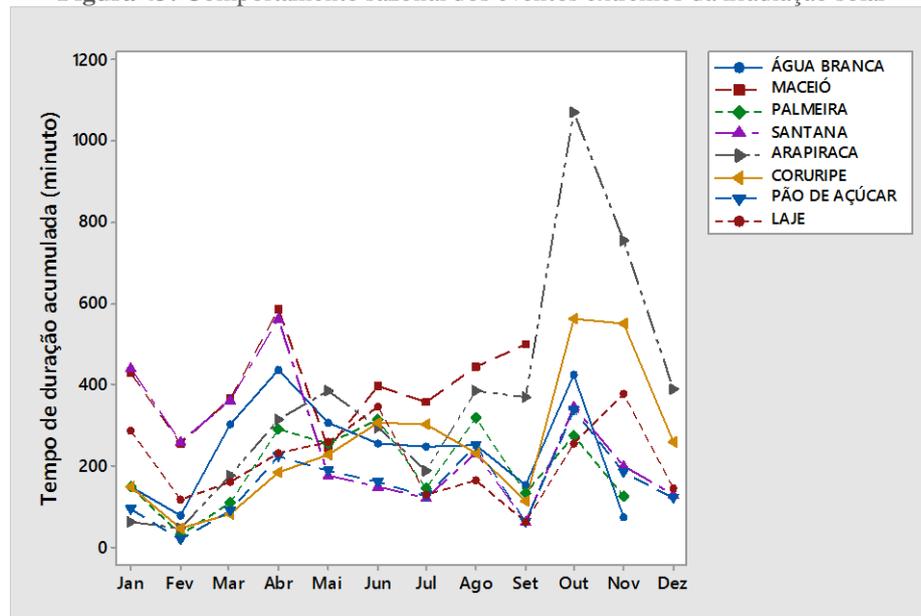
Figura 42: Comparação da duração média dos eventos em função das coordenadas geográficas



4.1.1. Sazonalidade

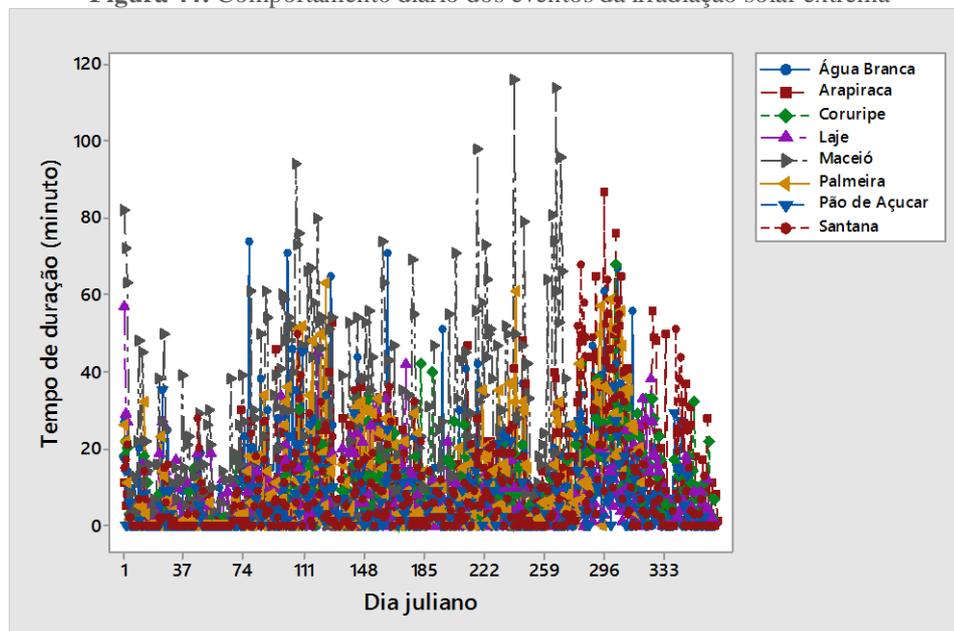
O comportamento sazonal dos eventos extremos da radiação solar para todas as estações solarimétricas é mostrado na figura 43. Na ordenada, é mostrado o tempo total acumulado durante cada mês, e no eixo das abcissas tem-se os meses do ano. Existem dois picos claros de ocorrência: um em abril e outro em outubro. No caso de Maceió, não existem dados para outubro, novembro e dezembro. Porém tem-se a mesma tendência das ocorrências e a tendência para um pico é bastante visível.

Figura 43: Comportamento sazonal dos eventos extremos da irradiação solar



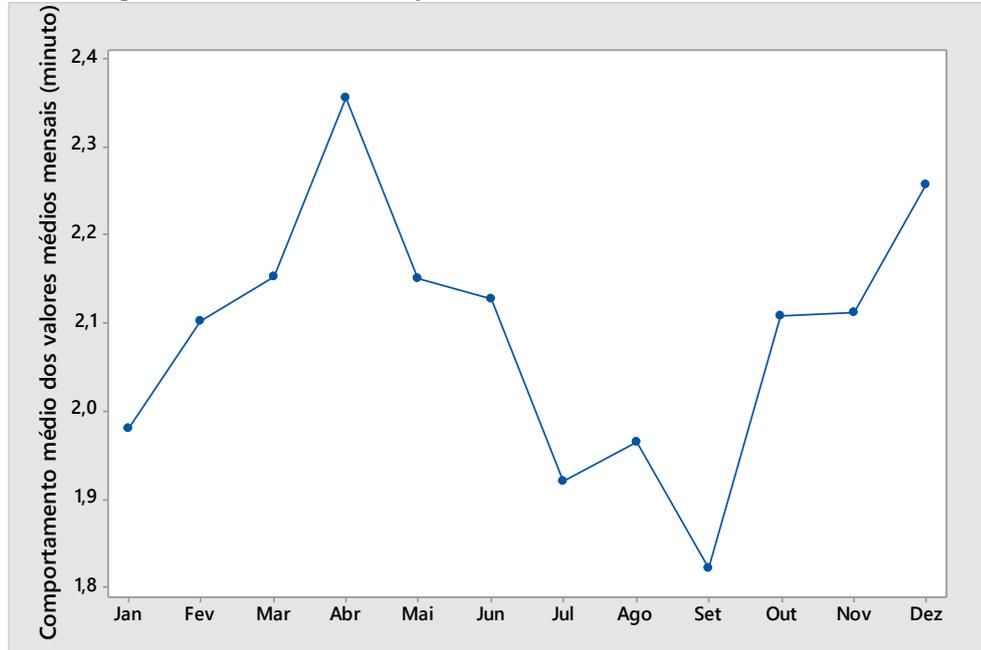
A sazonalidade pode ser explicada porque o aumento da radiação solar ocorre preferencialmente em dias com uma alta variabilidade de nebulosidade. O comportamento sazonal das médias das oito estações pode ser visto na Fig. 43, que mostra que a maioria dos fenômenos ocorreram nos meses de abril e outubro. Estas situações ocorrem durante os períodos de transição, tais como períodos de chuva intensa (abril) ou no final da estação das chuvas (outubro). Do mesmo modo, a Fig. 44 mostra o tempo de duração do fenômeno para todos os dias de 2008 para as oito estações.

Figura 44: Comportamento diário dos eventos da irradiação solar extrema



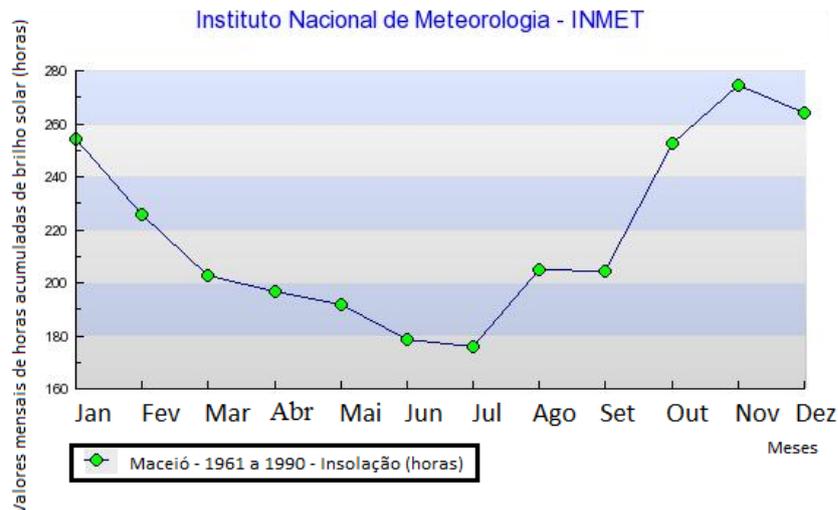
Um comportamento semelhante foi obtido para a duração média de ocorrências do fenômeno em cada média mensal, nas oito localidades estudadas, como se vê na Fig. 45.

Figura 45: Comportamento mensal da duração-média do fenômeno com valores de todas as localidades



Já a figura 46 mostra os valores mensais de horas acumuladas de brilho de sol em Maceió durante o período 1961-1990. Na Fig. 45, pode-se ver que os meses de Março, Abril e Maio, bem como o de agosto, setembro e outubro, são períodos de transição das estações chuvosas. Por esta razão (maior variabilidade climática), pode-se justificar os picos nos meses de abril e outubro, como o visto na Fig. 43.

Figura 46: Valores mensais de horas acumuladas de brilho de sol em Maceió para os anos de 1961-1990



4.1.2. Perfil Diário

Para identificar os intervalos de tempo de maior ocorrência do fenômeno da contribuição das nuvens na irradiação solar global, foi utilizada a frequência relativa de eventos de irradiação extrema em cada intervalo do dia, ao longo do ano, em intervalos de 30 minutos, como pode ser visto nas figuras 47 e 49, para as localidades da Água Branca e Maceió, respectivamente.

Na figura 47, pode-se ver que, para Água Branca, o fenômeno é mais provável de ocorrer entre 9:30 e 10:30. Para Maceió, na Fig. 49, o período de maior ocorrência é de 8:00 às 09:00 horas. O fenômeno ocorre principalmente na parte da manhã, mas também pode ser observado na parte da tarde em torno 13:00-14:00 horas.

Uma possível explicação para isso é a assimetria no período da tarde em Maceió; a velocidade média do vento é maior do que no período da manhã, como o mostrado na Fig. 50 e esta velocidade do vento mais elevada conduz a uma mais rápida dispersão das formações de nuvens, e, por conseguinte, o efeito lente causado pelas nuvens seria menos frequente com durações mais curtas. Ao contrário, como se mostra na Fig. 48, a velocidade média do vento na localidade Água Branca é maior a partir do meio para o final do período da manhã, que é o período de formação das nuvens e, portanto, a frequência de eventos é aumentada.

Figura 47: Perfil diário (anual) dos eventos da radiação solar extrema para a localidade de Água Branca

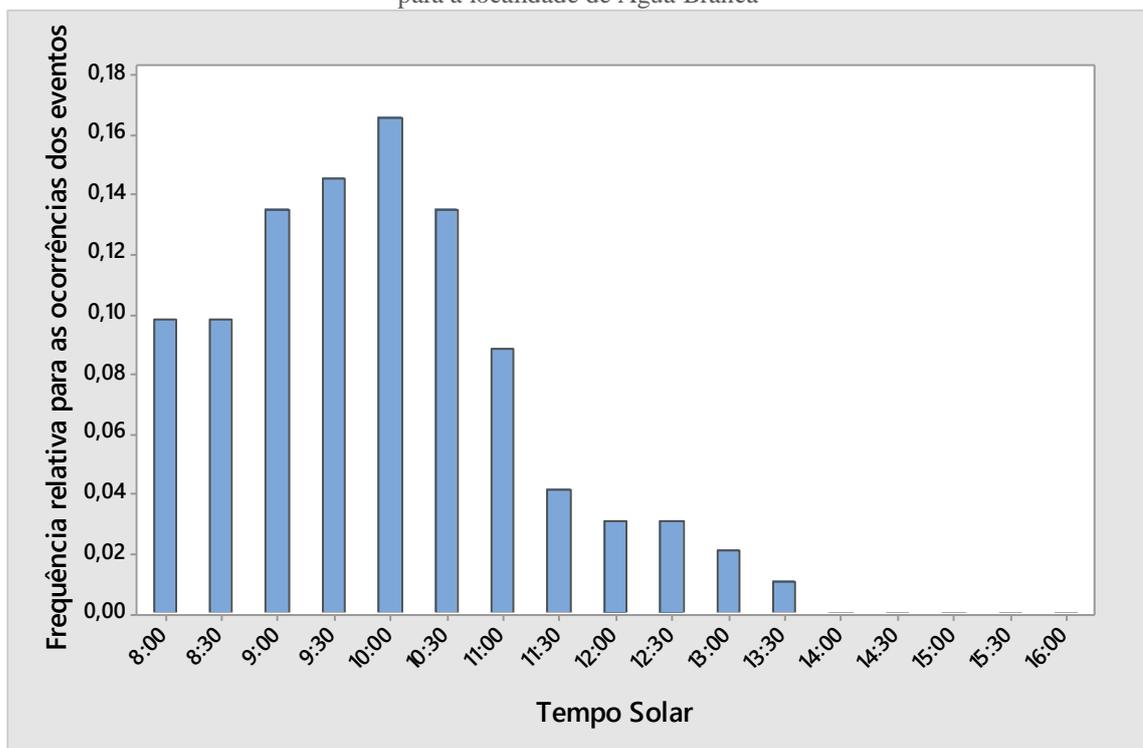


Figura 48: Perfil diário típico (anual) da velocidade do vento para a localidade de Água Branca (2008)

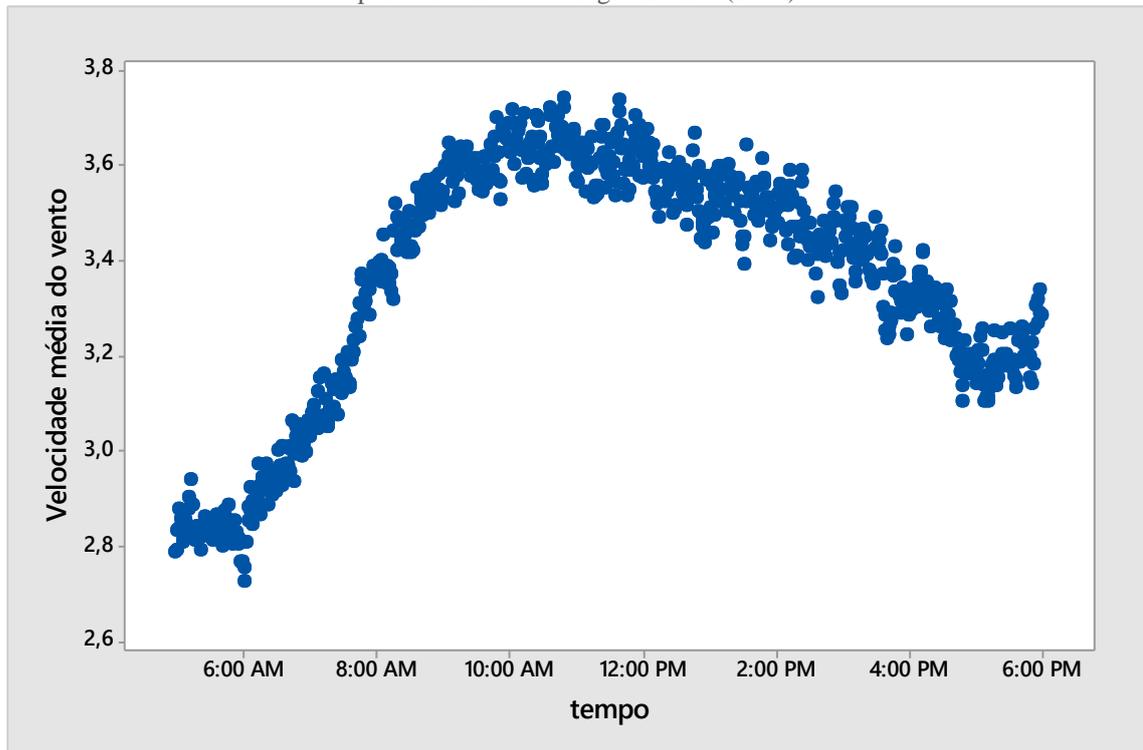


Figura 49: Perfil diário (anual) dos eventos da radiação solar extrema para a localidade de Maceió

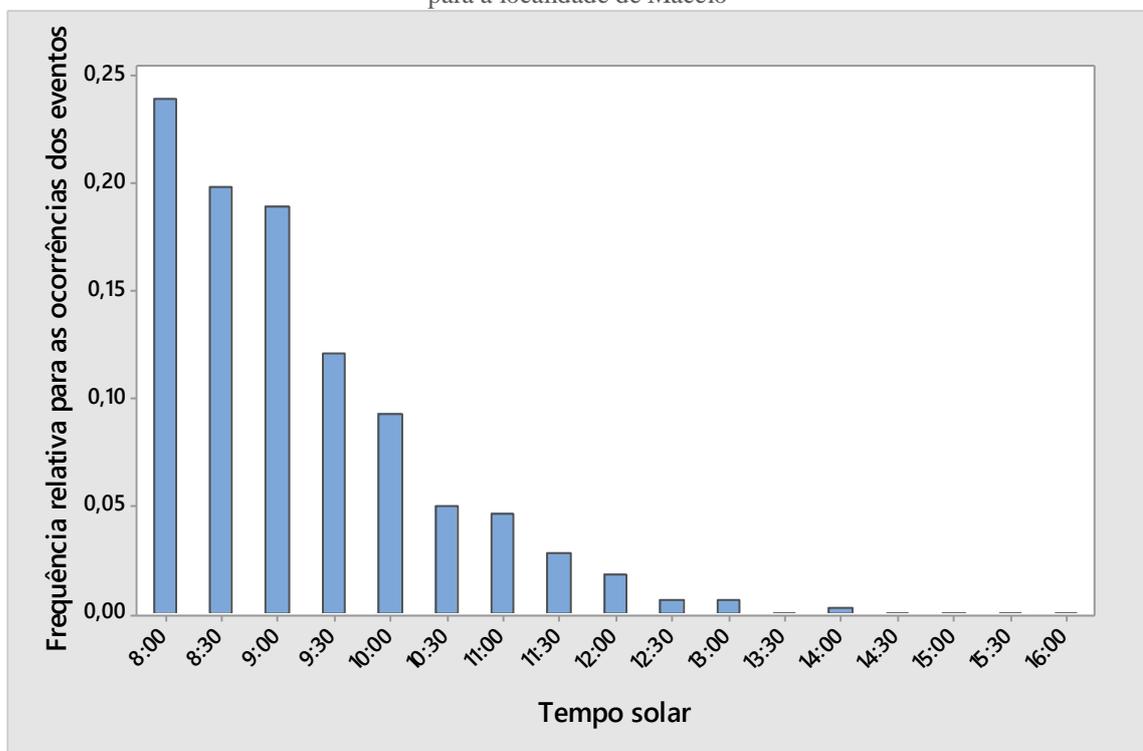
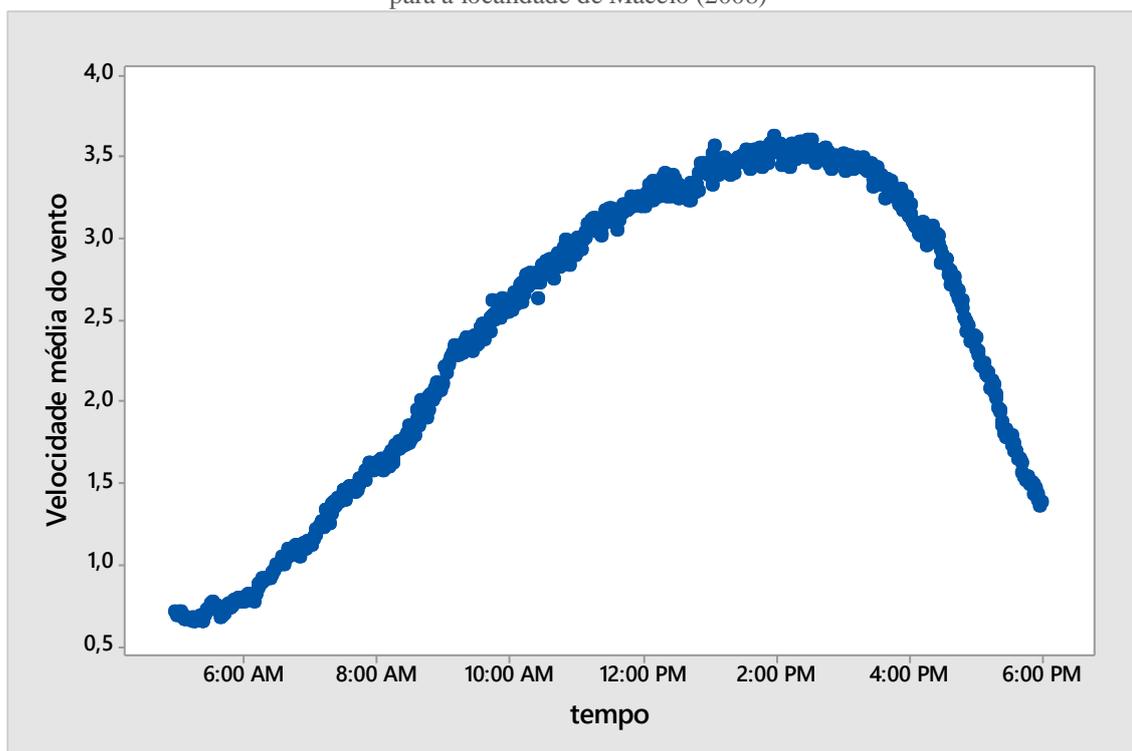


Figura 50: Perfil diário típico (anual) da velocidade do vento para a localidade de Maceió (2008)



De acordo com Grimm (2012), as nuvens com desenvolvimento vertical estão relacionadas com ar instável. Correntes convectivas associadas com ar instável pode produzir cumulus, cumulus congestus e nuvens cumulo nimbus. Porque a convecção é controlada por aquecimento solar, o desenvolvimento de nuvens cumulus freqüentemente segue a variação diurna da insolação.

Em um dia com bom tempo, nuvens cumulus começam a se formar a partir do meio até o fim da manhã, depois do sol ter aquecido o solo. A cobertura de nuvens cumulus no céu é maior na parte da tarde – geralmente o período mais quente do dia. Se as nuvens tipo cumulus apresentarem qualquer crescimento vertical, estas são chamadas de nuvens de "bom tempo". Nuvens cumulus podem produzir chuva leve. Com a aproximação do por do sol, a convecção enfraquece e as nuvens cumulus começam a se dissipar (evaporar).

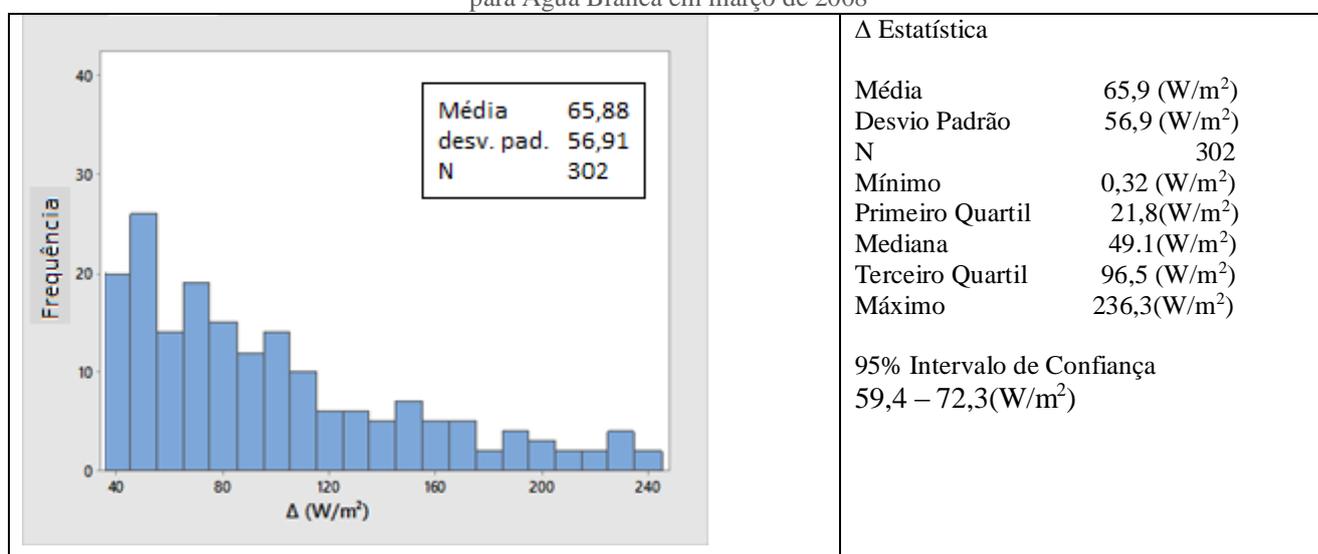
4.1.3. Distribuição das diferenças entre os valores medidos e extraterrestres

A distribuição estatística da diferença (Δ) entre os valores de medição de radiação solar extrema e a irradiação extraterrestre pode ser vista na figura 51 para Água Branca em março de

2008. O terceiro quartil dessa distribuição é de $96,5 \text{ W/m}^2$, o que significa que 25 % da amostra é maior do que este valor.

Uma vez que o erro típico instrumental do piranômetro devidamente calibrado é de 5% do nível superior, o maior erro estimado para as medidas presentes nessa tese, é de, aproximadamente 82 W/m^2 , ou seja, 5% de 1648 W/m^2 (maior valor medido), e o fenômeno da radiação solar na superfície terrestre superior à irradiação solar extraterrestre é demonstrado inequivocadamente. Esse fenômeno também pode ser identificado para os locais de Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, São José da Laje, Pão de Açúcar, Arapiraca, Coruripe e Maceió, com níveis de confiança mais baixos.

Figura 51: Distribuição da diferença entre a radiação solar extrema e a irradiação extraterrestre para Água Branca em março de 2008



4.2. Modelagem do evento extremo utilizando determinação local do AOD

Toda a modelagem anterior desenvolvida para as estações solarimétricas de AL, tiveram o índice de turbidez de Linke estimado por meio do modelo de céu claro do ESRA. Neste item o índice de turbidez de Linke foi calculado diretamente mediante a medição experimental da profundidade óptica dos aerossóis utilizando a metodologia da secção 3.5.3.

De posse da profundidade óptica de aerossóis, calculada a partir das medições realizadas com o fotômetro, utilizou-se a equação 26 para calcular o T_{LK} para dias claros de outubro e novembro de 2015, em Recife-PE. A Tabela 10 apresenta a profundidade óptica de aerossóis

(AOD), o fator de turbidez de Linke (T_{LK}) estimado e a observação para a condição de cobertura de nuvens para os dias medidos.

Tabela 10: Profundidade óptica de aerossóis, Fator de turbidez de Linke e observação da cobertura de nuvens para a localidade de Recife-PE

DATA (D/M/A)	AOD	T_{LK}	OBSERVAÇÃO SOBRE O DIA
02/10/2015	0,43	2,9	Céu claro
06/10/2015	0,48	3,4	Céu com muitas nuvens
07/10/2015	0,52	3,9	Céu com muitas nuvens
16/10/2015	0,32	1,6	Céu com muitas nuvens
19/10/2015	0,43	2,8	Céu com muitas nuvens
20/10/2015	0,27	1,1	Céu com muitas nuvens
21/10/2015	0,31	1,5	Céu com muitas nuvens
23/10/2015	0,25	0,8	Céu com muitas nuvens
28/10/2015	0,23	0,6	Céu com muitas nuvens
05/11/2015	0,23	0,55	Céu com muitas nuvens
06/11/2015	0,14	-0,44	Céu com muitas nuvens
10/11/2015	0,19	0,13	Céu com muitas nuvens
11/11/2015	0,12	-0,65	Céu com muitas nuvens
12/11/2015	0,21	0,32	Céu com muitas nuvens
13/11/2015	0,18	0,01	Céu com muitas nuvens

Os valores negativos ou muito baixos (menores que 1) encontrados na tabela 10 deve-se ao fato de que no instante em que ocorreu a medição provavelmente ocorreu o fenômeno do efeito lente. Os valores negativos do T_{LK} significam a intensificação da irradiação solar acima da condição de céu limpo e seco da definição do fator de turbidez de Linke.

A tabela 11 apresenta a classificação para um determinado tipo de atmosfera, a qual é encontrada no ESRA (SCHARMER, 1994). Nessa tabela, vê-se que o intervalo de classificação do tipo de atmosfera vai de 1 (Céu muito claro) até o valor 4 (Industrial).

Tabela 11: Tipo de atmosfera e sua classe de turbidez

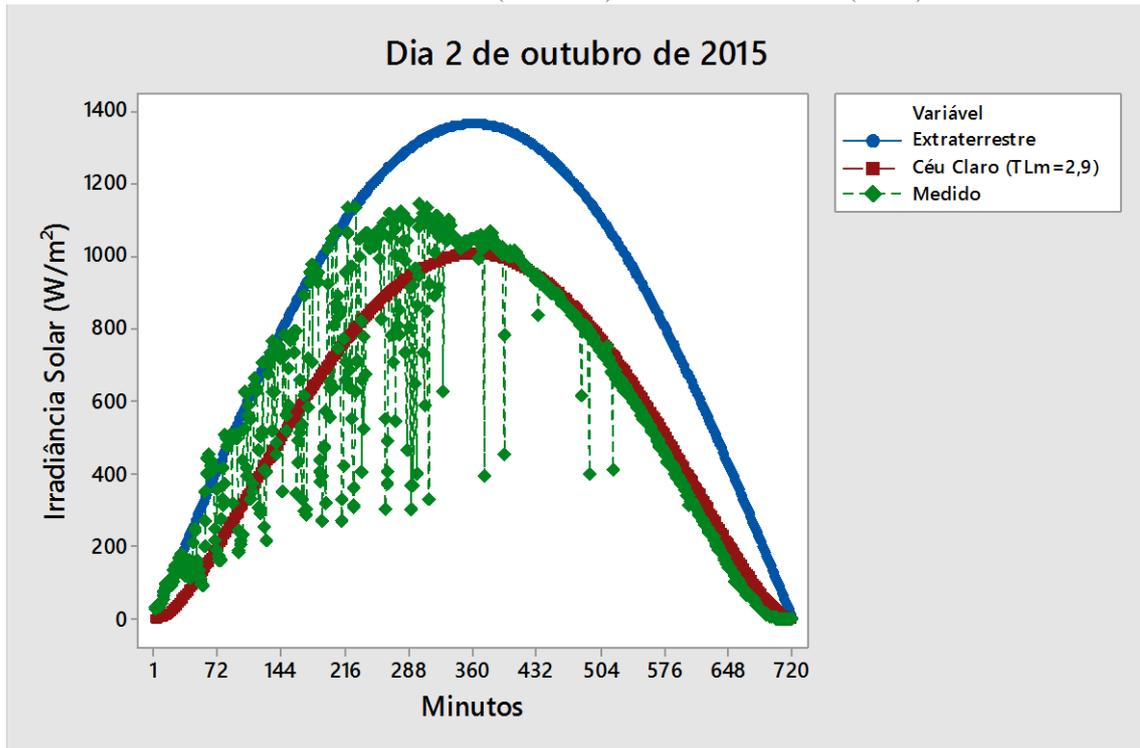
TIPO DE ATMOSFERA	CLASSE DE TURBIDEZ
Industrial	4
Urbano	3
Céu claro	2
Céu muito claro	1

A Figura 52 mostra, em Azul, uma curva modelada para a irradiância extraterrestre, em vermelho, a irradiação de céu claro calculada pelo modelo ESRA (SCHARMER, 1994) e, em verde, o valores medidos, para o dia 2 de outubro de 2015. Este é um dia típico de céu claro na parte da tarde. Percebe-se uma boa concordância da curva modelada em vermelho ($T_{LK}=2,9$) e da curva em verde (medidas).

A conclusão importante, aqui, é que a determinação direta do fator de turbidez de Linke realizado com medições da profundidade óptica dos aerossóis por meio dos fotômetros

construídos é um método preciso e confiável, e permite modelar com êxito o perfil de céu claro. Como pode-se perceber em determinados instantes de tempo, tem-se valores ultrapassando os valores esperados para o dia de céu claro (parte da manhã). Na tarde, um período bastante estável quanto à irradiação solar (o que mostra a condição de céu claro), a modelagem de céu claro mostra uma boa concordância com as medidas.

Figura 52: Perfil diário para o dia 2 de outubro de 2015 – irradiação extraterrestre (azul), irradiação de Céu claro (vermelho) e irradiação medida (verde)



Foi utilizado o fator de Turbidez de Linke $TLK=2,45$ para obtenção dos gráficos e dados para a análise estatística. Uma justificativa para esse valor é que em considerando a média dos valores iguais ou maiores do que uma unidade, a média do fator de Linke será aproximadamente 2,45.

Na figura 53 (10 de novembro), pode-se observar que o fenômeno de amplificação pode ocorrer várias vezes ao longo do dia se forem considerados os valores que ultrapassam a condição de céu claro. Já na figura 54 (11 de novembro), vê-se poucos valores que ultrapassaram tanto a condição de céu claro, tanto como extraterrestre. Porém, para esse dia, houve uma ocorrência de um valor de 1477 W/m^2 , no instante 402 minutos. Os gráficos dos outros dias medidos podem ser vistos no Apêndice.

Figura 53: Perfil diário para o dia 10 de novembro de 2015 – irradiância extraterrestre (azul), irradiância de céu claro (vermelho) e irradiância medida (verde)

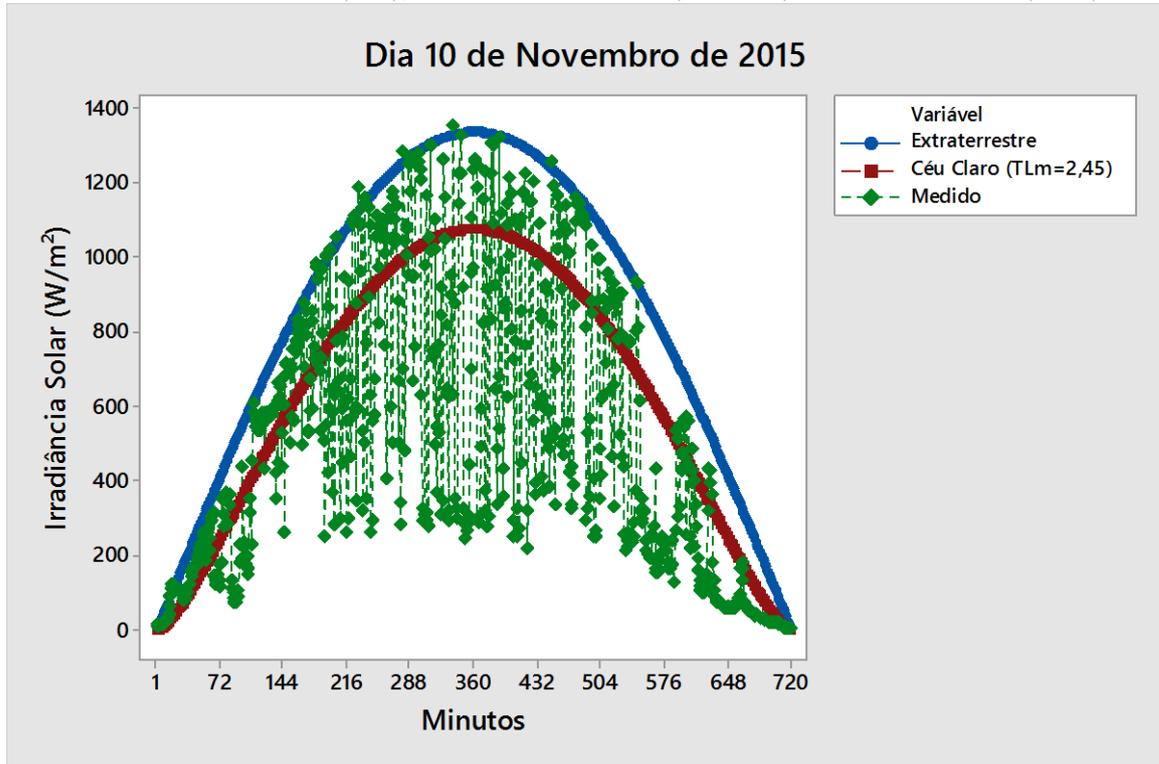
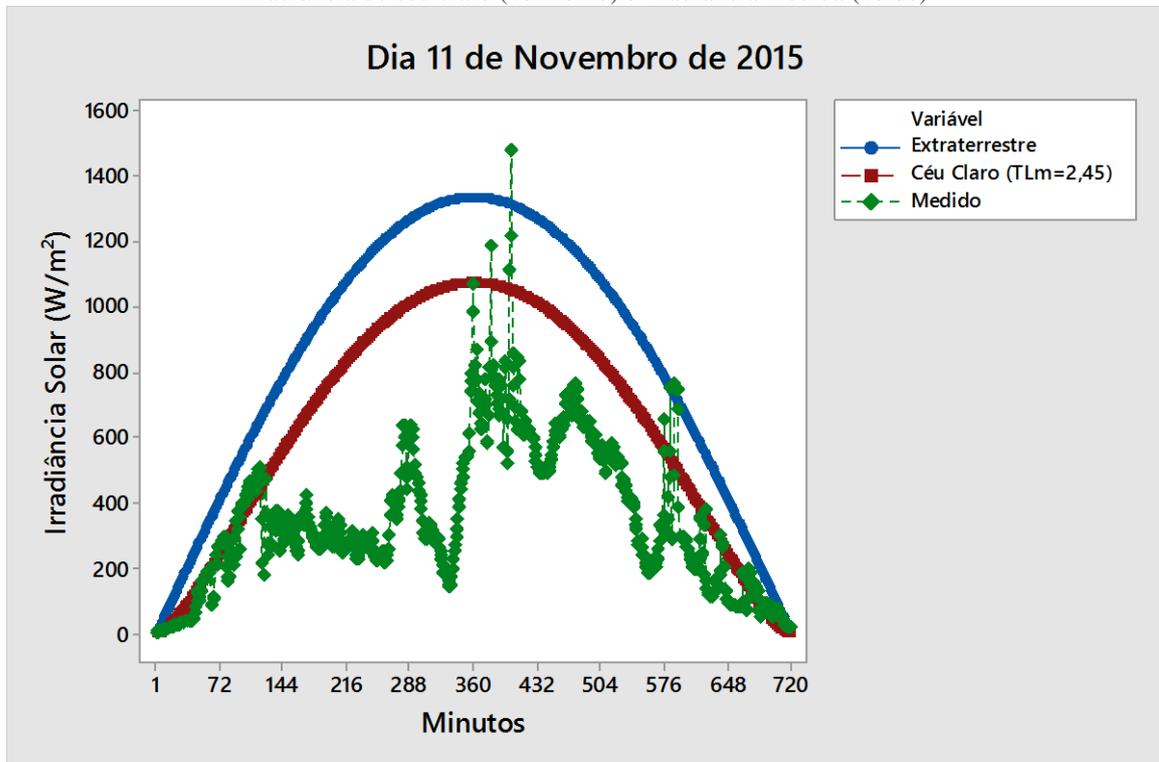


Figura 54: Perfil diário para o dia 11 de novembro de 2015 – irradiância extraterrestre (azul), irradiância de céu claro (vermelho) e irradiância medida (verde)



Na figura 55, tem-se a configuração de nuvens no céu para o dia 10 de novembro de 2015 às 13:00h, porém essas fotografias não representam, necessariamente, o momento de máxima irradiância devido ao efeito das nuvens.

Figura 55: Configuração de nuvens no céu para o dia 10 de novembro de 2015 às 13:00h



A tabela 12 mostra os parâmetros estatísticos relativos às ocorrências do fenômeno de irradiação solar global devido à contribuição das nuvens, durante alguns dias dos meses de outubro e novembro do ano de 2015, para a estação de Recife. Esta tabela apresenta os valores médios da duração do evento, o desvio padrão, a duração máxima (minutos consecutivos), os valores máximos medidos da irradiação solar, os números totais de minutos de ocorrência nos dias medidos, o número total de ocorrências no dia (número total de eventos de 1 minuto), o

valor correspondente da radiação solar na condição de céu claro e, finalmente, a diferença entre a radiação solar extrema e a irradiação na condição de céu claro.

Tabela 12: Estatísticas básicas do fenômeno da amplificação da irradiação solar global – Estação Solarimétrica de Recife-PE

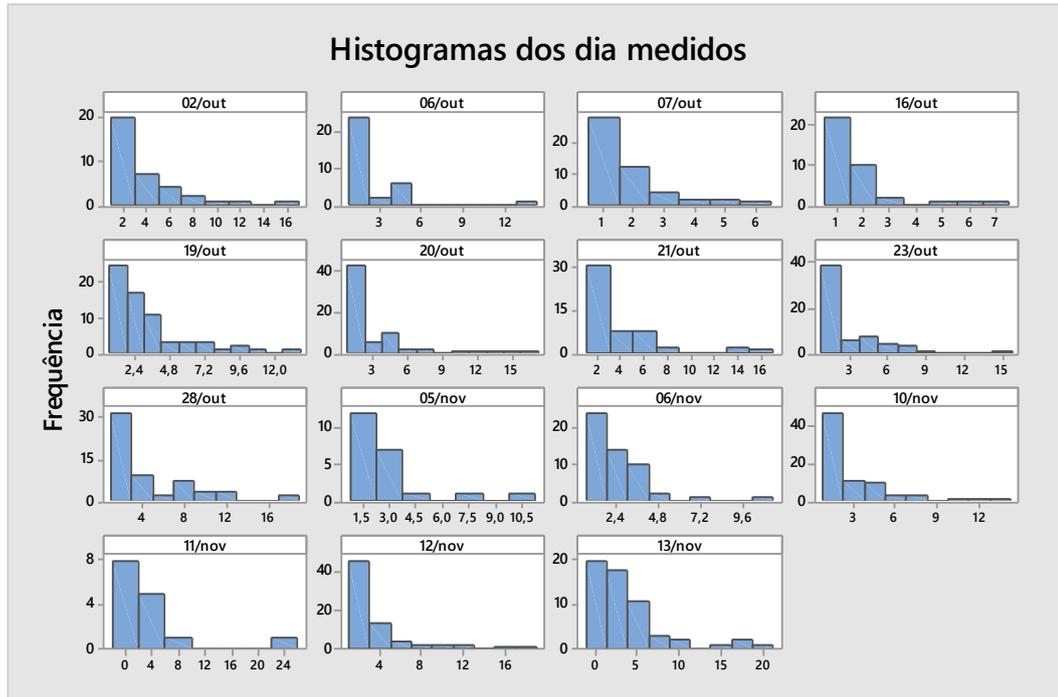
Data	Duração Média (min)	Desvio Padrão (min)	Duração Máxima (min)	Irradiância a Máxima (W/m^2)	Número total de eventos	Duração diária (min)	Delta (W/m^2)
02/10/2015	3,4	3,3	15	1141	36	121	82,5
06/10/2015	2,3	2,2	13	1272	33	75	178,4
07/10/2015	1,8	1,2	6	1329	49	88	260,7
16/10/2015	1,8	1,4	7	1419	37	66	324,8
19/10/2015	3,0	2,7	13	1324	67	199	241,5
20/10/2015	3,2	3,4	16	1325	67	212	250,6
21/10/2015	3,4	3,3	16	1265	52	176	198,1
23/10/2015	2,9	2,6	15	1284	61	177	193,4
28/10/2015	4,1	4,0	18	1396	58	240	320,5
05/11/2015	2,7	2,4	11	1342	22	59	274,8
06/11/2015	2,2	1,8	11	1272	52	116	194,8
10/11/2015	2,8	2,5	14	1351	77	218	284,0
11/11/2015	3,7	6,0	24	1477	15	55	425,3
12/11/2015	3,0	3,4	18	1337	71	217	268,0
13/11/2015	3,9	4,5	21	1215	58	226	184,5

Em Recife, a duração média do evento (ocorrências de 1 minuto) foi de 3,0 min com desvio padrão de 3,1min para um espaço amostral de 755 ocorrências consecutivas para os dias de medição. A duração mínima de minutos consecutivos foi de 6 minutos para o dia 7 de outubro e a duração máxima de minutos consecutivos foi de 24 minutos para o dia 11 de novembro.

Foi detectado um evento superior com diferença em relação à irradiância na condição de céu claro de 425,3 W/m^2 , e essa diferença é muito mais elevada do que o erro instrumental de 5%. Essa ocorrência foi no dia 11 de novembro com um máximo de 1477 W/m^2 . Também pode ser visto que os eventos foram muito frequentes, com um mínimo de 55 minutos de duração de valor do tempo diário acumulado para tais eventos em 11 de novembro e atingindo um máximo de 240 minutos em 28 de outubro.

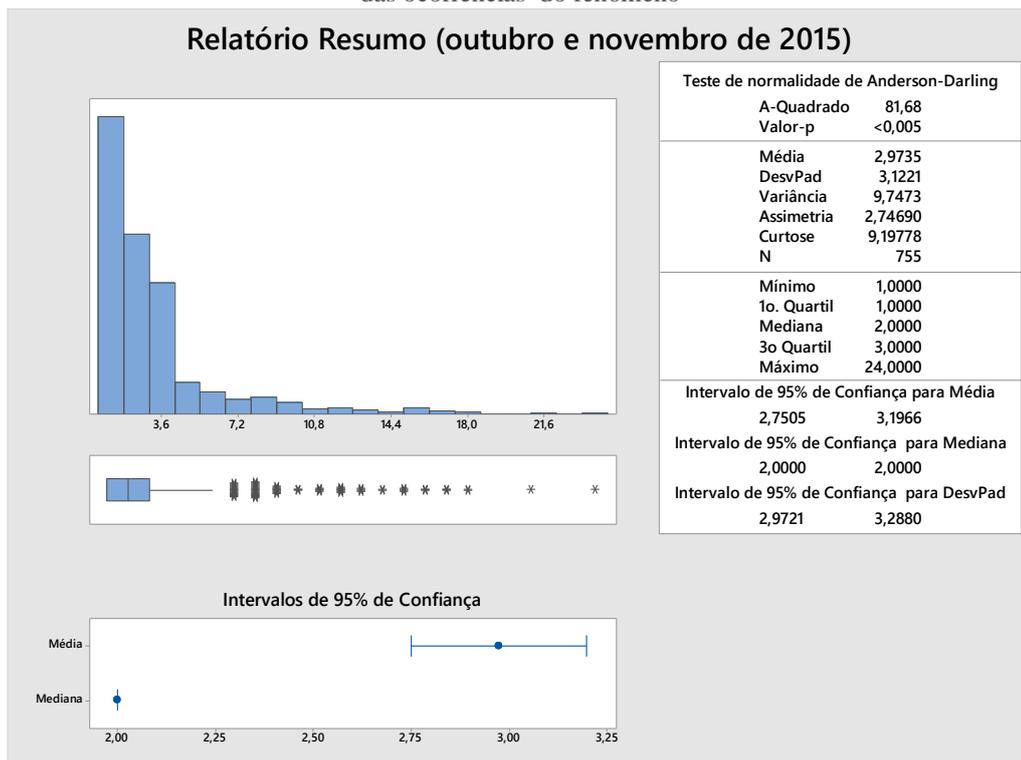
A Figura 56 apresenta um histograma do valor do tempo de duração acumulado (em minutos) para todos os dias medidos. Nesta figura tem-se o tempo médio de duração, o desvio-padrão e o número total de eventos para o dia em questão.

Figura 56: Histograma do tempo de duração do fenômeno para todos os dias medidos nos meses de outubro e novembro de 2015



Na figura 57, é apresentado o relatório das principais variáveis estatísticas para o tempo de duração do fenômeno da radiação extrema, na condição de céu claro, para todas as ocorrências nos dias medidos.

Figura 57: Relatório estatístico resumido para o tempo de duração das ocorrências do fenômeno



Na figura 58, tem-se o relatório estatístico resumido da variável Delta (diferença entre o valor de irradiância medido e o valor da irradiância na condição de Céu claro), apresentando as principais variáveis estatísticas para essa variável. O valor médio de Delta foi de 137,05 W/m² com desvio padrão de 59,7 W/m². O valor máximo medido foi de 425,3 W/m², o qual ocorreu no dia 11 de novembro de 2015, como já foi comentado.

Na figura 59, tem-se o relatório estatístico resumido das ocorrências em W/m² para os dias medidos em relação à condição de céu claro. O valor médio da irradiância foi de 958,49 W/m² com desvio padrão de 240,13 W/m², tendo um máximo de 1477 W/m² no dia 11 de novembro de 2015.

Figura 58: Relatório estatístico resumido da variável Delta (diferença entre o valor medido e o valor simulado para a condição de céu claro)

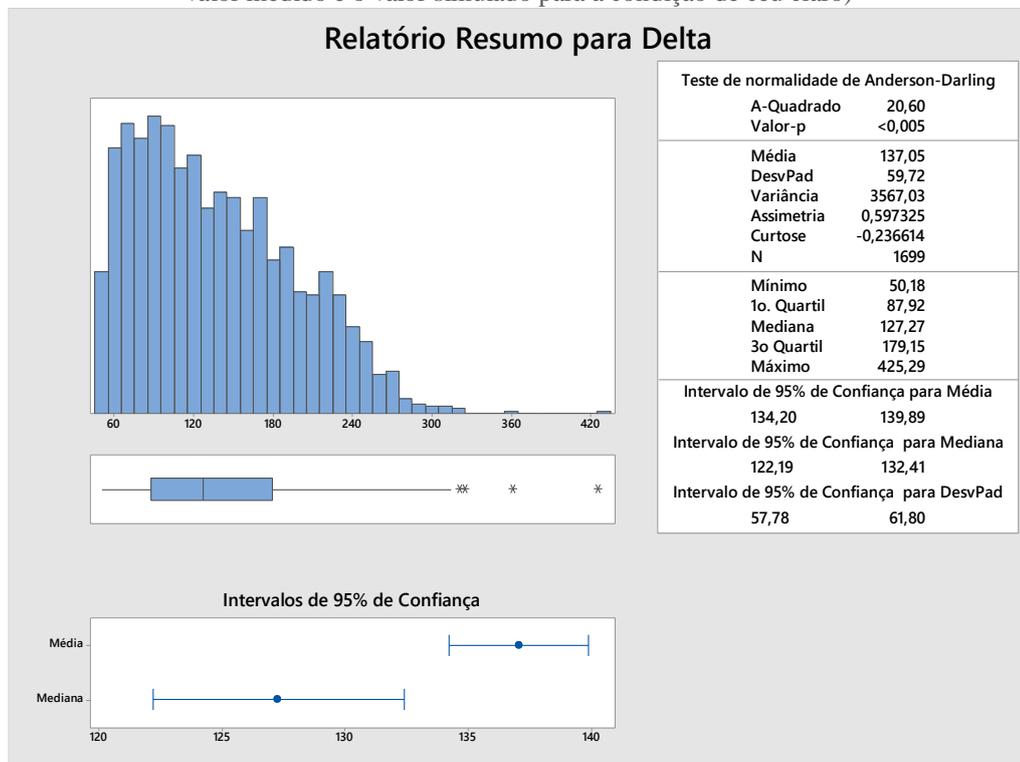
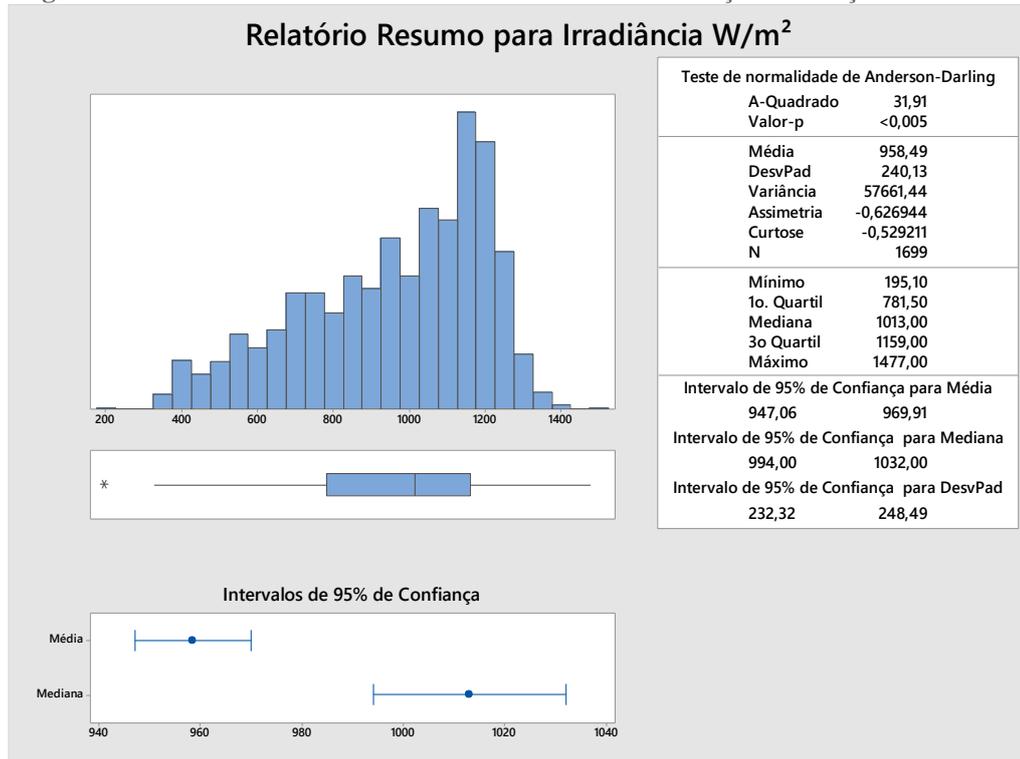


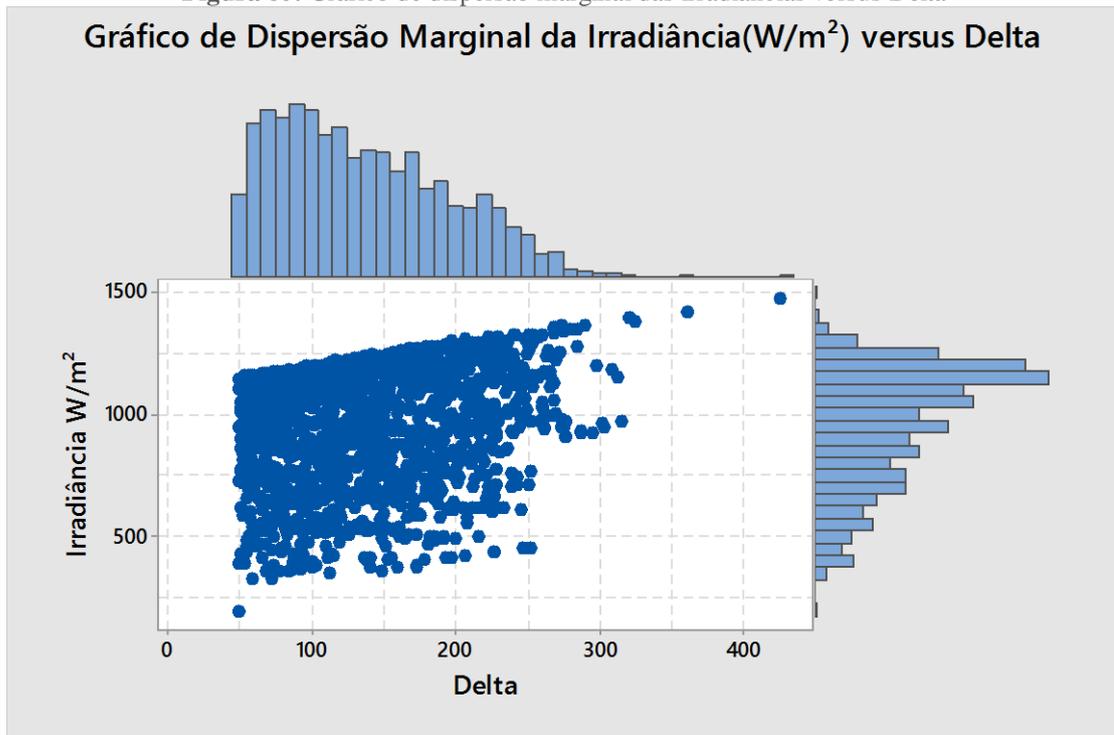
Figura 59: Relatório estatístico resumido das ocorrências em relação à condição de céu claro



Na figura 60, apresenta-se o gráfico de dispersão marginal das irradiâncias que ultrapassaram a condição de céu claro versus a variável Delta. Esta figura apresenta para os eixos das abcissas e ordenadas um histograma de distribuição. Assim, pode-se perceber que, por exemplo, valores de ocorrências de 1000W/m² podem ter valores de Delta contidos no intervalo de 50W/m² a 260W/m².

Em outras palavras, esse gráfico mostra a faixa de existência, acima da condição de céu claro, para um certo valor de ocorrência. Então, para o exemplo dado, a ocorrência de 1000W/m², pode se dar num intervalo de existência de 50 W/m² a 260W/m² acima da condição de céu claro. Os gráficos de dispersão marginal das irradiâncias que ultrapassaram a condição de céu claro versus a variável Delta dos outros dias medidos podem ser vistos no Apêndice.

Figura 60: Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta



5. CONCLUSÃO

A detecção experimental da irradiância solar global tem mostrado valores muito elevados ao nível do solo na região do nordeste do Brasil. Foram observados valores superiores a 20% acima da constante solar extraterrestre, com duração de até 30 minutos consecutivos e ocorrências em mais de 20 dias em um dado mês. Neste estudo, constatou-se que a amplificação da radiação solar acima da condição extraterrestre não é um evento raro e também que acima da condição de céu claro é bastante comum.

A radiação solar extraterrestre pode superar a radiação solar na condição de céu claro por mais de 40% ao meio-dia, o que equivale a 200 W/m^2 . Como esses valores são muito maiores do que a resolução do sensor piranométrico (50 W/m^2), garante-se, com grande confiabilidade, que tais eventos estão, inequivocadamente, acima do nível de irradiação de céu claro e, em alguns casos, acima da irradiação solar extraterrestre.

A mudança de um clima tropical semi-árido (Água Branca) para um clima tropical marítimo como Maceió produz uma mudança notável nos resultados relativos às ocorrências do fenômeno: a duração acumulada, em minutos consecutivos, atinge 29 minutos (mais que o dobro de Água Branca) e o número de dias em que o fenômeno ocorre torna-se maior do que 20. O tempo mensal acumulado também aumenta significativamente e atinge 588 minutos em Maceió ou 9,8h (abril) em comparação com os 438 minutos em Água Branca ou 7,3h.

Em resumo, um local tropical marítimo aumenta dramaticamente o fenômeno, especialmente a duração, o número de acontecimentos consecutivos e o total de dias de ocorrência mensais. Já as localidades de Santana do Ipanema e Palmeira dos Índios tiveram valores intermediários entre aqueles de Maceió e Água Branca, com a maior tendência encontrada em Maceió.

A duração média dos fenômenos é de, aproximadamente, 2 minutos para todas as oito localidades estudadas. Além disso, graças ao banco de dados robusto utilizado nesta pesquisa, constatou-se a existência de um comportamento sazonal para os eventos extremos da radiação solar para todas as oito estações solarimétricas. Existem dois picos claros de ocorrência: um em abril e outro em outubro.

A distribuição estatística da diferença entre os valores de medição de radiação solar extrema e a irradiação extraterrestre para a localidade de Água Branca em março de 2008, mostrou que o terceiro quartil dessa distribuição é de $96,5 \text{ W/m}^2$, o que significa que 25 % da amostra é maior do que este valor, uma vez que o erro típico instrumental do piranômetro

devidamente calibrado é de 5% do nível superior. O maior erro estimado para as medidas presentes nessa tese, é de, aproximadamente 82 W/m^2 , ou seja, 5% de 1648 W/m^2 (maior valor medido), e o fenômeno da radiação solar na superfície terrestre superior à irradiação solar extraterrestre é demonstrado inequivocadamente. O mesmo ocorre para as outras sete localidades.

No presente estudo foram identificados os períodos diários de maior ocorrência do fenômeno. Além disso, foi percebido que, para a localidade de Água Branca, o fenômeno tem ocorrência mais provável entre 9:30h e 10:30h. Para Maceió, esse período é das 8:00 às 09:00 horas. O fenômeno ocorre, principalmente, na parte da manhã, mas também pode ser observado na parte da tarde, em torno das 13:00-14:00 horas. A explicação da maior ocorrência do fenômeno, na parte da manhã, deve-se a maiores velocidades do vento à tarde, o que provoca uma dissipação mais rápida das configurações espaciais favoráveis ao evento.

A determinação direta do fator de turbidez de Linke realizado com medições locais da profundidade óptica dos aerossóis por meio dos fotômetros é um método preciso e confiável e permite modelar com êxito o perfil de céu claro. Assim, para Recife, a duração média do evento (ocorrências de 1 minuto) foi de 3,0min, com desvio padrão de 3,1min; a duração mínima de minutos consecutivos foi de 6 minutos e a duração máxima de minutos consecutivos foi de 24 minutos. Também foi detectado um evento com diferença em relação à irradiância na condição de céu claro de $425,3 \text{ W/m}^2$, com um máximo de 1477 W/m^2 .

Os resultados obtidos têm implicações direta e significativas no estudo dos efeitos da radiação solar em materiais expostos ao ar livre, cálculo do índice de UV e de efeitos biológicos. Radiação extrema, acima do valor extraterrestre, com duração de até 30 minutos, pode significar índices UV (IUV) muito elevados e potencialmente perigosos, mesmo em situações com nebulosidade, que indiquem um IUV (atualmente divulgados na internet) com baixo potencial de dano.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. P.; ZILLES, R.; LORENZO, E. Extreme Overirradiance Events in São Paulo, Brazil. *Solar Energy*, v. 110, p. 168-173, 2014.

AKEMI. Apostila da Disciplina Meteorologia Física II – ACA 0326, p. 49. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicaII/apostila_cap_05.pdf>. Acesso em : 16 de mai. 2013.

ANDERSON, G.P.; CHETWYND, J.H.; THERIAULT, J.M.; ACHARYA, P.; BERK, A.; ROBERTSON, D.C.; KENZYS, F.X.; HOKE, M.L.; ABREU, L. W. MODTRAN2: Suitability for remote sensing, Proc. Conf. Atmospheric Propagation and Remote Sensing II, A. Kohnle and W.B. Miller eds., Orlando, SPIE, v. 1968, p. 514-525, 1993.

BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ROBERTSON, D. C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN7, Rep. GL-TR-89-0122, Air Force Geophysical Lab., Hanscom, MA 1989.

BIRD, R. E. A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance, *Solar Energy* v.32, p. 461-471, 1984.

BIRD, R. E.; RIORDAN, C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres, *J. Clim. Appl. Meteorol.* v. 25, p. 87-97, 1986.

BRINE, D. T.; M. IQBAL. Solar Spectral Diffuse Irradiance Under Cloudless Skies. *Solar Energy*, v. 30, p. 447-453, 1983.

BROOKS, D.R.; MIMS, F. M. III. Development of a inexpensive handheld LED – based sun photometer for the GLOBE program. *Journal of Geophysical Research* 106, DS, p. 4733-4740, 2001.

CAMPOS, M. S. Desvendando o Minitab. Qualitymark Editora Ltda., Rio de Janeiro, 2003.

CAVALCANTI, M. A.; HAAG, R. Corpo negro e determinação experimental da constante de Plack. *Revista Brasileira Ensino de Física*. v. 27 n. 3, p. 343-348, 2005.

CEDE, A.; LUCCINI, E.; PIACENTINI, R. D.; NUÑEZ, L. ; BLUMTHALER, M. Effects of clouds on erythema and total irradiance as derived from data of the Argentine Network, *Geophysical Research Letters*. 24 - 2002GR015708, 2002.

CORRÊA, M. P. Algoritmos para cálculos de transferência radiativa na região ultravioleta do espectro eletromagnético. XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Fortaleza, 2004, CD-ROM.

DANIEL, V. F.; FERNANDO, R. M.; NELSON, J. S.; ENIO, B. P. Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. *Revista Brasileira de ensino de Física*, v. 33, n. 1, 2011.

ECHER, E.; SOUZA, M. P. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. *Revista Brasileira Ensino de Física*, v.23, n.3, p. 276-283, 2001.

EMCK, P., RITCHER, M. Na upper threshold of enhanced global shortwave irradiance in the troposphere derived from field measurements in tropical mountains. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* v. 47, p. 2828-2845, 2008

FEISTER, U.; SHIELDS, J.; KARR, M.; JOHNSON, R.; DEHNE, K.; WOLDT, M. Ground-Based Cloud Images and Sky Radiances in the Visible and Near Infrared Region from Whole Sky Imager Measurements. In: *Climate Monitoring – Satellite Application Facility Training Workshop*, 2000, Dresden. *Proceedings...* Dresden: DWD/ EUMETSAT/WMO, 2000.
Disponível em: <<http://www.mpl.ucsd.edu/people/jshields/publications/publications.htm>>
Acesso em: 13 jul 2005.

FRISINA; V.A.; J.F. ESCOBEDO; E.N. GOMES. Esmatima da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em estufa de polietileno. An. 3. Enc. Energ. Meio Rural, 2003.

GEO – Ilhas de calor. Disponível em: <<http://geoconceicao.blogspot.com.br/2012/03/1-origem-das-ilhas-de-calor-os-grandes.html>>. Acesso em: 26 de jul. 2016.

GEODESIGN - GeoDesign Recurso Solar. Disponível em: recursosolar.geodesign.com.

Acesso: 15 de abr. 2016.

GU, L., FUENTES, J.D., GARSTANG, M., DA SILVA, J.T., HEITZ, R., SIGLER, J., SHUGART, H.H. Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. *Agric. For. Meteorol.* 106, 117-129, 2001.

GRIMM, A. M. Notas de aula da prof. Alice Marlene Grimm – Meteorologia Básica. Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>. Acesso em: 29 de set. 2012.

GUGLIELMO, S. A.; STEFANO, R.; ADRIAN, R. T.; THOMAS, M. Harnessing High-Altitude Solar Power. *IEEE*, v. 24, p. 442-451, 2009.

GUEYMARD, C. Development and performance assessment of a clear sky spectra radiation model. *Proc. 22ndASES Conf., Solar*, Washigton, DC, American Solar Energy Society, p. 433-438, 1993.

GUEYMARD, C. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Renewable Energy*, v. 74, p. 355-379, 2003.

HANSEN, C.W.; STEIN, J.S.; ELLIS, A. Statistical criteria for characterizing irradiance time series. Sandia National Laboratories. Report SAND2010-7314, <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2010/107314.pdf>. 2010.

HOLLE, R. L. ; MACKAY, S. Tropical Cloudiness from All-Sky Cameras on Brabados and Adjacent Atltic Ocean. *Journal of Applied Meteorology*. v.14 , p. 1437-1450, 1975.

INMET. Instituto nacional de Meteorologia. Disponível em:<http://www.inmet.gov.br/html/informacoes/sobre_meteorologia/atlas_nuvens/atlas_nuvens.html>. Acesso em : 29 de set. 2012.

INCA – Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. Disponível em: <http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/tiposdecacer/site/home/pele_ao_melanoma>.

Acesso em: 4 de fev. 2016.

INEICHEN, P. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Solar Energy*, v. 80, p. 468-478, 2006,

JUSTUS, C. G. ; PARIS, M. V. A Model for Solar Spectral Irradiance at the Bottom and Top of a Cloudless Atmosphere. *Climate and Applied Meteorology*, 1985.

KASTEN, F.; DOLCHERT, H. J.; DOGNIAUX, R.; LEMOINE, M. European Solar Radiation Atlas. Commission of the European Communities, Cologne, v.1, 1984.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ECHER, E.; PAES LEME, N.; SILVA, A. A. A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, n. 1, p. 63-73, 2000.

LEME, N. P. A Camada de Ozônio. Disponível em: <<http://prozonesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/31/2014/02/acamadaozonio.pdf> >. Acesso em: 24 de jun. 2016.

LUOMA, J.; KLEISSL, J.; MURRAY, K. Optimal inverte sizing considering cloud enhancement, *Solar Energy*, v. 86, p. 421-429, 2012.

MARIZA, P. S. E.; ENIO B. P. Desenvolvimento de um Sistema de Superfície para Mapeamento Automático da Fração de Cobertura de Nuvens. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, v. 18, n. 1, Março, 2005

MATTHEWS, L. K.; MULHOLLAND, G. P.; STEVENS, M. Measurement and analysis of solar spectral irradiance, *Proc. ASME/JSME/JSES Solar Engineering Conf.*, Honolulu, HI, p. 307-313, 1987.

MIMS, F. M.; FREDERICK, J. E. Cumulus clouds and UV-B. *Nature*, v. 371, p. 291, 1994.

NANN, S.; RIORDAN, C. Solar spectral irradiance under clear and cloudy skies: Measurements and a semiempirical model, *J. Appl. Meteorol.* v.30, p. 447-462, 1991.

OLIVEIRA, G. F.; CAMPOS, R. L. C.; TEMPORAL, W. F. Efeitos da Radiação Ultravioleta nas Atividades Aéreas e Terrestres. RMAB, v. 55, n. ½, p. 19-26, 2005.

OKUNO, E.; CALDAS, I.L.; CHOW, C. Física para ciências biológicas e biomédicas. HARBRA ltda, p. 174-176, 1986.

PAROSCIENTIFIC. Met3A calculation of dew point. Inc. (2004). Disponível em: www.paroscientific.com/dewpoint.htm. Acesso em: Set. 2008.

PFISTER, G.; MCKENZIE, R.L.; LILEY, J.B.; THOMAS, A.; FORGAN, B.W.; LONG, C.N. Cloud coverage based on All-Sky imaging and its impact on surface solar irradiance. Journal of Applied Meteorology, v. 42, p. 1421– 1434, 2003.

PIACENTINI, R. D.; CEDE, A.; BARCENA, H. Extreme solar total and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desert plateau Puna of Atacama (Argentina). J. Atmos. Solar Terr. Phys, v.65, p. 725-731, 2003.

PIACENTINI, R.; SALUM, G.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. Renewable Energy, v. 36, p. 409-4121, 2011.

PIEDEHIERRO, A.A., ANTÓN, M., CAZORLA, A., ALADOS-ARBOLEDAS, L., OLMO, F.J. Evaluation of enhancement events of total solar irradiance during cloudy conditions at Granada (Southeastern Spain). Atmos. Res. 135-136, 1-7, 2014.

RIGOLLIER, C.; BAUER, O.; WALD, L. On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas - with respect to the Heliosat method, Solar Energy, v. 68, n. 1, p. 33–48, 2001.

SANTAMOURIS, M.; IHALAKAKOU, G. Modeling the global solar radiation on the earth's surface using atmospheric deterministic and intelligent data-driven techniques. American Meteorological Society, Outubro, 1999.

SABBURG, J.; WONG, J. The effect of clouds on enhancing UVB irradiance at the earth's surface: a one year study, *Geophysical Res. Letters*, v. 27, p. 3337-3340, 2000.

SANTOS, J. M. Contribuição aos estudos de albedo. Tese (Doutorado em Agrometeorologia)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. p47,1957.

SCHARMER, K. ESRA HANDBOOK, *International Journal of Solar Energy*, v.15, Chapter III, p. 81-87, 1994. SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment). Disponível em: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce_05.php. Acesso em: 4 de set, 2009.

SHIELDS, J.E.; KARR, M.E.; TOOMAN, T.P.; SOWLE, D.H.; MOORE, T.S. The whole sky image a year of progress, 1988. disponível em:
<http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_9803/shields-98.pdf>

SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment). disponível em:
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce_05.php>. Acesso in September 2009.

TAPAKIS, R., CHARALAMBIDES, A.G. Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. *Renew. Energy* 62, 459-467, 2014.

TIBA, C. ; FRAIDENRAICH, N. ; MOSZKOWICZ, M. ; CAVALCANTI, E. S. C. ; LYRA, F. J. M. ; NOGUEIRA, A. M. B. ; GROSSI, H. G. . Atlas Solarimétrico do Brasil. Recife, Pernambuco: Editora Universitária - UFPE, p. 111, 2001.

WEIGL, T., NAGL, L., WEIZENBECK, J., ZEHNER, M., AUGEL, M., ÓCHSNER, P., GIESLER, B., BECKER, G., MAYER, O., BETTS, T., GOTTSCHALG, R. Modelling and validation of spatial irradiance characteristics for localized irradiance fluctuations and enhancements. In: Proc. of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, EU PVSEC Proceedings, 2012 Sep 24-28; Frankfurt, Germany, pp. 3801-3804, 2012.

WMO – World Meteorological Organization. Disponível em:
https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf. Acesso em: 20 de jun. 2016.

- WONG, L. T.; CHOW, W. K. Solar radiation model. Elsevier, Applied Energy, v. 69, 2001.
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION 2016, Sunbeds, tanning and UV exposure, Disponível em: <http://www.Who.int/mediacentre/factsheets/fs287/em>. Acesso em: 10 fev. 2016.
- WRC - WORLD RADIATION CENTER. Solar Constant: Construction of a composite total solar irradiance (TSI) time series from 1978 to the present (Responsible C. Fröhlich). Davos, Switzerland. Disponível em:
<<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>>. Acesso em: 10 de set. 2009.
- YORDANOV, G. H.; MIDTGARD, O. M.; SAETRE, T. O.; NILESEN, H. K.; L. E. NORUM. Over irradiance (cloud enhancement) events at high latitudes. 38th IEEE , PVSC, Austin, 2012.
- YORDANOV, G. H.; SAETRE, T. O.; MIDTGARD, O. M., 2013b. 100-Miliseconds resolution for accurate overirradiance measurements. IEEE J. Photovolt. 3 (4), 1354-1360, 2013
- YES - Yankee Environmental System. Cloud Cover. Disponível em: <http://www.yesinc.com/products/data/tsi880/index.html>. Acesso: 09 de mar. 2016.

APÊNDICE

Figura 61 – Perfil diário para o dia 6 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

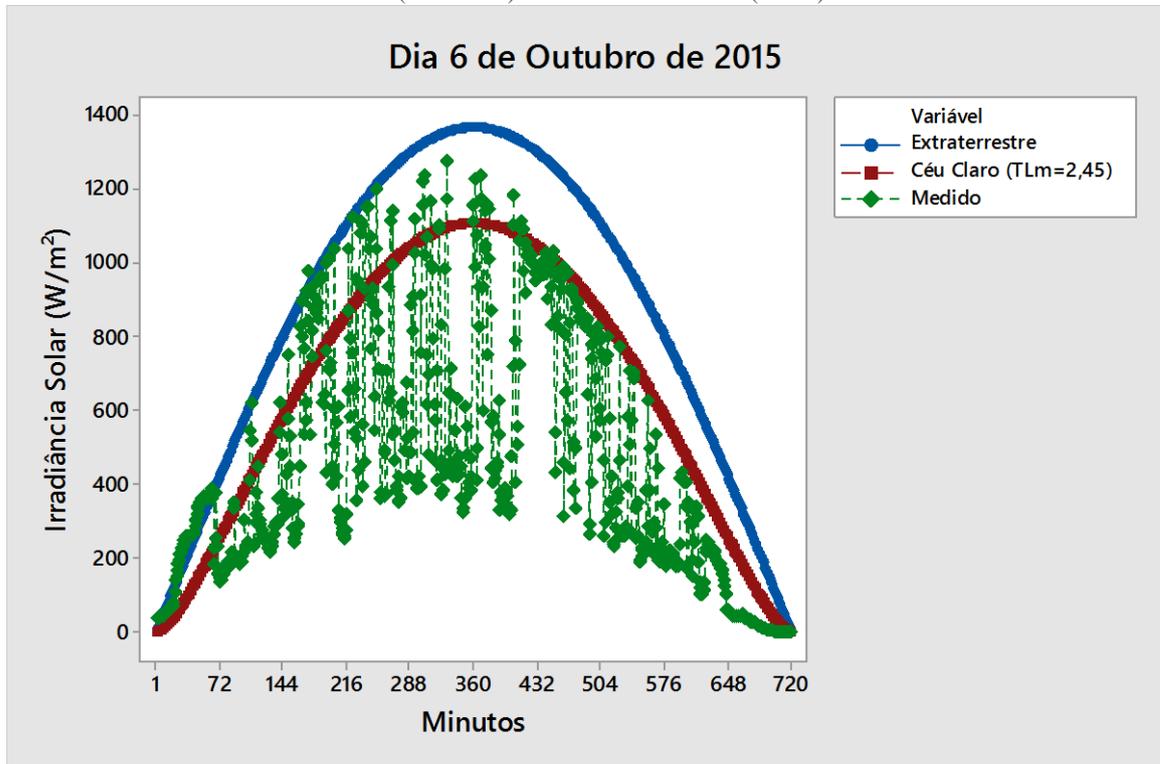


Figura 62 – Perfil diário para o dia 7 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

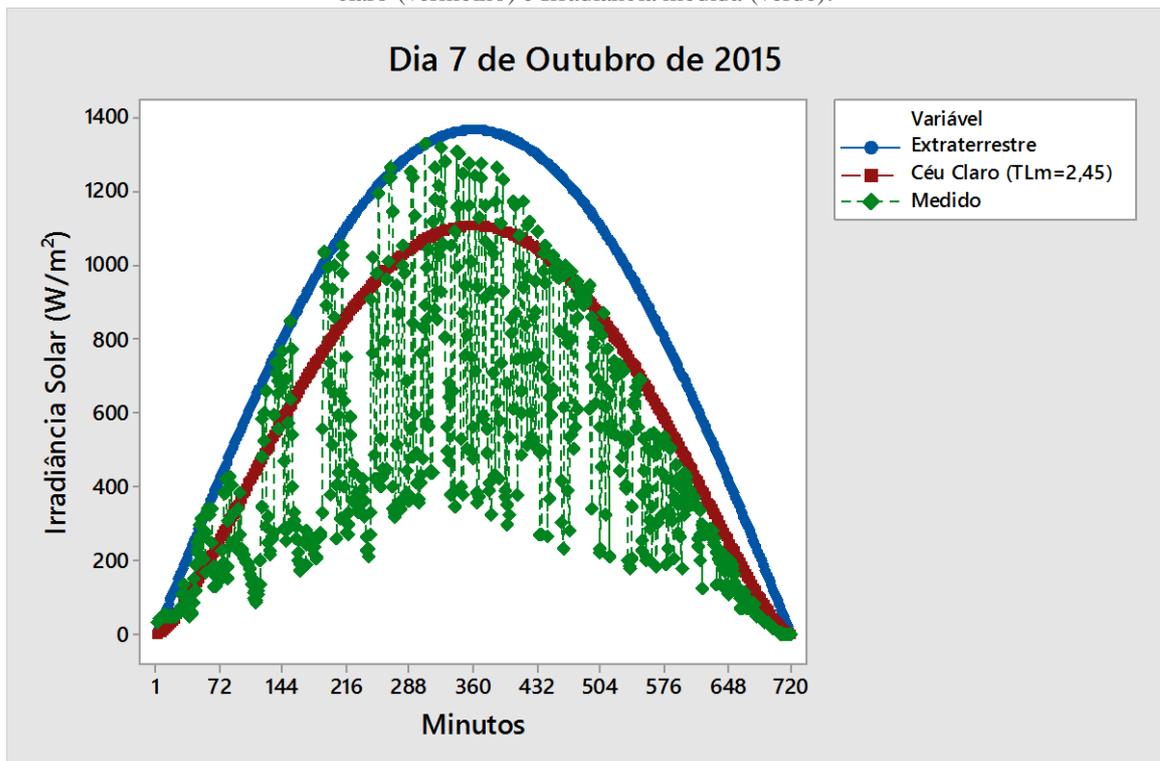


Figura 63 – Perfil diário para o dia 16 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

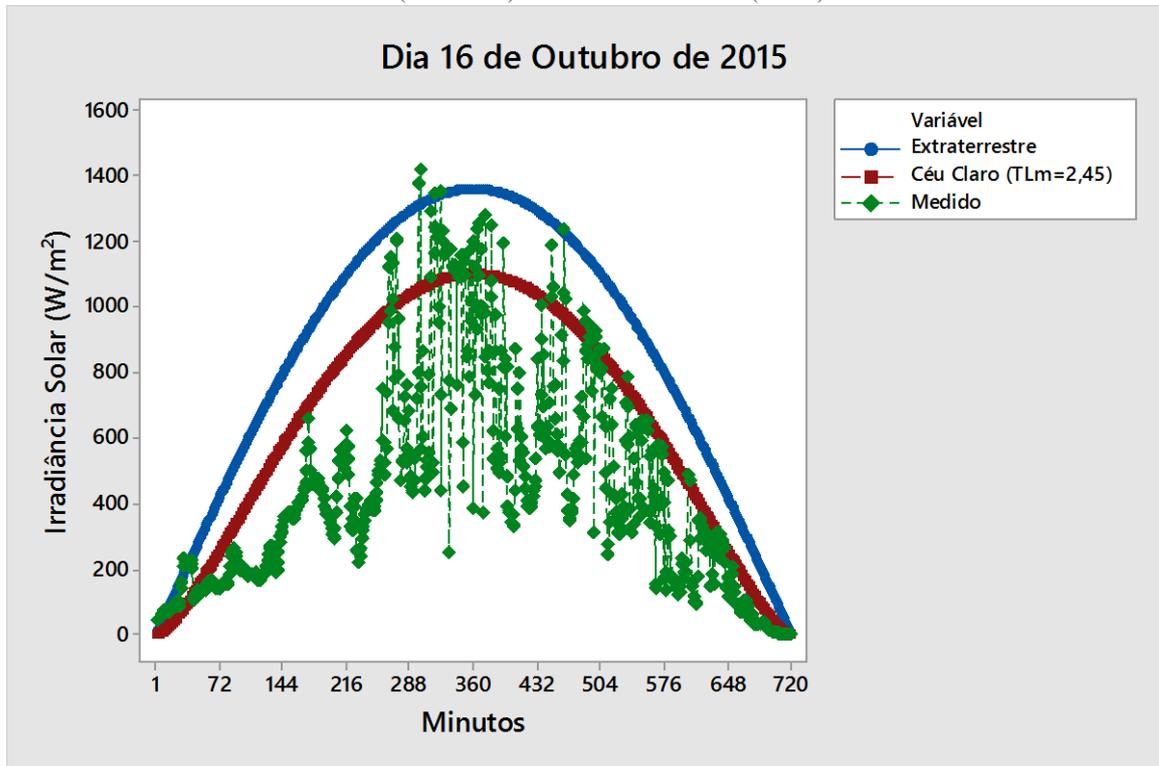


Figura 64 – Perfil diário para o dia 19 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

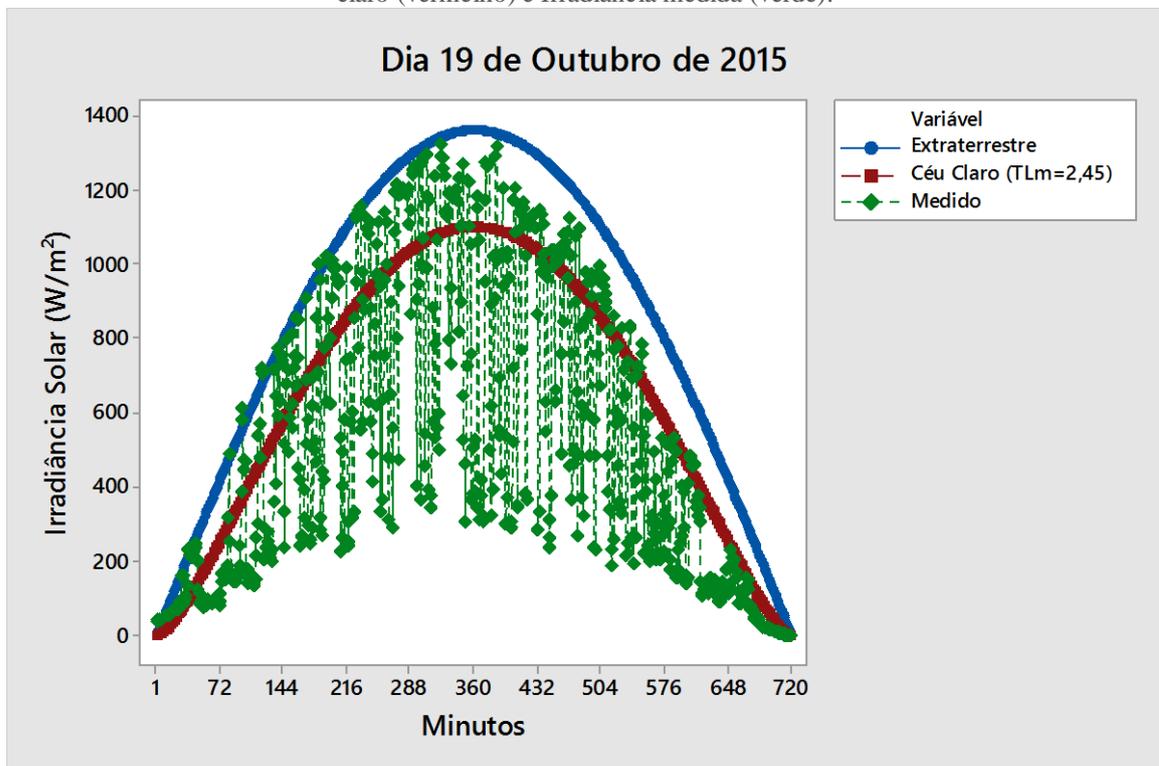


Figura 65 – Perfil diário para o dia 20 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

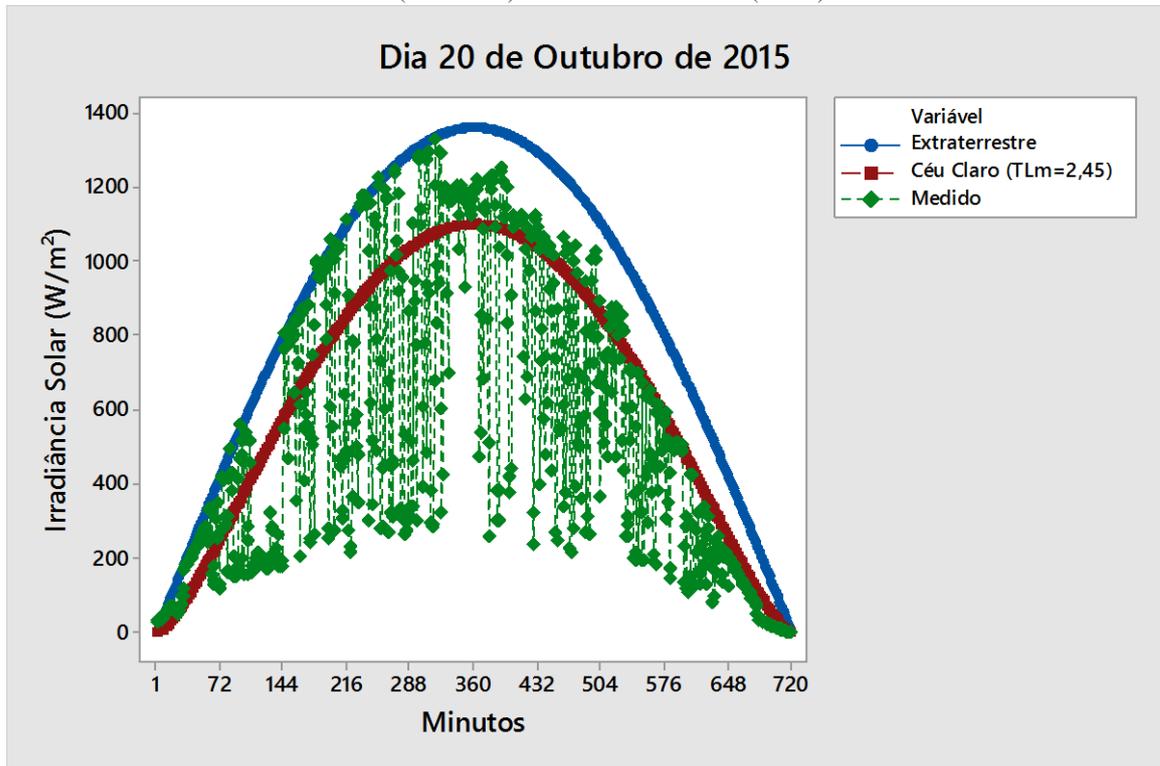


Figura 66 – Perfil diário para o dia 21 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

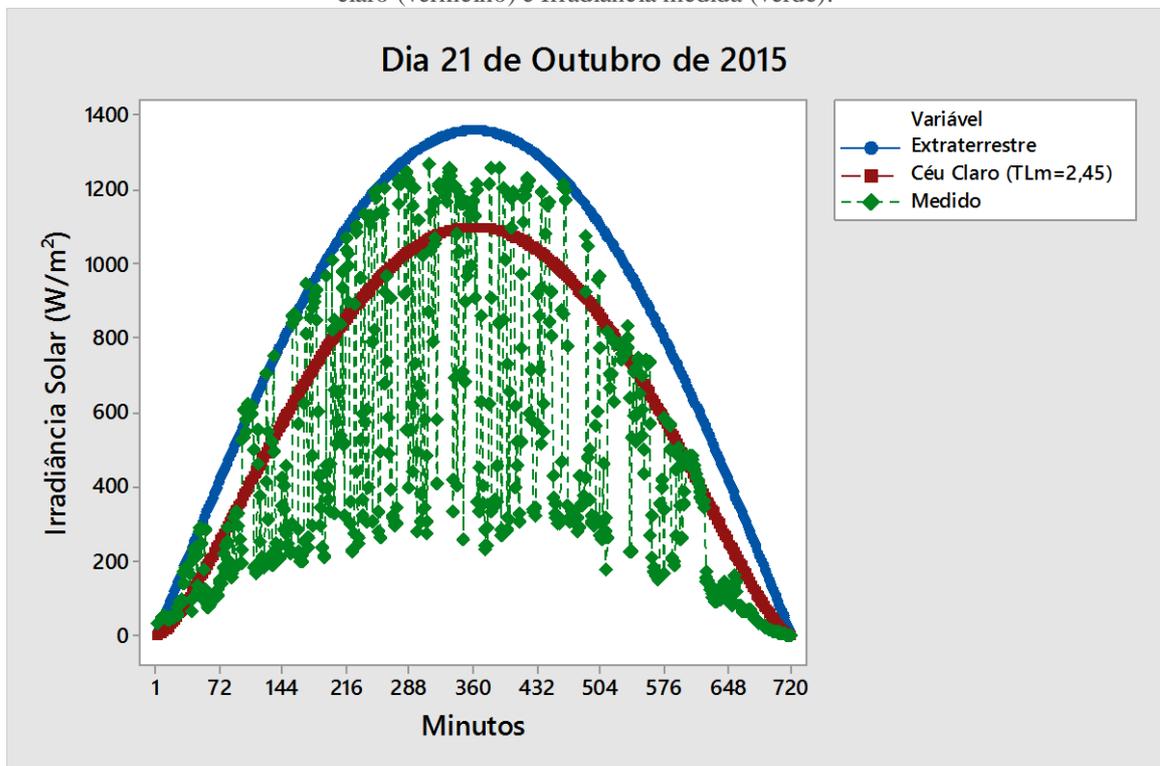


Figura 67 – Perfil diário para o dia 23 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

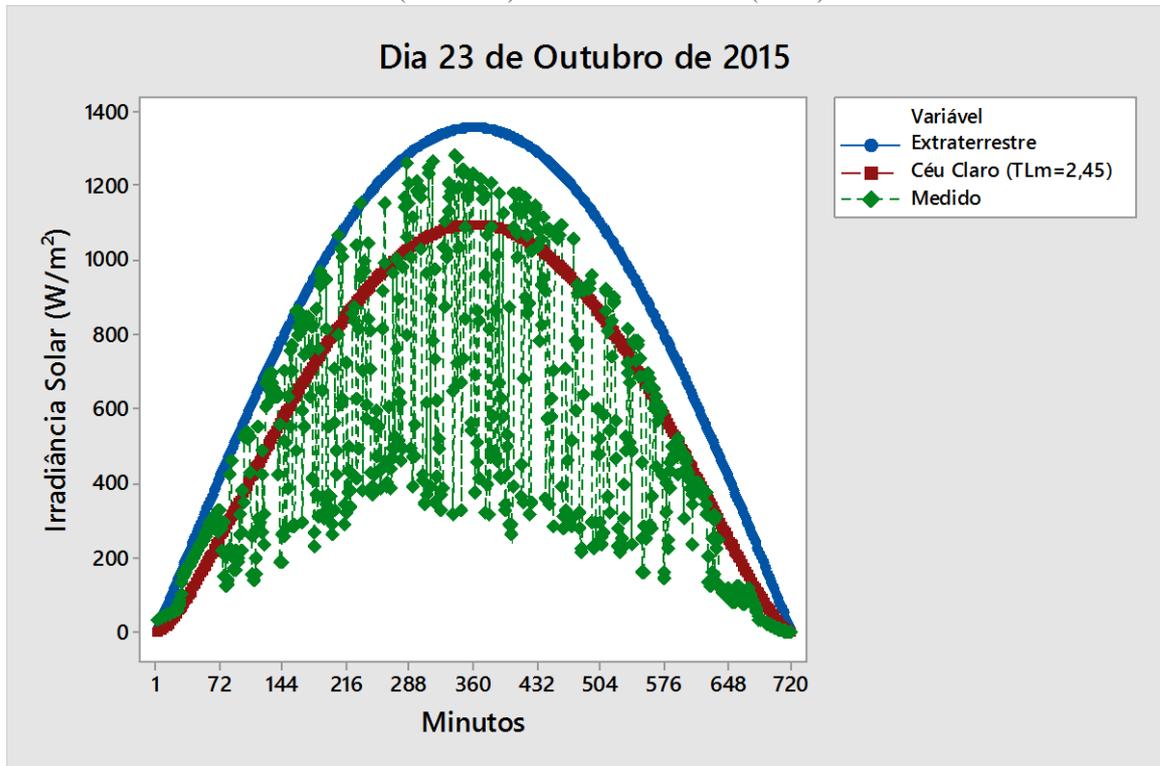


Figura 68 – Perfil diário para o dia 28 de outubro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

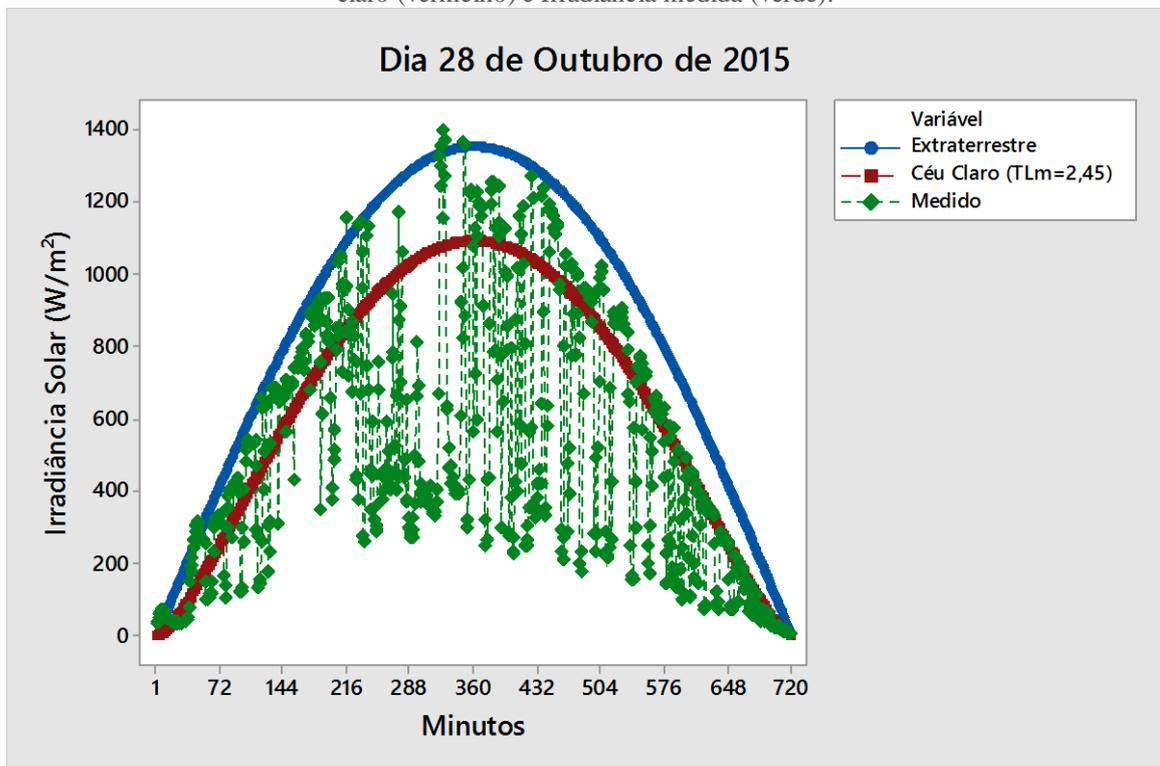


Figura 69 – Perfil diário para o dia 5 de novembro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

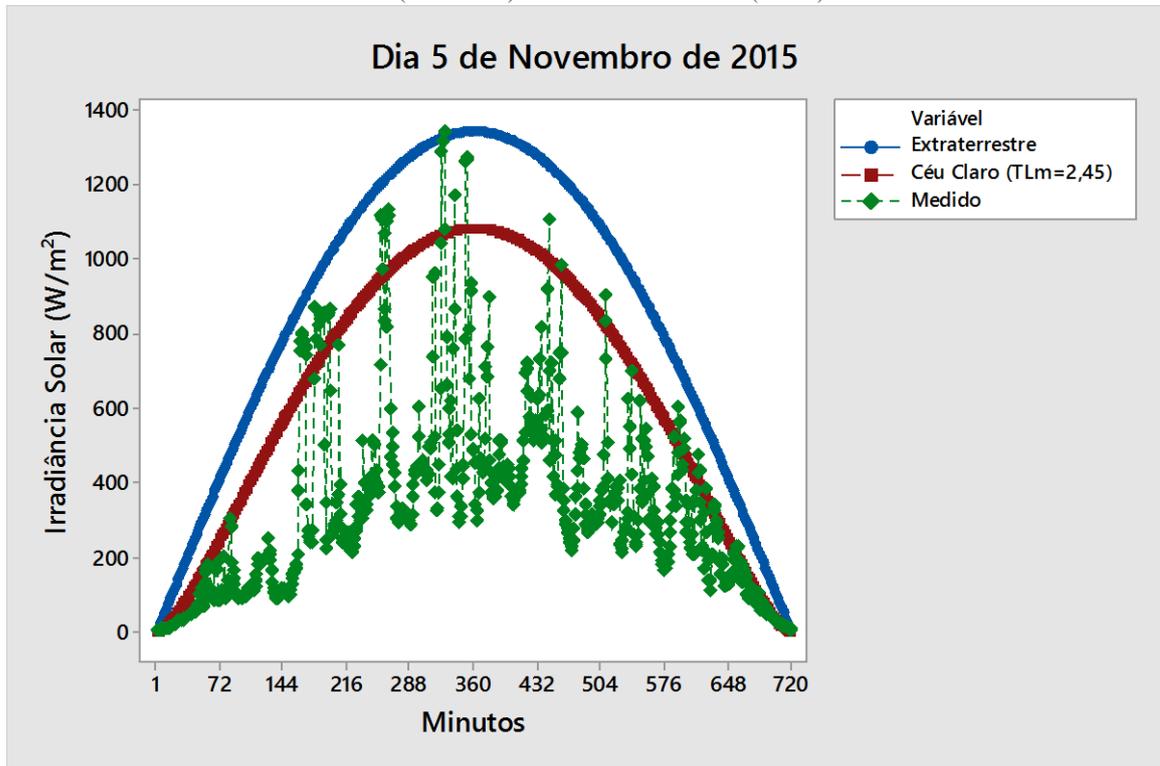


Figura 70 – Perfil diário para o dia 6 de novembro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

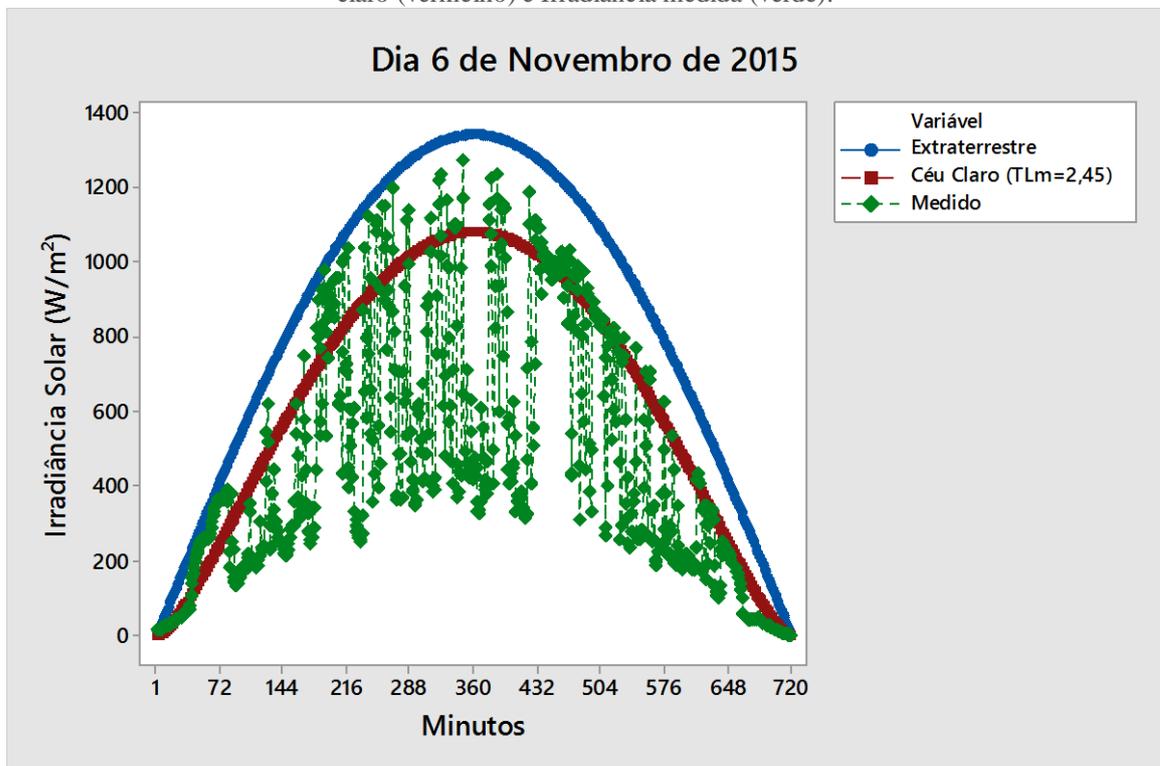


Figura 71 – Perfil diário para o dia 12 de novembro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

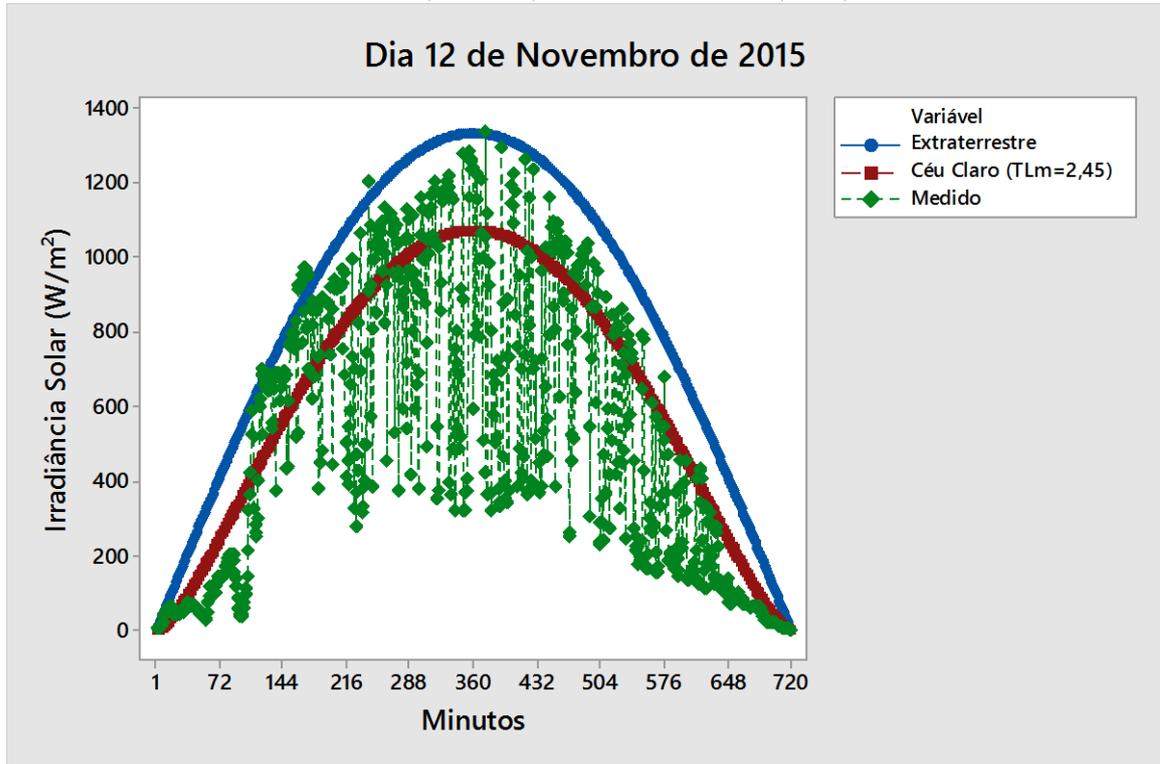


Figura 72 – Perfil diário para o dia 13 de novembro de 2015: Irradiância Extraterrestre (Azul), Irradiância de Céu claro (vermelho) e Irradiância medida (verde).

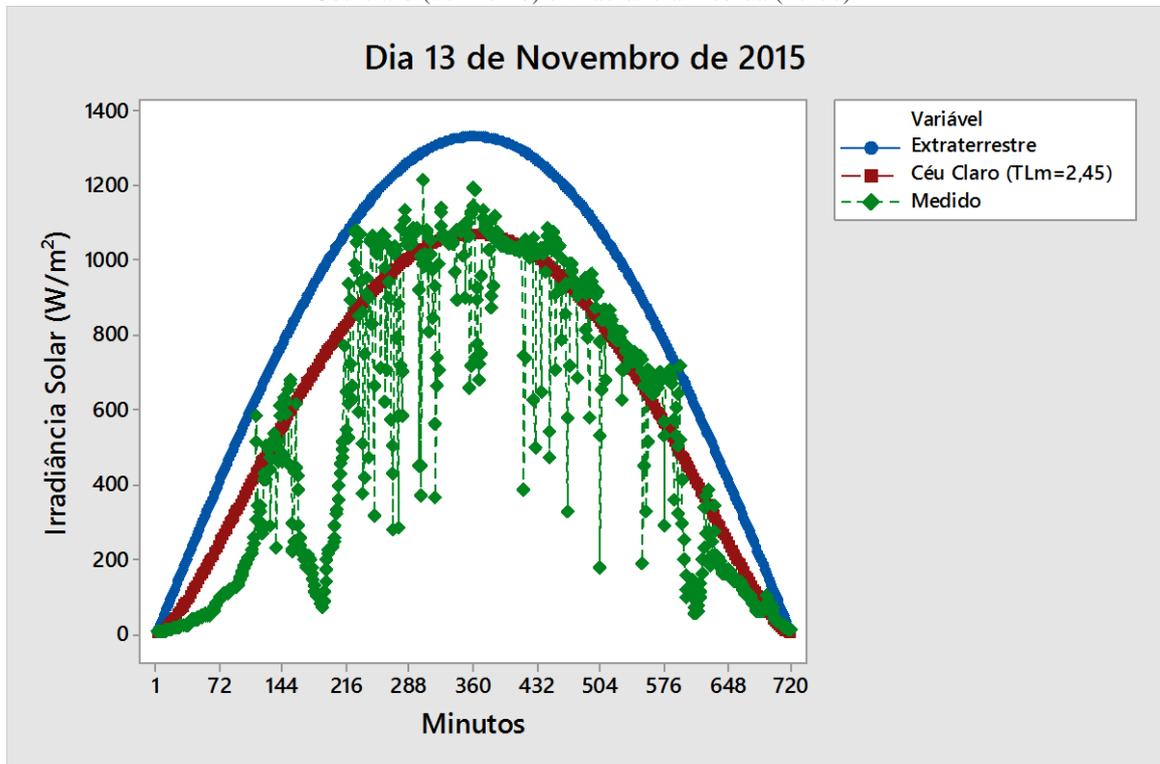


Figura 73 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 2 de outubro de 2015.

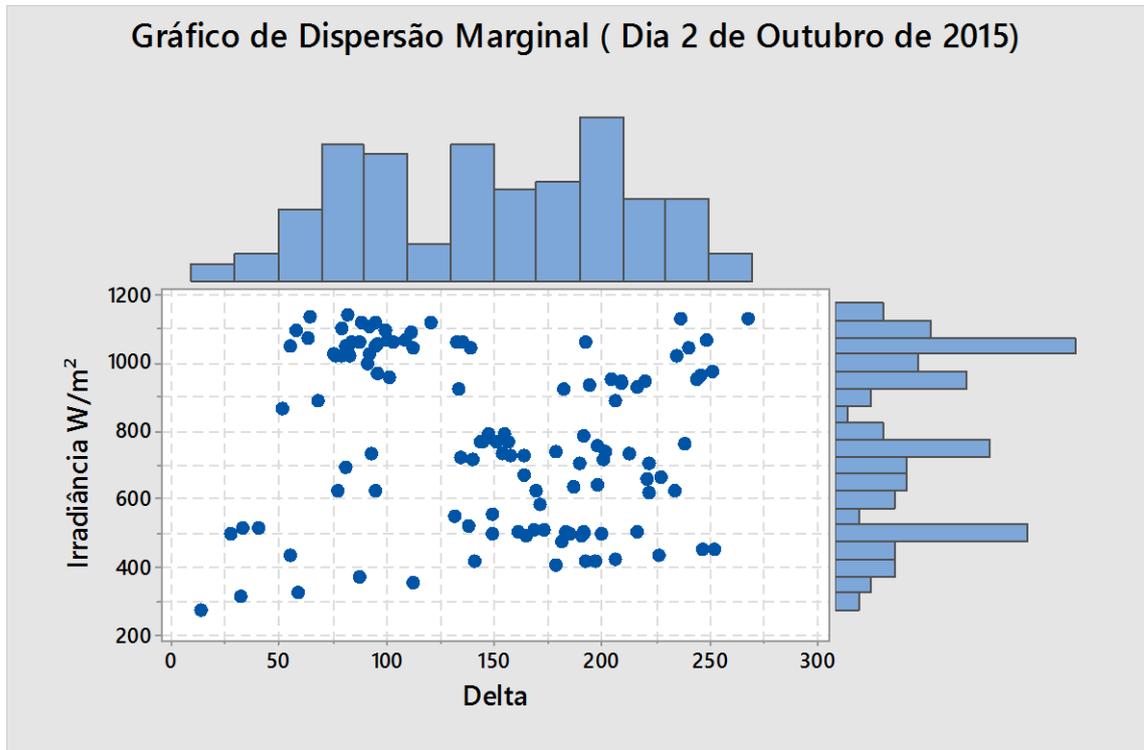


Figura 74 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 6 de outubro de 2015.

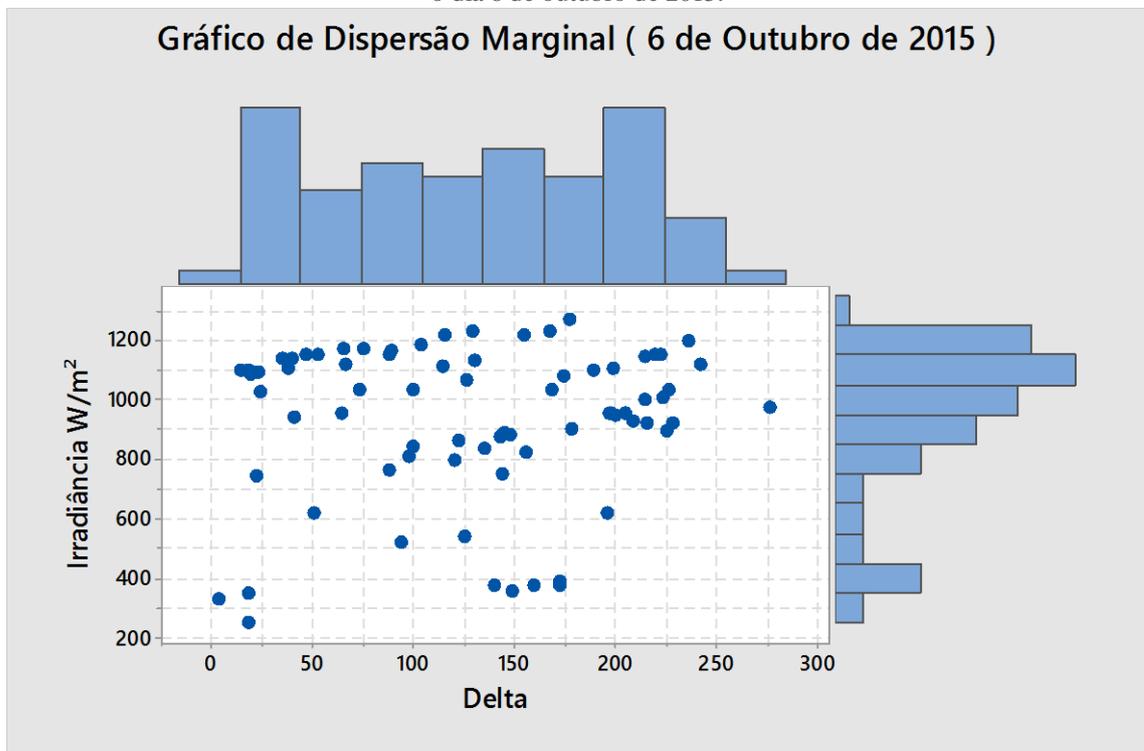


Figura 75 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 7 de outubro de 2015.

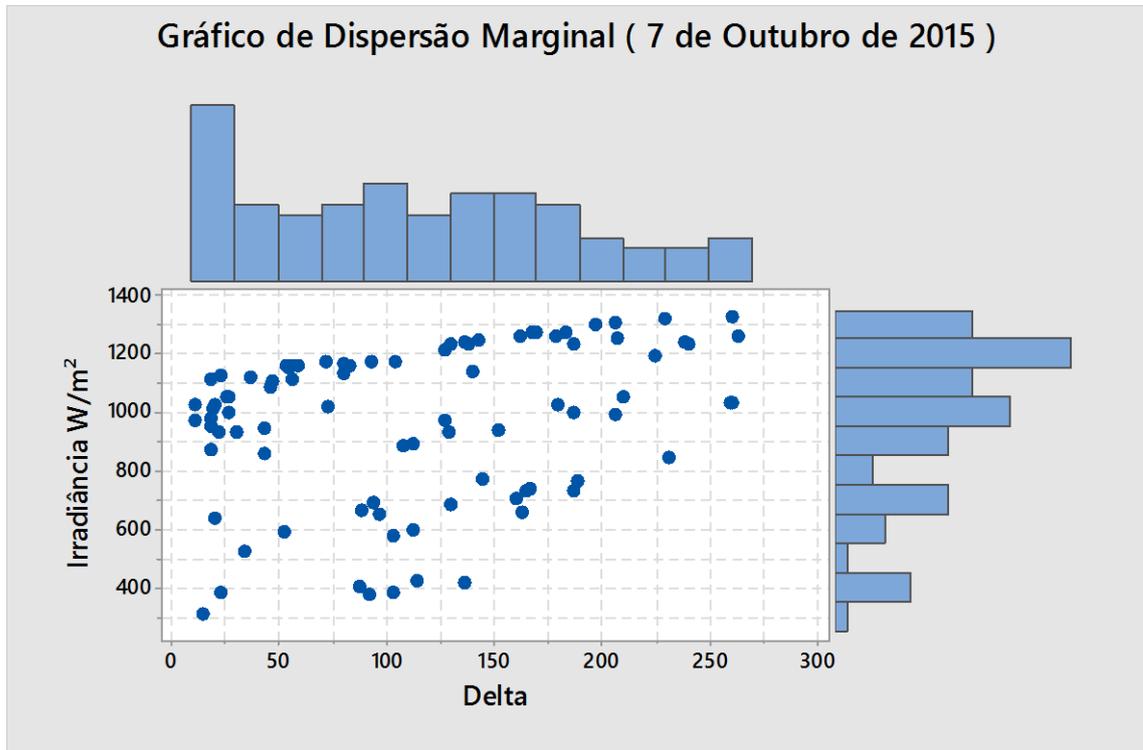


Figura 76 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 16 de outubro de 2015.

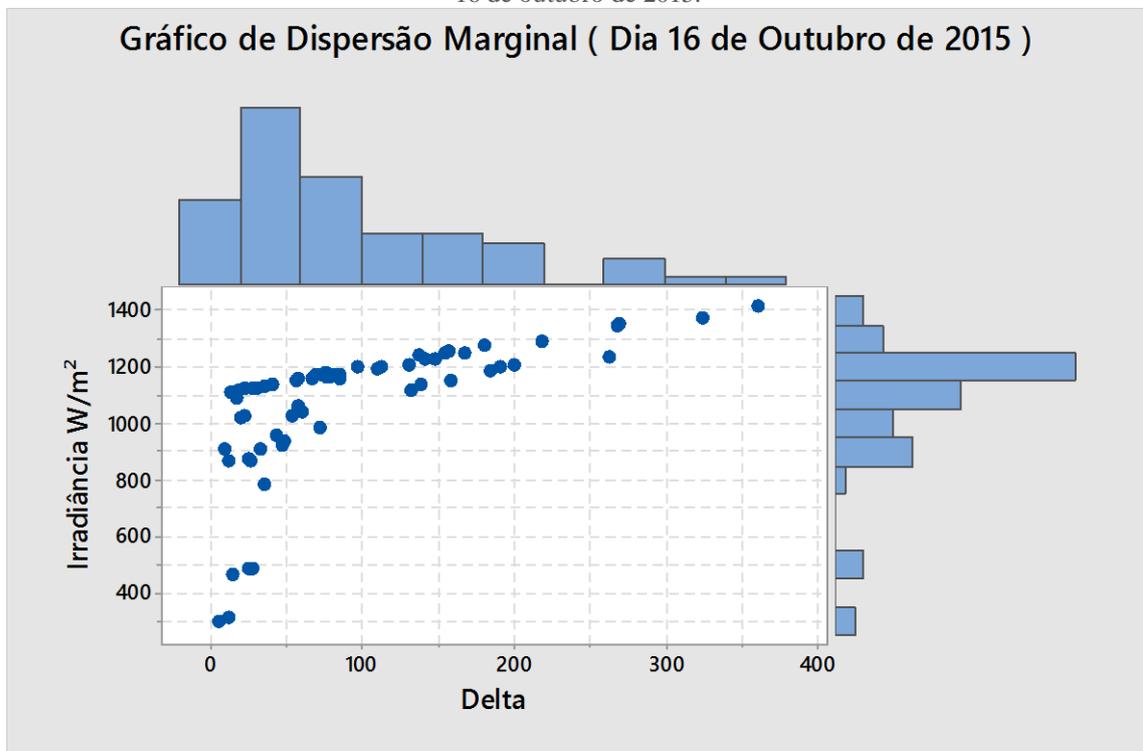


Figura 77 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 19 de outubro de 2015.

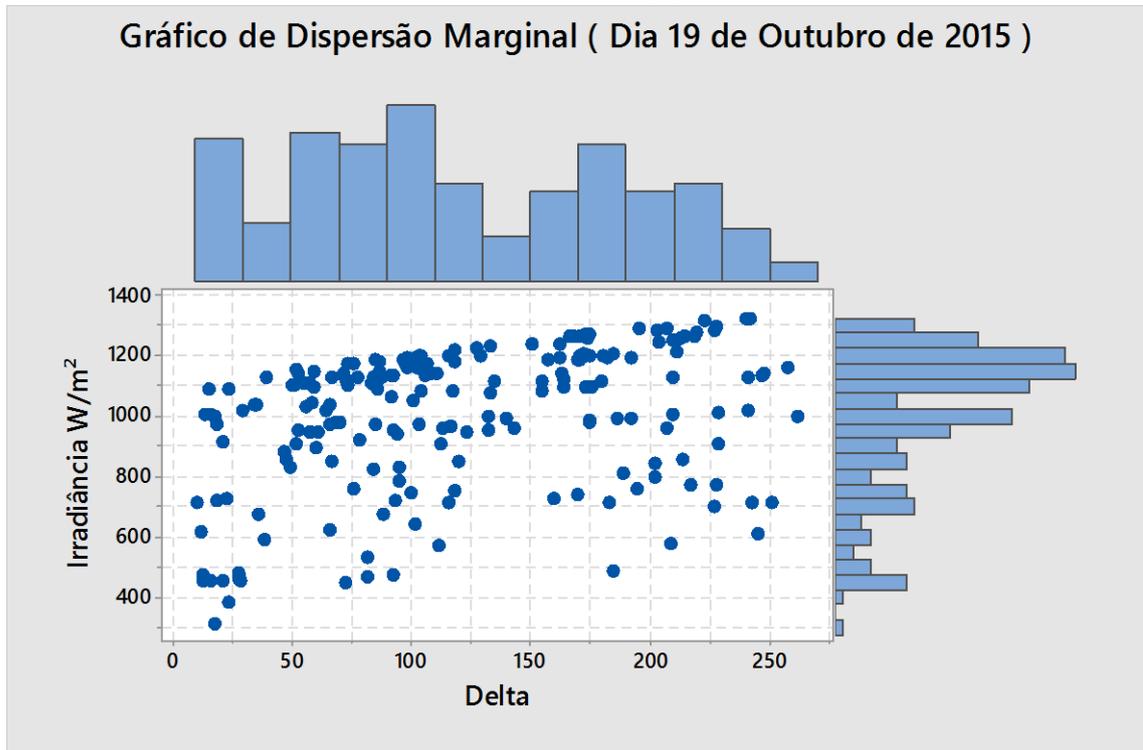


Figura 78 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 20 de outubro de 2015.

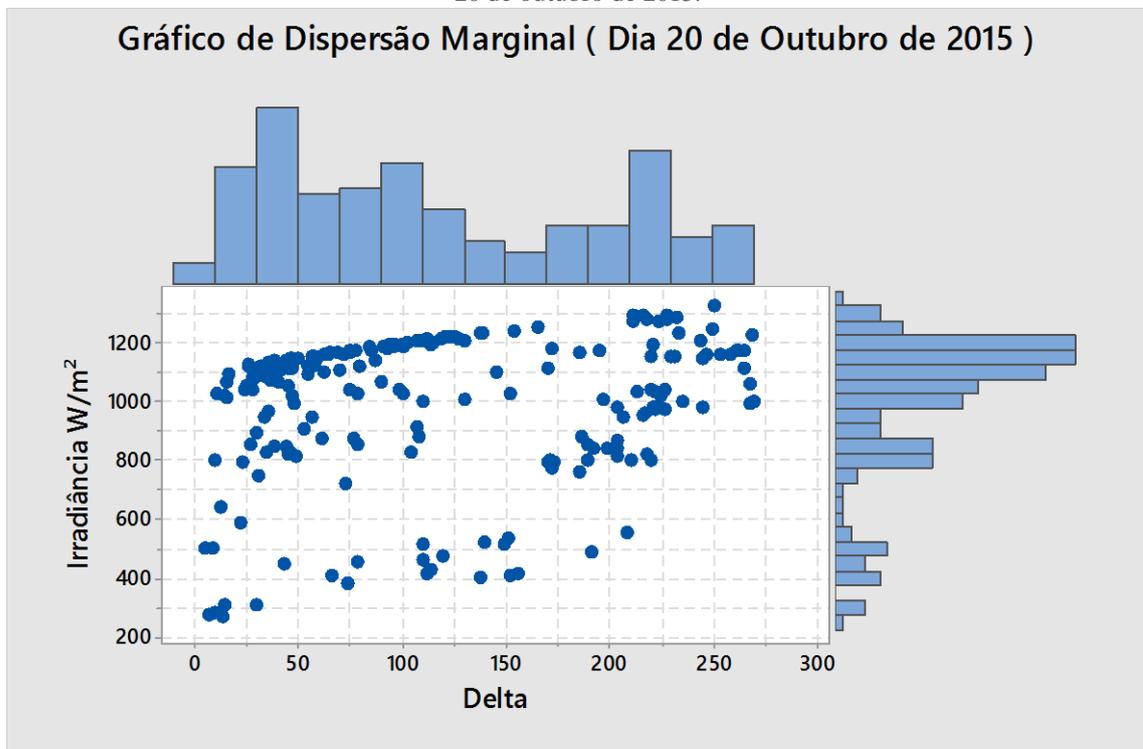


Figura 79 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 21 de outubro de 2015.

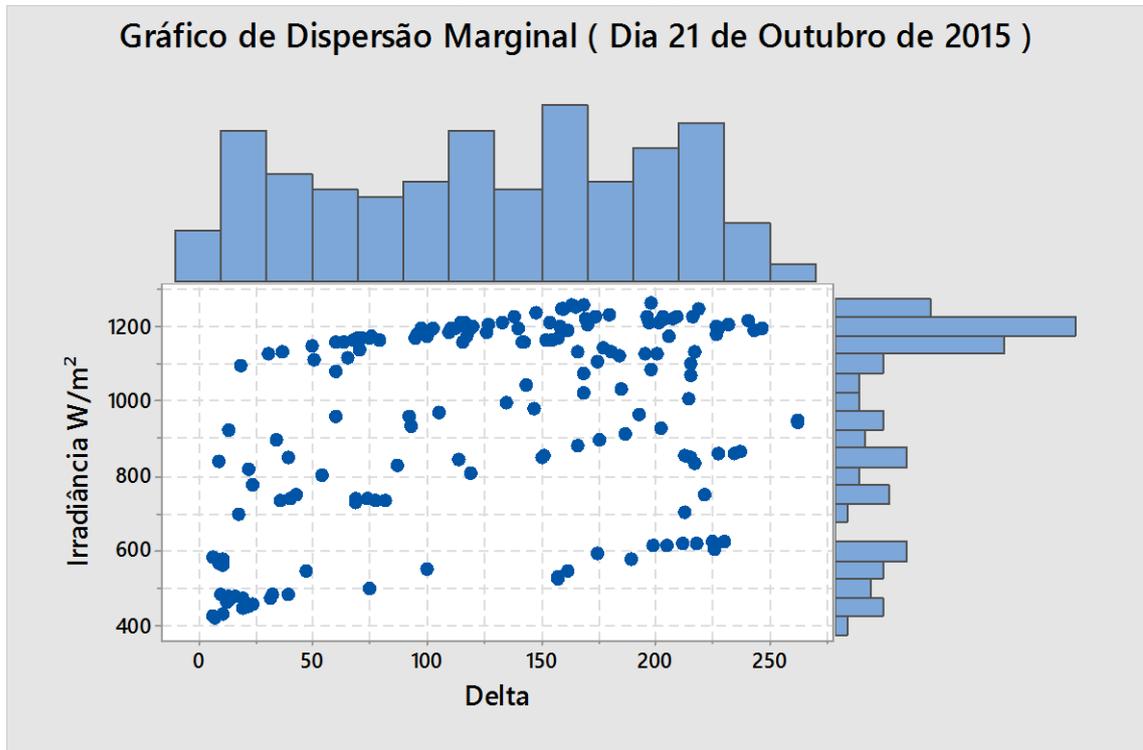


Figura 80 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 23 de outubro de 2015.

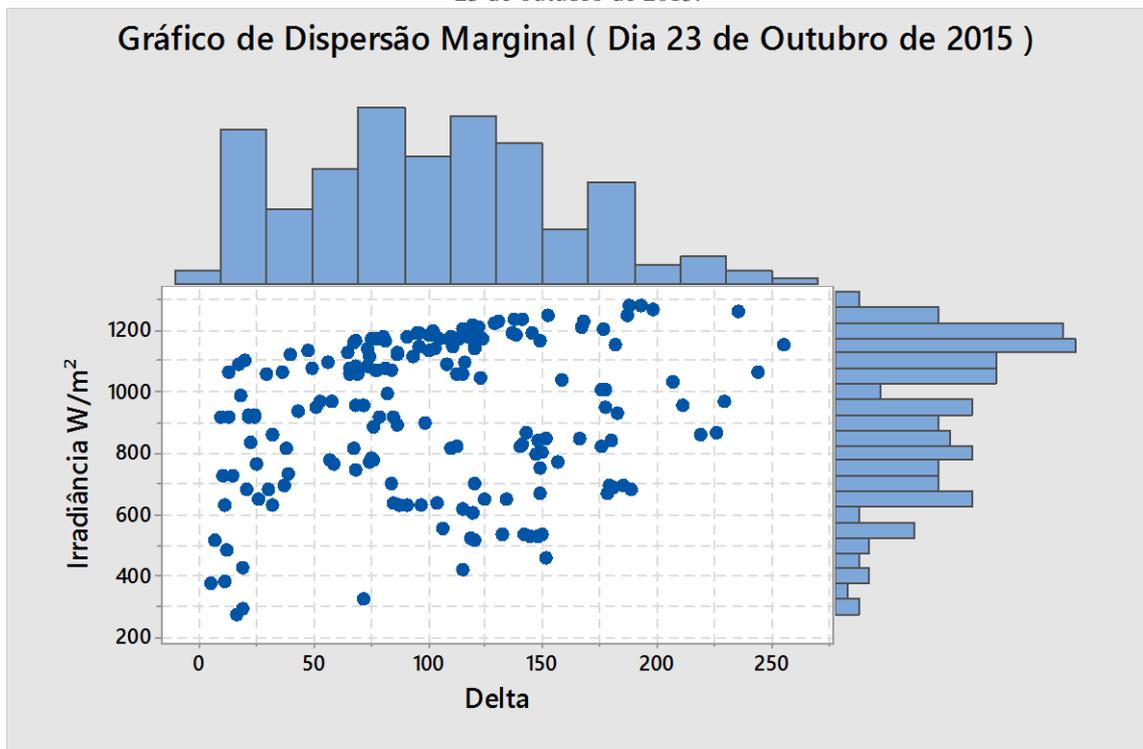


Figura 81 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 28 de outubro de 2015.

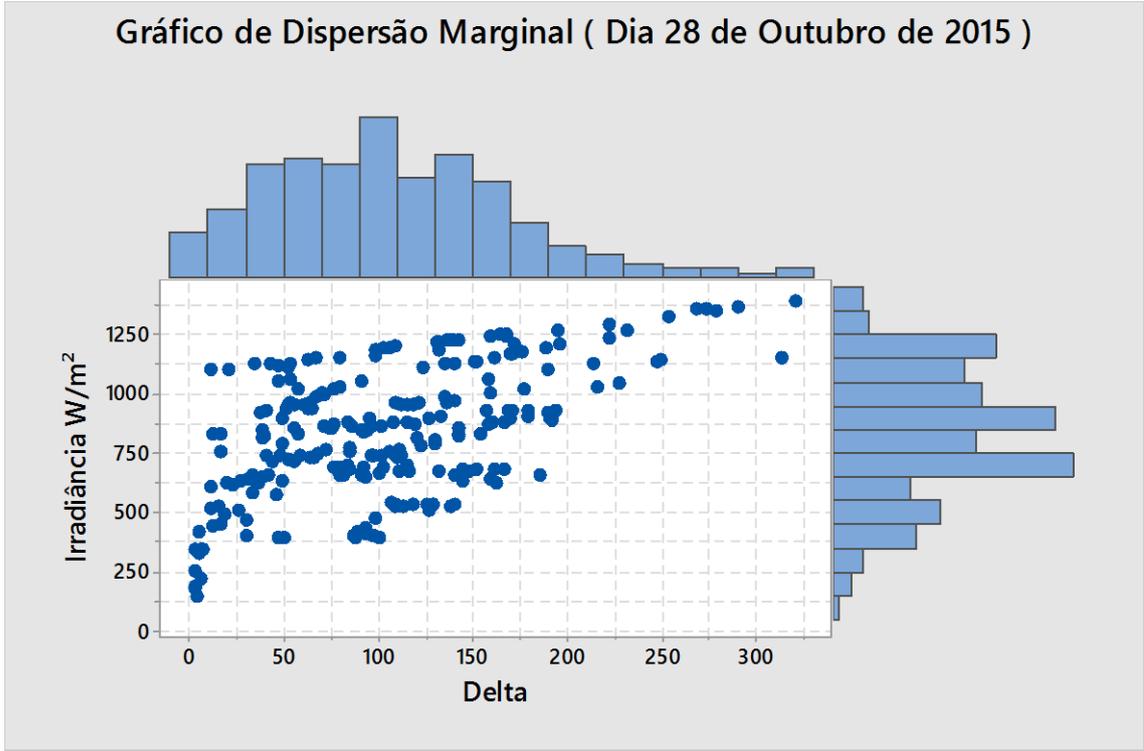


Figura 82 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 5 de novembro de 2015.

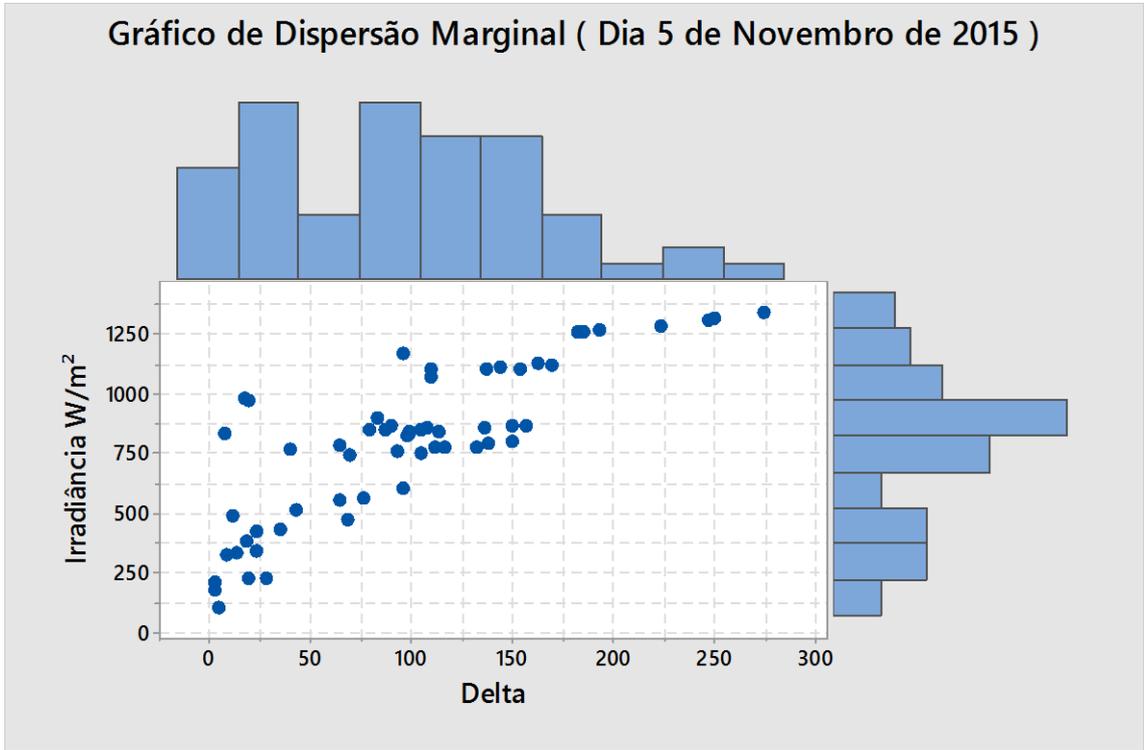


Figura 83 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 6 de novembro de 2015.

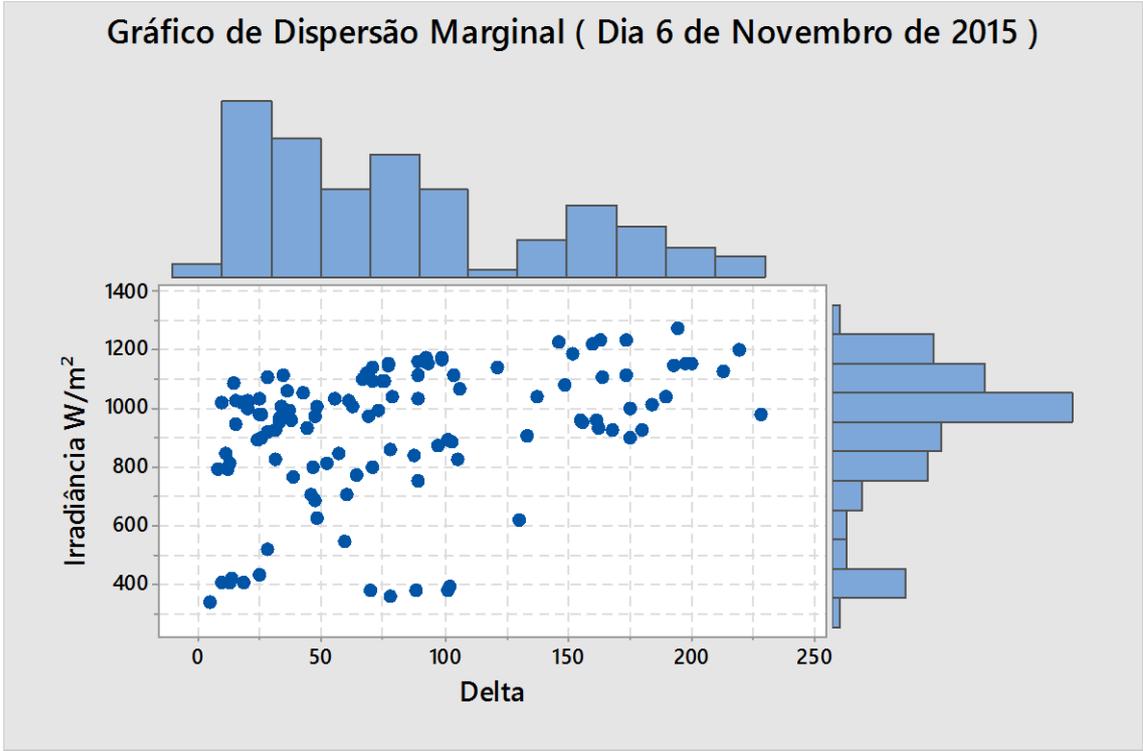


Figura 84 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 10 de novembro de 2015.

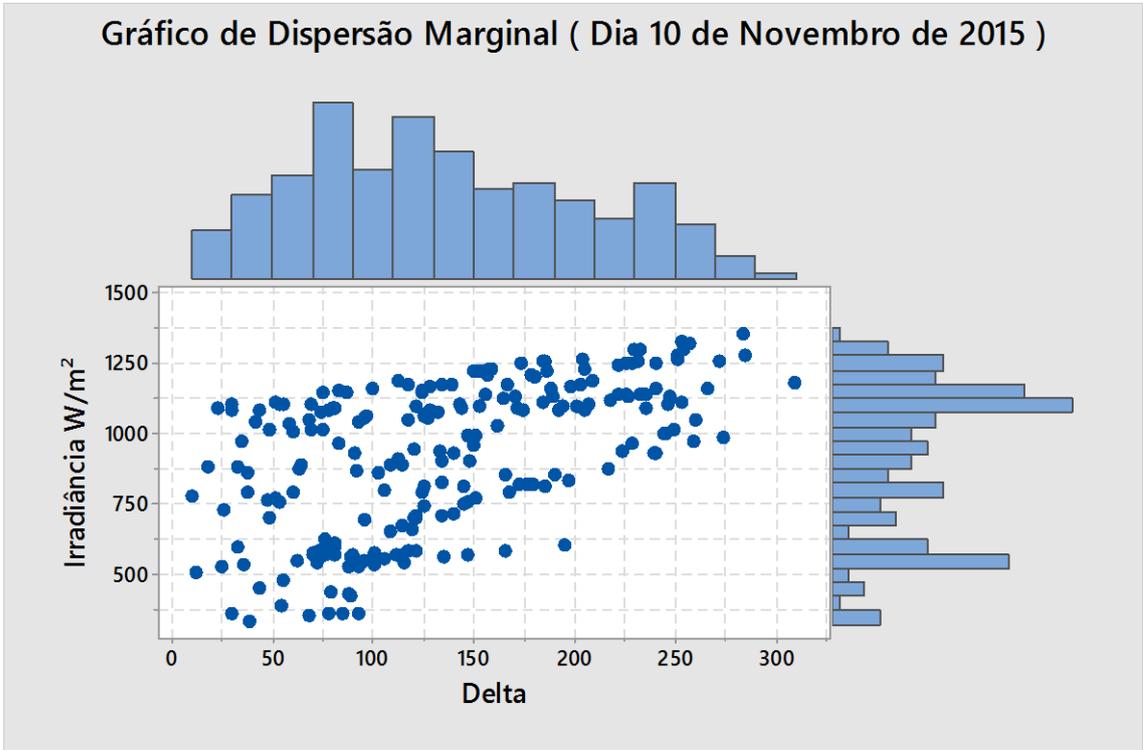


Figura 85 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 11 de novembro de 2015.

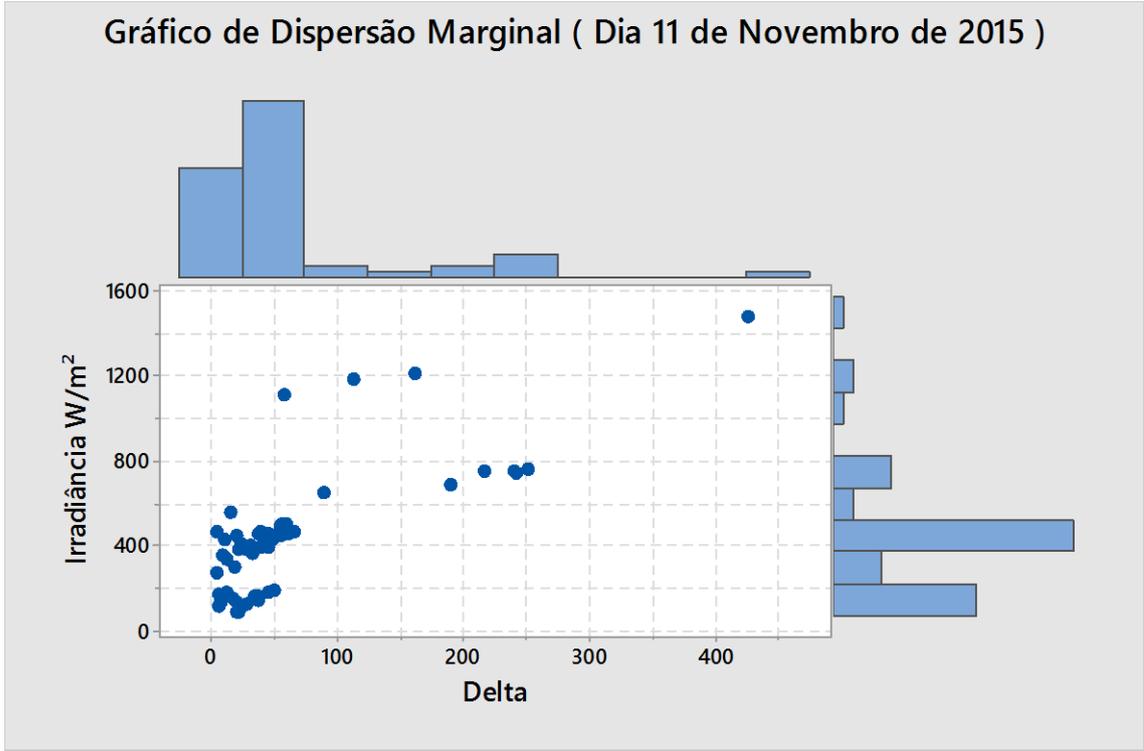


Figura 86 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 12 de novembro de 2015.

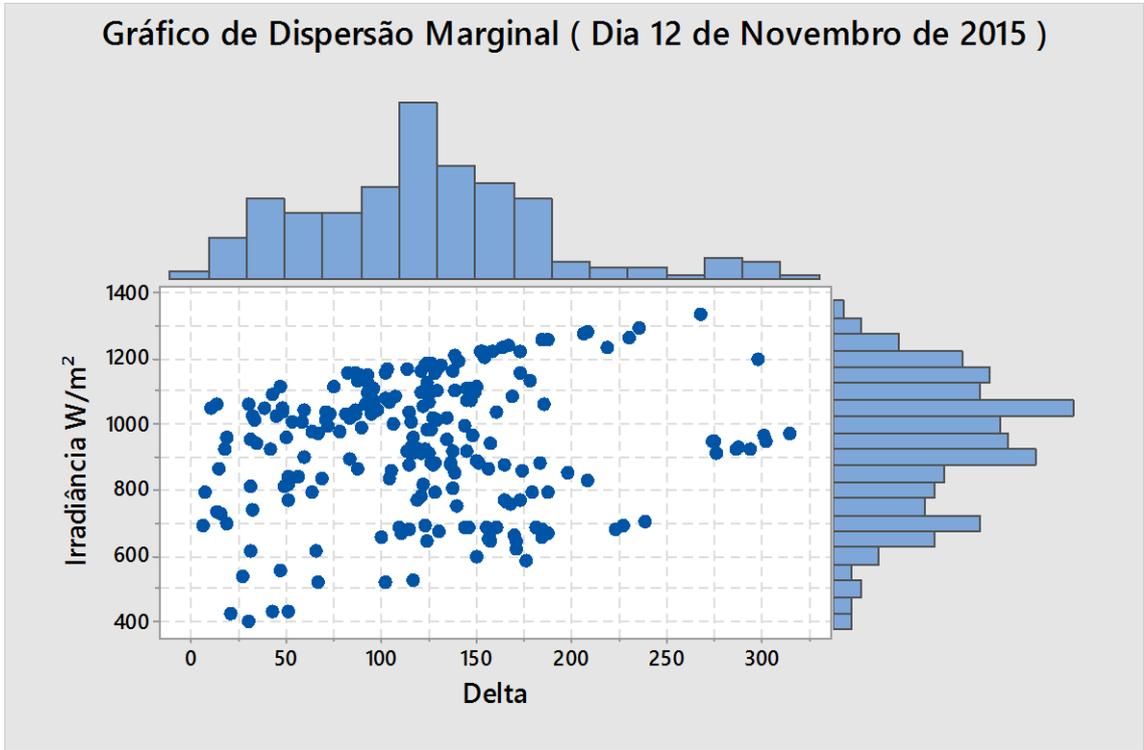


Figura 87 – Gráfico de dispersão marginal das irradiâncias versus Delta para o dia 13 de novembro de 2015.

