**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

ANDRÉ DE OLIVEIRA

**PREVISÃO NUMÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR: UM ESTUDO
APLICADO À ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO LSF-IEE**

SÃO PAULO

2020

ANDRÉ DE OLIVEIRA

PREVISÃO NUMÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR: UM ESTUDO APLICADO À
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO LSF-IEE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

FICHA CATALOGRÁFICA

De Oliveira, André.

Previsão numérica da irradiação solar: um estudo aplicado à estação meteorológica do LFS-IEE. /André de Oliveira; orientador: Roberto Zilles – São Paulo, 2020.

144 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Energia solar. 2. Sistemas fotovoltaicos. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

Nome: DE OLIVEIRA, André

Título: Previsão numérica da irradiação solar: um estudo aplicado à estação meteorológica do LFS-IEE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles

Aprovado em: 04 de dezembro de 2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Tércio Ambrizzi

Instituição: IAG/USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Fernando Ramos Martins

Instituição: UNIFESP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Ricardo Rüther

Instituição: UFSC

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Roberto Zilles

Instituição: PPGE/USP

Orientador e Presidente da Comissão

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Tatiana e à minha filha Adriana, por absolutamente tudo.

À Universidade de São Paulo, que sempre foi uma segunda casa com a qual pude contar.

Aos companheiros de mestrado do IEE, pelos momentos de descontração, de trabalho em grupo e pelas conversas e idéias que pudemos compartilhar durante o curso.

Aos amigos de longa data da Escola Politécnica, pelo companheirismo durante todo este tempo.

A todo corpo de pesquisadores e mantenedores do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, passado e presente, pelo trabalho já realizado e pelo acolhimento.

Ao Prof. Roberto Zilles em especial, por aceitar orientar-me e por fazê-lo sempre de forma aberta.

RESUMO

DE OLIVEIRA, André. Previsão numérica da irradiação solar: um estudo aplicado à estação meteorológica do LFS-IEE. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Este trabalho teve como objetivo compreender os desafios técnicos da previsão de irradiação, avaliar o estado-da-arte produzido e propor uma metodologia de análise e aprimoramento da previsão de curto prazo para a irradiação solar do modelo de previsão numérica do tempo Global Forecast System (GFS), aplicada às medições obtidas da estação meteorológica do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do Instituto de Energia e Ambiente (IEE). Os dados solarimétricos foram submetidos a um procedimento de avaliação de qualidade, no qual se intercomparou a consistência entre medidas de piranômetros dedicados à medição da irradiação global horizontal, difusa e sobre plano inclinado sobre uma base comum, denominada espaço-K. A avaliação permitiu identificar registros que potencialmente comprometeriam a análise de desempenho das previsões do modelo numérico, motivando ajustes metodológicos para que o conjunto de dados consistidos disponíveis nas etapas de análise subsequentes mantivesse um tamanho amostral robusto. O confronto entre valores observados e previstos foi realizado considerando a antecipação com a qual a previsão ocorre e para intervalos de integralização de 3h, que correspondem a períodos do amanhecer ao anoitecer. Os resultados demonstraram que o modelo GFS é capaz de produzir previsões consistentes para a irradiação em superfície, mas com vieses positivos expressivos. A habilidade preditiva foi comparada em referência à previsão por persistência, a qual assume a permanência da condição celeste em relação ao último registro de medição. O emprego de regressão linear simples permitiu o refinamento destes resultados, mas os melhores índices de desempenho foram obtidos da combinação das técnicas com o emprego de regressões lineares múltiplas. A avaliação indicou ganhos de aproximadamente 45% na habilidade preditiva original do modelo GFS para a integral diária da irradiação em D+0 e em D+1.

Palavras-chave: Previsão numérica do tempo. Radiação solar. Estação solarimétrica. Energia solar. Sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

DE OLIVEIRA, André. Numerical weather forecast of solar irradiance: an application regarding the solar monitoring station at LSF-IEE. 144 f. Master of Science Dissertation – Instituto de Energia e Ambiente, University of São Paulo, São Paulo, 2020.

This research project aimed to understand the technical challenges regarding numerical weather prediction for solar irradiance, to evaluate the state-of-art of the matter and to propose a method for analysis and enhancement of short-term solar irradiance forecast extracted from Global Forecast System (GFS) numerical weather forecast model applied to the measurements obtained from the solar monitoring station located at the Photovoltaic Systems Laboratory (LSF) of the Energy and Environment Institute (IEE). Global horizontal irradiation measurements were subjected to a data quality assessment procedure, which identified data points that could potentially compromise the performance analysis of the GFS model. Forecast downscaling considered whether the forecasted time corresponded to sunrise, early morning, midday, afternoon or sunset periods, as well as lead time. The results demonstrated that the GFS model is somewhat skilled in forecasting ground irradiance, but presents clear positive bias. The skill score was calculated in reference to persistence forecast, which assumes that sky condition will remain unchanged compared to that last registered. The use of linear regression schemes allowed the enhancement of forecast score, however, best results were obtained from ensemble prediction methods. The assessment indicates benefits of approximately 45% over the original skill score of GFS forecast in regards to daily accumulated irradiation values for D+0 and D+1.

Keywords: Numerical weather prediction. Solar radiation. Solar monitoring station. Solar energy. Photovoltaic systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético.	29
Figura 2 - Simulação do espectro de absortividade das principais espécies atmosféricas com a ferramenta HITRAN para o intervalo de comprimentos de onda no infravermelho.....	30
Figura 3 - Espalhamento Rayleigh e Mie.....	32
Figura 4 - Perfis verticais de pressão, temperatura e composição atmosférica média para diversos gases constituintes.....	34
Figura 5 - Estabilidade de longo termo da WRR desde 1980.	40
Figura 6 - Componentes direto, difuso e global da irradiação solar sobre uma superfície horizontal ..	41
Figura 7 - Instrumentação para medições em radiometria meteorológica.	42
Figura 8 - Elementos construtivos básicos de um pireliômetro.	43
Figura 9 - Caracterização e classificação de pireliômetros.	46
Figura 10 - Elementos construtivos básicos de piranômetros a termopilha (esquerda) e fotoelétricos (direita).	47
Figura 11 - Seletividade espectral de piranômetros a efeito termoelétrico e fotovoltaico para células de referência de silício com diferentes materiais de encapsulamento: vidro borossilicato (BG), vidro com filtro óptico passa-baixa (KG) e quartzo de alta performance ótica (HOQ).	49
Figura 12 - Caracterização e classificação de piranômetros.	51
Figura 13 - Refinamento da previsão da irradiação com o emprego do modelo ETA e pós-tratamento estatístico. Desempenho do modelo de persistência (a); desempenho e viés da saída direta do modelo ETA (b); tratamento do viés por aplicação de ajuste linear (c); tratamento do viés pela subtração do erro médio (d); pós-tratamento da previsão com o emprego de RLM (e) e RNA (f) com o conjunto completo de preditores; pós-tratamento da previsão com o emprego de RLM (g) e RNA (h) para um conjunto reduzido de preditores.	53
Figura 14 - Mapas de irradiação solar referentes ao período da primavera de 2011: medidos (esquerda), estimados pela RNA (centro) e desvio médio verificado (direita).	55
Figura 15 - Fluxograma de dados e do código computacional do modelo BRASIL-SR.	56
Figura 16 - Propagação da radiação solar na atmosfera no espectro visível e infravermelho próximo conforme hipóteses do modelo GL1.0.	59
Figura 17 - Ciclo diário da irradiância e irradiação média mensal para janeiro de 1991 incluindo medições de actinógrafos e estimativas a partir do modelo GL1.0 (esquerda) e dispersão entre dados (direita) para as localidades de Cabaceiras e Belém do Brejo da Cruz.	62
Figura 18 - Diagramas de dispersão da irradiação média diária entre dados de PCDs e estimativa do modelo GL1.1 e evolução temporal destas medidas para a estação de Cruzeiro para novembro e dezembro de 1998.	64
Figura 19 - Distribuição espacial da média sazonal da irradiação direta normal em MJ/m ² para o Nordeste brasileiro.	66
Figura 20 - Tabelas de atenuação por aerossóis rurais em função da profundidade óptica e ângulo zenital para as condições de céu claro (esquerda) e encoberto (centro) e melhoria na estimativa da irradiação global diária após inclusão destes efeitos na versão 2.0 do modelo GL.	68
Figura 21 – Proposta de previsão do recurso solar apresentada pelo LABREN no workshop ONS. ...	70
Figura 22 - Limites de aplicabilidade de cada técnica preditiva segundo diversos autores. Abaixo, visão proposta por INMAN <i>et al.</i> (2003). Acima e à esquerda, proposição de DIAGNE <i>et al.</i> (2013). Acima e à direita, delimitação conforme ANTONANZAS <i>et al.</i> (2016).	71

Figura 23 - Habilidade preditiva de diversas técnicas empregadas em função do horizonte de previsão conforme estudos revisionais de INMAN <i>et al.</i> (2013) (esquerda) e ANTONANZAS <i>et al.</i> (2016) (direita).....	73
Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema Sun4Cast® Solar Power Forecasting System.	75
Figura 25 - Potência instalada de usinas fotovoltaicas operação comercial no SIN, por classificação. 76	
Figura 26 - Potência instalada de usinas fotovoltaicas classificadas na modalidade de operação Tipo III – sem relacionamento com o ONS.	77
Figura 27 - Desempenho individual das alternativas de modelagem da previsão solar para toda a Itália (acima) e ganhos preditivos com o emprego das técnicas de previsão por conjunto (abaixo).....	78
Figura 28 - A estação solarimétrica do LSF.....	80
Figura 29 - Trecho de medições em base horária disponibilizadas pelo LSF-IEE.	82
Figura 30 - Fluxograma empregado na avaliação da qualidade dos dados solarimétricos.....	84
Figura 31 - Coeficientes de absorção do dióxido de carbono para uma camada atmosférica ($p=507$ mbar), durante o verão em latitudes médias no intervalo espectral de $630-700\text{cm}^{-1}$ como função do número de onda (a) e após reordenação com a função de probabilidade acumulada (b).	85
Figura 32 - Bandas espectrais e componentes absorvedores relevantes para o algoritmo RRTM-LW/RRTMG-LW.....	86
Figura 33 - Bandas espectrais e componentes absorvedores relevantes para o algoritmo RRTM-SW/RRTMG-SW.	86
Figura 34 - Pontos de grade nativos ao modelo GFS nas proximidades da cidade universitária da USP.	91
Figura 35 - Fluxograma do processo de confronto e aprimoramento estatístico da previsão numérica	92
Figura 36 - Dispersão kn versus kt para todo o conjunto de dados da estação Tallahassee entre 1977 e 1980, conforme MAXWELL <i>et al.</i> (1993), e para todo o conjunto de dados da estação solarimétrica do IEE entre junho de 2015 e fevereiro de 2019.....	93
Figura 37 - Dispersão kn versus kt dos dados da estação solarimétrica do IEE, discretização mensal. 94	
Figura 38 - Dispersão kn versus kt dos dados da estação solarimétrica do IEE, discretização anual para dados tomados no mês de março.....	95
Figura 39 - Dispersão ks versus kt dos dados da estação solarimétrica do IEE.....	97
Figura 40 - Geometria e ângulos referentes à posição solar na abóboda celeste.....	99
Figura 41 - Dispersão kt/ks para dados coletados nos meses de janeiro e contagem de pontos por quadrícula.....	100
Figura 42 – Identificação visual dos locais de maior densidade de pontos a partir de esquema de cores e função de densidade de probabilidade construída para este mesmo subconjunto de dados.	101
Figura 43 - Agrupamento dos dados observados e máscara de filtragem dos registros suspeitos	102
Figura 44 – Linha de comando para extração de informação individual do arquivo grib2.....	103
Figura 45 - Registros de previsão histórica do modelo GFS para a coordenada ($-23,5^\circ$ S, $-46,75^\circ$ W), que corresponde ao ponto de grade mais próximo à estação solarimétrica do LSF.....	103
Figura 46 - Dispersão entre valores previstos e observados para os intervalos das 0900-1200 UTC, 1200-1500 UTC, 1500-1800 UTC e 1800-2100 UTC do dia D+1.	105
Figura 47 - Dispersão entre valores previstos e observados para os intervalos das 0900-1200 UTC, 1200-1500 UTC, 1500-1800 UTC e 1800-2100 UTC do dia D+0.	106
Figura 48 - Subconjunto de previsões GFS com horário de inicialização em 0000 UTC.....	107
Figura 49 - Confronto entre valores observados e previstos para o intervalo das 0900-1200 UTC (LEAD=12h) do dia D+0 e resultados da regressão linear simples otimizada para este conjunto.....	109

Figura 50 - Confronto entre subconjuntos A e B de dados observados e previstos para o intervalo das 0900-1200 UTC (LEAD=12h) do dia D+0 e resultados da regressão linear simples otimizada para cada subconjunto.	110
Figura 51 - Dispersão dos valores observados e previstos para a integral diária da irradiação em D+0 e D+1.....	115
Figura 52 - Previsão para a irradiação diária prevista pelo modelo GFS originalmente (à esquerda) e após tratamentos estatísticos (à direita) com as técnicas que melhor desempenharam em cada intervalo. Versão não passível de operacionalização.	116
Figura 53 - Prazos para elaboração do acompanhamento e previsão meteorológica.	117
Figura 54 - Previsão para a irradiação diária prevista pelo modelo GFS originalmente (à esquerda) e após tratamentos estatísticos (à direita) com as técnicas passíveis de operacionalização.....	118
Figura 55 – Detalhamento mensal da avaliação de qualidade de dados solarimétricos.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação da qualidade preditiva do modelo GFS para no entorno da estação solarimétrica do LSF.	108
Tabela 2 - Avaliação da qualidade preditiva do modelo GFS após regressão linear simples.	111
Tabela 3 - Avaliação da qualidade preditiva da previsão por conjunto, otimizada com o emprego de regressão linear múltipla (RLMa).	112
Tabela 4 - Avaliação da qualidade preditiva da previsão por conjunto após alteração no critério utilizado para a persistência (RLMb). Manteve-se a referência anterior na estimativa das métricas de qualidade a fim de se possibilitar a comparação direta dos resultados obtidos com aqueles dos demais experimentos.	113
Tabela 5 - Resumo comparativo das métricas de performance originais e em cada técnica de pós-processamento.	114

LISTA DE SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

ABI – Advanced Baseline Imager

ACR – Ambiente de Comercialização Regulado

AER – Atmospheric and Environmental Research

AERONET – Aerosol Robotic Network/Rede Automática de Dados de Aerossóis

AMA – Sistema de Acompanhamento de Medições Anemométricas

BSRN – Baseline Surface Radiation Network

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CIE – Comissão Internacional de Iluminação

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

DMS – Divisão de Meteorologia por Satélite

EOS – Earth Observation System

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ETR – Equação de Transferência Radiativa

GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

GFS – Global Forecast System

GCM – Global Circulation Model

GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite

GRG – Generalized Reduced Gradient

GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

ICG – Instalações de Transmissão de Interesse Exclusivo de Centrais de Geração para Conexão Compartilhada

IDH – Irradiância Difusa Horizontal

IDN – Irradiância Direta Normal

IEA – Internacional Energy Agency

IEE – Instituto de Energia e Ambiente

IGH – Irradiância Global Horizontal

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

IPC – International Pyrheliometer Comparison

ISO – International Organization of Standardization
ITS – Irradiância Solar Total
IGP – Irradiância Global sobre Plano Inclinado
IV – Intervalo de comprimento de onda infra-vermelho
LABSOLAR/UFSC – Laboratório de Energia Solar
LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LAI – Lei de Acesso à Informação
LBLRTM – Line-By-Line Radiative Transfer Model
LSF – Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos
McICA – Monte Carlo Independent Column Approximation
MME – Ministério de Minas e Energia
MSG – METEOSAT de Segunda Geração
NCEP – National Centers for Environmental Prediction
OMI – Ozone Monitoring Instrument
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCD – Plataforma de Coleta de Dados
RFA – Radiação Fotosinteticamente Ativa
RRTM – Rapid Radiative Transfer Model
RTTMG – Rapid Radiative Transfer Model for GCM
SAPM – Sandia Array Performance Model
SBDART – Santa Barbara DISTORT Atmospheric Radiative Transfer
SONDA – Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais
SI – Sistema Internacional de Unidades
TOA – Topo da Atmosfera
UFF – Universidade Federal Fluminense
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
UFPB – Universidade Federal da Paraíba
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
USP – Universidade de São Paulo
UTC – Coordinated Universal Time
UV – Intervalo de comprimento de onda ultra-violeta
VIS – Intervalo de comprimento de onda visível
WMO – World Meteorological Organization
WRC – World Radiation Center

WRF – Weather Research and Forecast Model

WRR – World Radiometric Reference

WSG – World Standart Group

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Resumo das principais produções nacionais associadas ao tema	18
1.2. Objetivos	22
1.3. Motivação e justificativa	23
1.4. Estrutura capitular	24
2. FUNDAMENTOS.....	25
2.1. Propagação do fluxo radiativo.....	26
2.2. Interação entre radiação e matéria.....	27
2.3. Transferência radiativa na atmosfera	33
2.4. Recurso solar disponível em solo.....	36
2.5. Medição do recurso solar disponível em solo	39
2.5.1 Pireliômetros	43
2.5.2 Piranômetros.....	46
3. PREVISÃO NUMÉRICA DA CONDIÇÃO SOLAR	52
3.1. Iniciativas brasileiras.....	52
3.2. Estado da arte internacional	70
4. METODOLOGIA	80
4.1. Avaliação da qualidade dos dados solarimétricos da estação do IEE	80
4.2. Previsão numérica da irradiação solar pelo modelo GFS.....	84
5. RESULTADOS	93
5.1. Avaliação de qualidade dos dados da estação solarimétrica do IEE	93
5.2. Pós-processamento das previsões do modelo GFS	102
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
Apêndice A – Avaliação mensal da qualidade dos dados solarimétricos	141

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da fonte primária solar para geração de energia elétrica se apresenta como alternativa estrategicamente promissora e com projeção de custos decrescentes, conforme acompanhamentos de entidades como a Agência Internacional de Energia (IEA, 2014), a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2016) e do National Renewable Energy Laboratory do governo dos Estados Unidos (NREL, 2017). Ademais, este mesmo laboratório americano mantém um registro histórico que demonstra avanços progressivos na eficiência de conversão da energia solar em células fotovoltaicas de diferentes tecnologias (NREL, 2020), o que contribui parcialmente para a redução dos custos e rentabilidade de projetos fotovoltaicos. Como solução energética, o aproveitamento do recurso solar é passível de implementação em sistemas isolados ou diretamente conectadas à transmissão ou distribuição, assim como em diferentes escalas, de forma centralizada ou distribuída. Entretanto, esta versatilidade das tecnologias de conversão da radiação solar é acompanhada de forte intermitência da fonte primária, assim como à incerteza na previsão das condições de oferta futura.

A interação com a atmosfera é a principal causa de intermitência da radiação solar à superfície terrestre, enquanto seus ciclos diurno e sazonal determinam os padrões mais reconhecíveis de sua variabilidade natural. Por ser uma onda eletromagnética, a radiação solar se propaga no espaço sem perdas e atinge as camadas atmosféricas, passando então por processos de absorção, dispersão e reflexão. Segundo INMAN *et al.* (2013), a fonte mais comum de variabilidade espaço-temporal é a cobertura das nuvens, mas também se atribui uma parcela de responsabilidade à presença de aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases e partículas atenuantes e dispersantes.

Os impactos da variabilidade da produção de energia a partir da fonte solar durante a operação em tempo real são por sua vez refletidos nas operações da rede elétrica e do mercado de energia, de modo que a comunidade científica internacional tem dedicado parte de sua atenção a este tema, principalmente na última década. CSIRO (2012) apresenta um estudo de caracterização dos efeitos da intermitência solar na rede australiana e destaca, dentre outros pontos relevantes, a importância da previsão deste recurso para que esta integração ocorra e a necessidade de dados solarimétricos em alta resolução para suporte investigativo. APPEN *et al.* (2013) apresentam uma análise dos desafios da alta penetração da fonte solar no sistema elétrico alemão e identificam 3 problemas principais decorrentes desta tendência: fluxos de potência

revertidos em sistemas de distribuição, fluxos de potências adicionais ao sistema de transmissão e cuidados adicionais para a manutenção da estabilidade da rede, principalmente no contexto da interligação com sistemas de outros países europeus. O operador independente do sistema elétrico nova-iorquino (NYISO, 2016) produziu uma avaliação inicial dos impactos nas condições de atendimento em sua rede em função da penetração crescente da geração solar e eólica. Dentre as conclusões e recomendações iniciais do estudo se destaca a compreensão de que a geração solar distribuída em grande escala deve alterar significativamente o perfil típico de carga do sistema, assim como as operações e manobras de controle a ele associadas. ALMEIDA (2017) aborda os efeitos esperados sobre o sistema elétrico com a inserção em grande escala da geração fotovoltaica, apresentando uma avaliação prática no sistema isolado da ilha de Fernando de Noronha, onde a participação já pode ser considerada elevada.

Uma outra série de estudos e autores deu preferência em avaliar os efeitos da adoção massiva da fonte solar nos mercados de energia. PARASCHIV e PIETSCH (2014) avaliaram como a oferta de energia solar e eólica impactou a formação de preços um dia à frente (*day ahead*) no mercado alemão, revelando que a incorporação destas fontes aumentou a frequência de eventos com variação abrupta de preços, mas surtir um efeito médio de redução nos preços spot. CLO *et al.* (2015) realizaram uma análise similar voltada ao mercado italiano, chegando às mesmas conclusões de redução no preço médio e amplificação da volatilidade. O estudo também foi capaz de identificar que há um desequilíbrio entre os valores investidos para o incentivo da fonte solar e as economias obtidas com a adoção da fonte, o que justificaria ajustes na política energética adotada. Análises desta natureza são possíveis em sistemas e mercados maduros, capazes de traduzir os desdobramentos de tais eventos atmosféricos em estratégias de planejamento técnico e comercial.

Um caso de sucesso no ajuste da operação em função de forte flutuação na produção total de energia de fonte solar foi o esquema operativo implementado pelo operador independente do sistema elétrico do estado da Califórnia durante o eclipse do dia 21 de agosto de 2017. Segundo o relatório (CAISO, 2017), os efeitos do eclipse começaram a ser percebidos no sistema a partir das 9h11, atingindo obscurecimento máximo às 10h24, para então rapidamente se desfazer até às 11h17. Durante o eclipse houve uma redução de aproximadamente 6.000 MW na potência injetada por usinas fotovoltaicas, além de outros 1.460 MW de geração distribuída. Grande parte dessa redução foi suprida por meio de importação de energia das demais redes interligadas, assim como da geração complementar de hidroelétricas e termoeelétricas a gás natural, tecnologias de resposta mais rápida. O fator

preponderante para o sucesso da operação foi a capacidade de planejar com mais de um ano de antecedência, antever as dificuldades técnicas de controle de tensão e frequência e formular um esquema de operação mais robusto para a contingência. A antecipação só foi possível porque eventos de eclipse são previsíveis, com efeitos que podem ser avaliados de forma precisa através das equações de movimento dos astros. Em contrapartida, a variabilidade causada pela interação da radiação solar com a atmosfera, especialmente os efeitos da nebulosidade, são menos previsíveis, matematicamente mais complexos e podem exigir uma grande rede de coleta de dados terrestres, infraestrutura orbital e previsão numérica do tempo para serem estimados com maior precisão.

Atualmente se observa um esforço conjunto e coordenado de especialistas em energia solar para desenvolver métodos e técnicas de previsão da irradiação para produção fotovoltaica, com uma produção científica extensa e variada. INMAN *et al.* (2013) dividem os principais métodos preditivos em seis grandes categorias: persistência, regressões estatísticas, inteligência artificial, sensoriamento remoto, sensoriamento local e a previsão numérica do tempo. Também é possível o uso combinado destas técnicas, formulando assim modelos híbridos, a fim de contornar as diversas limitações que cada método possui e ampliar a capacidade de previsão em resoluções espaciais e temporais distintas.

No Brasil se destacam os trabalhos desenvolvidos por um grupo de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) e também algumas contribuições muito significativas do grupo do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC). Um resumo das principais referências bibliográficas nacionais associadas ao tema é apresentado a seguir.

1.1. Resumo das principais produções nacionais associadas ao tema

MANTELLI NETO (2001) procurou desenvolver uma metodologia para a estimativa do índice de cobertura de nuvens de uma determinada região geográfica a partir de imagens de uma câmera de superfície, inter-relacionar os resultados de sua modelagem a dados obtidos de estações solarimétricas e meteorológicas e compará-los às estimativas obtidas a partir de imagens de satélite.

CECONI (2013) apresentou métodos de estimativa da radiância de céu claro e encoberto, necessárias para a estimativa do coeficiente de cobertura de nuvens a partir de

imagens de satélite, avaliando a confiabilidade dos valores obtidos através de sua comparação com a razão entre a irradiação solar incidente e a irradiação incidente no topo da atmosfera e com as normais climatológicas de nebulosidade publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Em sua dissertação de mestrado, LUIZ (2014) utilizou dados de irradiação de onda longa incidente na superfície e dados meteorológicos de duas outras estações para estimar parâmetros de nebulosidade como a quantidade e altitude das nuvens assim como a fração de cobertura do céu, e compara os resultados obtidos com medições de satélite. Já em sua tese de doutorado, LUIZ (2018) buscou desenvolver uma metodologia de caracterização da variabilidade do recurso solar sobre grandes áreas utilizando somente as informações de sensoriamento remoto por satélites estacionários, com enfoque aos efeitos associados à cobertura de nuvens.

GUARNIERI (2006) pesquisou o desenvolvimento de uma metodologia de refinamento da previsão de irradiação solar incidente fornecida pelo modelo numérico ETA do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), utilizando-se de redes neurais artificiais e regressões lineares múltiplas para a remoção do viés e redução do erro relativo médio quadrático. Os resultados foram produzidos e comparados com medições de duas estações solarimétricas do Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais (SONDA). De forma similar, LIMA (2015) apresentou a possibilidade de se empregar redes neurais artificiais no tratamento estatístico das saídas de uma aplicação regional de mesoescala do modelo numérico Weather Research and Forecast Model (WRF) para a previsão da irradiação solar no nordeste brasileiro. Dados de estações do INMET dos anos de 2005 a 2011 foram utilizados na avaliação dos resultados e ao fim do estudo se determinou uma arquitetura mista de melhor desempenho para a previsão da irradiação solar.

NOBRE (2015) avaliou a previsão do recurso solar em curtíssimo prazo para a região de Cingapura, explorando uma metodologia híbrida que combina as técnicas regressivas e de persistência com uma rede de sensoriamento em solo em busca de uma melhor adequação ao ambiente tropical da ilha estudada. Os efeitos da poluição atmosférica, muito particulares à localidade escolhida, foram estudados em grande profundidade.

TOGAWA (2014) apresentou uma adaptação do método de previsão da irradiância solar por rastreamento de nuvens a partir de imagens de céu completo e as comparou com resultados obtidos de modelos de persistência. O trabalho mostrou que as modificações nos programas de

coleta e tratamento das imagens foram satisfatórias e a metodologia aplicada apresentou desempenho superior aos obtidos por modelos de persistência em dias encobertos.

BOTTINO (2000) apresentou aprimoramentos em relação à estimativa de nebulosidade, ao efeito atenuante da presença de ozônio na atmosfera e à correção da refletância por efeitos de anisotropia da reflexão no modelo GL 1.0, implementado no CPTEC/INPE para a estimativa da irradiação solar à superfície a partir de dados do satélite geostacionário GOES-8. PORFIRIO (2012) desenvolveu um método de estimativa focado na componente direta normal da irradiância à superfície a partir de dados meteorológicos e imagens de satélite, comparando os produtos de sua pesquisa com dados de medição da rede SONDA para três estações do nordeste brasileiro. Em seguida, PORFIRIO (2017) propôs metodologias para a decomposição dos componentes da radiação solar e modelagem de aerossol no modelo GL. Os três estudos dão continuidade aos trabalhos de CEBALLOS e MOURA (1997) no desenvolvimento e implementação do modelo GL, cuja versão 1.2 permanece operacionalizada no CPTEC/INPE até os dias atuais.

À exceção de métodos preditivos puramente estatísticos, verifica-se que antever a produção de energia a partir de tecnologias de conversão solar implica invariavelmente na previsão da condição celeste. A grande maioria dos autores faz a distinção da modelagem sob as condições de céu descoberto e encoberto por nuvens, com métodos específicos para a determinação da irradiação à superfície no primeiro e segundo caso.

Em geral, a modelagem a céu sem nuvens é utilizada como referência no cálculo da irradiância nas demais condições, motivo que levou a um grande grupo de autores a focarem suas pesquisas no aprimoramento das estimativas desta variável. RUIZ-ARIAS e GUEYMARD (2018) apresentam um estudo revisional que contempla a listagem dos principais modelos de irradiação a céu-claro já publicados. Já a caracterização da cobertura de nuvens costuma ser sintetizada em um indicador único, com escala variando no intervalo $[0,1]$, no qual o valor unitário corresponderia à situação de cobertura total e o valor nulo à situação sem nenhuma nebulosidade. A pesquisa bibliográfica levantou duas formulações principais: o coeficiente de cobertura de nuvens (C), determinado pela razão entre a diferença da radiância emergente captada a uma condição qualquer e aquela a céu claro e a diferença entre a radiância emergente captada sob condições de total cobertura de nuvens e aquela a céu claro, vide CEBALLOS e MOURA (1997), CEBALLOS *et al.* (2004), BOTTINO (2000), PORFIRIO (2012), CECONI (2013), LUIZ (2018) e PORFIRIO (2017); e a fração de cobertura celeste, calculada ou

estimada a partir de metodologias diversas, conforme cada definição nos trabalhos de MANTELLI NETO (2001), LUIZ (2014), LIMA (2015) e TOGAWA (2014).

Parte do desafio da modelagem e previsão da irradiação solar corresponde em associar os coeficientes que caracterizam a condição atmosférica a outros dois índices diretamente ligados à disponibilidade do recurso solar em solo, são eles: índice de claridade ou índice de transmissividade, dado pela razão entre a irradiância solar global horizontal verificada à superfície e a irradiância extraterrestre para o mesmo período e coordenada geográfica; e índice de céu claro, a razão entre a irradiância verificada sob uma condição de cobertura qualquer e aquela esperada conforme referência a céu descoberto. Em conjunto, os quatro índices supracitados possuem aplicações importantes nas diversas metodologias de estimativa do recurso solar em condições intermediárias de cobertura celeste.

A transformação da previsão do recurso solar disponível em um dado intervalo de tempo em eletricidade se dá a partir das equações que delineiam o comportamento típico das tecnologias de conversão, utilizando-se de outras variáveis meteorológicas das quais o desempenho destes equipamentos é dependente. A eficiência da conversão também pode ser parametrizada de acordo com as especificidades técnicas de cada projeto. Para usinas solares fotovoltaicas é importante identificar a sua localização geográfica, a tecnologia utilizada, o tempo em operação do projeto, a estrutura de rastreamento ou de concentração dos raios solares adotada, a característica dos inversores empregados e os fatores de perda associados a cada um dos principais componentes.

Verifica-se uma produção científica brasileira ainda muito tímida e circunscrita às atividades desenvolvidas no INPE. Não há como assumir a exaustão da pesquisa bibliográfica nacional, mas todo projeto de dissertação e tese acadêmica encontrado foi desenvolvido neste instituto de referência ou possui vínculos estreitos a ele; ademais, a sua reduzida quantidade demonstra uma visão em amadurecimento desta temática. Os principais estudos internacionais são originários de países nos quais a participação da fonte solar na oferta de energia ocorreu de forma mais prematura e acelerada, onde já se observam os efeitos da maior penetração das fontes renováveis na operação das redes elétricas e nos mercados de energia. O Brasil se encontra em uma fase ainda inicial deste processo de aceitação em massa da oferta de energia intermitente, mas caminha nesta mesma direção, como indicado no Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2029, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

A execução do estudo depende de aprofundamentos conceituais em meteorologia, na caracterização do recurso solar e na compreensão de seus ciclos, de sua variabilidade e incerteza intrínseca, dos processos atmosféricos que regem a atenuação da irradiação solar extraterrestre incidente, da modelagem das equações de transferência radiativa e da decomposição da irradiância em suas componentes difusa e normal direta.

Também são exigidos conhecimentos no campo do sensoriamento local e remoto da irradiância solar e nas técnicas de integração destas duas bases de dados. Como é feita a medição direta da irradiância em solo, quais os equipamentos utilizados, qual a frequência de medição, onde estes dados estão disponíveis e quais as incertezas a eles associadas são perguntas que se pretenderam responder ao longo do estudo. O mesmo vale para a medição indireta da irradiância a partir de dados de satélite ou outros dispositivos remotos que permitam a sua estimativa.

Por fim, é necessário o entendimento da engenharia de conversão do recurso primário solar, quais os mecanismos que permitem a produção de eletricidade a partir desta fonte, quais os equipamentos empregados e suas características, quais os efeitos de perdas que necessitam ser parametrizados e quais fatores são capazes de alterar o desempenho dos sistemas instalados.

A conjunção dos conhecimentos específicos nestes três grandes campos permitirá uma compreensão aprofundada das estratégias possíveis de se implementar no desenvolvimento de um modelo preditivo próprio. A definição da abrangência territorial e do horizonte de previsão permitem fazer recortes mais específicos do tema, limitando o tamanho das bases de dados a serem processadas e o nível de detalhamento das análises. A proposta do estudo se limitou em compreender a complexidade do tema e apresentar um plano estratégico de desenvolvimento e uma prova de conceito deste modelo preditivo.

1.2. Objetivos

O estudo tem como objetivos gerais compreender os desafios técnicos da previsão de irradiação, avaliar as metodologias existentes internacionalmente e no Brasil, avaliar a disponibilidade de recursos por parte dos centros brasileiros e a influência deste fator na definição dos produtos e modelos hoje disseminados. Ademais, tem o objetivo específico de propor uma metodologia de análise e aprimoramento da previsão de curto prazo para a irradiação solar aplicada aos registros solarimétricos da estação do Laboratório de Sistemas

Fotovoltaicos (LSF) do Instituto de Energia e Ambiente (IEE), apresentando uma versão preliminar que demonstre a prova conceitual de seu funcionamento.

1.3. Motivação e justificativa

Há uma tendência mundial de adoção da tecnologia solar como parte das soluções de suprimento de energia e de redução dos impactos ambientais associados a este setor produtivo. Segundo levantamentos realizados pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2017), o uso de tecnologias de conversão da energia solar apresentou em 2017 as maiores taxas de crescimento dentre todas as fontes renováveis. Sistemas fotovoltaicos e conversores térmicos ocuparam a primeira e a quarta posição no ranking do órgão, com crescimentos anuais médios de 45,5% e 11,4%, respectivamente.

Na medida em que as perspectivas técnico-econômicas apresentam equipamentos de conversão progressivamente mais eficientes e menos custosos, o foco da avaliação de especialistas se dirige aos desafios associados à maior participação desta fonte na oferta de energia. O principal fator se refere à integração em massa da produção de eletricidade de fontes renováveis nas redes elétricas, garantindo a qualidade, estabilidade e confiabilidade da operação destes sistemas perante as características intrínsecas dos recursos solar e eólico. A preocupação com os desdobramentos da alta penetração da produção de fontes intermitentes já é realidade em alguns sistemas elétricos operados internacionalmente e, neste contexto, a capacidade de antecipar os possíveis impactos é reconhecida como parte integral da cadeia de valor da produção deste tipo de energia (WMO *et al.*, 2015).

Esta compreensão internacional permeia o terreno do planejamento elétrico e energético brasileiro, onde a capacidade instalada deve quadruplicar entre 2017 e 2022. Diante destas perspectivas o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) promoveu, no dia 11 de junho de 2018, o primeiro Workshop de Energia Solar Fotovoltaica, dirigido ao público interno, com o objetivo de adensar o conhecimento técnico necessário para se desenvolver um programa em código aberto de previsão da geração solar para a programação diária e intra-diária. Iniciativa análoga já vem sendo discutida e desenvolvida para a fonte eólica desde 2016. Dentre os principais pontos discutidos durante o *workshop*, destacam-se a necessidade de adensamento e padronização mínima da rede de medição do recurso solar no país, a complexidade associada à previsão da geração fotovoltaica em condições de cobertura intermediária do céu, a importância do monitoramento e projeção dos movimentos das nuvens, da integração de dados obtidos em

solo e por sensoriamento remoto e da compreensão das resoluções temporais e espaciais com as quais se deseja trabalhar na definição da melhor técnica ou do melhor conjunto de técnicas preditivas.

Além dos benefícios previstos no planejamento, operação em tempo real, gerenciamento da rede elétrica e do mercado de energia brasileiro, WMO *et al.* (2015) aponta que serviços de previsão meteorológica da radiação solar produzam impactos positivos no âmbito social, aprimorando a qualidade das informações para a comunidade científica e contribuindo para a conveniência, segurança, conforto e proveito das atividades cotidianas; no âmbito ambiental, a partir do monitoramento contínuo e de longo prazo dos indicadores base do estado ambiental, da minimização das emissões de substâncias tóxicas e demais poluentes, do gerenciamento da qualidade ambiental local, do suporte no enfrentamento das principais questões ambientais globais; e no âmbito econômico, reduzindo perdas econômicas decorrentes de variações do tempo, aumentando a produtividade, previsibilidade e planejamento de negócios sujeitos à riscos desta natureza, permitindo a prevenção de danos às propriedades e pessoas.

As perspectivas para o contínuo desenvolvimento e expansão da participação da fonte solar na matriz energética brasileira e mundial, os desafios técnico-científicos associados à previsão desta energia primária e a amplitude dos benefícios associados justificam a relevância do tema. Desenvolvimentos na direção do aperfeiçoamento da previsão da radiação solar e da modelagem de sua interação com a atmosfera surtem efeitos positivos em diversas áreas do conhecimento humano, a saber: meteorologia, biologia, agronomia, agrometeorologia, arquitetura, engenharia e energia.

1.4. Estrutura capitular

A estrutura capitular tem como objetivo apresentar nesta introdução o contexto e relevância do tema escolhido. O segundo capítulo discorre acerca da fundamentação teórica e aproximações/simplificações de cunho prático que são consideradas para se determinar a quantidade de recurso solar disponível em superfície. A terceira parte desta dissertação apresenta uma revisão das principais iniciativas brasileiras no tema, seguido por um breve resumo da experiência internacional. Com base no referencial estabelecido, apresentam-se as fontes de dados utilizadas no quarto capítulo, enquanto a metodologia empregada e resultados do estudo são objetos do quinto. O sexto e último capítulo é reservado às conclusões e sugestões de continuidade dos estudos.

2. FUNDAMENTOS

O entendimento e representação do clima e das condições meteorológicas do planeta depende de uma compreensão precisa dos balanços de radiação e fluxos energéticos nas camadas superiores da atmosfera e em superfície, de forma que em agosto de 2010 a Organização Mundial de Meteorologia (WMO) os reconheceu como variáveis essenciais através do programa Sistema Global de Observação Climática. Seguindo a definição estabelecida (GCOS, 2018), uma Variável Essencial Climática é uma grandeza física, química, biológica ou um agrupamento de variáveis inter-relacionadas que acrescenta uma contribuição crítica à caracterização do clima terrestre e cuja medição pode ser realizada em escala global de maneira economicamente viável a partir de métodos e tecnologias comprovados.

Para se determinar o balanço em cada camada atmosférica e em superfície é necessário distinguir os fluxos radiantes em ascendentes e descendente. Sistemas de medição em solo se ocupam geralmente da caracterização direta dos fluxos descendentes, enquanto sistemas orbitais costumam realizar a mensuração direta daqueles ascendentes ou extraterrestres. Algumas metodologias permitem a estimativa indireta destas variáveis a partir de formulações, premissas e simplificações da teoria de transferência radiativa, geralmente aplicáveis em vasta extensão do globo.

A principal fonte emissora de radiação que alimenta o clima do planeta é o Sol, mas durante o ciclo noturno é o próprio planeta Terra o responsável pela maior parte das emissões registradas; a atmosfera e seus componentes, em especial a cobertura de nuvens, possuem importante papel regulador. A radiação proveniente de todas estas fontes é emitida em diferentes comprimentos de onda. Corpos idealizados, também denominados corpos negros, possuem distribuição de frequências bem determinada em função de sua temperatura de equilíbrio, a qual pode atuar como uma assinatura típica que permite identificar o emissor. A distribuição espectral característica de um corpo negro emissivo, a uma temperatura de equilíbrio térmico T [K], pode ser calculada a partir da Lei de Planck:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.1)$$

onde λ [m] é o comprimento da onda eletromagnética, h [Js] a constante de Planck, c [ms⁻¹] a velocidade da luz, k [JK⁻¹] a constante de Boltzman e $B(\lambda, T)$ [Wm⁻²m⁻¹sr⁻¹] a densidade espectral da radiação emitida isotropicamente para um dado comprimento de onda.

YAMASOE (2016) especifica que a não aplicabilidade desta função é limitada matematicamente para duas situações extremas: (a) quando $h\nu/kT \gg 1$, para situações de alta energia nas quais o limite de Wien é ultrapassado; e (b) quando $h\nu/kT \ll 1$, na região espectral de micro-ondas quando o limite de Rayleigh-Jeans é ultrapassado.

A densidade do fluxo irradiante é dada pela integração da densidade espectral da radiação de corpo negro em todas as direções do hemisfério emissivo. A área infinitesimal da superfície esférica observada na direção das coordenadas (θ, φ) é dada por $dA = r d\theta \cdot r \sin\theta \cdot d\varphi$; o ângulo sólido de observação neste ponto $d\Omega = dA/r^2 = \sin\theta d\theta d\varphi$; o componente da densidade de radiação emitida normal à superfície emissora $B(\lambda, T) \cos\theta$. Desta forma, a irradiância espectral de um corpo negro, dada pela integral da Lei de Plank sobre todos os ângulos sólidos do hemisfério visível é calculada conforme equação (2.3):

$$I(\lambda, T) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} B(\lambda, T) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.2)$$

$$I(\lambda, T) = B(\lambda, T) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi = \pi B(\lambda, T) \quad (2.3)$$

A radiação e irradiância total podem ser obtidas a partir da integração das equações (2.1) e (2.3) em todo o domínio de comprimentos de onda. O resultado desta integral representa a Lei de Stefan-Boltzman, vide equação (2.5), a qual determina que a energia emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura de equilíbrio. A constante de proporcionalidade $\sigma [Wm^{-2}K^4]$ é denominada constante de Stefan-Boltzman.

$$B(T) = \int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^4 k^4}{15h^3 c^2} T^4 \quad (2.4)$$

$$I(T) = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda = \pi \frac{2\pi^4 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

2.1. Propagação do fluxo radiativo

A radiação se propaga de um ponto a outro do espaço em forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas, em qualquer meio. Na ausência de matéria, o fluxo radiativo emitido por um corpo negro irradia isotropicamente e conservativamente, isto é, em todas as direções e sem perdas energéticas. Entretanto, a energia propagada deve necessariamente se diluir sobre uma extensão maior do espaço conforme se distancia da sua fonte emissora.

Partindo-se do princípio de conservação da energia é possível determinar a relação entre o fluxo irradiante em uma posição qualquer do espaço em função daquele presente na superfície da fonte emissora.

$$Po = 4\pi r^2 I(T) = 4\pi d^2 I'(T) \quad (2.6)$$

$$I'(T) = I(T) \left(\frac{r}{d} \right)^2 = \bar{I}(T) \left(\frac{\bar{d}}{d} \right)^2 \quad (2.7)$$

onde Po é a potência irradiante original em $[W]$, r o raio atribuído ao corpo emissor, $I(T)$ a irradiância emitida na superfície do corpo emissor em $[Wm^{-2}]$, d a distância entre o corpo emissor e um ponto de interesse no espaço. $I'(T)$ é a irradiância aferida neste mesmo ponto de interesse após propagação, enquanto $\bar{I}(T)$ é valor verificado para um ponto à distância média $\bar{d}$ entre os dois corpos. A equação (2.7) permite determinar a razão entre fluxos radiativos para dois pontos quaisquer no espaço em função de suas distâncias à fonte emissora. Esta formulação é particularmente útil em vista da órbita elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol, sendo a aproximação pela distância média entre eles suficiente para a maior parte das aplicações, conforme sugestão em YAMASOE (2016).

2.2. Interação entre radiação e matéria

O modo de interação entre ondas eletromagnéticas e a matéria depende de características intrínsecas à mesma e à radiação incidente. O resultado desta interação abrange as possibilidades de ruptura das ligações nucleares; de ionização da matéria; de separação das cargas elétricas de moléculas e átomos; de excitação destas mesmas cargas elétricas, de alteração dos modos vibracionais, translacionais e rotacionais da matéria; de aquecimento; e até mesmo de não interação.

No que diz respeito à onda eletromagnética incidente, o conteúdo energético é o principal fator determinante do modo de interação com a matéria. A energia é transferida por meio de unidades discretas, denominadas quanta ou fótons. O conteúdo energético dos fótons radiantes é dado como função da razão entre o produto de sua velocidade de propagação e a constante de Planck (h) por seu comprimento de onda (λ). Uma vez que a velocidade típica de propagação de fótons em qualquer meio pode ser aproximada pela velocidade da luz (c) sem grande prejuízo numérico, têm-se no comprimento de onda o parâmetro primário para definição do nível energético irradiante. A equação (2.8) evidencia estas relações.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.8)$$

O domínio espectral da radiação é então dividido em intervalos de comprimentos de onda com propriedades comuns. Uma primeira forma de divisão possível classifica este espectro em relação às radiações ionizantes e não-ionizantes: a primeira contempla a radiação eletromagnética do tipo gamma e a maior fração do espectro associado à radiação tipo X, com fótons de comprimentos de onda inferiores a 1 nm; o segundo engloba a radiação óptica, micro-ondas e ondas de rádio. YAMASOE (2016) considera como radiação óptica a fração da radiação eletromagnética contida no intervalo de comprimentos de onda entre 1 nm e 10^6 nm. A radiação visível (VIS) e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), são sub-regiões de interesse especial para as atividades humanas, geralmente delimitadas pelos comprimentos de onda entre 400 nm e 780 nm e entre 400 nm e 700 nm, respectivamente.

A radiação ultravioleta (UV) é definida no intervalo espectral imediatamente inferior à radiação visível, entre 100nm e 400nm, e possui relação com uma série de efeitos fotobiológicos e fotoquímicos importantes para o desenvolvimento da vida e da atmosfera no planeta; a região do ultravioleta pode ser subdivida em três sub-bandas espectrais: UV-A (315-400nm), UV-B (280-315nm) e UV-C (100-280nm). A radiação infravermelha, fundamental na determinação do balanço de energia do sistema Terra-atmosfera, ocupa a fração do espectro com comprimentos de onda imediatamente superior à radiação visível, de 780nm a 10^6 nm; a região do infravermelho pode ser subdividia em duas sub-bandas: IV-próximo (780-3500nm) e IV-térmico (3500nm-1mm); ou em três sub-bandas: IV-A (780-1440nm), IV-B (1400-3000nm) e IV-C (3000nm- 10^6 nm). Por fim, pode-se redividir todo o domínio espectral nas regiões de radiação de onda curta ($\lambda < 4000$ nm) e onda longa ($\lambda > 4000$ nm), acompanhando as regiões predominantes de emissão da radiação solar e terrestre, respectivamente. A subdivisão do espectro radiativo detalhada acima, conforme proposta didática em YAMASOE (2016), é de grande valor para a melhor compreensão científica dos fenômenos presentes. A figura 1 apresenta um outra forma de se dividir o espectro radiativo, desta vez com maior foco nas atividades humanas e tecnologias diretamente relacionadas a cada banda de interesse.

Figura 1 - Espectro eletromagnético.

Fonte: ALLEMAN e KAUFMAN (2011).

Em relação à matéria, são as estruturas atômicas, moleculares e cristalinas e seus correspondentes níveis de energia que delimitam as formas com as quais a interação com a radiação incidente ocorre. Após se propagar pelo vácuo a radiação solar alcança a atmosfera terrestre, onde fica sujeita a quatro possibilidades de interação com a matéria: (a) absorção, referente à fração da energia radiante convertida em outro vetor energético, incluindo a possibilidade de ter sido reemitida em um comprimento de onda diferente; (b) reflexão ou retroespalhamento, referente à fração da energia radiante redirecionada ao hemisfério de origem; (c) difusão ou pró-espalhamento, referente à fração da energia radiante direcionada ao hemisfério de destino com orientação distinta da onda original; e (d) transmissão direta, referente à fração da energia radiante que não interagiu com o meio, mantendo suas propriedades originais intactas.

A combinação dos processos de absorção e espalhamento é denominada extinção ou atenuação radiativa. A atenuação da energia radiante aumenta linearmente em função da intensidade radiante original, do caminho óptico a ser percorrido e da concentração e/ou densidade de matéria presente, conforme descrito na equação (2.9) pela Lei de Beer-Bouguer-Lambert.

$$dL_{\lambda} = -L_{\lambda}\beta_{\lambda}(s)\rho(s)ds \rightarrow L_{\lambda}(s_2) = L_{\lambda}(s_1)\exp\left(-\int_{s_1}^{s_2}\beta_{\lambda}(s)\rho(s)ds\right) \quad (2.9)$$

$$L_{\lambda}(s_2) = L_{\lambda}(s_1)\exp(-\delta_{\lambda}) = L_{\lambda}(s_1)t_{\lambda} \quad (2.10)$$

onde $\beta_\lambda(s)$ [$m^2 kg^{-1}$] é o coeficiente espectral linear mássico de extinção, $\rho(s)$ [$kg.m^{-3}$] a densidade do meio na posição (s) do caminho óptico, ds [m] a distância infinitesimal do caminho óptico percorrido. A integração do fator multiplicativo $\beta_\lambda(s)\rho(s)ds$ entre dois pontos limítrofes de uma região da atmosfera determina δ_λ , a espessura óptica da camada em questão. Por fim o resultado da exponencial $\exp(-\delta_\lambda)$ determina o índice de transmitância espectral, τ_λ .

No caso de absorção, somente fótons com níveis energéticos compatíveis com os modos naturais de vibração, rotação e translação das moléculas e átomos são capazes de interagir diretamente com a estrutura da matéria; alguns possuem energia suficiente para somente excitar os elétrons na camada de valência enquanto outros, energeticamente intensos, são capazes de romper com a estrutura em questão, dissociando a matéria a nível nuclear, iônico ou eletrônico. Cada componente atmosférico possui composições química e estrutural próprias, apresentando padrão típico de interação com a radiação que determina a sua assinatura e seletividade espectral.

Figura 2 - Simulação do espectro de absortividade das principais espécies atmosféricas com a ferramenta HITRAN para o intervalo de comprimentos de onda no infravermelho.

Fonte: ZHANG *et al.* (2014).

A figura 2 apresenta uma compilação destas assinaturas espectrais para diferentes espécies químicas com foco em uma fração do intervalo de comprimento de ondas do infravermelho. Os padrões espectrais de interação são descritos por linhas discretas, bandas ou intervalos contínuos. Cada linha de absorção é definida por três propriedades principais: (a) posição central, (b) intensidade e (c) fator de forma. Toda linha está sujeita a um alargamento natural que decorre do princípio de incerteza e alargamentos adicionais associados a processos atmosféricos, como a movimentação aleatória própria das moléculas em função de sua temperatura e a colisão entre moléculas em função da pressão ambiente. Camadas atmosféricas

distintas podem apresentar predominância de um ou outro processo, ou mesmo a combinação de ambos. A descrição matemática de cada modalidade de alargamento é realizada a partir de três perfis típicos: Lorentz, na caracterização do alargamento por efeitos de pressão; Doppler, na caracterização do alargamento por efeitos de temperatura na ausência de colisão; e Voigt, na caracterização do alargamento sob condições de baixa pressão, nas quais os efeitos Doppler e Lorentz não podem ser tratados separadamente.

Define-se espalhamento o processo de interação entre radiação e matéria que resulta no desvio de orientação da onda eletromagnética propagada. O padrão angular de espalhamento é descrito matematicamente pela função de fase $P(\lambda, \Omega_i, \Omega_e)$, que reflete a distribuição de densidade de probabilidade de reorientação da radiação da direção incidente Ω_i para a direção Ω_e . Sendo o espalhamento um processo conservativo, a integração da radiação espalhada em todas as direções equivale à intensidade da onda incidente original. Analogamente, tem-se que a integral da função de fase sobre todas as orientações possíveis equivale à integral da função unitária em todas as orientações possíveis. Isto permite a sua normalização segundo a fórmula abaixo:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\lambda, \Omega_i, \Omega_e) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \int_0^{4\pi} P(\lambda, \Omega_i, \Omega_e) d\Omega = \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} P(\lambda, \Omega_i, \Omega_e) d\Omega = 1 \quad (2.12)$$

O fator determinante no modo com a qual o espalhamento irá ocorrer é a razão entre o tamanho da partícula espalhadora e o comprimento de onda da radiação incidente. Neste sentido, há dois modelos matemáticos para descrever o fenômeno: (a) espalhamento Rayleigh, quando o raio das partículas espalhadoras é ao menos uma ordem de grandeza inferior ao comprimento de onda da radiação incidente; e (b) espalhamento Mie, quando o tamanho das partículas espalhadoras são comparáveis ou maiores que o comprimento de onda da radiação incidente. A figura 3 permite uma visualização e distinção destes dois modos, destacando as características de simetria ou assimetria em relação ao plano ortogonal à direção incidente típica a cada um. Fatores como composição química e forma da partícula também influenciam no processo de espalhamento, mas com efeitos menos preponderantes.

Figura 3 - Espalhamento Rayleigh e Mie

Adaptado de: IQBAL (1983).

Na natureza os processos de absorção e espalhamento ocorrem simultaneamente, sendo assim, o coeficiente de extinção mássico apresentado na equação (2.9) contempla todos os efeitos presentes. Entretanto, em muitas situações é necessário quantificar cada processo de forma isolada. Para tal fim, define-se o parâmetro de albedo simples como a fração da radiação atenuada unicamente por eventos de espalhamento. Desta maneira, é possível calcular separadamente as espessuras ópticas de espalhamento e absorção, e, incluindo os conceitos apresentados previamente, determinar os índices de absortância a_λ , retroespalhamento r_λ e pró-espalhamento d_λ .

$$\omega_\lambda(s) = \frac{\beta_\lambda^e(s)}{\beta_\lambda^e(s) + \beta_\lambda^a(s)} = \frac{\beta_\lambda^e(s)}{\beta_\lambda(s)} \quad (2.13)$$

$$\tau_\lambda^a = \int_{s_1}^{s_2} (1 - \omega_\lambda(s)) \beta_\lambda(s) \rho(s) ds \rightarrow a_\lambda = (1 - \exp(-\tau_\lambda^a)) \quad (2.14)$$

$$\tau_\lambda^e = \int_{s_1}^{s_2} \omega_\lambda(s) \beta_\lambda(s) \rho(s) ds \rightarrow s_\lambda = (1 - \exp(-\tau_\lambda^e)) \quad (2.15)$$

$$r_\lambda = s_\lambda \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\pi P(\lambda, \Omega_i, \Omega_e) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.16)$$

$$d_\lambda = s_\lambda \frac{1}{4\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \int_0^\pi P(\lambda, \Omega_i, \Omega_e) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.17)$$

A fração da energia radiante que não sofreu o efeito de nenhum destes processos e que simboliza a parcela da intensidade radiante original disponível ao fim do caminho óptico de propagação é denominada transmitância direta t_λ , conceito já apresentado na equação (2.10).

Pela lei de conservação da energia, tem-se que a soma dos índices de transmitância direta, absorptância, retroespalhamento e pró-espalhamento deve sempre resultar no valor unitário. Isto permite uma interpretação probabilística para os processos de interação entre a radiação eletromagnética e a matéria, a qual pode ser utilizada como base metodológica para a resolução de problemas de transferência radiativa na atmosfera.

$$t_\lambda + a_\lambda + r_\lambda + d_\lambda = 1 \quad (2.18)$$

2.3. Transferência radiativa na atmosfera

Os cálculos de transferência radiativa procuram descrever como a radiância espectral se propaga e atenua ao atravessar a atmosfera em razão dos processos previamente descritos, com o objetivo de compreender e quantificar esta interação, e definindo as possíveis consequências nas demais variáveis meteorológicas. Como a interação depende de propriedades da própria onda eletromagnética e do meio pelo qual ela se propaga, e em vista da grande diversidade na composição atmosférica global, os métodos de transferência radiativa costumam adotar premissas ou procedimentos simplificadores em seus algoritmos, ainda que existam métodos de solução exata sob condições específicas. Em geral, busca-se equilibrar os níveis de sofisticação matemática, acurácia, tempo de processamento, adaptabilidade e praticidade durante a solução do problema. A formulação geral é dada pela Equação de Transferência Radiativa (ETR), conforme equações (2.19) e (2.20)

$$dL_\lambda(\Omega_i, s) = -dL_\lambda^1(\Omega_i, s) - dL_\lambda^2(\Omega_i, s) + dL_\lambda^3(\Omega_i, s) + dL_\lambda^4(\Omega_i, s) \quad (2.19)$$

$$dL_\lambda(\Omega_i, s) = -L_\lambda(\Omega_i, s)\beta_\lambda^a(s)\rho(s)ds - L_\lambda(\Omega_i, s)\beta_\lambda^e(s)\rho(s)ds + B(\lambda, T(s))\beta_\lambda^a(s)\rho(s)ds \\ + \beta_\lambda^e(s)\rho(s)ds \frac{1}{4\pi} \int^{4\pi} L_\lambda(\Omega_e, s)P(\lambda, s, \Omega_e, \Omega_i) d\Omega_e \quad (2.20)$$

Cada termo da ETR possui uma interpretação específica em relação aos processos de interação eletromagnética com a matéria: dL_λ^1 representa a remoção por absorção, $dL_\lambda^2(\Omega_i, s)$ a remoção por espalhamento, $dL_\lambda^3(\Omega_i, s)$ a adição por emissão do próprio material supondo comportamento como corpo negro e temperatura de equilíbrio $T(s)$, e $dL_\lambda^4(\Omega_i, s)$ a adição por espalhamento proveniente do entorno material nas demais orientações. Definindo a função fonte por espalhamento (2.21) e retomando o conceito de albedo simples (2.13), pode-se escrever a ETR em sua forma diferencial (2.22)

$$J_{\lambda}(\Omega_i, s) = \frac{1}{4\pi} \int^{4\pi} L_{\lambda}(\Omega_e, s) P(\lambda, s, \Omega_e, \Omega_i) d\Omega_e \quad (2.21)$$

$$\frac{dL_{\lambda}(\Omega_i, s)}{\beta_{\lambda}(s)\rho(s)ds} = -L_{\lambda}(\Omega_i, s) + (1 - \omega_{\lambda}(s)) B(\lambda, T(s)) + \omega_{\lambda}(s)J_{\lambda}(\Omega_i, s) \quad (2.22)$$

Uma das principais premissas simplificadoras adotadas na maioria das técnicas de resolução da ETR é a aproximação atmosfera plano-paralela. YAMASOE (2006) destaca que esta aproximação permite considerar a atmosfera como um conjunto de camadas verticalmente sobrepostas e com propriedades horizontalmente homogêneas, hipótese aceitável para a maior parte das aplicações meteorológicas uma vez que as variações verticais de temperatura, pressão, composição atmosférica e profundidade óptica são via de regra mais significativas que suas respectivas variações horizontais.

Figura 4 - Perfis verticais de pressão, temperatura e composição atmosférica média para diversos gases constituintes.

Fonte: GOODY e YUNG (1989) e JACOB (1999).

A divisão da atmosfera em camadas permite a adoção de perfis típicos para variáveis como temperatura, pressão, composição química, concentração de espécies gasosas, concentração de vapor d'água, presença e tipologia de nuvens, entre outros; de forma a definir os processos atenuantes possíveis. A figura 4 apresenta estes perfis típicos para as variáveis meteorológicas de pressão, temperatura e composição atmosférica para alguns dos principais gases constituintes. Cada conjunto de premissas formulados constitui uma tipologia de atmosfera-padrão. Cada metodologia e modelagem adota uma ou mais atmosferas-padrão para a descrição do contexto no qual a resolução do problema de transferência radiativa se dará, com acurácia distintas em razão destas configurações. A distinção de perfis em função da latitude ou da estação do ano também é uma prática comum à maioria dos modelos.

Outra técnica empregada diz respeito ao tratamento dado na discretização do domínio espectral sob o qual a solução da ETR será obtida. Metodologias mais apuradas, como a do

Modelo de Transferência Radiativa Linha-a-Linha (LBLRTM), descrito em SMITH *et al.* (1978), trabalham com intervalos espectrais que correspondem a frações da espessura das linhas de absorção a serem consideradas no cálculo. Proposições mais ágeis procuram reduzir a quantidade de intervalos de comprimento de onda a serem avaliados empregando técnicas específicas para a escolha destas subdivisões, as quais não são necessariamente uniformes. Cita-se o Modelo de Transferência Radiativa Rápida (RRTM), especificado em MLAWER *et al.* (1997) com uma referência neste caso. Metodologias simplificadas, por exemplo, o modelo de radiação global (GL) publicado por CEBALLOS *et al.* (2004), reduzem o espectro total a apenas dois intervalos: visível e infravermelho próximo.

Um último procedimento que vale menção se refere à separação do problema equacionado pela ETR para fluxos radiativos ascendentes e descendentes. Assumindo uma atmosfera plano-paralela, é possível descrever as orientações de propagação em termos das coordenadas locais de ângulo zenital e azimutal, substituir posições s e variações elementares ds do caminho óptico por suas contrapartes em altitude z e $dz = \mu ds$, onde μ é o cosseno do ângulo zenital. A atenuação esperada ao longo da camada atmosférica passa a ser definida em função da profundidade óptica $\tau_\lambda(z)$, conforme equação (2.24). Aplicando estes conceitos e definições, a ETR passa a ser formulada segundo a equação (2.25).

$$\frac{\mu dL_\lambda(\mu, \phi, z)}{\beta_\lambda(z)\rho(z)dz} = -L_\lambda(\mu, \phi, z) + (1 - \omega_\lambda(z))B(\lambda, T(z)) + \omega_\lambda(z)J_\lambda(\mu, \phi, z) \quad (2.23)$$

$$\delta_\lambda(s) = \int_{s_1}^{\infty} \beta_\lambda(s)\rho(s)ds \rightarrow \tau_\lambda(z) = \int_{z_1}^{\infty} \beta_\lambda(z)\rho(z)dz \rightarrow d\tau_\lambda = -\beta_\lambda(z)\rho(z)dz \quad (2.24)$$

$$-\frac{\mu dL_\lambda(\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} = -L_\lambda(\mu, \phi, \tau_\lambda) + (1 - \omega_\lambda(z))B(\lambda, T(\tau_\lambda)) + \omega_\lambda(\tau)J_\lambda(\mu, \phi, \tau_\lambda) \quad (2.25)$$

A separação da ETR nas situações específicas de propagação de radiância em função de sua orientação vertical fica, portanto, facilitada. O componente ascendente é obtido para valores de $\mu > 0$ ou, por simplicidade de notação, $+\mu$. Analogamente, o componente descendente é definido para valores de $\mu < 0$ ou $-\mu$. A dupla de equações pode ser avaliada no contexto de propagação da radiação solar ($-\mu$) e terrestre ($+\mu$), sendo possível negligenciar termos distintos da ETR geral para cada caso. YAMASOE (2006) propõe, por exemplo, que para o intervalo de ondas curtas a contribuição do termo referente à emissividade do material presente na atmosfera e na superfície terrestre é desprezível em comparação à contribuição extraterrestre proveniente do Sol. Em contraposição, no intervalo de emissão do espectro terrestre o processo de atenuação

atmosférica pode ser reduzido essencialmente à absorção, negligenciando-se os efeitos de espalhamento. Nestas condições é possível determinar soluções analíticas e numéricas para cada componente da ETR ao longo de cada camada atmosférica, em função de sua profundidade óptica espectral τ_λ .

$$\pm\mu \frac{dL_\lambda(\pm\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} = L_\lambda(\pm\mu, \phi, \tau_\lambda) - (1 - \omega_\lambda(\tau_\lambda))B(\lambda, T(\tau_\lambda)) - \omega_\lambda(\tau)J_\lambda(\pm\mu, \phi, \tau_\lambda) \quad (2.26)$$

2.4. Recurso solar disponível em solo

Uma das grandezas de maior interesse nos campos de meteorologia e engenharia é a Irradiância Horizontal Global (IGH), que corresponde ao fluxo irradiante solar total incidente sobre uma superfície horizontal proveniente de todas as direções do hemisfério celeste, especificado em Wm^{-2} . Retomando os fundamentos de transferência radiativa apresentados, seja $L_\lambda(-\mu, \phi, \tau_g)$ a radiância espectral descendente em superfície, $\mu = \cos\theta$, $d\mu = \sin\theta d\theta$, tem-se:

$$IGH = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_\lambda(-\cos\theta, \phi, \tau_g) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi d\lambda \quad (2.27)$$

$$IGH = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^1 L_\lambda(-\mu, \phi, \tau_g) \mu d\mu d\phi d\lambda \quad (2.28)$$

Outra grandeza de grande aplicação é a Irradiância Direta Normal (IDN), que corresponde à parcela do fluxo irradiante solar, em Wm^{-2} , que não sofreu o efeito de nenhum processo atenuante, mantendo sua orientação original $\Omega_0 = (\mu_0, \phi_0)$ em relação a um observador em solo, dada pelo cosseno do ângulo zenital solar μ_0 e pelo ângulo azimutal solar ϕ_0 . Partindo-se do componente descendente da ETR limitada ao intervalo de onda curta e negligenciando o termo referente a emissão de radiação pelo material atmosférico, pode-se escrever:

$$-\mu \frac{dL_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} = L_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) - \omega_\lambda(\tau_\lambda)J_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) \quad (2.28)$$

Separando a radiância nos componentes direto $S_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)$ e difuso $D_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)$, desenvolvendo os termos nas equações (2.29), (2.30) e (2.31) e os reinserindo na equação (2.28) para formar (2.32):

$$L_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) = S_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) + D_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) \quad (2.29)$$

$$J_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) = \frac{1}{4\pi} \int^{4\pi} S_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) P(\lambda, \tau_\lambda, \Omega_e, \Omega_i) d\Omega_e \\ + \frac{1}{4\pi} \int^{4\pi} D_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) P(\lambda, \tau_\lambda, \Omega_e, \Omega_i) d\Omega_e \quad (2.30)$$

$$\frac{dL_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} = \frac{dS_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} + \frac{dD_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} \quad (2.31)$$

$$-\mu \left[\frac{dS_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} + \frac{dD_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} \right] = \\ S_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) \\ + D_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)^{(a)} \\ + \frac{\omega_\lambda(\tau_\lambda)}{4\pi} \int^{4\pi} S_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) P(\lambda, \tau_\lambda, \Omega_e, \Omega_0) d\Omega_e \quad (b) \\ + \frac{\omega_\lambda(\tau_\lambda)}{4\pi} \int^{4\pi} D_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) P(\lambda, \tau_\lambda, \Omega_e, \Omega_i) d\Omega_e \quad (c) \quad (2.32)$$

Compreendendo que o termo (a) diz respeito à intensidade original do componente difuso, que (b) modela a produção de radiância difusa por espalhamento simples do componente direto e que (c) representa a produção de radiância difusa por espalhamento múltiplo, entende-se que nenhum dos três poderia estar associado ao processo de transmissão direta. Negligenciando a contribuição do espalhamento múltiplo para a orientação Ω_0 , pode-se inferir:

$$-\mu \frac{dS_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} = S_\lambda(-\mu, \phi, \tau_\lambda) = S_\lambda(\tau_\lambda) d(\Omega - \Omega_0) \quad (2.33)$$

A formulação $d(\Omega - \Omega_0)$ corresponde a função delta de Dirac, a qual é definida com as propriedades elencadas nas equações (2.34), (2.35) e (2.36). A inclusão da função delta de Dirac evidencia que não há componente direto em orientações diferentes à posição solar no campo celeste.

$$d(x - x_0) = 0 \quad \forall x \neq x_0 \quad (2.34)$$

$$d(x - x_0) = 1 \quad \leftrightarrow \quad x = x_0 \quad (2.35)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) d(x - x_0) dx = f(x_0) \quad (2.36)$$

Para $\Omega(\mu, \phi) = \Omega_0(\mu_0, \phi_0)$:

$$-\frac{\mu_0 dS_\lambda(\tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} = S_\lambda(\tau_\lambda) \rightarrow S_\lambda(\tau_\lambda) = S_\lambda(0) \exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\mu_0}\right) \quad (2.37)$$

Por definição, a IDN é o resultado da integração da radiância direta normal $S_\lambda(\tau_\lambda)$ para um ângulo sólido que cobre estritamente o disco solar. Seja ∂_s o meio-ângulo de abertura do disco solar, assumindo que o seu valor não se altere significativamente para um observador localizado em solo ou no topo da atmosfera. Dadas estas premissas:

$$\begin{aligned} IDN_\lambda &= \int_{\phi_0 - \partial_s}^{\phi_0 + \partial_s} \int_{\theta_0 - \partial_s}^{\theta_0 + \partial_s} S_\lambda(\tau_\lambda) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \\ &= \int_{\phi_0 - \partial_s}^{\phi_0 + \partial_s} \int_{\theta_0 - \partial_s}^{\theta_0 + \partial_s} S_\lambda(0) \exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\mu_0}\right) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = IDN_\lambda^{TOA} \exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\mu_0}\right) \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$IDN = \int_0^\infty IDN_\lambda^{TOA} \exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\mu_0}\right) d\lambda \quad (2.39)$$

A equação (2.39) define a irradiância direta normal em superfície sem descartar a dependência profundidade óptica atmosférica com o intervalo espectral de integração. Resta a condição de contorno, IDN_λ^{TOA} , que corresponde ao recurso disponível no topo da atmosfera terrestre. Este valor equivale ao fluxo irradiante espectral solar, dado pela equação (2.3), considerado os efeitos de diluição da potência disponível após sua propagação pelo espaço, vide equação (2.6), e assumindo que a distribuição espectral das emissões solares podem ser aproximadas pelo padrão esperado para um corpo negro, conforme a Lei de Planck (2.1). Seja T_s a temperatura de equilíbrio do Sol, r_s o raio solar e d_{TS} a distância Terra-Sol:

$$IDN_\lambda^{TOA} = \pi B(\lambda, T_s) \left(\frac{r_s}{d_{TS}}\right)^2 \quad (2.40)$$

Também é possível obter boas estimativas para a IDN sem que seja necessário aplicar todo o rigor com domínio espectral que as formulações anteriores demonstraram. BIRD e HULSTROM (1981) apresentam um levantamento bibliográfico que reúne funções paramétricas para a transmitância direta das espécies gasosas mais relevantes na atmosfera propostas por diversos autores, a partir das quais é possível derivar uma profundidade óptica total equivalente. Desta forma, a integração das profundidades ópticas em função do comprimento de onda não é mais necessária. A resolução analítica da integral remanescente resulta na Irradiância Solar Total (ITS), comumente denominada constante solar extraterrestre.

Finalmente, pode-se descrever o cálculo da IDN de forma simplificada com a equação (2.42), a qual faz forte alusão à formulação clássica proposta em BIRD e HULSTROM (1981).

$$IDN = \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \int_0^\infty IDN_\lambda^{TOA} d\lambda = ITS \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \quad (2.41)$$

$$IDN = ITS \exp(-AM\tau) = ITS \exp\left(-AM \sum \tau_{eq}\right) \quad (2.42)$$

2.5. Medição do recurso solar disponível em solo

A radiometria é o ramo científico que se ocupa da mensuração da energia radiante. No campo da meteorologia as técnicas de radiometria são empregadas na determinação dos balanços de radiação nas camadas superiores da atmosfera e em superfície. Para tal fim é de grande valor prático distinguir os fluxos radiantes em ascendentes e descendentes. Há também o interesse de se discriminar qualitativamente cada uma destas categorias de acordo com sua predominância espectral. Por exemplo, os intervalos de onda curta e longa são particularmente importantes na distinção de emissões provenientes da fonte solar e terrestre.

O monitoramento dos fluxos ascendentes e descendentes, de onda curta e longa, tanto em superfície quanto nas camadas superiores da atmosfera, permite verificar a disponibilidade dos recursos energéticos que definem parte essencial das condições de contorno dos eventos meteorológicos no planeta. A mensuração de cada uma destas variáveis só pode ser realizada de forma confiável a partir do emprego de equipamentos e métodos distintos. O estabelecimento dos padrões internacionais em estudos e equipamentos radiométricos pode ser atribuído globalmente à Organização Internacional de Padronização (ISO), com foco em publicações de normas e especificações técnicas para o avaliação de qualidade dos dados e equipamentos; e à WMO, atuante na publicação do Guia de Instrumentação Meteorológica e Métodos de Observação (CIMO, 2014) e na criação de comissões e centros dedicados à uniformização e universalização das medições.

Dentre as diversas entidades associadas ao WMO, destaca-se o Centro Mundial de Radiação (WRC), criado com o objetivo de assegurar a homogeneidade e a calibração das medições radiométricas ao redor do mundo, localizado na cidade de Davos, na Suíça. Neste centro que se encontra instalado o Grupo de Padronização Mundial (WSG), o conjunto de instrumentos que constituem o padrão de classe primária para a determinação da unidade de referência da irradiância como grandeza física no Sistema Internacional de Unidades (SI). A

escala derivada da média das medições simultâneas dos diversos instrumentos do WSG define a Referência Radiométrica Mundial (WRR).

De acordo com as orientações em CIMO (2014), para garantir a estabilidade de longo termo desta referência metrológica, exige-se que na determinação da WRR sejam utilizados ao menos quatro radiômetros de cavidade absoluta com características construtivas e design distintos. Ademais, determina que individualmente cada instrumento deve apresentar uma estabilidade abaixo de 0,2% do valor medido em escalas temporais de décadas e incertezas dentro dos limites da WRR com um intervalo de confiança de 95%. A estabilidade de longo termo e a compatibilidade da WRR com o SI são confirmadas a partir da comparação quinquenal das medições do WSG com outros radiômetros absolutos durante o painel Internacional de Comparação de Pireliômetros – IPC.

Figura 5 - Estabilidade de longo termo da WRR desde 1980.

Fonte: WMO (2015).

A figura 5 apresenta os resultados obtidos nos painéis IPC dos últimos 35 anos. Cada curva acompanha o desempenho individual de um dos instrumentos pertencentes ao WSG, normalizado com base em coeficientes obtidos durante o procedimento de calibração de cada membro em cada um dos painéis. A evolução destas curvas permite destacar desvios de medição de um instrumento individual em comparação à média de todo o grupo, assim como as flutuações desta média ao longo dos anos. A curva rosa em destaque acompanha a evolução da WRR, calculada com base nos índices de desempenho dos instrumentos tipificados como radiômetros de cavidade absoluta. O desvio padrão normalizado deste subconjunto de medições

em cada IPC também é destacado em rosa, nas semi-retas verticais. A intercomparação dos resultados obtidos nos dois últimos painéis demonstra que a WRR manteve-se estável, com variação inferior a um desvio padrão normalizado. A grande maioria dos instrumentos também apresentou variações insignificantes em seus índices de desempenho normalizados, garantindo assim a rastreabilidade de suas medições em relação à referência e permitindo a sua utilização como instrumentação primária.

A calibração de instrumentos de classe secundária ou inferior deve ser realizada a partir das medições do WSG ou de algum outro instrumento primário diretamente comparável ou rastreável a WRR. Para medições em solo as variáveis de maior interesse são a IDN e a IGH. Em ambos os casos os instrumentos utilizados são compostos de elementos com propriedades termoelétricas, termomecânicas ou fotoelétricas que são sensíveis a alterações da irradiância incidente. Existe uma relação geométrica entre as duas variáveis, de forma que a projeção da IDN sobre um plano horizontal é umas das parcelas que compõe a IGH. A fração restante é chamada Irradiância Difusa Horizontal (IDH).

$$IGH = IDN \cos \alpha + IDH \quad (2.43)$$

onde α é o ângulo zenital de incidência do componente direto solar. A projeção da IDN costuma corresponder à maior fração da irradiância disponível em uma superfície horizontal em dias sem nebulosidade, entretanto, a ocorrência de efeitos absorptivos, refletivos e dispersivos podem variar muito a depender das condições atmosféricas. Em dias de cobertura atmosférica total é possível verificar que praticamente toda a irradiância disponível em solo provém do componente difuso. A figura 6 permite uma noção visual da definição e contribuição de cada componente para o recurso total disponível em solo para uma superfície horizontal.

Figura 6 - Componentes direto, difuso e global da irradiação solar sobre uma superfície horizontal

Fonte: IQBAL (1983) e VIGNOLA *et al.* (2012).

Em geral, emprega-se pireliômetros na aferição da IDN e piranômetros para a IGH. Também é possível realizar a medição da IDH através de um arranjo especial, no qual o componente direto é obstruído do campo de visão do piranômetro via sombreamento. Existe uma gama de outros sensores radiométricos, com aplicações similares e distintas, mas cuja descrição completa foge aos objetivos traçados neste estudo. A figura 7 apresenta uma listagem dos principais instrumentos, sua função, uso típico e ângulo sólido de medição.

Figura 7 - Instrumentação para medições em radiometria meteorológica.

<i>Instrument classification</i>	<i>Parameter to be measured</i>	<i>Main use</i>	<i>Viewing angle (sr) (see Figure 7.1)</i>
Absolute pyrheliometer	Direct solar radiation	Primary standard	5×10^{-3} (approx. 2.5° half angle)
Pyrheliometer	Direct solar radiation	(a) Secondary standard for calibrations (b) Network	5×10^{-3} to 2.5×10^{-2}
Spectral pyrheliometer	Direct solar radiation in broad spectral bands (e.g. with OG 530, RG 630, etc. filters)	Network	5×10^{-3} to 2.5×10^{-2}
Sunphotometer	Direct solar radiation in narrow spectral bands (e.g. at 500 ± 2.5 nm, 368 ± 2.5 nm)	(a) Standard (b) Network	1×10^{-3} to 1×10^{-2} (approx. 2.3° full angle)
Pyranometer	(a) Global (solar) radiation (b) Diffuse sky (solar) radiation (c) Reflected solar radiation	(a) Working standard (b) Network	2π
Spectral pyranometer	Global (solar) radiation in broadband spectral ranges (e.g. with OG 530, RG 630, etc. filters)	Network	2π
Net pyranometer	Net global (solar) radiation	(a) Working standard (b) Network	4π
Pyrgeometer	(a) Upward long-wave radiation (downward-looking) (b) Downward long-wave radiation (upward-looking)	Network	2π
Pyrradiometer	Total radiation	Working standard	2π
Net pyrradiometer	Net total radiation	Network	4π

Notes:

- a Near state of the art; suitable for use as a working standard; maintainable only at stations with special facilities and staff.
- b Acceptable for network operations.
- c Suitable for low-cost networks where moderate to low performance is acceptable.

Fonte: CIMO (2014).

2.5.1 Pireliômetros

Pireliômetros são dispositivos utilizados na medição da irradiância solar direta. Para tanto, dispõem de um pequeno orifício e de um tubo alongado através do qual se propagam somente os raios solares incidentes com a devida orientação. Em instrumentos modernos o ângulo de abertura varia entre 5-10°, de forma que o ângulo sólido de observação do equipamento engloba uma região circumsolar mais ampla e não somente o disco solar. Esta diferença no ângulo de abertura, quando desconsiderada, pode ser um fator de desvios relevantes entre resultados produzidos por modelos de estimativa da IDN estritamente teóricos e resultados obtidos em campo. São elementos construtivos básicos de qualquer pireliômetro: janela óptica de captura do feixe solar, escudo de proteção da janela óptica, tubo de colimação, anéis de controle da abertura, detector termo sensível, elemento dessecante, guia para alinhamento, circuito eletrônico, fixadores, conectores e cabeamento elétrico; vide figura 8.

Figura 8 - Elementos construtivos básicos de um pireliômetro.

Fonte: KIPP & ZONNEN (2017).

Pireliômetros absolutos são instrumentos de especial importância para a radiometria por serem autocalibrados, o que significa que são capazes de determinar a escala de correspondência entre a irradiância absorvida pelo detector e a potência elétrica necessária para obter um efeito equivalente sem o uso de qualquer referência externa. O processo de levantamento de todas as fontes de incerteza durante a construção desta escala é denominado caracterização instrumental; dispositivos devidamente caracterizados podem ser utilizados como padrão de classe primária. Equipamentos desta qualidade que compõem o WSG e definem a WRR, referência para todos os demais dispositivos.

Dado que a operação e manutenção de instrumentos absolutos deve ser limitada a laboratórios especializados, para aplicações em campo é suficiente o emprego de pireliômetros de padrão secundário a termopilha. Nestes casos, a calibração do instrumento deve ser realizada em comparação a alguma referência primária, de modo a manter a rastreabilidade dos valores

obtidos à WRR. Os procedimentos específicos de calibração são definidos pela norma ISO 1990b, a qual determina que as condições climáticas de céu estável e limpo e com valores de irradiância direta superiores a 700 Wm^{-2} devem estar presentes durante todo o processo. A sensibilidade do sensor é o parâmetro que relaciona diretamente a tensão verificada nos terminais do detector e a irradiância direta absorvida. As equações de transferência e de calibração do equipamento apresentam formulação simples, conforme (2.44).

$$M = R \text{ IDN} \rightarrow R = \frac{M}{\text{IDN}} = \frac{V - \text{offset}}{\text{IDN}} \quad (2.44)$$

onde $R [\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}]$ é a sensibilidade do instrumento, $V [\mu\text{V}]$ a tensão de saída, $\text{offset} [\mu\text{V}]$ a tensão de deriva do instrumento, $\text{IDN} [\text{Wm}^{-2}]$ a componente direta normal da irradiância obtida da medição com o pireliômetro de referência.

O Guia para a Expressão de Incertezas em Metrologia (JCGM, 2010) define que todo o conhecimento de uma dada variável é inferido a partir da observação repetitiva de valores indicativos ou pelo julgamento científico de suas dependências. Os fatores de erro que se encaixam no primeiro caso são atribuídos à classe de erros tipo A, enquanto os do segundo caso são classificados com a tipologia B. As recomendações no guia permitem que somente as incertezas associadas às variáveis de entrada do instrumento sejam expressadas, entretanto, parte dos desvios declarados nos catálogos técnicos fazem referência explícita ao sinal de saída já convertido. A fim de integrar todas as incertezas associadas à medida em um único índice, uma adaptação das diretrizes do guia foi desenvolvida em KONNINGS e HABLE (2015). Sob a hipótese de que a irradiância solar possui uma variabilidade intrínseca muito alta, de forma que a realização de 60 tomadas de valores por minuto não caracterizaria a repetitividade da medição sob uma mesma condição, KONNINGS e HABLE (2015) argumentam que a contabilidade de erros de tipo A não deve ser considerada em piranômetros e pireliômetros, a fim de isolar o efeito da variância instrumental.

Na ausência de desvios de tipo A, a incerteza das medições será composta somente pelas parcelas associadas ao julgamento científico da variação da sensibilidade do instrumento com a variação das condições da medição. Estas dependências podem ser avaliadas a partir da determinação das derivadas parciais destes parâmetros, as quais são definidas a seguir para um pireliômetro de termopilha:

- 1) A variância associada à tensão medida nos terminais da termopilha:

$$\sigma_V = \frac{\partial R}{\partial V} = \frac{1}{IDN} \quad (2.45)$$

- 2) A variância associada à medição da componente normal direta do pireliômetro de referência:

$$\sigma_{DNI} = \frac{\partial R}{\partial IDN} = -\frac{(V - offset)}{IDN^2} \quad (2.46)$$

A incerteza total associada à medição instrumental é dada a partir da soma das quadraturas de todas as fontes de desvio, multiplicada por um fator de abrangência que procura traduzir o nível de representatividade que as estatísticas obtidas da medição possuem em relação ao espaço amostral possível para o mesurando. A escolha do fator de cobertura apropriado é um procedimento complicado, mas seu detalhamento pode ser encontrado no anexo G do guia (JCGM, 2010). Por simplificação, assume-se que a densidade de probabilidade da distribuição do mesurando pode ser aproximado por uma função normal, conforme orientações em VIGNOLA *et al.* (2012), de forma que um intervalo de confiança de 95% seria obtido da consideração de dois desvios padrões em relação média ($k=2$).

$$U = k\sigma_{TOT} = k\sqrt{u_a^2 + u_b^2} = k\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \partial i^2} \quad (2.47)$$

$$U = k\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V}\right)^2 (\Delta V)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial IDN}\right)^2 (\Delta IDN)^2} \quad (2.48)$$

Além do erro associado à calibração do equipamento, as incertezas na medição de pireliômetros também consideram desvios no rastreamento da posição solar, desvios derivados do emprego de diferentes ângulos de abertura, da seletividade espectral do instrumento, de sua não-linearidade, da dependência de sua resposta em função do ângulo de incidência, da dependência de sua sensibilidade em função da temperatura ambiente, da variação de seu offset térmico em função de variações na temperatura ambiente, da estabilidade de longo prazo do equipamento, bem como por inadequações em sua instalação, exposição e manutenção

A figura 9 apresenta as diferentes fontes de desvio de medição, assim como as classes de qualidade de pireliômetros segundo CIMO (2014). A integração dos valores máximos

admissíveis das diversas fontes de erro dentro de um intervalo de confiança de 95% mostra que pireliômetros de alta performance apresentam incertezas de até 0,9% nos valores obtidos para intervalos de 1 minuto de medições, de até 0,7% na totalização horária destes valores e de até 0,5% na totalização diária da irradiância medida. As incertezas encontradas com a utilização equipamentos de qualidade inferior são, via de regra, duas vezes superiores.

Figura 9 - Caracterização e classificação de pireliômetros.

<i>Characteristic</i>	<i>High quality^a</i>	<i>Good quality^b</i>
Response time (95% response)	< 15 s	< 30 s
Zero offset (response to 5 K h ⁻¹ change in ambient temperature)	2 W m ⁻²	4 W m ⁻²
Resolution (smallest detectable change in W m ⁻²)	0.51	1
Stability (percentage of full scale, change/year)	0.1	0.5
Temperature response (percentage maximum error due to change of ambient temperature within an interval of 50 K)	1	2
Non-linearity (percentage deviation from the responsivity at 500 W m ⁻² due to the change of irradiance within 100 W m ⁻² to 1 100 W m ⁻²)	0.2	0.5
Spectral sensitivity (percentage deviation of the product of spectral absorptance and spectral transmittance from the corresponding mean within the range 300 to 3 000 nm)	0.5	1.0
Tilt response (percentage deviation from the responsivity at 0° tilt (horizontal) due to change in tilt from 0° to 90° at 1 000 W m ⁻²)	0.2	0.5
Achievable uncertainty, 95% confidence level (see above)		
1 min totals		
%	0.9	1.8
kJ m ⁻²	0.56	1
1 h totals		
%	0.7	1.5
kJ m ⁻²	21	54
Daily totals		
%	0.5	1.0
kJ m ⁻²	200	400

Notes:

a Near state of the art; suitable for use as a working standard; maintainable only at stations with special facilities and staff.

b Acceptable for network operations.

Fonte: CIMO (2014).

2.5.2 Piranômetros

Segundo definição da WMO, piranômetros são instrumentos de medição da radiação projetados para capturar a irradiância incidente sobre um plano horizontal de um ângulo sólido de 2π esferorradianos proveniente da fonte solar. Independentemente da tecnologia empregada para a conversão da irradiância em um sinal mensurável, todo piranômetro é composto pelos

seguintes elementos básicos: abóboda de acondicionamento ótico do sinal de entrada, transdutor principal, sensor térmico auxiliar, corpo, circuito eletrônico, elemento dessecante, fixadores, conectores e cabos elétricos; vide figura 10.

Figura 10 - Elementos construtivos básicos de piranômetros a termopilha (esquerda) e fotoelétricos (direita).

Fonte: MARTÍNEZ *et al.* (2009) e KIPP & ZONNEN (2017).

A fim de manter a rastreabilidade com a WRR, a calibração de piranômetros deve ser realizada com arranjos especiais que permitam a comparação das medições em uma base comum ao padrão internacional. Segundo CIMO (2014), os principais métodos de calibração são:

- (a) por comparação, em ambiente externo, utilizando um pireliômetro primário para a determinação e rastreabilidade da componente direta e um piranômetro sombreado previamente calibrado para a determinação da componente difusa;
- (b) por comparação, em ambiente externo, utilizando um pireliômetro primário para determinação e rastreabilidade da componente direta e uma banda de sombreamento removível ou alternante sobre o instrumento em calibração;
- (c) diretamente, em ambiente externo, utilizando um pireliômetro primário para a determinação e rastreabilidade da componente direta e dois piranômetros em calibração para medição alternada da irradiância global e sua componente difusa;
- (d) por comparação, em ambiente externo, utilizando outro piranômetro como referência e sob condições naturais diversas. Cuidados devem ser tomados caso as diferenças entre o instrumento de referência e sob calibração sejam muito acentuadas, seja com a utilização de um período de comparação mais longo, com a escolha de períodos de baixa

flutuação dos valores de irradiância ou com a percepção de que as incertezas apresentadas possam ser reflexo da distinção entre os modelos e não da estabilidade do instrumento a ser calibrado.

(e) por comparação, em laboratório, utilizando uma bancada de teste com fonte e incidência previamente estipulada e outro piranômetro similar e previamente calibrado em ambiente externo;

(f) por comparação, em laboratório, utilizando uma câmara de teste que simule o espalhamento natural da radiação no céu e um outro piranômetro similar e previamente calibrado em ambiente externo.

Os métodos de calibração (a), (b), (c) e (d) são os mais comumente empregados (CIMO, 2014). A norma ISO 9846 determina os cuidados necessários para a calibração de piranômetros a partir dos métodos (a), (b) e (c), nos quais um piranômetro é utilizado como instrumento de referência. Já a norma ISO 9847 estabelece os procedimentos para que a calibração ocorra, seja em ambiente externo ou em laboratório, a partir da comparação com outro piranômetro previamente calibrado, de forma que a rastreabilidade em relação à WRR seja mantida.

Toda medida de IGH possui um nível de incerteza intrinsecamente maior que aquele verificado para a componente direta da irradiância solar. Isto ocorre em vista da ausência de instrumentos primários absolutos que realizem a caracterização direta e acurada da irradiância global ou de sua componente difusa (VIGNOLA *et al.*, 2012). Medições em piranômetros estão sujeitas a erros por conta da seletividade espectral do instrumento, de sua não-linearidade, de seu offset térmico sob condições de irradiância solar nula, da dependência de sua resposta em função da orientação por conta de assimetrias construtivas, da dependência de sua resposta em função do ângulo de incidência, da dependência de sua sensibilidade em função da temperatura ambiente, da estabilidade de longo prazo do equipamento, bem como por inadequações em sua instalação, exposição e manutenção. Este elevado número de fontes de incerteza justifica a grande preocupação usualmente presente na calibração e caracterização do instrumento.

No que concerne à totalização da irradiância sobre a faixa de comprimentos de onda curta, os erros associados à seletividade espectral são mais presentes em piranômetros baseados no efeito fotoelétrico. A figura 11 apresenta a espectrografia típica da radiação solar sobreposta às curvas de resposta espectral de piranômetros a termopilha e diferentes células fotovoltaicas

de referência. Nota-se que somente o instrumento baseado no efeito termoeletrico possui uma curva relativamente uniforme sobre a banda de comprimentos de onda entre 300nm e 3000nm.

Figura 11 - Seletividade espectral de piranômetros a efeito termoeletrico e fotovoltaico para células de referência de silício com diferentes materiais de encapsulamento: vidro borossilicato (BG), vidro com filtro óptico passa-baixa (KG) e quartzo de alta performance ótica (HOQ).

Fonte: AZOUZOUTE *et al.* (2019)

A relação entre o sinal de entrada e o sinal de saída destes instrumentos é dada diretamente pela sensibilidade do elemento transdutor. A equação de transferência e de calibração da sensibilidade de um piranômetro a partir da comparação com medidas de referência das componentes direta e difusa são apresentadas a seguir:

$$M = R IGH = V - offset \quad (2.50)$$

$$IGH = \frac{M}{R} = \frac{V - offset}{R} \rightarrow R = \frac{V - offset}{IGH} = \frac{V - R_{lw}IR_{net}}{IDN \cos \alpha + IDH} \quad (2.51)$$

onde R [$\mu V/Wm^{-2}$] é a sensibilidade do instrumento, V [μV] a tensão de saída, $offset$ [μV] a tensão de deriva verificada com medições em períodos com irradiância solar nula, IDN [Wm^{-2}] a componente direta normal da irradiância obtida da medição com o pireliômetro de referência, IDH [Wm^{-2}] a componente difusa obtida da medição sombreada e α ângulo zenital solar ao instante de medição. A determinação do offset térmico pode ser realizada com o intuito de se minimizar as incertezas, partindo-se de medições de irradiância líquida de onda

longa IR_{net} [Wm^{-2}] de um pirgeômetro nas proximidades e da sensibilidade do instrumento R_{lw} [$\mu V/Wm^{-2}$] específica para esta faixa espectral. Assumindo a ausência de desvios da tipologia A, a incerteza das medições pode ser avaliada a partir da determinação das seguintes derivadas parciais:

- 1) A variância associada à tensão medida nos terminais da termopilha:

$$\sigma_V = \frac{\partial R}{\partial V} = \frac{1}{[IDN \cos \alpha + IDH]} \quad (2.52)$$

- 2) A variância associada à sensibilidade específica do instrumento à irradiação de onda longa:

$$\sigma_{R_{lw}} = \frac{\partial R}{\partial R_{lw}} = \frac{-IR_{net}}{[IDN \cos \alpha + IDH]} \quad (2.53)$$

- 3) A variância associada à medida de irradiância de onda longa em um pirgeômetro próximo:

$$\sigma_{IR_{net}} = \frac{\partial R}{\partial IR_{net}} = \frac{-R_{lw}}{[IDN \cos \alpha + IDH]} \quad (2.54)$$

- 4) A variância associada à medição da componente normal direta do pireliômetro de referência:

$$\sigma_{DNI} = \frac{\partial R}{\partial IDN} = \frac{-(V - R_{lw}IR_{net}) \cdot \cos \alpha}{[IDN \cos \alpha + IDH]^2} \quad (2.55)$$

- 5) A variância associada à medição da componente horizontal difusa:

$$\sigma_{DHI} = \frac{\partial R}{\partial IDH} = \frac{-(V - R_{lw}IR_{net})}{[IDN \cos \alpha + IDH]^2} \quad (2.56)$$

- 6) A variância associada ao desvio direcional do ângulo de incidência, a resposta cosseno do instrumento:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\partial R}{\partial \alpha} = \frac{IDN \sin \alpha (V - R_{lw}IR_{net})}{[IDN \cos \alpha + IDH]^2} \quad (2.57)$$

A incerteza total, obtida a partir da raiz quadrada do produtório entre o quadrado de cada derivada parcial e cada incerteza individual é dada pela equação (2.58), já e considerando o fator de abrangência.

$$U = k \sqrt{\sigma_V^2 \Delta V^2 + \sigma_{R_{lw}}^2 \Delta R_{lw}^2 + \sigma_{IR_{net}}^2 \Delta IR_{net}^2 + \sigma_{DNI}^2 \Delta IDN^2 + \sigma_{DHI}^2 \Delta IDH^2 + \sigma_\alpha^2 \Delta \alpha^2} \quad (2.58)$$

A figura 12 apresenta as diferentes fontes de desvio de medição, assim como as classes de qualidade de piranômetros. A integração dos valores máximos admissíveis das diversas fontes de erro dentro de um intervalo de confiança de 95% mostra que piranômetros de alta performance apresentam incertezas de até 3% na totalização horária e de até 2% na totalização diária da irradiância medida. A diferença entre as incertezas encontradas na medição de piranômetros de qualidade inferior é bastante acentuada, especialmente na integração das medições em intervalos de tempo mais curtos.

Figura 12 - Caracterização e classificação de piranômetros.

<i>Characteristic</i>	<i>High quality^a</i>	<i>Good quality^b</i>	<i>Moderate quality^c</i>
Response time (95% response)	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Zero offset:			
(a) Response to 200 W m ⁻² net thermal radiation (ventilated)	7 W m ⁻²	15 W m ⁻²	30 W m ⁻²
(b) Response to 5 K h ⁻¹ change in ambient temperature	2 W m ⁻²	4 W m ⁻²	8 W m ⁻²
Resolution (smallest detectable change)	1 W m ⁻²	5 W m ⁻²	10 W m ⁻²
Stability (change per year, percentage of full scale)	0.8	1.5	3.0
Directional response for beam radiation (the range of errors caused by assuming that the normal incidence responsivity is valid for all directions when measuring, from any direction, a beam radiation whose normal incidence irradiance is 1 000 W m ⁻²)	10 W m ⁻²	20 W m ⁻²	30 W m ⁻²
Temperature response (percentage maximum error due to any change of ambient temperature within an interval of 50 K)	2	4	8
Non-linearity (percentage deviation from the responsivity at 500 W m ⁻² due to any change of irradiance within the range 100 to 1 000 W m ⁻²)	0.5	1	3
Spectral sensitivity (percentage deviation of the product of spectral absorptance and spectral transmittance from the corresponding mean within the range 300 to 3 000 nm)	2	5	10
Tilt response (percentage deviation from the responsivity at 0° tilt (horizontal) due to change in tilt from 0° to 90° at 1 000 W m ⁻²)	0.5	2	5
Achievable uncertainty (95% confidence level):			
Hourly totals	3%	8%	20%
Daily totals	2%	5%	10%

Notes:

a Near state of the art; suitable for use as a working standard; maintainable only at stations with special facilities and staff.

b Acceptable for network operations.

c Suitable for low-cost networks where moderate to low performance is acceptable.

Fonte: CIMO (2014).

3. PREVISÃO NUMÉRICA DA CONDIÇÃO SOLAR

3.1. Iniciativas brasileiras

GUARNIERI (2006) pesquisou o desenvolvimento de uma metodologia de refinamento da previsão de irradiação solar incidente fornecida pelo modelo numérico ETA/CPTEC, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA) e Regressões Lineares Múltiplas (RLM) para a remoção do viés e redução do erro relativo médio quadrático. Modelos de previsão numérica do tempo usualmente calculam campos de radiação solar incidente e de outras componentes radiativas com a finalidade de verificar o balanço de energia atmosférico a cada intervalo de simulação. As variáveis prognósticas, selecionadas pelo autor, resultantes das simulações com o modelo ETA foram: temperatura do ar, componentes eólicas zonal e meridional, umidade específica, água líquida da nuvem, pressão à superfície e energia cinética turbulenta. As demais variáveis de interesse são calculadas internamente a partir de parametrizações.

No caso da radiação, a parametrização do modelo ETA foi desenvolvida no Laboratório de Geofísica e Dinâmica dos Fluidos (GFDL), utilizando-se do método de adicionamento para o cálculo da radiação de onda curta, cuja essência consiste em dividir a atmosfera em subcamadas suficientemente delgadas para que suas funções de reflexão e transmissão da radiação possam ser conhecidas com a aproximação de espalhamento simples. O resultado esperado em uma camada inteira é constituído pelas sucessivas adições de cada subcamada delgada; o detalhamento desta metodologia pode ser encontrado em LACIS e HANSEN (1974). Apesar destes esforços, verifica-se que os resultados obtidos da parametrização do modelo ETA produzem valores de irradiância sistematicamente superiores àqueles observados em superfície. Aponta-se que problemas na parametrização de nuvens e na atenuação da radiação de onda curta por vapor d'água e aerossóis são os fatores principais para o viés sistemático.

Dentre todas as variáveis de saída do modelo ETA40, um conjunto de 33 foram selecionadas como possíveis preditores para a radiação solar na fase de refinamento das saídas do modelo de previsão numérica; incluindo os fluxos radiativos estimados pelo próprio modelo meteorológico. Outras duas variáveis, a umidade relativa e velocidade do vento a 10 metros, foram determinadas a partir do conjunto original e incluídas como preditores elegíveis. Por fim, também se adicionou ao conjunto predictor da rede neural os resultados dos cálculos teóricos da radiação solar incidente no topo da atmosfera, do ângulo zenital solar e da massa de ar. O autor justifica a integração deste último grupo pelo fato de que estas variáveis permitiriam melhor

representação na rede propriedades de sazonalidade, limite superior e intensidade da influência atmosférica na determinação do recurso solar.

Os resultados foram produzidos e comparados com medições de duas estações solarimétricas do projeto SONDA. Ressalva-se que as saídas dos modelos meteorológicos são empregadas com o objetivo de gerar campos de variáveis e não previsões pontuais. As diferenças avaliadas englobam não somente os erros do procedimento de cálculo do modelo ETA e de imprecisões na determinação de suas condições iniciais e de contorno, mas também os erros inerentes à comparação de valores de campo com valores de um ponto específico nele contido. A análise das diferenças entre medições em solo e resultados da previsão numérica antes do refinamento demonstram que há boa correlação entre dados simulados e observados, com coeficientes R entre 0,6 e 0,8. O erro quadrático médio (RMSE) para integralização diária da irradiação corresponde a aproximadamente 43% do recurso verificado em solo, com forte viés positivo. A figura 13 apresenta o refinamento da previsão da irradiação com o emprego do modelo ETA e pós-tratamento estatístico, comparando visualmente os desempenhos de cada experimento.

Figura 13 - Refinamento da previsão da irradiação com o emprego do modelo ETA e pós-tratamento estatístico. Desempenho do modelo de persistência (a); desempenho e viés da saída direta do modelo ETA (b); tratamento do viés por aplicação de ajuste linear (c); tratamento do viés pela subtração do erro médio (d); pós-tratamento da previsão com o emprego de RLM (e) e RNA (f) com o conjunto completo de preditores; pós-tratamento da previsão com o emprego de RLM (g) e RNA (h) para um conjunto reduzido de preditores.

Fonte: Adaptado de GUARNIERI (2006).

O refinamento via rede neural foi comparado ao tratamento estatístico direto das saídas da previsão numérica com de modelos de regressões lineares múltiplas. A métrica empregada na comparação do desempenho foi o skill score, de onde se inferiu que as duas técnicas de pós-processamento apresentaram desempenho próximos, mas com ganhos consideráveis em relação à previsão direta do modelo meteorológico; o impacto médio na redução do erro RMSE foi superior a 30% quando comparados à previsão original. Segundo o autor, um dos motivos para este equilíbrio de performance entre técnicas é a possibilidade de que a relação entre os fluxos radiativos e demais variáveis meteorológicas tenha um comportamento mais linear que o inicialmente suposto. Conclui-se que o refinamento das previsões de fluxos radiativos obtidos de modelos meteorológicos é uma alternativa metodológica que proporciona ganhos expressivos na previsibilidade do recurso solar.

LIMA (2015) apresenta estudo similar, que analisa a possibilidade de se empregar redes neurais no tratamento estatístico das saídas do modelo numérico WRF para a previsão da irradiação solar no Nordeste brasileiro. O WRF é uma ferramenta gratuita e de domínio público, concebida para representar o estado da arte da simulação atmosférica com cinco principais parametrizações físicas: microfísica, nuvens convectivas, camada limite planetária, ocupação do solo e radiação. O maior problema enfrentado na sua utilização consiste na escolha do grupo de parametrizações que seja adequado às condições do local de interesse, processo este denominado regionalização. A parametrização dos processos envolvendo a radiação de onda curta e longa foi avaliada com diferentes combinações de métodos de transferência radiativa já conhecidos, Dudhia/RTTM, RTTMG/RTTMG e Goddard/Goddard, sendo que os melhores resultados foram obtidos da combinação baseada unicamente no Método de Transferência Radiativa Rápida para Modelos de Circulação Generalizada (RRTMG).

A parametrização de nuvens convectivas Grell-3D teve melhor desempenho em todas as localidades avaliadas. As demais parametrizações escolhidas também foram elencadas pelo autor. A partir destas definições, o modelo WRF calcula a fração de cobertura de nuvens em três níveis altimétricos: alto, médio e baixo. Registrou-se a ocorrência de forte relação entre a fração de cobertura de nuvens calculada e o índice de céu claro, dado pela razão entre a radiação observada em superfície e aquela estimada em condições de céu descoberto, conforme LORENZ *et al.* (2010). A modelagem de céu claro utilizada se baseia no coeficiente de turbidez Linke, definido vide DUMONTIER (1998). Na sequência, o autor calcula a regressão linear múltipla da irradiação solar em função dos coeficientes de cobertura de nuvens e da irradiação solar a céu descoberto, cujos resultados serão comparados ao da rede neural desenvolvida.

Dados de estações do INMET dos anos de 2005 a 2011 foram utilizados na avaliação das previsões do WRF. Novamente se constata que a previsão numérica apresenta alguma habilidade em simular a irradiação solar, caracterizada por coeficientes de correlação R sempre superiores a 0,6. Também se identificam vieses positivos claros e expressivos e erros RMSE elevados, superiores a 40% do recurso verificado em solo. As previsões derivadas da rede neural com melhor desempenho promoveram a redução do erro quadrático médio em pelo menos 30% e em todas as sub-regiões analisadas pelo autor. A figura 14 apresenta um resumo visual dos resultados obtidos com o emprego da RNA para o período da primavera de 2011.

Figura 14 - Mapas de irradiação solar referentes ao período da primavera de 2011: medidos (esquerda), estimados pela RNA (centro) e desvio médio verificado (direita).

Fonte: Adaptado de LIMA (2015).

A RNA também apresentou performance superior ao modelo de regressão linear múltipla estabelecido, mas é importante ressaltar que, apesar das similaridades de proposta entre os estudos de GUARNIERI (2006) e LIMA (2015), o segundo apresentou uma alternativa única de regressão linear múltipla no refinamento estatístico das saídas dos modelos de previsão numérica e que abrangia um número menor de variáveis potencialmente preditoras. Isto pode ser um dos motivos pelos quais a performance da rede neural desenvolvida em LIMA (2015) tenha apresentado ganhos significativos em relação ao método regressivo, enquanto no caso apresentado por GUARNIERI (2006) os dois métodos tiveram desempenho equivalente. A discrepância também pode estar associada à distinção de modelagem dos fluxos radiativos nos modelos ETA e WRF. Ambos estudos demonstram uma alta capacidade de previsão da irradiação solar com o pós-tratamento das saídas de modelos de previsão numérica do tempo, passível de ser aplicada de forma generalizada sobre o território brasileiro.

A resolução exata das equações de transferência radiativa, costuma demandar o processamento de grande quantidade de dados de entrada. Modelos de previsão numérica do

tempo também precisam computar os desdobramentos termodinâmicos na atmosfera, em solo, nos oceanos e nas camadas polares, além dos processos de formação de nuvens, formação e transporte de componentes químicos, entre outros fatores. Diante deste quadro, muitos pesquisadores se dedicaram a desenvolver métodos alternativos aproximados, capazes de fornecer estimativas dos fluxos radiativos suficientemente acuradas e em tempo hábil para a sua operacionalização. O método de dois fluxos é um exemplo deste tipo de aplicação, atualmente empregado no Brasil para a determinação da radiação solar incidente a partir de imagens de satélite com o modelo BRASIL-SR. Esta adaptação brasileira da modelagem IGMK, proposta originalmente por STUHLMANN *et al.* (1990), foi desenvolvida por meio de convênio entre o INPE e o LABSOLAR/UFSC para o mapeamento do potencial energético solar da América Latina e do Brasil. O fluxograma esquemático do modelo pode ser avaliado em detalhe na figura 15.

Figura 15 - Fluxograma de dados e do código computacional do modelo BRASIL-SR.

Fonte: MARTINS e TROSNIKOV (2002).

O BRASIL-SR considera que a cobertura de nuvens é o principal fator modulador da transmitância atmosférica; a atenuação dos demais componentes é secundária e pode ser determinada simplesmente pelo uso de valores climatológicos mensais. A radiação solar à

superfície é determinada após o cômputo de três grandes etapas: a) tratamento dos dados climatológicos e de satélite, b) solução do equacionamento da transferência radiativa pelo método de dois fluxos, e c) determinação das componentes direta, difusa e global da radiação solar à superfície.

A formulação assume que o fluxo solar no topo da atmosfera se distribui linearmente entre as condições extremas de céu claro e céu encoberto. Também se assume uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletido ao espaço. Seria possível, portanto, estabelecer uma formulação linear simples entre o recurso solar disponível em solo e aquele incidente no topo da atmosfera, modulado a partir da aplicação do coeficiente de cobertura de nuvens. A equação (3.1) expressa esta relação simplificada:

$$GHI = TSI * [(\tau_{clear} - \tau_{cloud})(1 - C) + \tau_{cloud}] \quad (3.1)$$

A etapa (b) corresponde ao processo de determinação das transmitâncias de céu totalmente claro e totalmente encoberto a partir das quais se calcula a irradiância global em superfície. Nesta etapa que o método de dois fluxos é empregado. Inicialmente se subdivide o espectro solar em 135 intervalos e a atmosfera em 30 camadas verticalmente dispostas onde se dariam as interações da radiação com nuvens, espalhamento Rayleigh, espalhamento Mie de aerossóis e absorção pelos gases atmosféricos do ozônio, gás carbônico e vapor d'água. Utiliza-se bases de dados distintas para a obtenção das climatologias da temperatura do ar, visibilidade, albedo da superfície, umidade relativa do ar e altitude. O coeficiente de cobertura de nuvens é determinado a partir das imagens de satélite, e, segundo as premissas da metodologia, representa tanto fração de céu encoberto quanto a distribuição espacial da profundidade óptica das nuvens. As suas propriedades ópticas são derivadas de parametrizações que levam em conta a distribuição vertical em cada camada atmosférica, distribuição dos tamanhos de gotículas, tipificação de nuvens, pressão atmosférica e conteúdo total de água líquida na nuvem, conforme MARTINS e TROSNIKOV (2002).

A divisão em perfis atmosféricos permite a determinação da espessura óptica de cada processo de interação radiativa, com valores distintos de temperatura, espessura da camada, densidade do ar seco e concentrações de ozônio, dióxido de carbono e vapor d'água conforme tipologia atmosférica selecionada. Permite-se a seleção de 5 tipologias de atmosfera-padrão: tropical, latitudes médias em época de verão e de inverno, e latitudes subárticas em época de verão e de inverno. O perfil de água precipitável é definido pela parametrização descrita por

LECKNER (1978), enquanto o de gás carbônico segue regra de cálculo estabelecida em MARTINS (2001). A espessura óptica de espalhamento Rayleigh é calculada com base em um perfil típico para altitudes de 0 a 50 km. O efeito de aerossóis foi originalmente determinado com a adoção do perfil vertical continental típico proposto por MCCLATCHEY (1972) e das formulações de ANGSTRÖM (1964) e IQBAL (1983) na determinação da transmitância direta e global, respectivamente. Posteriormente, MARTINS e PEREIRA (2006) propuseram novas parametrizações que permitiram um grande aperfeiçoamento na modelagem de aerossóis, incluindo uma correção da concentração dos aerossóis nos primeiros 5 km em função da visibilidade horizontal média mensal. O coeficiente de extinção total e o conteúdo de água líquida em nuvens é calculado a partir da parametrização de Stephens (1978).

No cálculo da transmitância de céu encoberto, MARTINS *et al.* (2004) assumem as seguintes premissas: (a) a microfísica de nuvens é representada pela distribuição de tamanhos de gotículas e pelo tipo de nuvem presente; (b) as nuvens atenuam totalmente a radiação direta proveniente do Sol; (c) as nuvens são verticalmente e horizontalmente homogêneas; e (d) o conteúdo total de água líquida na nuvem está isotermicamente distribuído.

Sendo assim, o fluxo calculado em superfície corresponde ao componente global horizontal da irradiância solar. A determinação da componente normal direta parte da premissa de que a absorvidade das nuvens no espectro solar é desprezível e que a sua contribuição no espalhamento da radiação pode ser adicionada à transmitância atmosférica de céu claro. O retroespalhamento pela presença de gotículas de água na nuvem é considerado a partir do índice β . Novamente, a resolução das equações de transferência radiativa pelo método de dois fluxos que provê estes valores. Por fim, o componente difuso pode ser determinado partir da relação geométrica que o relaciona aos demais uma vez conhecido o ângulo zenital (θ).

$$IDN = TSI \tau_{atm-dir} \tau_{cloud-dir} = TSI \tau_{atm-dir} \frac{(1 - \tau_c)}{(\beta - \tau_c)} \quad (3.2)$$

$$\tau_c = (C + 0,05) \text{ se } C < 0,95 \quad | \quad \tau_c = 1 \text{ se } C \geq 0,95 \quad (3.3)$$

$$IGH = IDN \cos \theta + IDH \quad (3.4)$$

Houve um intenso processo de validação dos resultados do modelo BRASIL-SR (MARTINS *et al.*, 2004), que demonstrou desempenho compatível com o de outros códigos de transferência radiativa desenvolvidos mundialmente e intercomparados no âmbito do projeto SWERA, uma iniciativa internacional para a promoção das energias solar e eólica em países

O balanço radiativo do sistema Terra-atmosfera pode ser representado de forma simplificada por uma formulação geral de equivalência entre a energia solar incidente no topo da atmosfera e a soma das energias emergente, absorvida e medida em superfície. Desde que a absorção seja constante ou insignificante, a relação entre a radiação medida em superfície e a radiação emergente é praticamente linear. O autor cita dois estudos que confirmam experimentalmente a validade desta resposta linearizada tanto para condições de céu claro quanto para céu encoberto. A separação do espectro em bandas independentes permite a aplicação da equação de balanço e seu detalhamento em cada banda de interesse. O sistema Terra-atmosfera é descrito em três camadas, sendo a camada intermediária aquela que busca representar a presença de nuvens.

Para a banda VIS foram considerados os efeitos atenuadores em função da presença de ozônio e de vapor d'água na atmosfera, componentes atmosféricos com bandas de absorção próximas ou contidas no mesmo intervalo espectral de detecção do sensor do satélite METEOSAT, entre 550-750 nm. A absorção do ozônio é relativamente pouco expressiva e concentrada sobre os comprimentos de onda mais próximos ao ultravioleta, por este motivo o autor preferiu modelar seus efeitos como uma redução na disponibilidade da radiação que atravessa a atmosfera a partir de um fator de correção do recurso solar estratosférico. As bandas de absorção do vapor d'água neste intervalo de interesse apresentam respostas sobre faixas estreitas e com fraca atenuação, de forma que também podem ser desconsideradas. A versão inicial do modelo despreza atenuação pela presença de aerossóis e considera que a absorção dos demais componentes ocorre exclusivamente na região do infravermelho. Sendo assim, a atmosfera apresenta um comportamento conservativo no intervalo visível.

$$GL^{VIS} = \frac{Eg^{VIS}}{Eo^{VIS}} = \frac{(1 - a_{O_3}^{VIS} - Rp^{VIS})}{(1 - Rg^{VIS})} \quad (3.5)$$

onde $a_{O_3}^{VIS}$ é absortância do ozônio no intervalo visível, Rp^{VIS} é a refletância planetária obtida do processamento das imagens de satélite, Rg^{VIS} é o albedo em solo e GL^{VIS} é a irradiância global em superfície normalizada em relação ao recurso estratosférico disponível no intervalo visível. O processamento de múltiplas imagens de satélite em condições de céu claro permite obter uma estimativa do albedo em função da medida de refletância planetária e das propriedades óticas atribuídas à primeira camada atmosférica. O autor opta por considerar os efeitos de reflexão múltipla entre solo e atmosfera especificamente nesta estimativa, conforme equação (3.6). Os coeficientes de refletância atmosférica $R1^{VIS}$ e $R1'^{VIS}$ são determinados a

partir da formulação de LACIS e HANSEN (1974), corrigida for um fator multiplicativo que considera o desacoplamento espectral entre o intervalo de interesse e o intervalo modelado pela parametrização.

$$\text{céu claro} \rightarrow R_p^{VIS} = R1^{VIS} + \frac{(1 - R1^{VIS})Rg^{VIS}(1 - R1'^{VIS})}{(1 - Rg^{VIS}R1'^{VIS})} \quad (3.6)$$

O balanço radiativo na banda IR considera uma atmosfera absorptiva pela presença de vapor d'água e dióxido de carbono em sua composição. Nessa faixa de comprimentos de onda a dispersão Rayleigh é desprezível e a nebulosidade é o único fator para a ocorrência de efeitos dispersivos relevantes. Assume-se que toda a radiação em comprimento de onda compatível com as bandas do vapor d'água será absorvida na presença de nuvens, ou seja, que a radiação difusa descendente à superfície abaixo da camada de nuvens está em estado de saturação. Isto significa que os processos esperados no restante do caminho ótico a ser percorrido serão conservativos e a energia remanescente (Ec^{IR}) será extinguida após sofrer múltiplas reflexões entre a superfície e a base da camada de nuvens.

$$Eg^{IR} = \frac{Ec^{IR}}{(1 - Rg^{IR}CRc^{IR})} = \frac{(1 - C)(Eo^{IR} - \Delta E^{IR})}{(1 - Rg^{IR}CRc^{IR})} = \frac{(1 - C)(Eo^{IR} - \Delta E_{H2Ov}^{IR})}{(1 - Rg^{IR}CRc^{IR})} \quad (3.7)$$

O processo de absorção pela presença de vapor d'água é determinado de acordo com a parametrização proposta por CEBALLOS *et al.* (1992), que depende do conteúdo de água precipitável e seu perfil de distribuição vertical na atmosfera. A atenuação causada por gás carbônico e ozônio no intervalo infravermelho próximo foram desconsideradas neste primeiro estudo, restando como sugestão de aprimoramento em versões futuras. Estima-se um viés positivo de aproximadamente 30 W/m² nos resultados do modelo GL sob condição de céu claro em decorrência desta simplificação.

$$GHI = Eg = Eg^{VIS} + Eg^{IR} \quad (3.8)$$

A comparação de estimativas da irradiação por satélite e dados obtidos em solo envolve a aceitação de uma hipótese de ergodicidade do processo radiativo, isto é, que os valores espaciais médios obtidos da modelagem para uma determinada área possuem boa equivalência com a média temporal em qualquer ponto contido nesta mesma área, dado um período de análise suficientemente longo. Sendo assim, o autor sugere que se evite a aplicação do modelo GL na

estimativa de valores locais e instantâneos de irradiância, sendo mais adequado utilizá-lo na determinação de valores de irradiância média ou irradiação acumulada.

Os resultados da metodologia proposta foram confrontados com medições de duas estações solarimétricas no estado da Paraíba equipadas com actinógrafos bimetálicos do tipo Fuess. O modelo foi capaz de reproduzir o comportamento típico dos sistemas de nuvens presentes na região e apresentou erros médios (*bias*) inferiores a 20% para a irradiação diária. A figura 17 apresenta gráficos que demonstram os resultados obtidos. As hipóteses básicas de separação do espectro solar somente nas bandas visível e infravermelho, divisão da atmosfera em um número reduzido de camadas e premissa de que a transferência radiativa é essencialmente conservativa no intervalo visível permitem grande simplificação na modelagem, passível de ser implementada em computadores convencionais. A qualidade da estimativa da radiação passa a ser altamente dependente de boa determinação da refletância planetária e do albedo em superfície. O autor sugere que o sucesso na implementação do modelo também poderia estar associado à baixa turbidez atmosférica na região de análise.

Figura 17 - Ciclo diário da irradiância e irradiação média mensal para janeiro de 1991 incluindo medições de actinógrafos e estimativas a partir do modelo GL1.0 (esquerda) e dispersão entre dados (direita) para as localidades de Cabaceiras e Belém do Brejo da Cruz.

Fonte: Adaptado de CEBALLOS e MOURA (1997)

Algumas leituras indicaram que a adaptação da metodologia GL para o uso de imagens do canal VIS do satélite GOES foi realizada por pesquisadores da Divisão de Meteorologia por Satélite – DMS/INPE e da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, em projeto apresentado nos anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia e atribuído a BASTOS *et al.* (1996). Entretanto, a pesquisa pela fonte bibliográfica na página de internet dedicada às publicações deste congresso não retornou qualquer resultado. Buscou-se tanto diretamente nos anais da nona

edição, com 253 artigos disponíveis, quanto diretamente pelo nome do autor e co-autores da referida fonte bibliográfica em todo o histórico do congresso. A busca pelo artigo na internet também não teve êxito. De qualquer maneira, sabe-se que o modelo já trabalhava com as imagens do satélite GOES-8 em sua versão GL 1.1.

BOTTINO (2000) descreve em sua dissertação de mestrado os aprimoramentos em relação à estimativa de nebulosidade, ao efeito atenuante da presença de ozônio na atmosfera e à correção da refletância por efeitos de anisotropia da reflexão que levaram ao novo versionamento do modelo GL. O autor se baseou em metodologia própria de classificação de imagens para discernir e identificar a tipologia da cobertura de nuvens em cada cena do histórico analisado. Para tanto, utilizou das seguintes informações do satélite GOES-8: refletância do canal 1, textura da refletância no canal 1, temperatura de brilho do canal 4 e textura da temperatura de brilho do canal 4. A variável de textura foi definida como o logaritmo na base 10 da variância local calculada sobre uma grade de 3x3 pixels, centrada sobre o ponto de interesse. Os resultados da classificação sobre um histórico de imagens dos meses de novembro e dezembro de 1998 permitiu estabelecer limiares bem definidos para as condições de céu claro e céu encoberto, mas não houve iniciativa em tentar estabelecer relação com o cálculo do coeficiente de nebulosidade ou dos demais índices em condições intermediárias.

Uma premissa importante neste contexto é que a estimativa coeficiente de cobertura de nuvens a partir das imagens de satélite faz sentido somente no contexto de nuvens cumuliformes. Nuvens estratiformes são associadas à condição de cobertura total. Nuvens cirros são relativamente transparentes para a radiação de onda curta e parcialmente obstrutoras para o infravermelho próximo; o autor deu preferência por tratá-las como nuvens cumuliformes equivalentes. Sendo assim, a nebulosidade efetiva pode ser deduzida a partir dos parâmetros R_{min} , refletância típica da superfície em condição de céu claro, e R_{max} , refletância de transição entre campos de nuvens cumuliforme e estratiforme.

A absorção atmosférica devido a presença do ozônio e do gás carbônico foram implementadas a partir de parametrizações já defendidas por especialistas no campo da meteorologia. Para o ozônio, optou-se pela parametrização de LACIS e HANSEN (1974), adaptada para considerar somente a parcela correspondente à perda no espectro visível. No caso do gás carbônico, a parametrização adotada foi sugerida por CEBALLOS *et al.* (1992), a qual descreve o valor esperado médio de irradiância incidente absorvida no espectro do infravermelho próximo dada a concentração de 300 ppm de dióxido de carbono na atmosfera.

O autor admite desvios entre os valores de concentração de referência e atuais, os quais poderiam introduzir erros na estimativa da irradiação diária, ainda que aceitáveis.

Figura 18 - Diagramas de dispersão da irradiação média diária entre dados de PCDs e estimativa do modelo GL1.1 e evolução temporal destas medidas para a estação de Cruzeiro para novembro e dezembro de 1998.

Fonte: Adaptado de BOTTINO (2000)

A figura 18 apresenta a dispersão entre valores observados de irradiância média diária e estimados pelo modelo GL1.1 para a estação de Cruzeiro – SP, no Vale do Paraíba. A nova versão foi capaz de produzir uma redução no desvio padrão desta dispersão de 34 W/m² para 24 W/m²; o erro sistemático foi reduzido de 14 W/m² para 10 W/m² em novembro e de 7 W/m² para zero em dezembro.

Por fim, o autor destaca que premissa de isotropia da refletância detectada pelo satélite pode conduzir a erros nas medições satelitais, principalmente para ângulos zenitais acentuados. Estes desvios podem ser corrigidos a partir do levantamento da função de distribuição da refletância bidirecional característica de cada tipificação de superfície. Isto permitiria converter a medição anisotrópica do satélite em um valor isotrópico equivalente para todas as posições relativas entre sol, alvo e satélite. A função utilizada pelo autor já havia sido tabelada em outro estudo, publicado por LUBIN e WEBER (1995), e sua aplicação foi limitada à correção dos valores de refletância em condição de cobertura total. Os resultados da aplicação não demonstraram grande alteração na capacidade preditiva da irradiância média diária, de modo que o autor decidiu não adotar o uso desta técnica no versionamento final do modelo. Não obstante, é possível que a análise em resoluções menores apresentasse melhores resultados. O autor não avalia a fundo esta possibilidade, nem chega a comparar os valores horários ou sub-horários estimados pelo modelo com e sem a aplicação do ajuste bidirecional da refletância com aqueles verificados em superfície.

PORFIRIO (2012) desenvolveu um método de estimativa focado no componente direto normal da irradiância à superfície a partir de dados meteorológicos e imagens de satélite, comparando os produtos de sua pesquisa com dados de medição da rede SONDA para três

estações do nordeste brasileiro e de medidas heliográficas de uma rede de estações da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) do CPTEC/INPE. A modelagem se fundamenta em funções de transmitância espectrais referentes a cinco processos principais de extinção da radiação na atmosfera: espalhamento Rayleigh, extinção por aerossol e absorção por ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono. Dados de profundidade óptica do aerossol foram extraídos de produtos médios diários disponibilizados na rede AERONET, enquanto dados de conteúdo total de ozônio foram obtidos do monitoramento diário pelo sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) do satélite AURA, o qual integra o grupo de sistemas de monitoramento remoto Earth Observation System (EOS).

Os efeitos de atenuação pela presença de cada componente atmosférico ocorrem em faixas espectrais distintas, motivo pelo qual o autor também decide separar o espectro solar em dois intervalos principais: onda curta e onda média. O intervalo de onda curta compreende os comprimentos de onda entre de 280nm a 1000nm, englobando os efeitos de espalhamento Rayleigh, aerossol e ozônio nas faixas do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. O intervalo de onda média se estende de 1000nm a 4000nm, centrado principalmente nos efeitos de absorção da radiação solar pelo vapor d'água e dióxido de carbono e, em caráter secundário, por aerossol. A transmitância do ozônio, vapor d'água, dióxido de carbono e pelo espalhamento Rayleigh foram parametrizadas com base em formulações matemáticas já consagradas na literatura, mas com adaptações para refletir dados em rede terrestre e níveis de concentração atuais. A influência do aerossol em onda curta é determinada de forma direta pela formulação de ANGSTRÖM (1929) com coeficientes ajustados à realidade de medições em terra, enquanto que para comprimentos de onda médios o seu efeito é calculado por meio de uma transmitância média. A composição destes efeitos sobre o recurso solar extraterrestre determina a componente direta normal em condições de céu sem nuvens.

A comparação da modelagem concebida no estudo com a de outras referências bibliográficas, inclusive de formulação mais complexa, demonstrou resultados teóricos aderentes. Os quatro modelos selecionados para confronto foram: Iqbal C (IQBAL, 1983), METSTAT (MAXWELL, 1998), REST (GUEYMARD, 2003) e Yang (YANG *et al.*, 2001).. O modelo PC12, desenvolvido pelo autor, apresentou erros médios de até 50 W/m² para a estimativa da IDN em dias com predominância de céu claro, os maiores desvios foram obtidos justamente nos intervalos que correspondem a momentos de baixa elevação solar. Em média, o modelo apresentou erro RMSE percentual de aproximadamente 3% do recurso verificado em solo, com predominância de viés negativo. O confronto com dados de estações solarimétricas

da rede SONDA evidenciou que os desvios obtidos de todas as modelagens avaliadas são superiores às incertezas associadas às medidas obtidas dos instrumentos solarimétricos e atmosféricos, cujo desvio médio aceitável para uma rede de boa qualidade é de aproximadamente 1% para valores de integralização diária da IDN, conforme figura 9.

A estimativa da IDN em condições de nebulosidade se dá pela simples aplicação do complemento do índice de cobertura de nuvens, definido a partir de imagens do canal visível do satélite GOES, sobre o valor calculado pelo modelo proposto em condições de céu descoberto. Verificou-se que a estimativa por satélite é capaz de acompanhar as variações da irradiância direta normal medida em solo e estimar com relativa acurácia a irradiação média diária, porém pode apresentar desvios significativos quando avaliada em escalas temporais menores. Em média, o erro RMSE percentual encontrado nas três localidades avaliadas foi de 18,7% e o coeficiente de correlação entre os valores estimados e verificados foi superior a $R = 0,9$. Em conclusão, o autor apresenta a concordância dos resultados obtidos com demais trabalhos difundidos na literatura ao apresentar de mapas de irradiação média diária mensais, sazonais e anual para o ano de 2008 e ao comparar os valores máximos de IDN encontrados; a figura 19 apresenta os mapas produzidos.

Figura 19 - Distribuição espacial da média sazonal da irradiação direta normal em MJ/m² para o Nordeste brasileiro.

Fonte: Adaptado de PORFIRIO (2012)

A metodologia desenvolvida poderia então ser incluída no modelo GL, possibilitando que a estimativa dos componentes global, direto e difuso da radiação solar pudesse ser obtida a partir de medições remotas por satélite de forma centralizada. Esta inclusão foi objeto de estudo da tese de doutorado de PORFIRIO (2017), que também apresentou outros aprimoramentos na concepção física do modelo GL. O autor apresenta uma análise preliminar da performance do modelo, na qual se verifica que o modelo apresenta tendência média de superestimar a verdade terrestre quando alimentado por imagens do satélite GOES, com erros quadráticos médios entre 10 e 40 W/m², variando em função da época do ano e da região. Os piores resultados se deram

nas regiões Norte e Centro-Oeste, especialmente na época de agosto a outubro, quando há maior concentração de aerossóis na atmosfera, principalmente em função de queimadas.

A concepção original do modelo GL negligencia a presença de aerossóis, o que motiva a superestimativa da irradiação diária, especialmente sob condições de céu claro, evidenciando a necessidade de se parametrizar a atenuação da radiação solar por este componente atmosférico. Mesmo em sua versão GL1.2, o modelo já assumia outras simplificações na distribuição espaço-temporal de alguns componentes notadamente variáveis nessas duas dimensões: o conteúdo total de ozônio é assumido constante e igual 0,28 cm-atm; a concentração do dióxido de carbono também é constante e igual a 360 ppm; a água precipitável é definida em 3,5g/cm³ para latitudes subtropicais e em 4,5 g/cm³ para latitudes tropicais; e a refletância de superfície era definida exclusivamente em função da localização geográfica, determinada a partir da estatística obtida para um mesmo agrupamento de pixels da medição por satélite. Já a versão GL1.4, implementada somente para imagens do satélite METEOSAT de Segunda Geração – MSG, inclui a consideração de campos médios quinzenais de água precipitável distribuídos geograficamente com resolução espacial de aproximadamente 0,94° e campos mensais de refletância mínima de superfície, determinados a partir das estatísticas de imagens entre 14h30 e 15h30 UTC para o setor da América do Sul.

O autor utilizou o código de transferência radiativa SBDART para confeccionar tabelas de referência para a atenuação por aerossóis de duas tipologias: rural, conforme proposto por SHETTLE e FENN (1979); e queimadas, seguindo metodologia de PROCÓPIO *et al.* (2003). As tabelas contemplam uma diversidade de valores para ângulos zenitais, albedos de superfícies e profundidades ópticas, além das condições extremas de céu claro e encoberto. O efeito esperado para condições de nebulosidade parcial é determinado a partir da interpolação linear destes extremos, calculada com base no coeficiente de cobertura de nuvens. A partir dessas tabelas o autor é capaz de definir diretamente a atenuação da radiação solar no intervalo ultravioleta e visível. Já para a banda do infravermelho próximo, deduziu-se parametrizações para a refletância atmosférica, transmitância média do aerossol e transmitância da camada abaixo da base da nuvem. Os resultados obtidos apresentaram um aperfeiçoamento das estimativas de irradiação diária do modelo GL, com redução em 50% no desvio médio das estimativas para dias de céu claro. O estudo finaliza com sugestões de aprimoramentos futuros, como: a inclusão de modelos ópticos de aerossóis de moda grossa; a implementação de campos sazonais geograficamente distribuídos em conjunção com as imagens do satélite GOES; e a atualização da metodologia com a avaliação das possíveis melhorias com o emprego de imagens

do satélite ABI/GOES-16, de tecnologia mais recente, avançada e com maior resolução espacial, temporal e espectral.

Figura 20 - Tabelas de atenuação por aerossóis rurais em função da profundidade óptica e ângulo zenital para as condições de céu claro (esquerda) e encoberto (centro) e melhoria na estimativa da irradiação global diária após inclusão destes efeitos na versão 2.0 do modelo GL.

Fonte: Adaptado de PORFIRIO (2017)

Salienta-se que todas as iniciativas supracitadas enxergaram o problema de monitoramento e previsão da irradiação solar disponível em solo sob uma ótica estritamente associada ao campo científico da meteorologia. Alguns dos autores, por exemplo LIMA (2015), já sinalizavam a importância da aplicação prática destes conhecimentos na área de energia, mas de forma ainda superficial. Aprofundamentos neste ramo temático fugiriam aos objetivos de cada trabalho. Em contrapartida, a produção nacional com foco no setor energético deu maior preferência em compreender os desdobramentos na operação da rede elétrica, principalmente sob a premissa de adoção massiva da tecnologia fotovoltaica como fonte geradora. ALMEIDA (2017) apresenta uma tese que avalia as implicações técnicas desta inserção em grande escala, em particular no controle de tensões e frequências, na avaliação de rampas de geração e na determinação de reservas operativas. O autor dedica o terceiro capítulo de sua tese para elucidar como a previsão da potência injetada por usinas fotovoltaicas pode beneficiar a integração e gerenciamento da rede elétrica. Dentre os benefícios, cita a prevenção contra riscos sistêmicos potenciais, redução de perdas e custos oriundos de medidas de mitigação mal utilizadas, cálculo de reservas operativas terciária e complementar.

Com estes mesmos benefícios em mente que o Operador Nacional do Sistema Elétrico promoveu o primeiro Workshop de Energia Solar Fotovoltaica no dia 11 de junho de 2018, dirigido ao público interno, com o objetivo de adensar o conhecimento técnico necessário para se desenvolver um programa em código aberto de previsão da geração solar para a programação da operação. Iniciativa análoga já vem sendo discutida e desenvolvida para a fonte eólica desde 2016. Participaram do evento das gerências de Metodologia e Modelos Energéticos e Recursos

Hídricos e Meteorologia do próprio ONS, além de convidados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), do Ministério de Minas e Energia (MME), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), da Universidade Federal Fluminense (UFF), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O operador reconhece que uma das formas de se mitigar os efeitos da ausência de controle sobre a produção das fontes eólica e solar é a partir da realização previsões acuradas, principalmente no âmbito do planejamento de curtíssimo prazo e da operação em tempo real. Métodos preditivos auxiliariam na determinação da reserva de potência adequada para manter os requisitos operativos da rede elétrica dentro dos padrões normais de controle de tensão e frequência. Ademais, conclui que, a despeito do aumento na oferta de energia renovável e intermitente, permanece a necessidade de expansão da inércia do sistema elétrico através da inserção de novos reservatórios hidráulicos de regularização, usinas térmicas de resposta rápida ou sistemas de armazenamento a bateria.

Dentre os principais pontos discutidos durante o workshop, destacam-se a necessidade de adensamento e padronização mínima da rede de medição do recurso solar no país, a complexidade associada à previsão da geração fotovoltaica em condições de cobertura intermediária do céu, a importância do monitoramento e projeção dos movimentos das nuvens, assim como da integração de dados obtidos em solo e por sensoriamento remoto e também da compreensão das resoluções temporais e espaciais com as quais se deseja trabalhar na definição da melhor técnica ou do melhor conjunto de técnicas preditivas.

O LABREN/INPE, grupo de pesquisa com o maior número de contribuições acadêmicas para o tema da previsibilidade solar no Brasil, apresentou uma proposta metodológica inicial que contempla a ponderação dos resultados obtidos de três modelos preditivos distintos: sensoriamento local com vetorização dos movimentos das nuvens a partir de imagens de céu-completo, sensoriamento remoto com vetorização dos movimentos das nuvens a partir de imagens de satélites, previsão numérica regional com tratamento estatístico e previsão numérica global com tratamento estatístico, apresentada em maior detalhe na figura 21. A combinação destes resultados seria determinada a partir de regressão linear múltipla, na qual os coeficientes da regressão refletiriam a habilidade de cada modelo em prever a disponibilidade do recurso solar em um determinado horizonte de previsão.

Figura 21 – Proposta de previsão do recurso solar apresentada pelo LABREN no workshop ONS.

Description of the proposed methodology:

$$P_{combi} = a_{WRF} p_{WRF} + a_{GFS} p_{GFS} + a_{CMV} p_{CMV} + a_0$$

Fonte: Workshop de Energia Solar Fotovoltaica – ONS (2018)

3.2. Estado da arte internacional

Durante o levantamento histórico de bibliografias internacionais voltadas à previsão do recurso solar, teve-se que o primeiro estudo revisional encontrado foi realizado no ano de 2009, a pedido do Operador Independente da Rede Elétrica do Estado da Califórnia (KLEISSL, 2009). Entendia-se à época o papel crescente das usinas fotovoltaicas no parque gerador local, com necessidade de medidas específicas para acomodar a natureza intermitente desta fonte na previsão e despacho da operação elétrica. O relatório comparou a performance, adequabilidade e aplicação das metodologias de previsão por persistência, imagens de céu completo, imagens de satélite e previsão numérica do tempo com o modelo *North American Mesoscale Forecast System* (NAM). Concluiu-se que as técnicas que empregavam imagens satelitais e previsões numéricas produziam os melhores resultados para integração nos processos de programação do despacho de curtíssimo prazo (*hour-ahead*) e curto-prazo (*day-ahead*).

As primeiras iniciativas coordenadas internacionalmente para a avaliação e aprimoramento das previsões do recurso solar disponível em solo se deram com o lançamento da Tarefa IEA 46 – Avaliação e Previsão do Recurso Solar (IEA, 2018), operante de junho de 2011 a junho de 2016. O projeto foi dividido em quatro grandes subtarefas: a) aplicações para alta penetração de fontes solares, b) procedimentos de padronização e integração de bancos de dados solares, c) previsão da irradiância solar e d) modelagem avançada de recursos. As universidades envolvidas em cada uma das 11 atividades programadas pertenciam a países

européus ou norte-americanos, onde os ciclos de investimento, desenvolvimento e adoção da tecnologia ocorreu precocemente. O projeto foi capaz de produzir guias importantes para a definição das melhores práticas na coleta, armazenamento e uso de dados solares, culminando em uma nota técnica com as melhores práticas da indústria (NREL, 2017); assim como na integração de dados obtidos de medições em solo com informações derivadas de simulações numéricas, com relatório específico para este detalhamento (IEA, 2015). Contribuições relevantes também foram e continuam sendo publicadas pelo Programa de Sistemas de Potência Fotovoltaicos da IEA – IEA PVPS. Em janeiro de 2013, no âmbito da Tarefa 14 – Alta Penetração de Sistemas Fotovoltaicos em Redes Elétricas, o grupo publicou um relatório (PELLAND *et al.*, 2013) do estado da arte em previsões fotovoltaicas e solares. Quatro anos depois, em 2017, teve início a Tarefa 16 – Recurso Solar para Aplicações em Larga Escala e Alta Penetração, com organização, subtarefas e objetivos muito semelhantes àqueles previstos pela Tarefa IEA 46.

Figura 22 - Limites de aplicabilidade de cada técnica preditiva segundo diversos autores. Abaixo, visão proposta por INMAN *et al.* (2003). Acima e à esquerda, proposição de DIAGNE *et al.* (2013). Acima e à direita, delimitação conforme ANTONANZAS *et al.* (2016).

Fonte: INMAN *et al.* (2013), DIAGNE *et al.* (2013) e ANTONANZAS *et al.* (2016).

Desde então um bom número de revisões bibliográficas deste tema foram publicadas, construindo uma coletânea de trabalhos, resultados e comparações de performance entre as diversas metodologias e técnicas empregadas, destaca-se neste âmbito as publicações de INMAN *et al.* (2013), DIAGNE *et al.* (2013), ANTONANZAS *et al.* (2016) e RAZA *et al.* (2016). Dada a riqueza de informações reunidas, recomenda-se a leitura direta destas referências para o entendimento dos pormenores de cada pesquisa; este trabalho se limitará a apresentar uma análise em conjunto dos diversos estudos e as conclusões em comum dela retiradas. A primeira grande conclusão é que não existe uma alternativa absolutamente superior às demais, o emprego de uma ou outra técnica preditiva está intimamente associado à resolução espacial e temporal desejada, assim como aos dados disponíveis. A figura 22 apresenta a adequabilidade de cada metodologia em função do horizonte de previsão e da escala espacial desejada, corroborando com a conclusão supracitada.

Outro ponto comum entre as revisões bibliográficas diz respeito ao modo como a comparação de desempenho das alternativas deve ser realizada: considerando um mesmo horizonte de previsão e com uma mesma métrica de avaliação. Este alinhamento advém do esforço para a padronização das informações proposta na Tarefa IEA 46. De fato, o único estudo revisional anterior a este processo, apresentado em KLEISSL (2009), apresenta a compilação de resultados em forma tabular, sendo necessária a adição da métrica específica utilizada em cada estudo e comentários adicionais para efetivamente se construir uma base comparativa. Os estudos posteriores ao procedimento de padronização, em sua maioria, passam a adotar como métrica principal a raiz do erro médio quadrático (RMSE) aferido a cada horizonte de previsão. Ademais, os autores se propuseram a definir uma metodologia de referência (benchmark), a qual pode representar o procedimento de previsão mais comum, mais simples de se implementar ou com desempenho a ser superado. Os resultados de cada técnica revisada são comparados a esta referência a partir de um índice de habilidade preditiva (skill score – ss), que aponta ganhos ($ss > 0$) ou perdas ($ss < 0$) na previsibilidade em razão da adoção da metodologia avaliada. Desta forma também é possível a intercomparação direta das diversas técnicas. As equações (3.9) e (3.10) detalham o cálculo destas métricas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} \quad (3.9)$$

$$ss = \frac{score_{prev} - score_{ref}}{score_{perfect} - score_{ref}} \approx 1 - \frac{RMSE}{RMSE_p} \quad (3.10)$$

Em geral, utiliza-se o desempenho da previsão por persistência como referência para a análise da adequabilidade e valor dos demais métodos preditivos. A previsão por persistência assume que a condição a ser verificada no próximo instante deve ser a mesma verificada no momento anterior e, apesar de possuir uma definição simples, abre margem para duas possibilidades de interpretações. No primeiro caso o termo “condição” seria entendido como o valor literal obtido do registro, de forma que o mesurando esperado para o próximo intervalo de medição seria idêntico ao último valor registrado. ANTONANZAS *et al.* (2016) sugerem distinguir estes casos com a terminologia persistência ingênua (*naive*), uma vez que sua aplicabilidade é restrita a séries temporais estacionárias, sendo somente adequada no tratamento de previsões intra-horárias. No segundo caso o termo “condição” poderia ser interpretado em respeito à variabilidade natural diária do recurso solar, entendido como a manutenção do índice de claridade/transmitância registrado. Para esta situação foi sugerido a distinção terminológica de persistência inteligente (*smart*). A depender do estudo revisional, uma ou outra forma de persistência pode ter sido selecionada como referência, impedindo que os resultados de todos sejam apresentados conjuntamente sem o devido cuidado. A figura 23 reúne as compilações de resultados levantados em INMAN *et al.* (2013) e ANTONANZAS *et al.* (2016), projetando os índices de habilidade preditiva de um grande número de publicações em função do horizonte de previsão. Observa-se que os ganhos obtidos não ultrapassam o valor de 50% do erro RMSE da referência de cálculo e variam significativamente entre um estudo e outro.

Figura 23 - Habilidade preditiva de diversas técnicas empregadas em função do horizonte de previsão conforme estudos revisionais de INMAN *et al.* (2013) (esquerda) e ANTONANZAS *et al.* (2016) (direita).

Fonte: INMAN *et al.* (2013) e ANTONANZAS *et al.* (2016).

Uma última conclusão derivada de todos estes estudos revisionais é de que o futuro da previsibilidade de curtíssimo prazo, com horizonte de previsão entre 1 minuto e poucas horas à frente, reside na implementação de métodos híbridos. São métodos que procuram reconhecer o

horizonte de maior afinidade de cada técnica empregada, priorizando aquelas que oferecem os melhores resultados. Para este horizonte de curtíssimo prazo as técnicas que ganham maior destaque são: persistência, imagens de céu-completo com rastreamento de nuvens, imagens de satélite com rastreamento de nuvens e redes de monitoramento terrestre. Já o futuro da previsibilidade de curto prazo, com horizonte de previsão de poucas horas e até alguns dias, continuará dependente de avanços em modelos de previsão numérica do tempo.

Neste sentido, pode-se citar o projeto Sun4Cast® Solar Power Forecasting System como um exemplo recente dos esforços empregados no sentido de aumentar a previsibilidade dos recursos e produção de energia solar para todos os horizontes de interesse (HAUPT *et al.*, 2016). O sistema pode ser dividido em quatro módulos principais: a) previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*); b) previsão de curto-prazo (*day-ahead*); c) conversão em potência (*power*) e d) previsão probabilística da produção (*probabilistic power*).

O módulo curtíssimo prazo inclui a hibridização das técnicas de imageamento completo do céu – TSICast; modelos estatísticos e de inteligência artificial – StatCast; duas técnicas distintas para análise de imagens de satélite e mapeamento do movimento de nuvens – CIRACast e MADCast; uma aplicação de modelagem numérica alimentada pelas condições de nebulosidade estimadas por satélite – MADWRF; e uma aplicação de modelagem numérica com aprimoramentos desenvolvidos especificamente para a previsão do recurso solar em curtíssimo prazo – WRF-SolarNow. Os resultados são reunidos em um integrador e disponibilizados em intervalos de 15 minutos.

O módulo de curto-prazo inclui a previsão da irradiância por conjunto utilizando os modelos numéricos de previsão do tempo de diversos centros de excelência em meteorologia, assim como uma versão do modelo WRF com aprimoramentos desenvolvidos especificamente para a previsão do recurso solar. Os resultados são combinados em um módulo integrador – DICAST, que corrige individualmente o viés preditivo de cada modelo utilizando metodologia de Tratamento de Viés Estatístico Dinâmico e em seguida determina a ponderação para cada intervalo de tempo à frente, produzindo uma previsão de consenso. A base de dados amostrais para este processamento ficou definida em 90 dias. Os resultados são disponibilizados em base horária, interpolados para intervalos de 15 minutos e agregados aos resultados do módulo de curtíssimo prazo antes de serem alimentados à rotina que implementa a conversão da irradiância em potência.

O módulo de potência emprega técnicas estatísticas para adequar localmente os processos de conversão da energia solar com base no pareamento dos dados de irradiância e potência disponíveis. Segundo os autores, o emprego de modelos físicos de conversão não permitiria o ajuste de características de perdas locais comumente presentes nos sítios de cada planta fotovoltaica como padrões de sombreamento e sujidade dos painéis. Outro ponto levantado diz respeito à dificuldade de obtenção de todo o conjunto de dados necessários para uma representação física adequada de todas as plantas que se queira modelar, incluindo a possibilidade de que os proprietários não estejam dispostos a compartilhar informações sensíveis de seus projetos. A modelagem em base puramente estatística permite contornar estes possíveis problemas, necessitando inicialmente apenas de dados de irradiância e produção locais para que possa ser aplicada. Entretanto, verificou-se a necessidade de incluir também alguma outra variável que permitisse a identificação temporal ou sazonal para que os resultados do modelo obtido fossem mais apurados. Informações sobre a semana, dia e hora de previsão, elevação e azimuth solar foram empregados em conjunto com os dados de irradiância e em combinações distintas para cada modelo/planta.

Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema Sun4Cast® Solar Power Forecasting System.

Fonte: HAUPT *et al.* (2016).

Por fim, o módulo de previsão probabilística procura identificar períodos de similaridade entre a previsão atual e previsões históricas a partir de um conjunto restrito de variáveis preditoras. Com isso se produz a premissa de que a incerteza associada à previsão atual pode ser obtida dos erros observados nos períodos do passado em que a similaridade das previsões ocorreu. A realimentação destas incertezas no módulo de potência permite a construção de um resultado probabilístico para a produção esperada da planta em questão. A figura 24 apresenta um diagrama com o fluxo de informações obtidas, processadas e produzidas em todos os quatro módulos descritos.

A maior parte dos esforços no projeto Sun4Cast® foi direcionado para a produção de previsões pontuais, direcionadas a empreendimentos solares comerciais de maior porte. Entretanto, em situações de geração solar distribuída, na qual as informações de irradiância e produção individual são muito provavelmente indisponíveis, a sua aplicação não é possível. No Brasil a indisponibilidade de dados individuais também pode ser uma realidade para usinas de grande porte. Há situações em que diversas usinas estão conectadas à Rede Básica em um único ponto de conexão e a informação obtida remotamente pelo ONS seja referente a todo o conjunto, como no caso de usinas classificadas na tipologia II-C.

Existe também usinas fotovoltaicas classificadas na tipologia III, prevista para centrais geradoras que não participam do processo de programação e despacho centralizado, são autônomas em seu planejamento e operação e não possuem obrigatoriedade de vínculo ou relacionamento com o ONS. Não seria exagero inferir que a ausência de relacionamento com o operador implica na ausência de dados para modelagem. As figuras 25 e 26 apresentam uma noção da capacidade instalada de usinas fotovoltaicas que dispensam relacionamento com o operador, conforme levantamento em maio de 2020.

Figura 25 - Potência instalada de usinas fotovoltaicas operação comercial no SIN, por classificação.

Potência Instalada (MW)					
Tipo I	Tipo II-B	Conjuntos	Total ONS	Tipo III	Total
0,00	30,00	2.585,89	2.615,89	2.921,05	5.536,94

Fonte: Boletim Mensal de Geração Solar 2020-05, ONS.

Figura 26 - Potência instalada de usinas fotovoltaicas classificadas na modalidade de operação Tipo III – sem relacionamento com o ONS.

Fonte: Boletim Mensal de Geração Solar 2020-05, ONS.

Portanto, seria necessário implementar também métodos preditivos regionais, que possibilitem a aglomeração das características de disponibilidade do recurso solar e de produção por área de interesse. Um estudo recente que possibilita esta abordagem foi publicado no âmbito da Tarefa IEA PVPS 16, comparando a capacidade preditiva solar regional para três localidades distintas na Europa (IEA, 2020). A primeira região modelada engloba uma área de 1.400 km² e 150 sistemas fotovoltaicos na província holandesa de Utrecht. O segundo caso estudado envolvia a produção regional de seis zonas de mercado italianas, com extensão territorial que variam entre 24.000 e 119.000 km². O último caso procurou avaliar a possibilidade de se prever a produção de toda a Itália, em uma área de controle de 300.000km². A técnica empregada sintetiza a produção de toda a área de interesse em uma única planta virtual, a qual é alimentada pelo valor médio do recurso solar disponível regionalmente. A principal vantagem desta alternativa é a possibilidade de se obter previsões confiáveis sem qualquer detalhe individual das instalações, necessitando somente de sua capacidade total instalada e localização da área de interesse.

O estudo revisa seis metodologias distintas para a previsão regional do recurso solar, cada uma com particularidades distintas no tratamento e agregação dos dados de entrada e saída. Todas as estratégias envolvem algum tipo de otimização estatística, seja por minimização de erros quadráticos, redes neurais artificiais, aprendizado de máquina, regressões lineares múltiplas, análise de componentes principais e regressão quantílica. Os resultados de todas as alternativas são combinados para formar uma única previsão por conjunto. Três formas de combinação foram avaliadas: média simples, média ponderada com base nos melhores membros de cada alternativa e média ponderada determinada a partir de um algoritmo de rede neural não linear. A figura 27 retrata os resultados produzidos para a modelagem de todo o

território italiano como uma única planta virtual em um diagrama de Taylor, onde são apresentadas de uma única vez as métricas de desvio padrão normalizado, coeficiente de correlação de Pearson e erro RMSE percentual. Verifica-se que as técnicas individuais demonstraram ganhos expressivos na habilidade preditiva, com erro RMSE percentual entre 10-20% do recurso em solo enquanto a previsão por persistência apresentou um valor de superior a 35%. Houve pouca alteração no desvio padrão normalizado das previsões, os índices se mantiveram na faixa 0,9-1,1. Os coeficientes de correlação linear apresentaram valores bastante elevados, com índice R superiores a 0,94. O emprego de técnicas de previsão por conjunto possibilitou um ganho ainda maior, com índices de habilidade preditiva superiores a 43% em todas as metodologias de combinação exploradas. A técnica que faz uso de redes neurais para determinar os coeficientes de combinação das previsões foi a que possibilitou maiores benefícios, com índices de habilidade preditiva superiores a 50% quando comparada à persistência.

Figura 27 - Desempenho individual das alternativas de modelagem da previsão solar para toda a Itália (acima) e ganhos preditivos com o emprego das técnicas de previsão por conjunto (abaixo).

Fonte: IEA (2020).

Destaca-se aqui a metodologia batizada com o nome de Modelo Físico Determinístico, a qual possui grande potencial para adaptação em vista da realidade de dados disponíveis no Brasil. A planta virtual equivalente é determinada em um procedimento prévio, no qual os dados históricos de irradiância média regional são confrontados com modelagens parametrizadas para usinas de capacidade instalada normalizada unitária e arranjos técnicos diversos, obtidas de um software especializado, Sandia Array Performance Model (SAPM). O arranjo equivalente ótimo corresponde àquele que minimiza o valor do erro RMSE obtido deste confronto. Da configuração técnica equivalente se retira o fator de performance normalizado para a usina, assim como os ângulos ótimos de inclinação e orientação dos módulos virtuais. Calcula-se o recurso total incidente sobre o plano dos módulos equivalentes em função destes ângulos e da IGH prevista. A estimativa da energia produzida leva em conta o valor do recurso incidente, da temperatura do ar prevista, das demais características técnicas equivalentes da usina virtual e da capacidade instalada total do parque gerador por ela modelado. Um último fator de correção é aplicado para levar em conta perdas por degradação ou elétricas não consideradas na modelagem SAPM.

O panorama internacional do estado da arte no tema da previsibilidade solar apresenta um ritmo acelerado de publicações nos últimos anos, com destaque aos trabalhos de coordenação de pesquisas realizados pela Agência Internacional de Energia. Em comparação, a produção acadêmica brasileira neste tema se mostra incipiente, especialmente na última década, quando os maiores avanços metodológicos e computacionais foram produzidos. É possível que esta situação seja resultado da adoção mais tardia das tecnologias solares no país; da incerteza regulatória decorrente desta adoção; da ausência de uma base ampla de dados solarimétricos de qualidade; da redução do fluxo de financiamentos em projetos de pesquisa, especificamente neste tema ou de forma geral; ou por todos estes fatores em conjunto. De qualquer maneira, não é possível simplesmente importar a experiência internacional e aplicá-la em território brasileiro, os dados e recursos necessários não estão disponíveis. As metodologias devem ser entendidas em profundidade para que possam ser feitas as adaptações necessárias para adequar os procedimentos à realidade científica local. Parte do esforço empregado neste trabalho vai diretamente neste sentido.

4. METODOLOGIA

4.1. Avaliação da qualidade dos dados solarimétricos da estação do IEE

A estação meteorológica está situada nas dependências do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente – LSF/IEE, interna ao campus principal da Universidade de São Paulo (USP), no município de São Paulo, SP, Brasil. Sua localização geográfica é dada pela altitude aproximada de 745 m e pelas coordenadas ($-23,558964^{\circ}$ S, $-46,735137^{\circ}$ W) e inserida na zona horária internacional correspondente a UTC-3, conforme figura 28. Está equipada com sensores de temperatura ambiente e umidade relativa do ar Campbell Scientific-Vaisala modelo HPM-45C, destacado na figura 28 em caixa de borda laranja, cujas incertezas de medição figuram na faixa de 0,5% para temperaturas entre -40°C e 60°C ; na faixa de 3% para a umidade relativa acima de 90% e de 2% abaixo deste valor. Também está equipada com um pluviômetro Young do tipo basculante, modelo 52203, destacado em caixa verde.

Figura 28 - A estação solarimétrica do LSF.

Elaboração própria.

Também compõe o conjunto instrumental anemômetros Campbell Scientific R.M. Young Wind Monitor 05103, com erro máximo de 0,3 m/s na determinação da velocidade do vento e de 3° na definição de sua direção. A estrutura suporta 3 piranômetros do tipo Kipp & Zonen CM11: o primeiro encoberto por anel de sombreamento Kipp & Zonen CM121B para registro da irradiância horizontal difusa, o segundo descoberto e instalado para medição da irradiância horizontal global, e o terceiro e último instalado sobre superfície inclinada com angulação de 27°. O anemômetro e piranômetros instalados são reconhecidos nos destaques em caixa amarela e azul da figura 28. Os instrumentos solarimétricos são de classe padrão secundária e possuem resolução máxima de 1 W/m². Um barômetro Young modelo 61302V e o sistema de *data-logging* estão acondicionados em um painel de fácil acesso, destacado em vermelho. A coleta de dados é realizada automaticamente a partir do sistema CR10X da Campbell Scientific, com erro máximo de registro em torno de 0,1% para temperaturas de operação entre -25°C e 50°C. Os dados são medidos a cada 10 segundos, integralizados e registrados em intervalos horários e diários.

O laboratório disponibilizou o histórico de medições da estação solarimétrica planilhado em dois arquivos excel com períodos de medições distintos: o primeiro referente ao intervalo entre julho de 2010 e junho de 2015 e o segundo referente ao intervalo entre junho de 2015 e fevereiro de 2019. Ambas planilhas apresentam registros horários de temperatura, umidade relativa, velocidade média do vento e irradiação global horizontal, irradiação difusa e irradiação global sobre plano inclinado. A planilha referente ao intervalo de medições mais recentes também inclui informações de pluviosidade e pressão barométrica. A figura 29 traz um trecho extraído diretamente da planilha de registros em base horária para o segundo intervalo de medições.

Todo conjunto de medições obtidas de estações de coleta de dados ambientais automática está sujeito a apresentar períodos de indisponibilidade temporária de alguns dos medidores, medições falhas, com valores anômalos e potencialmente comprometidos. Por este motivo é fundamental que a avaliação de qualidade e consistência dos dados obtidos seja realizada antes de qualquer análise mais aprofundada. Para este estudo em particular, o interesse maior reside em consistir os dados de medições solarimétricas obtidos, passo necessário em razão da maior complexidade e incerteza associada à medição de dados solarimétricos quando comparados às demais variáveis atmosféricas e essencial para a comparação e validação cruzada entre dados observados em solo e derivados de simulações com modelos de previsão numérica do tempo, conforme indicações em RELVA (2017) e SILVA *et al.* (2014). Em particular, VIGNOLA *et al.* (2012) apontam que toda medida de

irradiação global horizontal possui um nível de incerteza intrinsecamente maior que aquele verificado para a irradiação direta normal, que decorre da ausência de instrumentos primários absolutos que realizem a caracterização direta e acurada da irradiância global ou de sua componente difusa.

Figura 29 - Trecho de medições em base horária disponibilizadas pelo LSF-IEE.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Matriz	Ano	Data	Dia Juliano	Hora	Irradiação Global horária (horizontal) kWh/m ²	Irradiação Difusa horária kWh/m ²	Irradiação Global horária (Inclinada 27°) kWh/m ²	Temperatura ambiente °C	Umidade Relativa %	Velocidade média do vento m/s	Pressão Barométrica mm Hg	Pluviômetro mm
1													
14526	101	2017	06/02/2017	37	400	0	0	0	20,53	91	0	759	0
14527	101	2017	06/02/2017	37	500	0	0	0	20,4	92	0,005	759	0
14528	101	2017	06/02/2017	37	600	0,001	0,001	0,001	20,34	92,4	0,001	760	0
14529	101	2017	06/02/2017	37	700	0,084	0,023	0,035	23,52	77,8	0,081	760	0
14530	101	2017	06/02/2017	37	800	0,313	0,042	0,184	25,54	68,49	0,262	761	0
14531	101	2017	06/02/2017	37	900	0,553	0,055	0,417	26,72	60,31	0,448	761	0
14532	101	2017	06/02/2017	37	1000	0,76	0,072	0,638	28,47	58,23	0,667	761	0
14533	101	2017	06/02/2017	37	1100	0,918	0,108	0,818	29,4	55,2	0,906	761	0
14534	101	2017	06/02/2017	37	1200	1,005	0,15	0,939	30,25	52,69	0,966	760	0
14535	101	2017	06/02/2017	37	1300	0,871	0,24	0,82	31,29	48,48	0,981	759	0
14536	101	2017	06/02/2017	37	1400	0,92	0,354	0,854	31,28	45,42	0,965	759	0
14537	101	2017	06/02/2017	37	1500	0,218	0,166	0,219	30,43	50,06	0,462	759	0
14538	101	2017	06/02/2017	37	1600	0,347	0,244	0,328	28,89	65,6	0,912	758	0
14539	101	2017	06/02/2017	37	1700	0,04	0,032	0,032	25,66	77,7	0,925	759	1
14540	101	2017	06/02/2017	37	1800	0,005	0,004	0,003	21,21	89	0,672	760	11,2
14541	101	2017	06/02/2017	37	1900	0	0	0	20,59	93,5	0,379	760	10,8
14542	101	2017	06/02/2017	37	2000	0	0	0	20,6	93,9	0,226	760	1,1
14543	101	2017	06/02/2017	37	2100	0	0	0	21,11	94,6	0,015	761	0,1
14544	101	2017	06/02/2017	37	2200	0	0	0	21,14	94,9	0,027	761	0
14545	101	2017	06/02/2017	37	2300	0	0	0	20,87	95	0	761	0
14546	101	2017	06/02/2017	37	2400	0	0	0	20,77	95,3	0	760	0,1
14547	101	2017	07/02/2017	38	100	0	0	0	20,4	95,3	0	760	0
14548	101	2017	07/02/2017	38	200	0	0	0	20,02	95,4	0	760	0
14549	101	2017	07/02/2017	38	300	0	0	0	19,39	95,7	0,001	760	0
14550	101	2017	07/02/2017	38	400	0	0	0	19,16	95,7	0	760	0
14551	101	2017	07/02/2017	38	500	0	0	0	19,03	95,8	0	760	0,1
14552	101	2017	07/02/2017	38	600	0,001	0,001	0,001	19,36	95,8	0	760	0
14553	101	2017	07/02/2017	38	700	0,096	0,044	0,051	21,09	95,8	0,003	761	0
14554	101	2017	07/02/2017	38	800	0,19	0,123	0,146	21,45	95,6	0,036	761	0
14555	101	2017	07/02/2017	38	900	0,481	0,153	0,375	22,55	93,4	0,096	762	0
14556	101	2017	07/02/2017	38	1000	0,614	0,232	0,524	26,31	68	0,531	762	0
14557	101	2017	07/02/2017	38	1100	0,657	0,321	0,603	27,87	64,41	0,6	762	0
14558	101	2017	07/02/2017	38	1200	0,814	0,342	0,76	28,83	57,6	0,616	761	0
14559	101	2017	07/02/2017	38	1300	0,634	0,254	0,598	28,79	57,98	0,688	761	0
14560	101	2017	07/02/2017	38	1400	0,758	0,302	0,734	29,3	59,43	0,73	760	0
14561	101	2017	07/02/2017	38	1500	0,622	0,309	0,606	28,11	62,62	1,226	761	0
14562	101	2017	07/02/2017	38	1600	0,491	0,182	0,482	26,01	67,98	1,225	761	0
14563	101	2017	07/02/2017	38	1700	0,423	0,189	0,416	26,78	68,2	1,075	760	0
14564	101	2017	07/02/2017	38	1800	0,122	0,085	0,119	25,19	70,8	0,863	761	0
14565	101	2017	07/02/2017	38	1900	0,016	0,013	0,015	23,78	81,6	0,765	761	0
14566	101	2017	07/02/2017	38	2000	0	0	0	23,06	85,7	0,843	762	0

Fonte: LSF-IEE.

Em geral, os processos de análise de qualidade de dados solarimétricos envolvem a comparação dos valores registrados com limites físicos amplos, que permitem a sinalização da possibilidade física do evento observado; limites estatísticos adequados ao local, que permitem a sinalização da raridade do evento observado; e verificação de consistência das medições em confronto com outros sensores ou com resultados obtidos de modelos conceituais e/ou paramétricos (SILVA *et al.*, 2014; RELVA, 2017). A metodologia empregada deve ser compatível com a resolução temporal dos dados disponíveis. Por exemplo, os testes propostos segundo a Baseline Surface Radiation Network (BSRN) e rede SONDA são aplicáveis para dados integrados a cada minuto, portanto, inadequados para o estudo em questão.

MAXWEL *et al.* (1993) promoveram uma metodologia mais oportuna, adaptável para qualquer intervalo de registro de dados. A técnica se fundamenta na intercomparação dos

valores de irradiação medidos em solo, normalizados com base no recurso extraterrestre disponível para uma superfície de mesma orientação. Desta forma ficam definidos:

$$k_t = GHI/GHI_o = GHI/I_o \cos \theta \quad (5.1)$$

$$k_n = DNI/DNI_o = DNI/I_o \quad (5.2)$$

$$k_d = DHI/DHI_o = DHI/I_o \cos \theta \quad (5.3)$$

onde I_o corresponde à irradiância solar ao topo da atmosfera, θ representa o ângulo de incidência solar e k_t , k_n e k_d correspondem aos índices de transmitância de irradiação global horizontal, direta normal e difusa global, respectivamente. Denomina-se espaço-K o gráfico de dispersão que inter-relaciona os índices derivados dos dados de medição, os quais, via de regra, devem satisfazer a igualdade explicitada na equação (5.4).

$$GHI = DNI \cos \theta + DHI \rightarrow k_t = k_n + k_d \quad (5.4)$$

A análise do espaço-K sobre uma base de dados históricos suficientemente robusta permite definir limites claros para identificação de dados de qualidade suspeita ou que não correspondam às condições locais. A categorização das medidas obtidas, por exemplo, em razão do índice de massa de ar ou ângulo zenital estimados para cada registro, auxilia na determinação de zonas ainda mais restritas para a aceitação dos dados observados. A separação dos dados em função do mês de registro e a indicação de zonas de maior ou menor concentração de pares de valores (k_t , k_n) são outras formas de categorização úteis na avaliação. A figura 30 retrata o fluxograma empregado para a construção desta metodologia de avaliação, cujo passo-a-passo é descrito brevemente a seguir: (a) obtenção dos dados solarimétricos; (b) cálculo da geometria Sol-Terra-plano incidente para cada registro obtido; (c) cálculo do recurso solar extraterrestre correspondente a cada registro obtido; (d) cálculo dos índices de transmitância relevantes; (e) sinalização de suspeição de dados referentes à ângulos zenitais superiores a 80°; (f) separação dos dados em função do mês civil; (g) construção dos gráficos no espaço-K; (h) definição de critério de suspeição dos registros; (i) contabilização do percentual de registros suspeitos; (j) redefinição de critério e recontabilização de registros suspeitos enquanto a massa de dados assinalada com suspeição não for inferior a 5% do conjunto representado no espaço-K.

Figura 30 - Fluxograma empregado na avaliação da qualidade dos dados solarimétricos

Elaboração própria, adaptada de MAXWELL *et al.* (1993).

4.2. Previsão numérica da irradiação solar pelo modelo GFS

O modelo Global Forecast System – GFS é um modelo de previsão numérica produzido pelo centro americano *National Centers for Environmental Prediction* – NCEP, de cobertura global, utilizado tanto no fornecimento de previsões determinísticas quanto probabilísticas para o estado futuro do tempo. O GFS é composto por quatro modelos distintos e acoplados entre si, são eles: um modelo atmosférico, um modelo oceânico, um modelo terrestre e um modelo de geleiras marinhas (NOAA, 2019). A partir da interação entre estes quatro sistemas que o modelo global é capaz de descrever a condição do tempo com acuracidade; a interconexão entre eles determina o núcleo dinâmico do modelo. Não obstante, a projeção futura das equações do núcleo dinâmico não é capaz de fornecer todo o conjunto de variáveis meteorológicas de interesse; alguns dos efeitos que se deseja simular ocorrem em escalas espaço-temporais reduzidas, as quais o modelo dinâmico simplesmente não consegue contemplar. Nestes casos a solução adotada é a inclusão de parametrizações físicas e microfísicas com descrições mais precisas destes eventos. UCAR (2009) propõe a seguinte lista como exemplos de processos físicos que necessitam de parametrizações: transferência radiativa, condensação, turbulência, convecção, fluxo de calor sensível, precipitação, neve, evaporação, efeitos da cobertura vegetal, topografia, entre outros.

A resolução da transferência radiativa no modelo GFS é realizada a partir do método de aproximação por dois-fluxos e parametrização dos efeitos atenuantes das espécies gasosas mais relevantes a partir de versões modificadas e otimizadas do Modelo Global de Transferência Radiativa Rápida para Onda Longa (RRTMG_LW v2.3) e Onda Curta (RRTMG_SW v2.3),

desenvolvidas pela empresa *Atmospheric and Environmental Research* (AER). Métodos de transferência radiativa rápida foram desenvolvidos por MLAWER *et al.* (1997), especificamente para produzir resultados em tempo hábil, promovendo enorme velocidade no processamento da integração da equação de transferência radiativa ao reduzir o domínio do espectro eletromagnético a um número finito de comprimentos de onda durante o procedimento de cálculo do coeficiente de absorção espectral para um dado componente atmosférico. Isto é possível matematicamente a partir do emprego de uma função de probabilidade acumulada para o coeficiente de absorção e do mapeamento das relações entre o domínio espectral original e o domínio probabilístico. Este mapeamento é denominado correlação-k e sua visualização fica explicitada na figura 31.

Figura 31 - Coeficientes de absorção do dióxido de carbono para uma camada atmosférica ($p=507$ mbar), durante o verão em latitudes médias no intervalo espectral de $630\text{-}700\text{cm}^{-1}$ como função do número de onda (a) e após reordenação com a função de probabilidade acumulada (b).

Fonte: Adaptado de MLAWER *et al.* (1997).

O algoritmo de onda longa seleciona de forma não uniforme 140 pontos da função de probabilidade acumulada para 16 bandas espectrais enquanto o de onda curta inclui 224 pontos em 14 bandas espectrais. A versão do algoritmo de onda curta adaptada para emprego em Modelos de Circulação Global (GCM) utiliza de um conjunto reduzido de pontos, 112. Para garantir a qualidade dos cálculos a seleção das bandas espectrais é feita minuciosamente, considerando quais os componentes atmosféricos absorvedores principais e secundários por banda e em qual nível atmosférico eles usualmente se encontram. As figuras 32 e 33 apresentam o detalhamento das espécies químicas e bandas espectrais para cada algoritmo.

Figura 32 - Bandas espectrais e componentes absorvedores relevantes para o algoritmo RRTM-LW/RRTMG-LW.

Band Number	Wavenumber Range, cm^{-1}	Species Implemented in RRTM			
		Lower* Atmosphere		Middle/Upper† Atmosphere	
		Key Species	Minor Species	Key Species	Minor Species
1	10–250	H ₂ O		H ₂ O	
2	250–500	H ₂ O		H ₂ O	
3	500–630	H ₂ O, CO ₂		H ₂ O, CO ₂	
4	630–700	H ₂ O, CO ₂		CO ₂ , O ₃	
5	700–820	H ₂ O, CO ₂	CCl ₄	CO ₂ , O ₃	CCl ₄
6	820–980	H ₂ O	CO ₂ , CFC-11,‡ CFC-12	...	CFC-11,‡ CFC-12
7	980–1080	H ₂ O, O ₃	CO ₂	O ₃	
8	1080–1180	H ₂ O	CO ₂ , CFC-12, CFC-22‡	O ₃	
9	1180–1390	H ₂ O, CH ₄		CH ₄	
10	1390–1480	H ₂ O		H ₂ O	
11	1480–1800	H ₂ O		H ₂ O	
12	1800–2080	H ₂ O, CO ₂		...	
13	2080–2250	H ₂ O, N ₂ O		...	
14	2250–2380	CO ₂		CO ₂	
15	2380–2600	N ₂ O, CO ₂		...	
16	2600–3000	H ₂ O, CH ₄		...	

*1050–96 mbar except for band 8 (1050–317 mbar).

†96–0.01 mbar except for band 8 (317–0.01 mbar).

‡Optical depths of these halocarbons are increased to account for other absorption bands of these species that are not implemented.

Fonte: Mlawer *et al.* (1997).

Figura 33 - Bandas espectrais e componentes absorvedores relevantes para o algoritmo RRTM-SW/RRTMG-SW.

Band #	Wavenumber Range	Lower Atm (Key)	Lower Atm (Minor)	Mid/Up Atm (Key)	Mid/Up Atm (Minor)
16	2600-3250	H ₂ O, CH ₄		CH ₄	
17	3250-4000	H ₂ O, CO ₂		H ₂ O, CO ₂	
18	4000-4650	H ₂ O, CH ₄		CH ₄	
19	4650-5150	H ₂ O, CO ₂		CO ₂	
20	5150-6150	H ₂ O	CH ₄	H ₂ O	CH ₄
21	6150-7700	H ₂ O, CO ₂		H ₂ O, CO ₂	
22	7700-8050	H ₂ O, O ₂		O ₂	
23	8050-12850	H ₂ O		—	
24	12850-16000	H ₂ O, O ₂	O ₃	O ₂	O ₃
25	16000-22650	H ₂ O	O ₃	—	O ₃
26	22650-29000	—		—	
27	29000-38000	O ₃		O ₃	
28	38000-50000	O ₃ , O ₂		O ₃ , O ₂	
29	820-2600	H ₂ O	CO ₂	CO ₂	H ₂ O

Fonte: DTC (2019).

As propriedades ópticas das nuvens são obtidas de dois métodos distintos: (a) diagnóstico, no qual as propriedades ópticas das nuvens são derivadas das previsões de temperatura, pressão e circulação na camada limite; e (b) prognóstico, no qual o conteúdo de condensados é utilizado explicitamente neste cálculo. As propriedades radiativas de nuvens com água condensada são retiradas de HU e STAMNES (1993) para os intervalos de onda curta e longa. Para nuvens com gelo em sua composição, estas propriedades são determinadas em onda curta e em onda longa conforme FU (1996) e FU (1998), respectivamente. A parametrização da transferência radiativa no modelo GFS também emprega a Aproximação

Monte-Carlo para Colunas Independentes (McICA) como forma de mitigar os efeitos de variabilidade em nuvens de grande desenvolvimento vertical (NCEP, 2018). A sobreposição de nuvens é tratada a partir de um método máximo-aleatório, aplicado em ambos algoritmos de onda longa e onda curta.

Em sua implementação operacional, o modelo GFS utiliza valores climatológicos para o aerossol troposférico com uma resolução espacial de 5° tanto na parametrização em onda curta quanto em onda longa (HESS *et al.*, 1998; WMO WCP-112, 1986). Utiliza-se uma formulação generalizada de mapeamento espectral que permite o cálculo das propriedades de diversos componentes aerossóis para cada banda espectral. A simulação de eventos de atividade vulcânica exigiu um esquema de parametrização separado e específico para este fim. A constante solar em onda curta é obtida de uma tabela que engloba os períodos de 1850-2019, para intervalos que extrapolem esta janela se utiliza uma formulação aproximada do ciclo solar com periodicidade de 11 anos. A profundidade ótica total devido ao espalhamento Rayleigh é derivada de dados tabulados por FRÖLICH e SHAW (1980) para cada banda espectral. Calcula-se a contribuição de cada camada vertical com base na diferença de pressão nela presente e na pressão superficial.

O albedo de onda curta é determinado com base em conjunto de dados climatológicos sazonais para cobertura vegetal da superfície construído por BRIEGLEB (1992), com resolução horizontal de 1° (*apud* HOU *et al.*, 2002). Sobre esta base, aplica-se modificação no tratamento da resposta cosseno do albedo para superfícies livres de cobertura de neve, conforme (YANG *et al.*, 2008). A concentração de gases de efeito estufa é retirada da rede global de medição, quando possível, ou de constantes climatológicas. No caso específico do gás carbônico, o valor utilizado deriva da estimativa com base nas observações dos últimos 5 anos; sua distribuição média mensal é retratada em baixa atmosfera (<3km) com uma resolução espacial de 15° enquanto que em alta atmosfera um único valor médio mensal global é adotado (NCEP, 2018).

A qualidade da previsão de irradiação em superfície obtida do modelo GFS não depende somente das parametrizações contidas no módulo de transferência radiativa, é fruto da composição de processos físicos simulados no núcleo dinâmico e todos os demais esquemas de parametrização empregados. Processos convectivos, por exemplo, associados à formação de nuvens, constituem o fator modulador de enorme relevância para o recurso solar disponível em solo. A tabela 1 resume as principais parametrizações físicas implementadas no modelo GFS.

Tabela 1 – Parametrizações presentes na versão operacional do modelo GFS

GFS - Parametrizações			
Módulo	Função Global	Sub-parametrização	Função Específica
Transferência radiativa	Parametrização para os cálculos de transferência radiativa em onda curta e longa	RRTMG_SW v2.3	Propriedades ópticas de espécies gasosas para onda curta
		RRTMG_LW v2.3	Propriedades ópticas de espécies gasosas para onda longa
		CLOUGH <i>et al.</i> (1992)	Absortividade do vapor d'água
		HU e STAMNES (1993)	Cálculo de propriedades ópticas de nuvens com água em estado líquido
		FU (1996)	Cálculo de propriedades ópticas de nuvens cirrus/gelo para onda curta
		FU (1998)	Cálculo de propriedades ópticas de nuvens cirrus/gelo para onda longa
		EBERT e CURRY (1992)	Cálculo de propriedades ópticas de nuvens de gelo
		McICA	Representação da cobertura de nuvens com grande desenvolvimento vertical na grade do modelo
		HESS <i>et al.</i> (1998) e WMO WCP-112 (1986)	Climatologia e propriedades ópticas de aerossol troposférico
		FRÖLICH e SHAW (1980)	Profundidade óptica devido ao espalhamento Rayleigh
		BRIEGLEB (1992) e YANG <i>et al.</i> (2008)	Albedo em superfície e resposta cosseno
Camada limite planetária	Esquema Híbrido de Fluxo de Massa-Difusividade Turbulenta (HEDMFS). Utilizado para determinar a tendência de difusão vertical de temperatura, umidade e momento através das colunas modeladas, não se limitando à camada limite planetária.	TROEN e MAHRT (1986)	Parametrização de primeira ordem de base
		HONG e PAN (1996)	Implementação do HEDMFS
		HAN e PAN (2011) e HAN <i>et al.</i> (2015)	Aprimoramentos ao HEDMFS
		LOCK <i>et al.</i> (2000)	Inclusão de efeitos de mistura top-down devido a nuvens estratocumulus
		SIEBESMA <i>et al.</i> (2007) e SOARES <i>et al.</i> (2004)	Substituição dos termos de contra-gradiente por esquema de fluxo de massa
Arrasto de onda gravitacional	Arrasto de onda gravitacional por orografia (GWDPS)	ALPERT <i>et al.</i> (1988, 1996)	Descrição básica da parametrização de onda gravitacional por orografia
		LOTT e MILLER (1997)	Inclusão de efeitos de bloqueio por montanhas
		KIM e ARAKAWA (1995)	Arrasto de onda gravitacional na baixa troposfera
		BAINES e PALMER (1990)	Parametrização da orografia em sub-escala a partir dos valores de desvio padrão (HPRIME), anisotropia (GAMMA), inclinação (SIGMA) e orientação geográfica (THETA).
		PIERREHUMBERT (1987)	Parametrização dos efeitos de superfície
	Arrasto de onda gravitacional por convecção (GWDC)	CHUN e BAIK (1998)	Arrasto de onda gravitacional por convecção (CGWD)
		LINDZEN (1981)	Refinamento no cálculo do fluxo de momento
		CHUN <i>et al.</i> (2001, 2004) e JOHANSON (2008)	Testes e implementação do CGWD
Microfísica	Determinar a formação e evaporação de nuvens de água e gelo	ZHAO e CARR (1997)	Classificação de nuvens de gelo ou de água
		SUNDQVIST <i>et al.</i> (1989)	Cálculo da fração de cobertura de nuvens
		RUTLEDGE e HOBBS (1983)	Evaporação de nuvens
		HEYMSFIELD e McFARQUHAR (1996)	Raio efetivo de cristais de gelo
Precipitação	Conversão de água e gelo condensados em precipitação e neve	KESSLER (1969)	Base de métodos para parametrização de precipitação e neve
		LIN <i>et al.</i> (1983)	Autoconversão de nuvem de gelo em neve
		ROGERS (1979)	Detalhamento da microfísica de cristais de neve
		SUNDQVIST (1988)	Evaporação da água precipitante

Convecção Profunda	Scale-Aware Mass-Flux Deep Convection. Versão atualizada do esquema de convecção profunda Arakawa-Schubert Simplificado que considera efeitos atrelados à escala e à presença de aerossóis na formação deste processo convectivo.	ARAKAWA e SCHUBERT (1974)	Base metodológica para o esquema de convecção profunda
		GRELL (1993)	Simplificações, correntes de ar descendentes saturadas e tipo único de nuvem
		PAN e WU (1995)	Implementação no GFS
		HAN e PAN (2011)	Modificações no cálculo do topo de nuvem
		HAN et al. (2017)	Inclusão dos efeitos associados à escala e à presença de aerossóis
Convecção Rasa	Scale-Aware Mass-Flux Shallow Convection. Versão atualizada do esquema de convecção rasa, que considera efeitos atrelados à escala e à presença de aerossóis na formação deste processo convectivo.	HAN e PAN (2011)	Base metodológica para o esquema de convecção rasa
		HAN et al. (2017)	Inclusão dos efeitos associados à escala e à presença de aerossóis
Superfície	Modelo de Superfície NOAH	CHEN et al. (1996), KOREN et al. (1999) e EK et al. (2003)	Base metodológica do modelo de superfície NOAH
		SCHAAKE et al. (1996)	Infiltração e escoamento
Ozônio	Parametrização para a produção e destruição do ozônio atmosférico conforme modelo químico CHEM2D	MCCORMACK et al. (2006)	Produção e destruição do ozônio atmosférico

Elaboração própria.

Os cálculos derivados deste grande conjunto de premissas, metodologias e parametrizações físicas aproximadas que fornecem o fluxo radiativo total em superfície e a divergência do fluxo radiativo vertical. UCAR (2009) afirma que o fluxo em superfície é fundamental para estabelecer o balanço radiativo nesta camada e compreender os estágios iniciais de sistemas convectivos úmidos de grande profundidade. A divergência vertical do fluxo radiativo determina as taxas de aquecimento e resfriamento em cada camada atmosférica, podendo ser responsáveis por efeitos dinâmicos de grande força na formação de nuvens.

As previsões com o modelo GFS são produzidas quatro vezes ao dia, nos horários de 0000 UTC, 0600 UTC, 1200 UTC e 1800 UTC. Os dados utilizados neste estudo foram retirados da versão operacional do modelo GFS 0.25, o qual apresenta resultados agregados em intervalos de 3 horas para antecedência de até 240 horas e agregados em intervalos de 12 horas para o resto do horizonte total de previsão, que é de 384 horas. O modelo engloba toda a

extensão do planeta em uma grade de pontos com resolução horizontal de $0,25^\circ$ e 64 camadas verticais. Os resultados são armazenados em arquivos científicos grib2, sob nomes de variáveis pré-estabelecidas. O NCEP disponibiliza em seu arquivo online o histórico completo de previsões e estados iniciais utilizados desde 15 de janeiro de 2015. Para fins deste estudo o seguinte conjunto de dados foi requisitado para um horizonte máximo de previsão de 48 horas: DSWRF, variável que armazena o valor de irradiância global horizontal média, em Wm^{-1} .

Os resultados obtidos diretamente dos modelos meteorológicos de previsão numérica do tempo são referentes a campos de variáveis e não a previsões pontuais. O pós-processamento destas previsões visa corrigir os vieses passíveis de serem identificados na previsão numérica, de forma a melhor representar as condições e estatística local. Algumas considerações precisam ser levantadas no que diz respeito ao confronto entre dados destas duas qualidades.

Primeiramente, o processo de escalonamento (*downscaling*) dos dados em pontos de grade para um único ponto de interesse necessita ser definido. Alguns estudos optam por utilizar o ponto de grade mais próximo ao local de interesse, por exemplo, GUARNIERI (2006), LIMA (2015) e MARTIN (2011); outros autores entenderam ser mais adequado o uso de alguma técnica de interpolação espacial mais avançada para o confronto entre dados de modelo e observados, vide MURATA (2018) e ALMEIDA (2015). Dois estudos em particular procuraram quantificar os efeitos de suavização espacial nas métricas de desempenho das previsões ao se utilizar subconjuntos distintos de coordenadas no entorno do local de interesse com dimensões $N \times N$ variáveis (PELLAND et al, 2011; LORENZ *et al.*, 2016). Os resultados demonstraram que a configuração ótima é dependente da resolução nativa de cada modelo, mas em todos os casos houve reduções sensíveis nos valores de erros RMSE verificados em casos na qual a média espacial foi aplicada.

Como já mencionado, o modelo GFS apresenta resultados para uma resolução horizontal $0,25^\circ$, que corresponde à distância aproximada de 27-28 km entre dois pontos de grade. Por simplicidade, decidiu-se utilizar somente o ponto referente à coordenada mais próxima da estação solarimétrica do LSF. O efeito prático esperado desta decisão será o de verificar índices de desempenho original potencialmente inferiores; a avaliação do efeito de suavização espacial é deixada como objeto de estudos futuros. Obteve-se os valores previstos e compilados para o ponto de grade correspondente à coordenada ($-23,5^\circ$ S, $-46,75^\circ$ W), cuja distância em relação à estação solarimétricas do IEE é de aproximadamente 10km. A figura 34

permite a visualização da grade ao entorno da cidade universitária da USP, destacando o ponto para o qual as previsões foram retiradas.

Figura 34 - Pontos de grade nativos ao modelo GFS nas proximidades da cidade universitária da USP.

Elaboração própria.

Ademais, verifica-se a necessidade de acondicionamento dos dados também em razão de sua resolução temporal. Os registros de irradiação da estação estão disponíveis em base horária, enquanto os resultados do modelo correspondem à média esperada em um intervalo de 3h. Portanto, duas possibilidades metodológicas são possíveis: agregar os valores observados para intervalos equivalentes ao da previsão ou interpolar os resultados previstos para obter valores em base horária. Neste caso foi possível notar uma preferência pela primeira estratégia; dentre as referências levantadas somente MARTIN (2011) optou pela interpolação temporal dos dados previstos. Neste sentido, a proposta executada no estudo de GUARNIERI (2006), em que os valores de irradiância são integralizados e convertidos em irradiação por período se adequa bem às necessidades presentes.

O confronto direto das informações observadas e previstas será realizado para a irradiação acumulada em 3h, de onde se identificará se a previsão do modelo GFS apresenta algum viés preditivo passível de ser corrigido. O pós-tratamento da previsão visa compensar estas falhas, produzindo uma indicação final aprimorada e com viés removido. O fluxograma que explicita as operações realizadas é apresentado na figura 35.

Figura 35 - Fluxograma do processo de confronto e aprimoramento estatístico da previsão numérica

Elaboração própria.

5. RESULTADOS

5.1. Avaliação de qualidade dos dados da estação solarimétrica do IEE

O gráfico à direita na figura 36 apresenta uma análise inicial do espaço-K verificado na estação solarimétrica do IEE durante o período entre junho de 2015 e fevereiro de 2019. Limitou-se a apresentar somente registros que correspondessem a ângulos zenitais inferiores a 80° , conforme indicação em MAXWELL *et al.* (1993). Os dados foram categorizados por cor em função da densidade de pontos disponíveis no entorno do par (k_t, k_n) , evidenciando um comportamento geral bastante alinhado com a referência bibliográfica. Observa-se que as maiores concentrações de registros ocorrem justamente em zonas que correspondem a situações de céu encoberto e de céu claro.

Figura 36 - Dispersão k_n versus k_t para todo o conjunto de dados da estação Tallahassee entre 1977 e 1980, conforme MAXWELL *et al.* (1993), e para todo o conjunto de dados da estação solarimétrica do IEE entre junho de 2015 e fevereiro de 2019.

Fonte: Adaptado de MAXWELL *et al.* (1993) e elaboração própria.

Após disponibilização dos dados solarimétricos para este estudo, o corpo técnico do LSF advertiu sobre a possibilidade de que as medições da irradiação difusa horizontal apresentassem valores inconsistentes ou inválidos para parte do período de análise, em razão da baixa frequência ou ausência de ajustes na banda de sombreamento. Como a estação não possui um pireliômetro instalado para a determinação do componente direto normal da irradiação solar, os valores do índice k_n precisam ser obtidos com o emprego dos registros de irradiação difusa horizontal e da equação (5.4). Neste sentido, a sinalização prévia de que os

dados disponíveis possuem qualidade duvidosa configura um desafio a mais no âmbito deste trabalho.

Figura 37 - Dispersão kn versus kt dos dados da estação solarimétrica do IEE, discretização mensal.

Elaboração própria.

De fato, a avaliação do espaço-K em base mensal evidenciou um comportamento bastante anômalo para a dispersão de pontos verificada para o mês de março, conforme figuras 37 e 38. Observa-se uma região com grande densidade de pontos com valores k_t elevados e valores k_n reduzidos, ou seja, dados que apresentaram medições de irradiação total elevados e muito próximos à irradiação difusa. Esta situação corresponde exatamente ao comportamento esperado em caso de sombreamento parcial ou nulo do piranômetro aferidor do componente difuso. A análise dos dados ano a ano demonstra que os dados comprometidos são referentes aos anos de 2016 e 2018, principalmente neste último.

Figura 38 - Dispersão k_n versus k_t dos dados da estação solarimétrica do IEE, discretização anual para dados tomados no mês de março.

Elaboração própria.

O processo de avaliação de qualidade proposto em MAXWELL *et al.* (1993) recomenda a sinalização de aferições comprometidas, sugerindo que ao menos 5% de toda a base disponível seja assinalada a fim de minimizar a possibilidade de aceitação de dados ruins. Não obstante, caso a análise fosse limitada ao confronto (k_t, k_n) , o percentual de medições rejeitadas para o mês de março superaria em muito o valor de referência e implicaria em acentuada redução do conjunto amostral com o qual se poderia trabalhar nas etapas subsequentes deste estudo. Uma maneira de contornar esta situação seria a partir do uso dos registros obtidos pelo piranômetro instalado em superfície inclinada na comparação com os dados de irradiação global horizontal. Para tanto, é necessário adaptar a análise do espaço-K, substituindo o índice de transmitância difusa global pelo índice de transmitância global sobre superfície inclinada, conforme equação (5.5), na qual TGI corresponde à medida de irradiação sobre superfície inclinada e θ_s o ângulo de incidência dos raios solares em relação à normal a essa superfície. O cálculo deste ângulo é mais complexo e dependente de propriedades trigonométricas entre β a inclinação da superfície em relação à horizontal, γ o ângulo de orientação em relação ao sul geográfico, δ a declinação solar, φ a latitude local e ω o ângulo horário solar; vide a equação (5.6) retirada de MYERS (2013).

$$k_s = TGI/I_o \cos \theta_s \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (5.6)$$

O cruzamento das medições de irradiação global horizontal com a irradiação sobre plano inclinado para os registros tomados no mês de março demonstra que não houve quebra de consistência nos valores obtidos nestes dois sensores durante todo o período analisado. A figura 39 apresenta a dispersão do espaço-K adaptado para o conjunto completo de registros, que aponta um comportamento típico e bem definido de alinhamento entre as duas grandezas medidas dada a organização da maior parte dos dados no entorno da curva $y=x$. Em teoria, as diferenças entre os valores de k_t e k_s se resumem a: (a) presença de um componente de refletividade do solo na medição sobre o plano inclinado; (b) ausência de uma fração do componente horizontal difuso na medição sobre o plano inclinado; (c) possíveis características anisotrópicas deste componente difuso, alterando o resultado de sua integração sobre hemisférios distintos e (d) diferenças de geometria Sol-plano incidente, definidas pela razão $\cos \theta / \cos \theta_s$.

A definição de limites para os quais se determinam a aceitação ou rejeição dos dados pode ser feita tanto com base em limites teóricos como com base em curvas empíricas. O uso de curvas estritamente empíricas durante a definição dos limites de aceitabilidade dos registros retira a necessidade de se formular premissas específicas para seu confronto com resultados de modelos de referência. Em contrapartida, permanece o problema de se definir critérios para o estabelecimento das curvas limítrofes. Um consenso apresentado em MAXWELL *et al.* (1993) recomenda a individualização dos contornos adotados por estação e por mês. Ademais, recomenda-se consistência na definição do espaço-K para o qual as funções de contorno serão traçadas. Não há como garantir que os mesmos critérios de avaliação de qualidade serão adotados se diferentes curvas de referência forem aplicadas para diferentes espaços radiométricos.

Figura 39 - Dispersão k_s versus k_t dos dados da estação solarimétrica do IEE.

Elaboração própria.

Optou-se pela definição de um critério único de classificação e aceitação dos dados, adequado para qualquer das configurações adotadas. Dados que correspondessem a ângulos de incidência superiores a 80° em relação à superfície horizontal ou em relação à superfície inclinada foram imediatamente rejeitados na avaliação. Em seguida o espaço-K foi dividido em quadrículas de dimensão $1/20$, as quais foram numeradas e ordenadas em razão da densidade de pontos internos a cada uma. Seguindo este ordenamento, as quadrículas com menor densidade foram assinaladas com suspeição, assim como todos os registros nelas enquadrados, até que ao menos 5% do total de pares (k_t, k_s) tivessem recebido essa classificação. A análise foi realizada em base mensal. O detalhamento do procedimento adotado é apresentado a seguir.

Com as informações de calendário, calculou-se o quadrado da razão entre a distância real e a distância média entre a Terra e o Sol para todos os dias planilhados, conforme aproximação sugerida em FOSTER *et al.* (2010). O dia juliano pré-calculado pela planilha nada mais é que o número de dias transcorridos desde o 1º de janeiro do ano em questão. Este valor precisou ser adaptado para contemplar anos bissextos antes de sua aplicação na fórmula matemática dada pela equação (5.7), multiplicando o dia juliano original por 365/366 nas ocasiões relevantes. O recurso disponível ao topo da atmosfera é dado pela multiplicação simples entre esta razão e a constante solar, assumida igual a 1361 W/m^2 .

$$\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \quad (5.7)$$

$$I_o = TSI \left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^2 \quad (5.8)$$

para as quais n é o dia juliano após ajustes. Calculou-se o ângulo diário, equação do tempo e declinação conforme equações (5.9), (5.10) e (5.11), respectivamente, seguindo as formulações apresentadas em FOSTER *et al.* (2010). A partir dos dados de localização, zona horária internacional e horário oficial foi possível calcular o horário aparente local para todos os registros, conforme equação (5.12).

$$\Gamma = 2\pi \frac{n-1}{365} \quad (5.9)$$

$$EOT = 229,18 (7,5E^{-5} + 1,868E^{-3}\cos\Gamma - 3,2077E^{-2}\sin\Gamma - 1,4615E^{-2}\cos 2\Gamma - 4,089E^{-2}\sin 2\Gamma) \quad (5.10)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(n+284)\right) \quad (5.11)$$

$$LT = SDT + 4(LONG_{STD} - LONG_{LOCAL}) + EOT \quad (5.12)$$

Os valores de horário aparente local e de declinação solar foram utilizados como base para o cálculo das geometrias Sol-Terra-plano incidente, definindo desta forma o ângulo horário solar, o ângulo de elevação solar, o ângulo zenital, o ângulo azimutal e o ângulo incidente sobre plano inclinado. A figura 40 apresenta uma representação visual de todas as variáveis geométricas trabalhadas.

Figura 40 - Geometria e ângulos referentes à posição solar na abóboda celeste.

Fonte: FOSTER *et al.* (2010)

As equações (5.13) a (5.17) descrevem os cálculos para a determinação dos ângulos zenitais, horários, azimutais e de elevação solar para cada um dos registros disponibilizados.

$$\varphi = \text{latitude local} \quad (5.13)$$

$$\omega = \pi \frac{(LT - 12)}{12} \quad (5.14)$$

$$\theta_z = \arccos(\sin\varphi \sin\delta + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega) \quad (5.15)$$

$$\alpha_s = \arcsen(\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega) \quad (5.16)$$

$$\gamma_s = C1C2 \frac{\sin\omega \cos\delta}{\sin\theta_z} + C3 \left(\frac{1 - C1C2}{2} \right) \pi \quad (5.17)$$

De posse de todas as informações necessárias para a caracterização da geometria de incidência da irradiação solar, calculou-se os índices de transmitância k_t , k_n , k_d e k_s , conforme definições no capítulo 4. Separou-se os registros com base no mês de aquisição, rejeitando imediatamente os valores que correspondessem a situações de ângulo zenitais superiores a 80° . Utilizou-se uma planilha dedicada para cada mês no processamento destes dados pré-filtrados. Produziu-se o gráfico de dispersão (k_t, k_s) , calculou-se o número de pontos em cada quadrícula

de dimensão $1/20$ e se montou a função de densidade de probabilidade do número de pontos por quadrícula, a qual determina qual o percentual de pontos a se contabilizar considerando as quadrículas de densidade menor ou igual a um dado valor limítrofe. A figura 41 apresenta uma noção dos passos descritos até agora. A massa de pontos dispersos é representada no gráfico à esquerda, a contabilização do número de pontos por quadrícula é detalhada ao centro, enquanto a construção da função de densidade de probabilidade de pontos por quadrícula é realizada à direita. Nesta análise de densidade n representa o valor densidade de pontos considerado; f a frequência com a qual esta densidade de pontos se repete em todo o espaço-K, sum a contabilização de pontos associados a regiões de densidade igual ou inferior a n ; e p o percentual que sum representa na massa total de dados.

Figura 41 - Dispersão kt/ks para dados coletados nos meses de janeiro e contagem de pontos por quadrícula.

Elaboração própria

Determinou-se o valor imediatamente superior ao percentil 5% desta função de densidade de probabilidade como a referência de corte para o procedimento de avaliação de qualidade. Assinalou-se com suspeição todas as quadrículas com densidade de pontos inferior ao valor de corte. Aplicou-se esquema de cores para identificação visual das quadrículas com baixa e alta densidade de pontos: azul escuro para quadrículas com número de pontos internos inferior ao valor de corte, azul claro para quadrículas com número de pontos internos no intervalo de percentis entre o valor de corte e 25%, verde para o intervalo de percentis 25–50%, amarelo para o intervalo de percentis 50–75%, laranja para o intervalo 75–90% e vermelho para quadrículas com densidade de pontos superiores ao valor determinado pelo percentil 90% da

função de densidade de probabilidade construída. A figura 42 permite uma noção visual das operações realizadas nesta segunda etapa.

Figura 42 – Identificação visual dos locais de maior densidade de pontos a partir de esquema de cores e função de densidade de probabilidade construída para este mesmo subconjunto de dados.

Elaboração própria

O exemplo e figuras apresentados para esclarecer o processo de avaliação de qualidade dos dados solarimétricos correspondem à avaliação relativa ao mês de janeiro, para o qual quadrículas com 3 ou menos pontos em seu interior foram assinaladas com suspeição. Esta mesma análise foi repetida para os demais meses do calendário civil, cujos resultados podem ser avaliados individualmente no apêndice A. Ressalta-se que os gráficos de dispersão inclusos na figura 39 já empregavam o esquema de cores discriminatório para identificação do subconjunto de registros a serem rejeitados.

Por fim, os resultados foram acondicionados em uma planilha excel. Os registros de irradiação horária em solo foram agregados em intervalos de 3h, de forma a coincidir com os períodos referidos pelo modelo de previsão. Para tanto, foi necessário passar todos os registros para a referência de Tempo Universal Coordenado (UTC). Utilizou-se o mapeamento codificado AAAAMMDdhmm para o cruzamento das informações previstas e observadas. Intervalos assinalados com suspeição durante o processo de avaliação de qualidade das medições em solo foram filtrados a partir da aplicação de uma máscara. A figura 43 apresenta o estado final das informações, prontas para o confronto direto com a previsão obtida do modelo de previsão numérica.

Figura 43 - Agrupamento dos dados observados e máscara de filtragem dos registros suspeitos

INIT \ LEAD	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
11/06/2015 00:00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	50	523	172	X	X
12/06/2015 00:00	X	X	X	50	523	172	X	X	X	X	X	356	1608	1673	X	X
13/06/2015 00:00	X	X	X	356	1608	1673	X	X	X	X	X	371	1635	1493	X	X
14/06/2015 00:00	X	X	X	371	1635	1493	X	X	X	X	X	X	98	168	X	X
15/06/2015 00:00	X	X	X	X	98	168	X	X	X	X	X	198	887	1100	X	X
16/06/2015 00:00	X	X	X	198	887	1100	X	X	X	X	X	207	890	1265	X	X
17/06/2015 00:00	X	X	X	207	890	1265	X	X	X	X	X	340	X	1206	X	X
18/06/2015 00:00	X	X	X	340	X	1206	X	X	X	X	X	87	512	641	X	X
19/06/2015 00:00	X	X	X	87	512	641	X	X	X	X	X	159	1312	1696	X	X
20/06/2015 00:00	X	X	X	159	1312	1696	X	X	X	X	X	186	1550	1688	X	X
21/06/2015 00:00	X	X	X	186	1550	1688	X	X	X	X	X	330	1593	1659	X	X
22/06/2015 00:00	X	X	X	330	1593	1659	X	X	X	X	X	343	1614	1432	X	X
23/06/2015 00:00	X	X	X	343	1614	1432	X	X	X	X	X	74	670	651	X	X
24/06/2015 00:00	X	X	X	74	670	651	X	X	X	X	X	177	840	757	X	X
25/06/2015 00:00	X	X	X	177	840	757	X	X	X	X	X	348	1582	1595	X	X
26/06/2015 00:00	X	X	X	348	1582	1595	X	X	X	X	X	357	1663	1751	X	X
27/06/2015 00:00	X	X	X	357	1663	1751	X	X	X	X	X	306	1689	X	X	X
28/06/2015 00:00	X	X	X	306	1689	X	X	X	X	X	X	324	1573	1617	X	X
29/06/2015 00:00	X	X	X	324	1573	1617	X	X	X	X	X	318	1623	1637	X	X

Elaboração própria

5.2. Pós-processamento das previsões do modelo GFS

As previsões históricas do modelo GFS foram obtidas do arquivo online dedicado para dar suporte às atividades de pesquisa nos campos das geociências e ciências atmosféricas (NCEP, 2015), atualizado diariamente. Os arquivos são disponibilizados no formato WMO GRIB2, com informações georrefenciadas em relação à longitude, latitude e nível atmosférico de interesse; o conjunto de dados online abrange todo o globo terrestre. Foram obtidas previsões para um recorte que contempla a extensão territorial do Brasil, extraído-se somente as informações referentes ao ponto de grade mais próxima à estação com o programa auxiliar `wgrib2` e com rotinas de automação escritas em linguagem python. A figura 44 apresenta um exemplo de extração manual das informações com o programa `wgrib2` a partir de linha de comando. O argumento `-ijlat` permite individualizar a coordenada geográfica de interesse, enquanto o argumento `-ftime` explicita qual o intervalo de correspondência para o valor médio de irradiação lido. Neste exemplo, realizou-se a leitura do arquivo de previsão inicializado às 00 UTC do dia 15/01/2015, para uma antecedência de 12 horas, retornando a irradiação média esperada entre 6 e 12 horas do horário de inicialização para a coordenada de interesse ($x=134$, $y=47$) ($\text{lon} = -46,75^\circ \text{ W}$, $\text{lat} = -23,5^\circ \text{ S}$), cujo valor médio foi de 190 W/m^2 .

Figura 44 – Linha de comando para extração de informação individual do arquivo grib2

```

Prompt de Comando
Microsoft Windows [versão 10.0.19041.630]
(c) 2020 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\andre>cd C:\dev\IEE\dados\gsf0.25\dsurf\zip

C:\dev\IEE\dados\gsf0.25\dsurf\zip>wgrib2 gfs.0p25.2015011500.f012.grib2.spasub.deoliveira354517 -ijlat 134 47 -ftime
0 [main] wgrib2 23748 find_fast_cwd: WARNING: Couldn't compute FAST_CWD pointer. Please report this problem to
the public mailing list cygwin@cygwin.com
1:0:(134,47),lon=313.250000,lat=-23.500000,val=190:6-12 hour ave
  
```

Elaboração própria

Produziu-se um arquivo em formato comma-separated-values (.csv) com os registros de previsão discretizados por horário de inicialização e antecedência da previsão, possibilitando sua visualização em forma tabular. A figura 45 apresenta um trecho desta visualização, onde é possível acompanhar a evolução da previsão para um mesmo horário de interesse a partir da diagonal em destaque. Neste exemplo podemos verificar as alterações na previsão da irradiação média esperada para o intervalo entre às 15 e 18 UTC do dia 28/04/2017 para antecedências de até 48 horas.

Figura 45 - Registros de previsão histórica do modelo GFS para a coordenada (-23,5° S, -46,75° W), que corresponde ao ponto de grade mais próximo à estação solarimétrica do LSF.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	datetime	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
3331	26/04/2017 06:00	0	75	330	354	80	39	0	0	0	21	150	229	100	51	0	0
3332	26/04/2017 12:00	430	502	200	98	0	0	0	56	350	404	140	67	0	0	0	38
3333	26/04/2017 18:00	140	69	0	0	0	53	450	410	80	37	0	0	0	63	180	258
3334	27/04/2017 00:00	0	0	0	74	370	416	120	59	0	0	0	70	390	437	160	79
3335	27/04/2017 06:00	0	30	60	119	130	64	0	0	0	56	450	430	150	74	0	0
3336	27/04/2017 12:00	340	388	70	35	0	0	0	74	520	452	160	81	0	0	0	53
3337	27/04/2017 18:00	50	25	0	0	0	28	500	481	110	56	0	0	0	46	470	501
3338	28/04/2017 00:00	0	0	0	52	500	572	110	56	0	0	0	60	280	408	140	71
3339	28/04/2017 06:00	0	43	400	520	140	69	0	0	0	61	270	289	130	65	0	0
3340	28/04/2017 12:00	490	580	120	62	0	0	0	47	410	336	120	60	0	0	0	80
3341	28/04/2017 18:00	130	63	0	0	0	55	350	432	90	44	0	0	0	86	510	473
3342	29/04/2017 00:00	0	0	0	29	400	355	120	57	0	0	0	24	540	595	200	100
3343	29/04/2017 06:00	0	63	510	427	160	77	0	0	0	82	620	539	80	38	0	0
3344	29/04/2017 12:00	520	480	120	59	0	0	0	73	680	575	110	53	0	0	0	95
3345	29/04/2017 18:00	110	56	0	0	0	92	670	531	60	32	0	0	0	96	690	638
3346	30/04/2017 00:00	0	0	0	93	620	655	190	94	0	0	0	95	680	653	130	66
3347	30/04/2017 06:00	0	91	510	461	100	51	0	0	0	88	680	639	200	100	0	0
3348	30/04/2017 12:00	680	640	80	40	0	0	0	64	660	629	100	50	0	0	0	34
3349	30/04/2017 18:00	120	61	0	0	0	92	690	622	170	87	0	0	0	35	430	449
3350	01/05/2017 00:00	0	0	0	92	700	692	160	78	0	0	0	32	110	309	190	94
3351	01/05/2017 06:00	0	96	700	694	170	82	0	0	0	67	570	581	200	101	0	0
3352	01/05/2017 12:00	700	693	160	81	0	0	0	38	560	591	200	101	0	0	0	90
3353	01/05/2017 18:00	160	78	0	0	0	50	520	533	160	81	0	0	0	90	660	672
3354	02/05/2017 00:00	0	0	0	38	590	627	200	100	0	0	0	90	670	675	200	100

Elaboração própria

Mapeou-se os intervalos correspondentes a cada intervalo previsto a partir de um código que concatena as informações de ano, mês, dia, hora e minuto de referência da previsão (AAAAMMDDhhmm). A convenção utilizada foi de adotar o horário ao fim de cada intervalo como referência, mantendo o padrão encontrado nos arquivos originais do modelo GFS. O confronto direto entre informações previstas e observadas foi possível a partir do cruzamento dos códigos AAAAMMDDhhmm assinalados, possibilitando a avaliação da performance da previsão do modelo GFS para o recurso solar disponível em superfície. Esta avaliação foi realizada da forma fracionada, para cada antecipação. Calculou-se o erro quadrático de todos os registros, tirou-se a média e a raiz quadrada para obter o índice de performance RMSE. Registros afetados pela aplicação do filtro de dados suspeitos não foram contabilizados neste cálculo.

As figuras 46 e 47 apresentam os resultados obtidos para cada intervalo de 3h de interesse durante o ciclo diurno para previsões dentro do mesmo dia e um dia à frente e em para cada horário de inicialização possível. Os resultados apresentaram algumas características bastante interessantes e que serão brevemente exploradas agora. Em primeiro lugar, observa-se que a previsão possui um viés nitidamente positivo em todos os intervalos de análise, com valores previstos geralmente superiores aos observados; sendo assim, viés similar também é encontrado para a integralização em base diária da irradiância. É possível notar uma ligeira redução na qualidade preditiva para previsões dentro do mesmo dia e com um dia de antecedência a partir da comparação do índice R^2 e RMSE obtido em cada gráfico. Também é possível perceber que as previsões para o intervalo das 1800-2100 UTC apresentam desempenho muito ruim. Vale destacar que o período corresponde ao anoitecer local e que a análise neste intervalo foi possível somente durante os meses de verão; nos demais meses os registros de irradiação consolidados incluem ao menos um intervalo horário onde o ângulo zenital supera o limite estabelecido de 80° , implicando na rejeição da informação pelo procedimento de qualidade de dados.

Por fim, é possível verificar que não há distinção estatística clara entre os resultados obtidos de previsões com horários de inicialização distintos para um mesmo intervalo de interesse quando, a princípio, poderia se esperar que previsões baseadas em condições iniciais mais recentes produziram resultados melhores. Os dados de inicialização das previsões do modelo GFS são obtidos através do Sistema de Assimilação de Dados Globais (GDAS), o qual é alimentado por informações de satélites ambientais, sondas, aeronaves, estações meteorológicas e radares em uma janela de 3h para mais e para menos do horário de análise.

Estas informações são utilizadas para realizar pequenas correções nos resultados das nove primeiras horas da previsão anterior, a qual se assume possuir boa qualidade, premissa fundamental em qualquer sistema de assimilação de dados (UCAR, 2009). O resultado desta análise é utilizado para alimentar o próximo ciclo de assimilação e inicialização do modelo numérico de previsão do tempo. A natureza cíclica do procedimento de inicialização dos dados retroalimenta os possíveis vieses preditivos e isto poderia explicar porque não há um aumento visível na qualidade preditiva para inicializações mais próximas ao intervalo de interesse.

Figura 46 - Dispersão entre valores previstos e observados para os intervalos das 0900-1200 UTC, 1200-1500 UTC, 1500-1800 UTC e 1800-2100 UTC do dia D+1.

Elaboração própria.

Figura 47 - Dispersão entre valores previstos e observados para os intervalos das 0900-1200 UTC, 1200-1500 UTC, 1500-1800 UTC e 1800-2100 UTC do dia D+0.

Elaboração própria.

Com isto, decidiu-se por utilizar somente o subconjunto de previsões inicializadas às 0000 UTC para as demais análises apresentadas neste trabalho. As correções estatísticas sugeridas nas etapas subsequentes podem ser aplicadas diretamente nos demais subconjuntos sem nenhuma perda sensível na validade do tratamento. O conjunto inicial de dados previstos pelo modelo GFS foi filtrado para contemplar somente este horário de inicialização e passou a apresentar um padrão mais claro dos ciclos diurno e noturno, vide figura 48.

Figura 48 - Subconjunto de previsões GFS com horário de inicialização em 0000 UTC.

INIT \ LEAD	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
15/01/2015 00:00	0	0	0	190	920	920	370	190	0	0	0	178	900	940	370	193
16/01/2015 00:00	0	0	0	191	960	990	510	263	0	0	0	190	950	980	420	218
17/01/2015 00:00	0	0	0	190	950	980	500	258	0	0	0	180	900	930	380	195
18/01/2015 00:00	0	0	0	190	950	980	500	260	0	0	0	190	950	980	500	258
19/01/2015 00:00	0	0	0	200	970	1000	520	267	0	0	0	180	950	980	500	261
20/01/2015 00:00	0	0	0	190	950	970	470	243	0	0	0	160	930	920	230	120
21/01/2015 00:00	0	0	0	140	740	580	200	100	0	0	0	40	190	310	250	120
22/01/2015 00:00	0	0	0	100	940	970	500	260	0	0	0	100	680	740	350	180
23/01/2015 00:00	0	0	0	170	940	970	500	257	0	0	0	180	940	960	430	222
24/01/2015 00:00	0	0	0	180	940	970	460	237	0	0	0	140	880	940	490	249
25/01/2015 00:00	0	0	0	180	940	970	500	260	0	0	0	154	840	830	330	171
26/01/2015 00:00	0	0	0	120	920	900	360	189	0	0	0	80	610	780	420	215
27/01/2015 00:00	0	0	0	140	750	790	320	164	0	0	0	170	920	960	380	196
28/01/2015 00:00	0	0	0	170	920	950	440	225	0	0	0	170	910	920	460	237
29/01/2015 00:00	0	0	0	70	630	810	490	254	0	0	0	70	400	500	300	153
30/01/2015 00:00	0	0	0	110	760	850	250	124	0	0	0	25	450	320	80	39
31/01/2015 00:00	0	0	0	35	130	490	110	58	0	0	0	98	910	950	110	54
01/02/2015 00:00	0	0	0	158	920	950	470	245	0	0	0	159	630	740	490	254
02/02/2015 00:00	0	0	0	93	540	620	430	217	0	0	0	171	930	930	500	256
03/02/2015 00:00	0	0	0	171	930	964	500	256	0	0	0	134	860	880	280	145
04/02/2015 00:00	0	0	0	149	770	693	230	118	0	0	0	2	40	494	480	249

Elaboração própria.

Uma análise objetiva inicial da qualidade das previsões modelo GFS foi realizada a partir da comparação do erro RMSE obtido em relação à previsão por persistência. Para tanto, utilizou-se o valor médio do índice de transmitância verificado no dia anterior, combinado ao recurso extraterrestre médio esperado para cada horário de interesse. As equações (5.18) e (5.19) explicitam a regra de cálculo adotada. O índice d corresponde ao dia para o qual a previsão está sendo realizada, $d - 1$ corresponde ao dia anterior, h corresponde ao intervalo horário de interesse, $r/\bar{r}$ a razão entre a distância Terra-Sol calculada para o dia d e a distância média Terra-Sol.

$$P(d, h) = ETR(d, h) * k_t(d - 1, h) \quad (5.18)$$

$$ETR(d, h) = ITS \left(\frac{r}{\bar{r}} \right)^2 \quad (5.19)$$

Os resultados apresentados na tabela 2 mostram o erro RMSE obtido a partir do emprego de cada método, assim como a correlação entre dados observados e previstos por cada um.

Tabela 2 - Avaliação da qualidade preditiva do modelo GFS para no entorno da estação solarimétrica do LSF.

Intervalo	$RMSE_{GFS}$	$RMSE_p$	SS_{RMSE}	R^2_{GFS}	R^2_p	SS_{R^2}
0900-1200 UTC D+0	290,53	275,66	-0,0539	0,7559	0,6273	0,3450
1200-1500 UTC D+0	642,27	691,61	0,0713	0,7172	0,5117	0,4208
1500-1800 UTC D+0	757,71	725,92	-0,0438	0,5894	0,3966	0,3195
1800-2100 UTC D+0	558,22	473,3	-0,1794	0,3702	0,1135	0,2896
0900-1200 UTC D+1	295,98	332,87	0,1108	0,7425	0,4558	0,5267
1200-1500 UTC D+1	695,29	837,64	0,1699	0,6508	0,2838	0,5124
1500-1800 UTC D+1	783,59	847,68	0,0756	0,5612	0,1756	0,4677
1800-2100 UTC D+1	610,17	493,39	-0,2367	0,3421	0,0259	0,3246

Elaboração própria.

Em relação ao índice RMSE, observa-se um padrão de habilidade preditiva ligeiramente superior no intervalo 1200-1500 UTC e inferior à esta referência nos demais intervalos para previsões em D+0. Como já antecipado, há uma deterioração na qualidade das previsões entre os dias D+0 e D+1, com aumento sensível no RMSE estimado. Entretanto, a degradação ocorre ainda mais rapidamente para a técnica de persistência, de forma que os resultados do modelo GFS foram superiores à referência em todos os intervalos exceto ao entardecer para o dia D+1. Já em relação à métrica estabelecida para o confronto das correlações, verifica-se que o modelo GFS possui uma habilidade bastante superior em prover previsões mais consistentes e correlatas aos valores observados quando comparado à persistência. As diferenças são mais evidentes para as previsões em D+1, quando o método de persistência é obrigado a assumir a manutenção das condições verificadas no dia anterior para um horizonte ainda mais distante.

Em um primeiro experimento, procurou-se corrigir a previsão original do modelo GFS a partir de uma regressão linear simples (RLS), obtendo os coeficientes angular e linear ótimos com a minimização de erro RMSE. Os ajustes da previsão foram obtidos com o emprego da ferramenta de solver do excel. Formulou-se o equacionamento necessário conforme (5.20), calculou-se o erro RMSE para os valores de inicialização dos coeficientes a e b , definiu-se o objetivo de minimização deste erro a partir do método *Generalized Reduced Gradient* (GRG) não linear. Os resultados da otimização correspondem aos coeficientes que permitem a minimização do erro RMSE calculado a partir dos valores previstos e observados.

$$RLS = a.GFS + b \quad (5.20)$$

Testou-se a influência dos valores de inicialização dos coeficientes a e b nos resultados da otimização, sem qualquer efeito aparente. Também se avaliou os resultados obtidos a partir da separação dos dados qualificados em dois grupos, com a otimização sendo aplicada somente a um deles. É um procedimento comum separar o conjunto de dados em um grupo de análise, a partir do qual o tratamento estatístico é levantado, e um grupo de teste, para o qual o tratamento estatístico é aplicado e validado. A aprovação da técnica empregada ocorre quando os resultados obtidos no grupo de teste refletem desempenho comparável ao do grupo de análise. Não houve distinção significativa na comparação dos resultados entre subconjuntos ou entre cada subconjunto e o conjunto completo de dados, as figuras 49 e 50 exemplificam esta situação. Sendo assim, para a finalidade de prova conceitual do tratamento estatístico, optou-se por apresentar os resultados obtidos sobre a massa total de registros nas análises posteriores.

Figura 49 - Confronto entre valores observados e previstos para o intervalo das 0900-1200 UTC (LEAD=12h) do dia D+0 e resultados da regressão linear simples otimizada para este conjunto.

datetime	OBS	PREV	EQ	RLS	EQrls	SPLIT	a	0,667814667
12/06/2015 00:00	50	240	36100	218	28139,3	A	b	57,47228989
13/06/2015 00:00	356	378	484	310	2124,64	B		
14/06/2015 00:00	371	378	49	310	3732,45	A	RMSE	290,5302597
16/06/2015 00:00	198	156	1764	162	1321,22	B	RMSE_rls	205,4812173
17/06/2015 00:00	207	360	23409	298	8260,19	A	ss	29%
18/06/2015 00:00	340	366	676	302	1452,18	B		
19/06/2015 00:00	87	72	225	106	344,286	A		
20/06/2015 00:00	159	156	9	162	7,0298	B		
21/06/2015 00:00	186	372	34596	306	14375,9	A		
22/06/2015 00:00	330	366	1296	302	790,034	B		
23/06/2015 00:00	343	366	529	302	1689,83	A		
24/06/2015 00:00	74	0	5476	57,5	273,165	B		
25/06/2015 00:00	177	90	7569	118	3531,26	A		
26/06/2015 00:00	348	360	144	298	2511,46	B		
27/06/2015 00:00	357	384	729	314	1856,48	A		
28/06/2015 00:00	306	372	4356	306	0,01013	B		
29/06/2015 00:00	324	366	1764	302	488,743	A		
30/06/2015 00:00	318	360	1764	298	404,59	B		
01/07/2015 00:00	137	54	6889	93,5	1889,27	A		
02/07/2015 00:00	160	144	256	154	40,4801	B		
03/07/2015 00:00	37	60	529	97,5	3665,23	A		
04/07/2015 00:00	114	150	1296	158	1904,84	B		
05/07/2015 00:00	54	150	9216	158	10742,2	A		
06/07/2015 00:00	205	204	1	194	127,544	B		
07/07/2015 00:00	46	318	73984	270	50103,2	A		
08/07/2015 00:00	71	54	289	93,5	507,794	B		
09/07/2015 00:00	269	282	169	246	538,424	A		
10/07/2015 00:00	342	360	324	298	1946,08	B		
11/07/2015 00:00	196	222	676	206	94,6174	A		
12/07/2015 00:00	374	312	3844	266	11700,6	B		

Elaboração própria

Figura 50 - Confronto entre subconjuntos A e B de dados observados e previstos para o intervalo das 0900-1200 UTC (LEAD=12h) do dia D+0 e resultados da regressão linear simples otimizada para cada subconjunto.

SPLIT	datetime	OBS	PREV	EQ	RLS	EQrls	a	0.692874577	SPLIT	datetime	OBS	PREV	EQ	RLS	EQrls	a	0.641559283
A	12/06/2015 00:00	50	240	36100	210	25737,9	b	44,14056318	B	13/06/2015 00:00	356	189	27889	193	26689,1	b	71,37723043
A	14/06/2015 00:00	371	378	49	306	4218,87			B	13/06/2015 00:00	356	378	484	314	1773,54		
A	17/06/2015 00:00	207	360	23409	294	7495,3	RMSE	284,9196694	B	16/06/2015 00:00	198	156	1764	171	704,346	RMSE	296,0592627
A	19/06/2015 00:00	87	72	225	94	49,3862	RMSE_rls	204,7673991	B	18/06/2015 00:00	340	366	676	306	1143,26	RMSE_rls	205,7525888
A	21/06/2015 00:00	186	372	34596	302	13430,5	ss	28%	B	20/06/2015 00:00	159	156	9	171	155,264	ss	31%
A	23/06/2015 00:00	343	366	529	298	2049,13			B	22/06/2015 00:00	330	366	1296	306	567,015		
A	25/06/2015 00:00	177	90	7569	106	4970,35			B	24/06/2015 00:00	74	0	5476	71,4	6,87892		
A	27/06/2015 00:00	357	384	729	310	2189,83			B	26/06/2015 00:00	348	360	144	302	2084,97		
A	29/06/2015 00:00	324	366	1764	298	689,973			B	28/06/2015 00:00	306	372	4356	310	16,2997		
A	01/07/2015 00:00	137	54	6889	81,6	3074,06			B	30/06/2015 00:00	318	360	1764	302	245,28		
A	03/07/2015 00:00	37	60	529	85,7	2372,96			B	02/07/2015 00:00	160	144	256	164	14,1509		
A	05/07/2015 00:00	54	150	9216	148	8849,49			B	04/07/2015 00:00	114	150	1296	168	2874,15		
A	07/07/2015 00:00	46	318	73984	264	47731,2			B	06/07/2015 00:00	205	204	1	202	7,53325		
A	09/07/2015 00:00	269	282	169	240	868,411			B	08/07/2015 00:00	71	54	289	106	1226,5		
A	11/07/2015 00:00	196	222	676	198	3,83658			B	10/07/2015 00:00	342	360	324	302	1573,03		
A	13/07/2015 00:00	275	252	529	219	3164,63			B	12/07/2015 00:00	374	312	3844	272	10497,3		
A	15/07/2015 00:00	198	354	24336	289	8357,28			B	14/07/2015 00:00	354	366	144	306	2285,99		
A	17/07/2015 00:00	154	354	40000	289	18338,1			B	16/07/2015 00:00	315	372	3249	310	24,6286		
A	19/07/2015 00:00	366	384	324	310	3113,15			B	18/07/2015 00:00	353	378	625	314	1529,85		
A	21/07/2015 00:00	205	384	32041	310	11068			B	20/07/2015 00:00	389	390	1	322	4544,73		
A	23/07/2015 00:00	107	360	64009	294	34810,4			B	22/07/2015 00:00	80	126	2116	152	5214,82		
A	26/07/2015 00:00	327	408	6561	327	0,02776			B	24/07/2015 00:00	357	396	1521	325	996,368		
A	28/07/2015 00:00	133	456	104329	360	51570,5			B	27/07/2015 00:00	407	432	625	349	3418,64		
A	30/07/2015 00:00	138	456	101124	360	49324,6			B	29/07/2015 00:00	382	450	4624	360	480,534		
A	01/08/2015 00:00	217	444	51529	352	18164,8			B	31/07/2015 00:00	230	444	45796	356	15933,9		
A	03/08/2015 00:00	445	462	289	364	6520,79			B	02/08/2015 00:00	414	456	1764	364	2507,18		
A	05/08/2015 00:00	419	462	1849	364	2997,71			B	04/08/2015 00:00	391	462	5041	368	539,279		
A	08/08/2015 00:00	396	480	7056	377	371,705			B	06/08/2015 00:00	285	474	35721	375	8185,97		
A	10/08/2015 00:00	441	498	3249	389	2684,06			B	09/08/2015 00:00	409	486	5929	383	666,928		
A	12/08/2015 00:00	446	516	4900	402	1965,69			B	11/08/2015 00:00	452	504	2704	395	3280,64		
A	14/08/2015 00:00	417	534	13689	414	8,20486			B	13/08/2015 00:00	458	528	4900	410	2292,44		
A	16/08/2015 00:00	491	546	3025	422	4699,09			B	15/08/2015 00:00	490	534	1936	414	5780,58		
A	18/08/2015 00:00	309	480	29241	377	4586,05			B	17/08/2015 00:00	468	546	6084	422	2146,6		
A	20/08/2015 00:00	168	360	36864	294	15769,2			B	19/08/2015 00:00	379	552	29929	426	2163,92		
A	22/08/2015 00:00	429	594	27225	456	713,321			B	21/08/2015 00:00	394	546	23104	422	765,551		
A	24/08/2015 00:00	208	120	7744	127	6514,83			B	23/08/2015 00:00	487	618	17161	468	366,306		
A	26/08/2015 00:00	240	606	133956	464	50186,1			B	25/08/2015 00:00	58	474	173056	375	100791		
A	29/08/2015 00:00	530	666	18496	506	595,602			B	28/08/2015 00:00	309	582	74529	445	18432,1		
A	31/08/2015 00:00	602	696	8836	526	5718,19			B	30/08/2015 00:00	635	690	3025	514	14628,1		

Elaboração própria

A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos da aplicação da RLS, que foi capaz de produzir aumento nas performances preditivas sob a ótica do erro RMSE em todos os intervalos avaliados. Também é possível verificar que este ganho de performance foi obtido sem que houvesse perdas expressivas na correlação entre dados observados e previstos. Os benefícios mais expressivos ocorreram justamente para o intervalo das 1800-2100 UTC, que apresentava originalmente desempenho inferior à persistência.

Tabela 3 - Avaliação da qualidade preditiva do modelo GFS após regressão linear simples.

Intervalo	$RMSE_{RLS}$	$RMSE_p$	SS_{RMSE}		R^2_{RLS}	R^2_p	SS_{R^2}
0900-1200 UTC D+0	205,48	275,66	0,2546		0,7555	0,6273	0,3441
1200-1500 UTC D+0	485,81	691,61	0,2976		0,7172	0,5117	0,4208
1500-1800 UTC D+0	531,66	725,92	0,2676		0,5894	0,3966	0,3195
1800-2100 UTC D+0	291,10	473,30	0,3850		0,3702	0,1135	0,2896
0900-1200 UTC D+1	210,22	332,87	0,3685		0,7425	0,4558	0,5267
1200-1500 UTC D+1	529,30	837,64	0,3681		0,6508	0,2838	0,5124
1500-1800 UTC D+1	544,71	847,68	0,3574		0,5612	0,1756	0,4677
1800-2100 UTC D+1	294,46	493,39	0,4032		0,3421	0,0259	0,3246

Elaboração própria.

O próximo experimento procurou demonstrar as vantagens do emprego de métodos de previsão por conjunto, com o objetivo de combinar os pontos fortes de cada metodologia e em cada antecedência. Para tanto, propôs-se o emprego de uma regressão linear múltipla (RLMa), incluindo um termo ponderador para o resultado obtido da técnica de persistência, conforme equação (5.21). Os coeficientes foram novamente otimizados com o intuito de se minimizar o erro RMSE em cada intervalo de interesse sob análise.

$$RLMa = a.GFS + b.P(d, h) + c \quad (5.21)$$

A tabela 4 apresenta os resultados obtidos. Novamente, houve ganhos expressivos de previsibilidade para todos os intervalos avaliados e desta vez acompanhados por melhorias nas correlações entre previsões e dados observados. Uma análise realizada com base unicamente nos valores observados aponta que a correlação entre os índices de transmitância entre dois dias subsequentes é relativamente baixa, estimada em 0,4356 para o intervalo das 0900-1200 UTC, em 0,4347 para o intervalo das 1200-1500 UTC, em 0,3764 para o intervalo das 1500-1800 UTC e em 0,3811 para o intervalo das 1800-2100 UTC. Isto que significa que a relação entre a condição celeste de um e outro dia é fraca para esta localidade.

Tabela 4 - Avaliação da qualidade preditiva da previsão por conjunto, otimizada com o emprego de regressão linear múltipla (RLMa).

Intervalo	$RMSE_{RLMa}$	$RMSE_p$	SS_{RMSE}	R^2_{RLMa}	R^2_p	SS_{R^2}
0900-1200 UTC D+0	192,91	275,66	0,3002	0,7885	0,6273	0,4326
1200-1500 UTC D+0	463,60	691,61	0,3297	0,7464	0,5117	0,4807
1500-1800 UTC D+0	511,96	725,92	0,2947	0,6269	0,3966	0,3816
1800-2100 UTC D+0	290,38	473,30	0,3865	0,3759	0,1135	0,2960
0900-1200 UTC D+1	207,18	332,87	0,3776	0,7510	0,4558	0,5424
1200-1500 UTC D+1	524,04	837,64	0,3744	0,6592	0,2838	0,5242
1500-1800 UTC D+1	542,44	847,68	0,3601	0,5649	0,1756	0,4722
1800-2100 UTC D+1	294,46	493,39	0,4032	0,3421	0,0259	0,3246

Elaboração própria.

Verificou-se uma capacidade explicativa muito superior, naturalmente, ao se calcular a correlação com o valor de k_t obtido no intervalo de 3h imediatamente anterior, em substituição ao valor obtido para o mesmo intervalo do dia anterior. Por exemplo, a correlação foi estimada em 0,7520 entre os valores correspondentes aos intervalos 1500-1800 e 1800-2100 UTC. Com isto um último experimento é realizado, no qual o critério de cálculo da persistência passa a utilizar o valor mais recente de k_t não nulo disponível. Isto corresponde a projetar a condição celeste no amanhecer em função do anoitecer do dia anterior, prever o período de ascensão solar matinal com base nas primeira horas do dia, antever o intervalo de máxima intensidade vespertina em razão do que se verificou na contraparte matutina e antecipar a situação durante o anoitecer fundamentado nos índices determinados durante o começo da tarde. As equações (5.22a), (5.22b) e (5.23) explicitam a regra de cálculo adotada para o cálculo da persistência seguindo a descrição estabelecida.

$$\text{intervalo 0900-1200UTC} \rightarrow P^*(d, h) = ETR(d, h) * k_t(d - 1, 18H) \quad (5.22a)$$

$$\text{outro intervalo} \rightarrow P^*(d, h) = ETR(d, h) * k_t(d, h - 3) \quad (5.22b)$$

$$RLMb = a.GFS + b.P^*(d, h) + c \quad (5.23)$$

Esta nova persistência é utilizada em conjunto com as saídas do modelo GFS e o resultado combinado passa por otimização com o emprego de uma nova regressão linear múltipla (RLMb). A tabela 5 sintetiza os indicadores calculados.

Tabela 5 - Avaliação da qualidade preditiva da previsão por conjunto após alteração no critério utilizado para a persistência (RLMb). Manteve-se a referência anterior na estimativa das métricas de qualidade a fim de se possibilitar a comparação direta dos resultados obtidos com aqueles dos demais experimentos.

Intervalo	$RMSE_{RLMb}$	$RMSE_p$	SS_{RMSE}	R^2_{RLMb}	R^2_p	SS_{R^2}
0900-1200 UTC D+0	223,86	275,66	0,1879	0,7455	0,6273	0,3170
1200-1500 UTC D+0	454,80	691,61	0,3424	0,7900	0,5117	0,5699
1500-1800 UTC D+0	466,29	725,92	0,3577	0,7056	0,3966	0,5121
1800-2100 UTC D+0	271,05	473,30	0,4273	0,5018	0,1135	0,4380
0900-1200 UTC D+1	213,67	332,87	0,3581	0,7414	0,4558	0,5249
1200-1500 UTC D+1	509,39	837,64	0,3919	0,6824	0,2838	0,5566
1500-1800 UTC D+1	528,89	847,68	0,3761	0,5939	0,1756	0,5073
1800-2100 UTC D+1	293,92	493,39	0,4043	0,3468	0,0259	0,3294

Elaboração própria.

Observa-se que as alterações empregadas com o experimento RLMb foram desfavoráveis para o intervalo das 0900-1200 UTC, o que significa que a condição verificada ao fim da tarde do dia anterior não é um bom parâmetro para a antecipação da manhã do dia atual. Este resultado pode ser justificado a partir de dois argumentos distintos: sob a ótica estatística, motivado pela baixa correlação entre os índices de transmitância nestes dois períodos, com valor aproximado de 0,2407; e também sob a visão da meteorologia, fundamentado na existência de fenômenos típicos exclusivos a cada período do dia para a localidade em questão, como a presença de neblina durante a alvorada, a ocorrência de pancadas de chuva forte aos fins de tarde durante o verão, a redução da visibilidade por inversão térmica no inverno, entre outros; eventos que auxiliam no distanciamento das condições atmosféricas em um e outro período para dias subsequentes.

A fim de facilitar a comparação dos resultados obtidos em cada experimento, compilou-se os valores das métricas de habilidade referentes aos erro RMSE e ao índice R^2 entre dados previstos e observados na tabela 5. Nota-se que a combinação estatística das técnicas à disposição trouxe benefícios para ambas métricas de avaliação nos dois casos de previsão por conjunto realizados; estes resultados são condizentes com a pesquisa bibliográfica apresentada. A tabela 6 resume os resultados obtidos em cada um dos experimentos. O esquema de cores empregado buscou destacar pontos importantes, como a sinalização de ganhos e perdas nas métricas de habilidade calculadas.

Tabela 6 - Resumo comparativo das métricas de performance originais e em cada técnica de pós-processamento.

Intervalo	SS_{GFS}^{RMSE}	SS_{RLS}^{RMSE}	SS_{RLMa}^{RMSE}	SS_{RLMb}^{RMSE}	$SS_{GFS}^{R^2}$	$SS_{RLS}^{R^2}$	$SS_{RLMa}^{R^2}$	$SS_{RLMb}^{R^2}$
0900-1200 UTC D+0	-0,0539	0,2546	0,3002	0,1879	0,3450	0,3441	0,4326	0,3170
1200-1500 UTC D+0	0,0713	0,2976	0,3297	0,3424	0,4208	0,4208	0,4807	0,5699
1500-1800 UTC D+0	-0,0438	0,2676	0,2947	0,3577	0,3195	0,3195	0,3816	0,5121
1800-2100 UTC D+0	-0,1794	0,3850	0,3865	0,4273	0,2896	0,2896	0,2960	0,4380
0900-1200 UTC D+1	0,1108	0,3685	0,3776	0,3581	0,5267	0,5267	0,5424	0,5249
1200-1500 UTC D+1	0,1700	0,3681	0,3744	0,3919	0,5124	0,5124	0,5242	0,5566
1500-1800 UTC D+1	0,0756	0,3574	0,3601	0,3761	0,4677	0,4677	0,4722	0,5073
1800-2100 UTC D+1	-0,2367	0,4032	0,4032	0,4043	0,3246	0,3246	0,3246	0,3294

Elaboração própria.

Com os resultados de cada experimento discriminado em função do intervalo e antecedência, é possível combinar as técnicas que obtiveram os melhores resultados em cada período do dia neste horizonte de previsão de 48 horas e obter uma previsão final ótima da irradiação disponível por dia. Ressalva-se que avaliação deste caso final só é possível com a inclusão da parcela de dados rejeitados durante o processo de avaliação de qualidade descrito na seção 5.1, especialmente em função da exclusão das horas iniciais e finais de cada ciclo dial neste procedimento. Ademais, vale lembrar que o processo a ser aplicado só poderia ser operacionalizado com a existência de sistemas de monitoramento e previsão mais próximas à situação de tempo-real, pois necessitam de valores consolidados nas últimas 3h dos índices de transmitância para a correção da previsão original do modelo GFS. Por este motivo, os resultados apresentados a seguir devem ser tratados com maior cautela ou a título de curiosidade. A figura 51 apresenta os diagramas de dispersão entre valores observados e previstos em base diária, confirmando o viés positivo mencionado previamente. Os resultados são condizentes com as publicações de todas as referências bibliográficas consultadas, independentemente do modelo utilizado em cada estudo.

A avaliação da previsão final ótima do modelo GFS em todos os intervalos possíveis para uma antecipação máxima de 48 horas apresentou novas situações com desvios significativos em relação aos dados verificados em solo. Em particular, notou-se que os dados de modelo apresentava valores não nulos de irradiação média em superfície para o intervalo 2100-2400 UTC. A previsão atinge valores de até 80 W/m² enquanto os registros da estação se mantiveram na faixa entre 0-23 W/m² e são restritos aos meses de verão. Também há momentos em que as previsões indicam valores não nulos para o intervalo das 0600-0900 UTC. São ocasiões mais raras, limitadas aos dias entre o final do mês de outubro e início do mês de janeiro,

indicando intensidades entre 1-10 W/m². A verdade obtida em solo corroborou com a situação indicada pelo modelo, havendo realmente instâncias em que registros não nulos foram detectados no intervalo justamente no período do ano mencionado. Nestes dois casos os valores previstos foram utilizados integralmente no processo de cálculo em base diária, sem qualquer tratamento. Os desvios máximos assumidos com esta simplificação são muito inferiores aos valores esperados de erro para um ciclo diurno completo. As previsões otimizadas em cada intervalo foram acumuladas, constituindo um valor previsto diário final para os dias D+0 e D+1, vide figura 51.

Figura 51 - Dispersão dos valores observados e previstos para a integral diária da irradiação em D+0 e D+1.

Elaboração própria.

Com a combinação de duas metodologias distintas para a persistência, a definição de uma referência para comparação com base nesta técnica fica prejudicada. Decidiu-se por obter os indicadores de habilidade preditiva comparando os resultados diretamente com a previsão original do modelo GFS. O pós-processamento propiciou uma redução de aproximadamente 54% no erro RMSE esperado para previsões dentro do mesmo dia e de aproximadamente 45% para previsões com antecedência de um dia. O procedimento também foi capaz de aprimorar a correlação entre dados previstos e observados, atingindo valor excelente para D+0 e o mantendo em um nível satisfatório para D+1. A figura 52 resume os aperfeiçoamentos obtidos de forma visual e numérica. Por fim, recorda-se que os índices de desempenho obtidos neste estudo final não representam a realidade preditiva de um modelo em fase operacional; além das ressalvas em relação ao uso de informações praticamente em tempo real, o estudo não possui a abrangência espacial necessária para este tipo de conclusão.

Figura 52 - Previsão para a irradiação diária prevista pelo modelo GFS originalmente (à esquerda) e após tratamentos estatísticos (à direita) com as técnicas que melhor desempenharam em cada intervalo. Versão não passível de operacionalização.

Elaboração própria.

Finalmente, procurou-se aferir o que poderia ser alcançado do ponto de vista operacional com as técnicas e tratamentos já estabelecidos. A operacionalização da previsão prevê um cronograma pré-estabelecido e fixo para a obtenção dos dados, obtenção das previsões de modelos meteorológicos, realização dos processamentos necessários e publicação dos resultados. É de particular interesse para o planejamento eletroenergético do SIN e para o mercado de energia brasileiro a produção de previsões *day-ahead*, com horário limite para

publicação dos resultados, conforme prazos da para acompanhamento e previsão meteorológica, apresentados na figura 53.

Figura 53 - Prazos para elaboração do acompanhamento e previsão meteorológica.

Atividade		Responsável	Prazo	Periodicidade	Horizonte
1	Envio de dados e informações meteorológicas	Agente de geração, de transmissão e distribuição	Até às 10h	Diária	-
2	Atualização das previsões numéricas	ONS	Até às 10h	Diária	-
3	Análise dos dados obtidos de precipitação, temperatura e vento	ONS	Até às 11h	Diária (dias úteis)	Mínimo 7 dias, relativos aos dados de precipitação e temperatura; e Mínimo 48 horas, relativos aos dados de vento.
4	Cálculo da precipitação média observada e elaboração de mapas de precipitação	ONS	Até às 11h	Diária (dias úteis)	-
5	Disponibilização do Boletim de Precipitação nas Principais Bacias Hidrográficas e do Boletim Meteorológico Diário	ONS	Até às 12h	Diária (dias úteis)	Mínimo de 72 horas
6	Disponibilização do Boletim de Tempo Severo	ONS	Até o 1º dia útil subsequente à data de sua emissão	Sob demanda	-

Fonte: Procedimentos de Rede do ONS, submódulo 4.8, revisão 2020.12.

Com a estrutura e prazos determinados pelo procedimento de rede do operador, a previsão em D+1 haveria de ser concluída ainda no período da manhã. Já no planejamento em tempo real, é interessante produzir previsões com as rodadas mais atuais dos modelos numéricos e antecipar medidas corretivas enquanto o dia ainda não raiou, especialmente para a rampa de subida da geração de usinas solares na parte da manhã. Sendo assim, uma versão passível de operacionalização para o planejamento em D+0 e D+1 seria realizada ainda de

madrugada, com dados de transmitância consolidados somente até o dia anterior. Os resultados que seriam obtidos são apresentados na figura 54.

Figura 54 - Previsão para a irradiação diária prevista pelo modelo GFS originalmente (à esquerda) e após tratamentos estatísticos (à direita) com as técnicas passíveis de operacionalização.

Elaboração própria.

Os resultados obtidos com a implementação das técnicas passíveis de operacionalização efetiva e respeitando cronograma e prazos para o planejamento eletroenergético diário mantiveram-se em patamares bastante satisfatórios. A queda de desempenho em relação ao caso anterior idealizado se dá principalmente na previsão para D+0, muito em função da

impossibilidade de se utilizar dados de transmitância aferidos no próprio dia. Para D+1 a habilidade preditiva se manteve praticamente a mesma.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adequação das saídas produzidas por modelos numéricos à realidade local só é possível a partir do confronto com informações de qualidade das variáveis de interesse. Os dados obtidos da estação solarimétrica do LSF/IEE foram avaliados e submetidos a um procedimento de avaliação e sinalização de registros suspeitos. Este processo utilizou uma adaptação da metodologia apresentada por MAXWELL (1993), necessária para que se pudesse contornar a situação adversa encontrada em parte dos registros de irradiância difusa, que se mostraram claramente comprometidos para o subconjunto de medições referentes ao mês de março. Utilizou-se dos dados de um segundo piranômetro em plano inclinado como alternativa. A análise é realizada no contexto do espaço-K, ferramenta gráfica que inter-relaciona os índices derivados dos valores de irradiação medidos em solo, normalizados com base no recurso extraterrestre disponível para uma superfície de mesma orientação.

Para tanto foi necessário calcular a geometria Sol-Terra-plano incidente para cada registro obtido; calcular o recurso solar extraterrestre correspondente a cada registro obtido; calcular os índices de transmitância relevantes; sinalizar com suspeição de dados referentes a ângulos zenitais superiores a 80° ; separar os dados em função do mês civil; construir os gráficos no espaço-K; definir o critério de suspeição dos registros remanescentes; contabilizar o percentual de registros suspeitos; e repetir estes dois últimos passos enquanto a massa de dados assinalada com suspeição fosse inferior a 5% do conjunto inicialmente representado no espaço-K. Este procedimento foi aplicado sobre uma base de dados que continha originalmente registros horários para um período de aproximadamente 3 anos e meio. A razão entre o número de registros horários de irradiação solar consolidados e brutos foi estimada em aproximadamente 79%, valor que atesta a qualidade dos dados obtidos da estação solarimétrica do IEE.

O método proposto possui uma vantagem adaptativa de grande interesse ao permitir que se trabalhe com variáveis radiométricas em resoluções temporais menores que aquelas exigidas nas normativas da BSRN e rede SONDA. A adaptação sugerida para o processo de avaliação de qualidade de MAXWELL (1983) é mais flexível em relação às variáveis medidas em solo, podendo ser aplicada a qualquer combinação de pares de piranômetros e pireliômetros disponíveis. Ademais, é de fácil compreensão e passível de automação. Apesar de representar um estudo de caso limitado às dependências da estação solarimétrica do IEE, acredita-se, em razão das vantagens supracitadas, que a metodologia desenvolvida neste trabalho possa ser utilizada em qualquer outro local de interesse.

Levantou-se o histórico de previsões produzidas pelo modelo GFS 0.25, de janeiro de 2015 a março de 2019, de onde se extraiu os valores previstos de irradiância média de onda-curta descendente em superfície para o ponto de grade correspondente à coordenada mais próxima à estação solarimétrica do IEE, distante em aproximadamente 10 km. A extração foi realizada com o uso do software wgrib2, dedicado para manipulação de registros em formato científico WMO GRIB2, e de automações em linguagem de programação python. Os arquivos foram ordenados e classificados em função do horário de inicialização e do número de horas de antecedência de cada previsão. Esta organização de dados permitiu o pareamento inequívoco entre dado previsto e dado observado, de onde se derivou todo o processo de análise e aprimoramento estatístico formulado nesta segunda etapa prática do trabalho.

A avaliação inicial das saídas demonstrou que não há uma distinção estatística clara entre os resultados obtidos de previsões com horários de inicialização distintos. Poderia-se esperar a princípio que previsões iniciadas em horários mais próximos ao horário de interesse produzissem resultados mais apurados, com condições iniciais mais próximas àquelas observadas. Entretanto, a análise numérica dos índices de erro RMSE e R^2 obtidos evidenciam que inexistente tal comportamento esperado. ALMEIDA (2017) chega a uma conclusão similar ao avaliar um conjunto de previsões do modelo WRF e dados solarimétricos de estações no norte da Espanha. Em prática, estes resultados permitiram que se reduzisse o conjunto de dados de previsões a analisar. Optou-se por priorizar as previsões inicializadas no horário das 0000 UTC, os aprimoramentos estatísticos obtidos poderiam ser extrapolados para os demais horários de inicialização sem grande prejuízo aos resultados.

A análise dos dados de previsão originais evidenciou que a qualidade preditiva do modelo GFS é melhor traduzida a partir do índice de correlação com registros verificados em solo do que a partir do erro RMSE obtido deste confronto. Destaca-se um viés nitidamente positivo para as previsões em todos os intervalos de interesse e também para a integralização em base diária. O erro RMSE obtido desta integralização corresponde a aproximadamente 55% do recurso médio esperado em solo, fração bastante expressiva, a qual aponta a necessidade de aprimoramentos nos modelos de previsão numérica do tempo para fins de determinação do recurso solar em superfície. Quando comparado à previsão por persistência, sob a ótica do erro RMSE, o desempenho do modelo GFS é superior para previsões para o dia seguinte e, via de regra, inferior para previsões em D+0. Entretanto, pode-se inferir a partir da análise numérica que esta superioridade em D+1 é decorrente do deterioramento acelerado dos índices associados

à previsão por persistência, e não necessariamente da qualidade preditiva original do modelo numérico.

O refinamento estatístico da previsão do modelo GFS foi implementado a partir do uso de regressões lineares. A técnica propõe uma reformulação da previsão a partir de uma equação simples do tipo $RLS = a * GFS + b$, para a qual se determina os coeficientes a e b em função de algum critério de otimização desejado. O critério escolhido foi a minimização do erro RMSE obtido do confronto entre previsão reformulada e dados de irradiação consistidos em solo. Observou-se ganhos de previsibilidade em todos os casos, intervalos e antecedências, avaliados entre 25% e 40% a partir da métrica de *skill-score* sobre o erro RMSE. Os benefícios mais expressivos ocorreram para o período do anoitecer, que corresponde ao intervalo com pior desempenho original do modelo GFS.

Outros dois experimentos visaram incluir os resultados obtidos da técnica de persistência na avaliação com regressões lineares, reformulados conforme a seguinte equação: $RLM = a * GFS + b * P(d, h) + c$. O primeiro experimento calculou a persistência com base no recurso solar extraterrestre esperado para o intervalo de interesse e o índice de transmitância atmosférica verificado para este mesmo horário no dia anterior. O segundo procurou avaliar os ganhos de se utilizar valores de persistência mais condizentes com a operação em tempo real, baseados nos índices de transmitância verificados no intervalo imediatamente anterior ao de interesse. Os ganhos de previsibilidade foram estimados entre 30% e 40% para o experimento com persistência baseada na condição celeste do dia anterior. Para o outro, aferiu-se melhorias entre 35% e 40% exceto para o intervalo da manhã.

Realizou-se uma análise das habilidades preditivas em base diária, com ressalvas em relação à incorporação de dados previamente removidos pelo procedimento de avaliação de qualidade e em relação à idealização das medições disponíveis para o cálculo dos índices de transmitâncias mais recentes. O resultado idealizado sugeriu ganhos de até 55% no erro RMSE para previsões em D+0 e de 46% para previsões em D+1. Um último experimento foi realizado procurando entender as limitações reais da previsibilidade em base diária, assinalando um cronograma e prazos para a obtenção dos dados, previsões, processamentos e publicação dos resultados. Desta forma foi possível produzir expectativas de desempenho mais alinhadas a uma fase operacional deste tipo de previsão, com reduções no erro RMSE de aproximadamente 46% para D+0 e de 45% para D+1.

O trabalho desenvolvido ao longo deste projeto foi capaz de produzir um aperfeiçoamento das previsões numéricas de irradiação solar do modelo global GFS para uma avaliação pontual, utilizando os dados obtidos na estação solarimétrica do LSF/IEE no pós-processamento estatístico destas previsões. Com isto atinge-se o objetivo específico de demonstrar uma prova conceitual do funcionamento da metodologia. Os resultados intermediários e finais encontrados possuem grande correspondência àqueles reportados na bibliografia de referência nacional e internacional. As previsões originais da irradiação de onda curta descendente em superfície apresentam um forte viés positivo em base diária, que pode ser justificado pelo fato de que as parametrizações e o equacionamento da transferência radiativa nos principais modelos de referência são mais direcionados ao cálculo iterativo das condições atmosféricas em cada nível vertical; a demanda por qualidade preditiva para o recurso em solo é relativamente recente.

Ao longo deste processo, algumas definições tiveram de ser tomadas para delimitar o foco do estudo, criando ramificações que podem ser objeto de outras publicações científicas. Uma destas situações corresponde à possibilidade de se avaliar os efeitos de suavização espacial da previsão numérica no confronto com registros pontuais de estações meteorológicas, procurando definir alguma regra prática para a definição do conjunto de pontos a ser utilizado em função da grade nativa do modelo. Outrossim, seria de grande interesse avaliar a inclusão de previsões de outros modelos, globais e regionais, assim como as técnicas utilizadas para a sua combinação. Uma última sugestão seria a de implementar o processo de aperfeiçoamento estatístico também em base mensal ou sazonal, com vistas ao refinamento dos resultados obtidos com esta técnica de pós-tratamento.

Nas dependências do Instituto de Energia e Ambiente também se encontra a usina solar fotovoltaica do IEE, criando a possibilidade de se cruzar dados de irradiação consolidados no âmbito desta dissertação e valores de geração locais, produzindo assim um modelo ajustado localmente para a conversão da energia solar. Outra oportunidade interessante deriva do fato da usina ser composta por quatro subsistemas com topologias diferentes, de forma que seria possível avaliar técnicas para determinação de uma usina virtual equivalente ao conjunto completo. Finalmente, todos os desenvolvimentos supracitados poderiam ser agregados para a produção de um modelo de previsão de geração solar local.

Uma parte do esforço empregado ao longo desta dissertação foi no sentido de compreender como se poderia expandir a abrangência espacial das metodologias e técnicas

estudadas, com interesse particular no Sistema Interligado Nacional. A experiência internacional referenciada neste trabalho traz um exemplo recente e bem-sucedido de implementação de modelos de previsão regionais, os quais se mostram como a alternativa mais viável em nosso país, principalmente em função da indisponibilidade de dados de irradiação e geração individuais de usinas solares de grande porte. Há, entretanto, uma base de dados pública e com boa resolução temporal de dados de geração para conjuntos de usinas ou mesmo agregados por subsistema. Sob este pretexto, resta o desafio de se obter estimativas de qualidade para a irradiação média sobre as extensões territoriais de interesse na ausência de uma rede de compartilhamento destas informações.

A alternativa com maior probabilidade de sucesso vem do processamento de imagens de satélite, com ao menos duas referências nacionais para este fim: os modelos GL e BRASIL-SR. O modelo GL versão 1.2 está em pleno funcionamento e disponibiliza resultados de irradiação média diária em forma de mapas no site da divisão de satélites do CPTEC. Seria interessante que os avanços já promovidos nas versões superiores fossem operacionalizados e que os produtos fossem disponibilizados em resolução temporal e formato de arquivo mais adequados para inclusão no pós-processamento. O modelo BRASIL-SR foi empregado para a construção de dados de climatologia do recurso solar disponível em solo e precisaria ser operacionalizado, produzir e publicar resultados diariamente, com resolução temporal e formato de arquivos de saída adequados. A operacionalização e padronização dos processos de coleta de medições e previsões são passos fundamentais para a inclusão da previsão solar na Programação Diária da Operação Eletroenergética do SIN.

Não obstante, é consenso que o ambiente ideal para o desenvolvimento científico do tema de caracterização e previsibilidade do recurso solar envolve a disponibilização e publicidade de registros de irradiação em superfície. KUSIAK (2015 *apud* GUNASEKERA, 2018) aponta categoricamente que a ausência do compartilhamento de dados na indústria de energias renováveis está atrasando o progresso técnico e limitando as oportunidades de aumento da eficiência nos mercados de energia. Dentre as sinergias perdidas pela política de sigilo de dados solarimétricos e anemométricos elencadas por GUNASEKERA (2018), destacamos: (a) monitoramento das variáveis ambientais relevantes; (b) aprimoramento nas previsões; (c) produção de produtos adaptados conforme localidade e usuário; (d) mapeamento da vulnerabilidade de setores e sistemas em razão de eventos extremos; (e) integração facilitada das renováveis no *mix* energético; e (f) refinamento de estratégias de mercado com base nestas informações.

A importância da discussão sobre a publicidade dos dados ambientais pertinentes ao setor de energias renováveis fica ainda mais evidente após a realização do Workshop ANEEL: Regulamentação sobre Estações Anemométricas e Solarimétricas. O *workshop*, concretizado em 31/10/2019, permitiu que órgãos públicos e empresas públicas e privadas pudessem expressar suas visões e preocupações a respeito do tema, com posicionamentos bastante distintos entre cada participante.

Werner Klaus, diretor técnico da Fotovoltec, empresa especializada em monitoramento, medição e certificação de dados solarimétricos, reforçou o papel fundamental que este tipo de informação produz na estimativa das componentes de irradiação direta normal, difusa horizontal e também do efeito de albedo em solo. Segundo ele, a estimativa da irradiação global horizontal a partir de conjuntos de dados de reanálise e satélite já obtém resultados suficientemente apurados para os interesses do setor. A preferência por projetos de usinas com seguimento em 1 eixo fez com que a determinação da IDN ganhasse maior relevância em relação à IGH. As estimativas de decomposição da irradiação a partir de modelos de referência ainda fornecem vieses positivos relevantes, estimados aproximadamente em 6% do recurso efetivamente disponível em solo, cuja correção só é possível com o uso de informação local. No caso da estimativa de albedo, os *datasets* disponíveis apresentam diferenças elevadas e com pouca correlação à realidade; a medição é imprescindível neste caso. Ademais, quando questionado diretamente sobre a possibilidade de se formular uma rede pública de dados solarimétricos e de seus benefícios, Klaus afirmou que as vantagens são evidentes em razão da baixa densidade de estações solarimétricas no país com dados de alta qualidade, padrão rede BRSN. A qualidade dos dados disponibilizados é tão importante quanto a sua disponibilidade. A respeito do acesso público, mencionou que se trata de uma questão de política energética nacional, a qual deve levar em conta a responsabilidade pelo custeamento destes sistemas de monitoramento, transmissão e apresentação dos dados.

O posicionamento da agência reguladora foi apresentado a partir da mediação do debate concedida por Álvaro Moreira, à época especialista em regulação da Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração da ANEEL. O moderador expôs que a proposta original da agência era de construir uma base pública de dados anemométricos e solarimétricos, a exemplo do que foi realizado para o caso das usinas hidroelétricas. O registro desta iniciativa fica evidente no artigo 16º da resolução normativa nº 391, de 15 de dezembro de 2009, que exige a manutenção e disponibilização à ANEEL do histórico de medições anemométricas e climatológicas, dentre outros documentos, vide redação:

Art 16. A Autorizada deverá manter em seu arquivo, à disposição da ANEEL, os seguintes documentos:

I – Estudo de Impacto Ambiental (EIA), Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) ou estudo ambiental formalmente requerido pelo órgão ambiental conforme legislação específica de meio ambiente;

II – Projeto Básico;

III – Resultados dos ensaios de comissionamento; e

IV – Histórico atualizado das medições anemométricas e climatológicas.

Entretanto, a publicação da Portaria MME nº 29, em 28 de janeiro de 2011, resolveu que os registros das medições anemométricas deveriam ser transmitidas à EPE:

Art. 1º Os empreendedores que negociarem energia elétrica proveniente de fonte eólica nos Leilões de que tratam o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, e o Decreto nº 6.353, de 16 de janeiro de 2008, deverão iniciar as medições anemométricas e climatológicas permanentes dos ventos no local do parque de geração, na altura do eixo dos aerogeradores, em até cento e oitenta dias após a assinatura do Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado - CCEAR ou do Contrato de Energia de Reserva - CER, observando que:

I – as medições anemométricas deverão ser realizadas com instrumentos de primeira classe, de acordo com os padrões normativos aplicáveis da International Electrotechnical Commission - IEC; e

II – os registros das medições anemométricas deverão ser transmitidos à Empresa de Pesquisa Energética - EPE, de acordo com relação de grandezas e protocolo de transmissão de dados a ser definido, que integrarão a base pública referencial para os estudos de geração eólica.

Desta forma, ficava previsto via regulação setorial a existência de dois sistemas para recebimento destas informações, sob a responsabilidade de dois órgãos competentes autônomos, com propósitos, padronização e base referencial distintos; que culminou na suspensão das análises por parte da ANEEL e criou uma barreira inicial para que o objetivo de publicização fosse atingido. Por parte da EPE, o recebimento e organização dos dados anemométricos transmitidos resultou na criação do Sistema de Acompanhamento de Medições Anemométricas (AMA), de acesso restrito à própria e aos agentes empreendedores. A regulamentação do MME prevê que esta base de dados possui carácter público, vide grifo.

Informações de interesse público podem estar sujeitas a restrições de acesso conforme delimitações estabelecidas pela Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011, também conhecida como Lei de Acesso à Informação (LAI). A EPE, empresa pública federal vinculada ao MME, criada em 16 de agosto de 2004 através do Decreto nº 5.184, está diretamente subordinada ao regime imposto na LAI, evidenciado em seu artigo 1º, parágrafo único, que dispõe:

Parágrafo único. Subordinam-se ao regime desta Lei:

I - os órgãos públicos integrantes da administração direta dos Poderes Executivo, Legislativo, incluindo as Cortes de Contas, e Judiciário e do Ministério Público;

II - as autarquias, as fundações públicas, as empresas públicas, as sociedades de economia mista e demais entidades controladas direta ou indiretamente pela União, Estados, Distrito Federal e Municípios.

A Lei de Acesso à Informação dispõe sobre os procedimentos a serem observados pela União, Estados, Distrito Federal e Municípios, com o fim de garantir o acesso a informações previstos nos seguintes trechos da Constituição Federal:

inciso XXXIII do artigo 5º – todos têm direito a receber dos órgãos públicos informações de seu interesse particular, ou de interesse coletivo ou geral, que serão prestadas no prazo da lei, sob pena de responsabilidade, ressalvadas aquelas cujo sigilo seja imprescindível à segurança da sociedade e do Estado;

inciso II do parágrafo 3º do artigo 37º – o acesso dos usuários a registros administrativos e a informações sobre atos de governo, observado o disposto no art. 5º, X e XXXIII;

parágrafo 2º do artigo 216º – Cabem à administração pública, na forma da lei, a gestão da documentação governamental e as providências para franquear sua consulta a quantos dela necessitem.

Sob a ótica estritamente regulatória, o sigilo das informações de interesse público é ressaltado somente em casos de risco à segurança da sociedade e do Estado, conforme grifo. No contexto da abertura dos dados de medições anemométricas e solarimétricas, a componente de risco usualmente levantada por empreendedores e associações representativas corresponde à preocupações em relação à competitividade de projetos planejados ou ainda em execução. Eduardo Mikos, coordenador do GT de geração centralizada da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), afirmou que a preocupação mais latente dos empreendedores é justamente em relação à confidencialidade dos dados, especialmente durante a fase de desenvolvimento dos projetos. Para a ABSOLAR, não haveria empecilhos para a

publicidade dos dados de usinas operacionais, mas o detalhamento acerca de quais informações precisariam estar sob sigilo ou não ainda precisaria ser discutido. Sandro Yamamoto, diretor técnico da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), apresentou um posicionamento mais reativo à publicização: não haveria interesse em divulgação de dados que pudessem individualizar o desempenho dos parques eólicos. As principais preocupações apontadas pela associação estão relacionadas ao uso indevido destas informações por terceiros, por exemplo, para certificação de áreas vizinhas e em publicações sem o devido cuidado ou tratamento. Mas há ressalvas em relação a esta posição, dados individuais necessários para o processamento de ressarcimento por restrições de geração ou outros processos devidamente autorizados pela ANEEL seriam uma exceção. Além disto, Yamamoto mencionou que, dado o contexto das necessidades atuais por informações de medições anemométricas, a associação estaria aberta a reavaliar as necessidades de sigilo das informações e rever seu posicionamento.

Os requisitos de outorga exigem atualmente um registro de 3 anos de medições anemométricas e de 1 ano de medições solarimétricos, com devida certificação independente. A construção desta base de dados faz parte do ciclo de planejamento e investimento que as empresas se submetem a fim de viabilizar seus empreendimentos. Neste âmbito é razoável que as restrições de acesso sejam impostas, a publicidade de dados de projetos nesta fase de investimento poderia comprometer a segurança das iniciativas privadas. Reconhece-se também que estas informações são parte integral da estratégia de desenvolvimento das empresas do setor de energia, sendo efetivamente um patrimônio a ser preservado até que a operação comercial de cada projeto se concretize.

Não obstante, a exigência de medições não se limita ao período de prospecção e avaliação de projetos. O submódulo 2.12, revisão 2020.12, dos procedimentos de rede do ONS prevê os requisitos mínimos de supervisão e controle para a operação das instalações integradas ao SIN. Dentre as exigências, verifica-se a necessidade de fornecimento de dados ambientais, anemométricos e solarimétricos das centrais geradoras, conforme subitem 8.3.1.1:

- (d) As seguintes informações, relativas à central geradora eólica, devem ser obtidas e transferidas para os centros de operação do ONS, por parque gerador: (1) velocidade do vento (à altura do eixo de um dos aerogeradores), em m/s; (2) direção do vento (à altura do eixo de um dos aerogeradores), em graus em relação ao norte verdadeiro; (3) pressão atmosférica, em pascal (Pa); (4) temperatura, em °C.

(e) As seguintes informações, relativas à central geradora solar, devem ser obtidas e transferidas para os centros de operação do ONS, por parque gerador: (1) irradiação solar, em W/m²; (2) temperatura, em °C.

Outrossim, para empreendimentos eólicos vencedores de leilão de energia promovidos pelo MME, independentemente da potência instalada ou área ocupada, faz parte das exigências da EPE que as medições anemométricas e climatológicas sejam transmitidas de forma permanente e contínua durante todo o período de vigência do contrato estabelecido, vide nota técnica EPE-DEE-RE-057/2016-r1. Sendo assim, toda central geradora eólica ou solar em operação comercial possui a incumbência de transmitir as informações de medições ambientais, anemométricas e solarimétricas ao ONS e/ou à EPE, das quais um subconjunto significativo celebraram contratos de venda de energia no Ambiente de Comercialização Regulado (ACR). Os custos derivados da implantação das estações de monitoramento, produção e transmissão dos dados são, portanto, parte da parcela de investimentos obrigatórios e recuperáveis a cada empreendimento. A responsabilidade de patroneamento destas atividades são repassados ao consumidor final a partir do resultado da venda no ACR.

Esta mesma percepção é compartilhada no posicionamento apresentado pela CCEE durante o *workshop* ANEEL, representada no evento pelo seu presidente, Rui Altieri. Em suas palavras, o custo pela produção destas informações foi pago pelo consumidor final, repassado através da venda no leilão. Ademais, são informações de grande interesse para o mercado de energia, fortalecendo a base de conhecimento dos agentes para que possam se preparar para os desafios futuros decorrentes da implementação de preços horários e da forte penetração das fontes renováveis no planejamento do setor. Os resultados esperados com o compartilhamento destas informações contemplam aprimoramentos no ambiente de negócios do setor, permitindo a avaliação mais apurada de riscos e alocação mais adequada dos recursos, além de contribuir para a transparência das informações prestadas.

PFENNINGER (2017 *apud* GUNASEKERA, 2018) argumenta que o ambiente de pesquisa em energias renováveis precisa se inspirar nos movimentos de software-livre e de dados abertos vigentes em aplicações de tecnologia. Dentre as barreiras que previnem a adoção deste sistema de compartilhamento de informações, GUNASEKERA (2018) enumera: (a) possibilidade de individualização de negócios; (b) uso inapropriado dos dados; (c) interpretação errônea por parte de terceiros; (d) exposição indesejada de informações comerciais sensíveis; (e) danos à reputação em função da publicidade destes dados. É interessante observar que todos os pontos elencados foram devidamente expressados como foco de preocupação na

argumentação das associações representativas ABSOLAR e ABEEólica durante o *workshop*. O autor consolida a relutância ao compartilhamento de dados medidos em solo em uma barreira chave: a falta de confiança no tratamento da informação e suas consequências. Ainda que haja margem de argumentação legal para que os dados de usinas eólicas e fotovoltaicas com contratos no ACR sejam disponibilizados ao público, entende-se que a abertura ao diálogo e entendimento das necessidades entre produtores e custódios destas bases de dados é o processo adequado para a construção de uma relação mais confiável, salutar e duradoura entre empreendedores, órgãos públicos e a comunidade científica, que possa enfim permitir o uso público deste insumo.

Em reforço à importância científica do acesso aos dados obtidos em superfície, todo o conteúdo prático deste trabalho não seria possível sem a obtenção e disponibilização de dados realizada por parte dos pesquisadores e mantenedores do LSF. Cuidado que foi inclusive objeto de outras publicações acadêmicas, sobre as quais a presente dissertação se apoiou. A pesquisa no mapeamento e previsão dos recursos disponíveis necessita de iniciativas e atenção similares. O projeto SONDA, por exemplo, representa o esforço conjunto entre o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE) e instituições colaboradoras; ainda assim esteve sujeito a interrupções em 2016 e 2017 por falta de recursos para a manutenção de sua rede. A valorização de projetos que assegurem a coleta, manutenção e armazenamento de dados ambientais com qualidade é também fundamental para a cadeia de pesquisa e de negócios em energias renováveis, sendo outro grande desafio a ser superado em âmbito nacional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEMANN, I. B.; KAUFMAN, J. Laser principles. *Current Problems in Dermatology*, v. 42, pp. 7-23, 2011.
- ALMEIDA, M. P. Implicações técnicas da inserção em grande escala da geração solar fotovoltaica na matriz elétrica. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ALMEIDA, M. P.; PERPINÁN, O.; NARVARTE, L. PV Power Forecast using a Nonparametric PV Model. *Solar Energy*, v.115, pp. 354-368, 2015.
- ALPERT, J; KANMITSU, M.; CAPLAN, P. M.; SELA, J. G.; WHITE, G. H.; KALNAY, E. Mountain induced gravity wave drag parameterization in the nmc medium-range forecast model. *American Meteorology Society Eighth Conference on Numerical Weather Prediction.*, pp. 726–733, 1988.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 391, de 15 de dezembro de 2009. Estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas eólicas, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 dez. 2009. Seção 1, p. 113.
- ANGSTRÖM, A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*: v.11, n.2, pp. 156-166, 1929.
- ANGSTRÖM, A. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, v.16, pp. 64-75, 1964.
- ANTONANZAS, J. et alii. Review of photovoltaic power forecasting. *Solar Energy*, 2016, v.136, pp. 78-111.
- APPEN, J. et alii. Time in the Sun: the Challenge of High PV Penetration in the German Electric Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 11, n. 2, p. 55-65, 2013.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, uppercase Part uppercase I. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.31, pp. 674–701, 1974.
- AZOUZOUTE, A.; MERROUNI, A. A.; BENNOUNA, E. G; GHENNIQUI, A. Accuracy Measurement of Pyranometer vs Reference cell for PV resource assessment. *Energy Procedia*, v. 157, pp. 1202-1209, 2019.
- BASTOS, E. J. B.; FUNATSU, B. M.; BONFIM, A.; MORAES, E. C.; CEBALLOS, J. C. Estimativa da radiação solar global para a América do Sul via satélite. *IX Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Anais pp. 596-600. Campos do Jordão, 1996.
- BAINES, P. G.; PALMER, T. N. Rationale for a new physically based parametrization of sub-grid scale orographic effects. *Technical Memorandum 169*, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 1990.
- BIRD, R. E., HULSTROM, R. L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. *SERI/TR-642-761*. Golden, EUA. Solar Energy Research Institute, 1981.
- BOTTINO, M. J. Um modelo de estimativa de radiação solar por satélite: Análise e aprimoramentos. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2000.

BRASIL. Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011. Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do § 3º do art. 37 e no § 2º do art. 216 da Constituição Federal; altera a Lei nº 8.112, de 11 de dezembro de 1990; revoga a Lei nº 11.111, de 5 de maio de 2005, e dispositivos da Lei nº 8.159, de 8 de janeiro de 1991; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 nov. 2011.

BRIEGLEB, B. P. Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR community climate model. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, pp. 7603-7612, 1992.

CAISO – California Independent System Operator. Performance of ISO's system during August 21th 2017 eclipse, 2017.

CEBALLOS, J. C.; MOURA, G. B. A.; BEZERRA, V. F.; FARIAS, J. A. A. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa da insolação e fluxo direcional. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.7, pp. 563-581, 1992.

CEBALLOS, J.C.; MOURA, G.B.A. Solar radiation assessment using METEOSAT 4-VIS imagery. *Solar Energy*, v. 60, pp. 209-219, 1997.

CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. e SOUZA, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *Journal of Geophysical Research*, v.109, 2004.

CECONI, M. Variabilidade do coeficiente de cobertura de nuvens sobre o Brasil e sua relação com os fenômenos de solar dimming e brightening. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2013.

CHEN, F. *et al.* Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations, *Journal of Geophysical Research*, v.101, pp. 7251–7268, 1996. doi:10.1029/95JD02165.

CHUN, H.-Y.; BAIK, J.-J. Momentum flux by thermally induced internal gravity waves and its approximation for large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.55, pp. 3299–3310, 1998.

CHUN, H.-Y.; SONG, M.-D.; KIM, J.-W.; BAIK, J.-J. Effects of gravity wave drag induced by cumulus convection on the atmospheric general circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.58, pp. 302–319, 2001.

CHUN, H.-Y.; SONG, I.-S.; BAIK, J.-J.; KIM, Y.-J. Impact of a convectively forced gravity wave drag parameterization in near ccm3. *Journal of Climate*, v.17, pp. 3530–3547, 2004.

CIMO – Commission for Instruments and Methods of Observation. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8), Chapter 7: Measurement of Radiation. World Meteorological Organization, 2014.

CLÒ, S.; CATALDI, A.; ZOPPOLI, P. The merit-order effect in the Italian power market: the impact of solar and wind generation on national wholesale electricity prices. *Energy Policy*, vol. 77, pp. 79-88, 2015.

CLOUGH, S. A.; IACONO, M. J.; MONCET, J. L. Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. *Journal of Geophysical Research*, v.97, pp. 15761–15785, 1992.

CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Solar intermittency: Australia's clean energy challenge, 2012.

DIAGNE, H. M. et alii. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, v.27, pp. 65-76.

DTC – Developmental Testbed Center. GFS Operational Physics Documentation. Acesso em 25/03/2019. Disponível em:
https://dtcenter.org/GMTB/gfs_phys_doc_dev/group__module__radsw__main.html.

DUMONTIER, D. The Satelight model of turbidity variation in Europe. In: SATELIGHT MEETING, 6., 1998, Freiburg, Alemanha. Proceedings... Freiburg, 1998. Technical Report.

EBERT, E. E.; CURRY, J. A. A parameterization of ice cloud optical properties for climate models. *Journal of Geophysical Research*, v.97, pp. 3831–3836, 1992.

EK, M. B. *et al.* Implementation of Noah land surface model advancements in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research*, v.108, pp. 8851, 2003. doi:10.1029/2002JD003296.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Instruções para medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos. Nota Técnica EPE-DEE-RE-057/2016-r1. Brasília, DF, 2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Instruções para solicitação de cadastramento e habilitação técnica de empreendimentos fotovoltaicos com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica. Nota Técnica EPE-DEE-RE-065/2013-r5. Brasília, DF, 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Brasília, DF, 2020.

FLEAGLE, R. G.; BUSINGER, J. A. An Introduction to atmospheric physics. Academic Press, 1980.

FOSTER, R.; GHASSEMI, M.; COTA, A. Solar energy: renewable energy and the environment. CRC Press, 2010.

FRÖLICH, C.; SHAW, E. New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*, v.19, pp. 1773-1775, 1980.

FU, Q. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. *Journal of Climate*, v.9, pp. 2058–2082, 1996.

FU, Q.; YANG, P.; SUN, W. B. An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models. *Journal of Climate*, v.11, pp. 2223–2237, 1998.

GAUTIER, C.; DIAK, G.; MASSE, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, v.19, pp. 1005-1012, 1980.

GCOS – Global Climate Observing System. Essential Climate Variables. Último acesso em 08 de abril de 2018. Disponível em:
<https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>.

GOODY, R. M.; YUNG, Y. L. Atmospheric Radiation, Theoretical basis, OUP, 1989.

GRELL, G. A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, v.121, pp. 764–787, 1993.

GUARNIERI, R. A. Emprego de redes neurais artificiais e regressão linear múltipla no refinamento das previsões de radiação solar do modelo ETA. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2006.

GUNASEKERA, D. Bridging the Energy and Meteorology Information Gap. Em: TROCOLLI, A. Weather & Climate Services for the Energy Industry, capítulo 1. Palgrave Macmillan. Cham, Suíça, 2018.

HAN, J.; PAN, H.-L. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the ncep global forecast system. Weather and Forecasting, v.26, pp. 520–533, 2011.

HAN, J.; WITEK, M. L.; TEIXEIRA, J.; SUN, R.; PAN, H.-L.; FLETCHER, J. K.; BRETHERTON, C. S. Implementation in the ncep gfs of a hybrid eddy-diffusivity mass-flux (edmf) boundary layer parameterization with dissipative heating and modified stable boundary layer mixing. Weather and Forecasting, 2015.

HAN J.; WANG, W; KWON, Y. C; HONG, S.-Y.; TALLAPRAGADA, V.; YANG, F. Updates in the ncep gfs cumulus convection schemes with scale and aerosol awareness. weather and forecasting. American Meteorological Society, v.32, pp. 2005–2017, 2017.

HAUPT, S. E. *et al.* The Sun4Cast® Solar Power Forecasting System: The Result of the Public-Private-Academic Partnership to Advance Solar Power Forecasting. NCAR Technical Note NCAR/TN-526+STR, 307 p., 2016.

HESS, M.; KOEPKE, P.; SCHULT, I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. Bulletin of the American Meteorological Society, v.79. pp. 831-844, 1998.

HEYMSFIELD, A. J.; MCFARQUHAR, G. M. High albedos of cirrus in the tropical pacific warm pool: Microphysical interpretations from cepex and from kwajalein, marshall islands. Journal of the Atmospheric Sciences, v.53, pp. 2424–2451, 1996.

HONG, S.-Y.; PAN, H.-L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. Monthly Weather Review, v.124, pp. 2322–2339, 1996.

HOU, Y.; MOORTHY, S.; CAMPANA K. Parameterization of solar radiation transfer. NCEP Office note 441, 46 p., 2002.

HU, Y.X.; STAMNES, K. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models. Journal of Climate, v.6, pp. 728–742, 1993.

IEA – Agência Internacional de Energia. Technology roadmaps: Solar photovoltaic energy, 2014.

IEA – Agência Internacional de Energia. CO2 Emissions from Fuel Combustion Overview. Paris, 2017.

IEA – Agência Internacional de Energia. IEA Task 46, Solar Resource Assessment and Forecasting. Acesso em 01/08/2018. Disponível em: <https://task46.iea-shc.org/>

IEA – Agência Internacional de Energia. Integration of ground measurements to model derived data. IEA SHC Task 46 Solar Resource Assessment and Forecasting, 2015.

IEA – Agência Internacional de Energia. Regional solar power forecasting. IEA PVPS Task 16 Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications, 2020.

IRENA – International Renewable Energy Agency. The power to change: Solar and Wind cost reduction potential to 2025, 2016.

INMAN, R. H.; PEDRO, H. T. C.; COIMBRA, C. F. M. Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, pp. 535-576, 2013.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Toronto: Academic Press Canada, 1983. 390p.

JACOB, D. J. Introduction to Atmospheric Chemistry. Prince University Press, 1999.

JCGM – Joint Comitee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measure. JCGM 100:2008, corrected version. 2010.

KESSLER, E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. American Meteorolgy Society, 1969.

KIM, Y.-J.; ARAKAWA, A. Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity-wave model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.52, pp. 1875–1902, 1995.

KIPP & ZONNEN. SHP1 Smart Pyrheliometer Instruction Manual. Delft, Países Baixos, 2017.

KIPP & ZONNEN. SMP series Smart Pyranometer Instruction Manual. Delft, Países Baixos, 2017.

KLEISSL, J. Current State of the Art in Solar Forecasting. California Renewable Energy Forecasting Resource Data and Mapping, Appendix A, Final Report. CAISO Contract Number 500-99-013. California, EUA, 2009.

KONINGS, J.; HABLE, A. Uncertainty evaluation of measurements with pyranometers and pyrheliometers. Solar World Congress 2015. Daegu, Korea, 2015.

KOREN, V. *et al.* A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models. *Journal of Geophysical Research*, v.104, pp. 19569-19585, 1999. doi:10.1029/1999JD900232

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, n. 1, pp. 118-133, 1974

LECKNER, B. The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface – elements of a model. *Solar Energy*, v. 20, n.2, pp. 143-150, 1978.

LIMA, F. J. L. Previsão de Irradiação Solar no Nordeste do Brasil Empregando o modelo WRF Ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs). Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2015.

LIN, Y.-L.; FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.22, pp. 1065–1092, 1983.

LINDZEN, R. S. Turbulence and stress due to gravity wave and tidal breakdown. *Journal of Geophysical Research*, v.86, pp. 9707–9714, 1981.

LOCK, A. P.; BROWN, A. R.; BUSH, M. R.; MARTIN, G. M.; SMITH, R. N. B. A new boundary layer mixing scheme. Part I: Scheme description and single-column model tests. *Monthly Weather Review*, v.128, pp. 3187–3199, 2000.

LORENZ, E. et alli. Comparison of global horizontal irradiance forecasts based on numerical weather prediction models with different spatio-temporal resolutions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016.

LORENZ, E.; SCHEIDSTEGE, T. HURKA, J.; HEINEMANN, D.; KURZ, C. Regional PV power prediction for improved grid integration. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v.19, pp. 757-771, 2010.

LOTT, F.; MILLER, M. J. A new subgrid-scale orographic drag parametrization: Its formulation and testing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.123, pp. 101–127, 1997.

LUBIN, D.; WEBER, P. The use of cloud reflectance functions with satellite data for surface radiation budget estimation. *Journal of Applied Meteorology*, v.34, pp. 1333-1347, 1995.

LUIZ, E. W. Desenvolvimento de metodologias para estimativas de cobertura de nuvens. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2014.

LUIZ, E. W. Analysis of cloud cover variability using geostationary satellite data. Tese (Doutorado) – Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2018.

MANTELLI NETO, S. L. Desenvolvimento de metodologia para a estimativa da cobertura de nuvens usando uma de câmera de superfície e comparando com as imagens de satélite. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MARTIN, L. Global and direct normal irradiance forecast using GFS and statistical techniques. Conference ES1002: Workshop march 22nd-23rd, 2011.

MARTÍNEZ, M. A.; ANDÚJAR, J. M.; ENRIQUE, J. M. A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range. *Sensors*, v.9, pp. 4615-4634, 2009.

MARTINS, F. R. Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2001.

MARTINS, F. R.; TROSNIKOV, I. Implementação e avaliação de uma parametrização de aerossóis de queimada no modelo físico de transferência radiativa BRASIL-SR. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Anais pp. 3057-3066. Foz do Iguaçu, 2002.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. de S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto SWERA. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, pp. 145-159. São Paulo, 2004.

MAXWELL, E. *et al.* User's manual for SERI QC software: Assessing the quality of solar radiation data. Report no. NREL-TP-463-5608. National Renewable Energy Laboratory – NREL, Golden, Colorado, USA, 1993.

MCCLATCHEY, R. A.; FENN, R. W.; SELBY, J. E. A.; VOLZ, F. E.; GARIN, J. S. Optical properties of atmosphere. Bedford, Massachussets: Air Force Cambridge Research Laboratories (AFCRL-72-0497), 108p., 1972.

MCCORMACK, J. P. *et al.* Chem2d-opp: A new linearized gas-phase ozone photochemistry parameterization for high-altitude nwp and climate models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.6, pp. 4943-4972, 2006.

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogenous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, pp. 16663-16682, 1997.

MME – Ministério de Minas e Energia. Portaria MME nº 29, de 28 de janeiro de 2011. Dispõe sobre a negociação de energia elétricas, pelos empreendedores, proveniente de fonte eólica nos Leilões de que tratam o Decreto nº 5.163 de 2004 e o Decreto nº 6.353 de 2008. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 01 fev. 2011.

MURATA, A.; OHTAKE, H.; OOZEKI, T. Modeling of uncertainty of solar irradiance forecasts on numerical weather predictions with the estimation of multiple confidence intervals. *Renewable Energy*, v.117, pp. 193-201, 2018.

MYERS, D. R. *Solar Radiation, practical modeling for renewable energy applications*. Taylor & Francis Group, 2013.

NCEP – National Centers for Environmental Prediction. GFS Physics Documentation, FY18 FV3GFS Beta Version Physics. Acesso em 04/10/2020. Disponível em: https://www.emc.ncep.noaa.gov/NEMS/doxygenDoc/20180327_PhysicsDoc/physics/docs/doc/html/group__r_r_t_m_g.html

NCEP – National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2015, atualizado diariamente. doi: 10.5065/D65D8PWK. Acesso em 25/03/2019. Disponível em: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/>

NOAA Virtual Laboratory. GLOBAL FORECAST SYSTEM - GLOBAL SPECTRAL MODEL (GSM) - V13.0.2. Acesso em 25/03/2019. Disponível em: <https://vlab.ncep.noaa.gov/web/gfs/documentation>.

NOAA – National Oceanic and Atmosphere Administration. Global Forecast System (GFS). Acesso em 25/03/2019. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.

NOBRE, A. M. Short-term solar irradiance forecasting and photovoltaic systems performance in a tropical climate in Singapore. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. Cost-Reduction Roadmap for Residential Solar Photovoltaics (PV) 2017-2030, 2017.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. Best practices handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition. Technical Report NREL/TP-5D00-68886, 2017.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. Research Cell Efficiency Records. Acesso em 01/11/2018. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

NYISO – New York Independent System Operator. Solar Impact on Grid Operations – An Initial Assessment, 2016.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. WORKSHOP DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Rio de Janeiro, RJ, 2018. Apresentações. Acesso em 01/08/2018. Disponível em: <http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20180611-workshopsolarfotovoltaica.aspx>.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de rede: submódulo 2.12 – Requisitos mínimos de supervisão e controle para a operação, revisão 2020.12. Rio de Janeiro, RJ, 2020.

PAN, H. L.; WU W.-S. Implementing a mass flux convection parameterization package for the nmc medium-range forecast model. *NMC Office Note, No. 409*, 40 p., 1995.

PARASCHIV, F.; PIETSCH, D. E. R. The impact of renewable energies on EEX day-ahead electricity prices. *Energy Policy*, vol. 73, pp. 196-210, 2014.

PELLAND, S.; GALANIS, G.; KALLOS, G. Solar and photovoltaic forecasting through post-processing of the Global Environmental Multiscale numerical weather prediction model. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011.

PELLAND, S. et alii. Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme. IEA PVPS Task 14, Subtask 3.1 Report, 2013.

PIERREHUMBERT, R. T. An essay on the parameterization of orographic wave drag. observation, theory, and modelling of orographic effects, 1986.

PORFIRIO, A. C. S. Estimativa de irradiação solar direta normal mediante satélite: um estudo para o nordeste brasileiro. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2012.

PORFIRIO, A. C. S. Uma contribuição à modelagem de aerossol e componentes da radiação solar no modelo GL. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2017.

PROCÓPIO, A. S. *et al.* Modeled spectral optical properties for smoke aerosols in Amazonia. *Geophysical Research Letters*, v.30, n.24, 2265, doi: 10.1029/2003GL018063, 2003.

RAZA, M. Q.; NADARAJAH, M.; EKANAYAKE, C. On recent advances in PV output power forecast. *Solar Energy*, 2016, v.136, pp. 125-144.

RELVA, S. G. Método de caracterização da irradiação para geração fotovoltaica: uma análise sistêmica da modelagem da energia primária. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017. 267 p.

RINTAMÄKI, T.; SIDDIQUI, A. F.; SALO, A. Does renewable energy generation decrease the volatility of electricity prices? An analysis of Denmark and Germany. *Energy Economics*, vol. 62, pp. 270-282, 2017.

ROSA, D. J. M. Caracterização da Radiação Solar: O caso da Cidade Universitária/USP e Ilha do Cardoso/Cananéia. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – PIPGE/USP. São Paulo, 2003.

ROGERS, R. R. A short course in cloud physics. Butterworth Heinemann, 1979.

RUTLEDGE, S. A.; HOBBS, P. V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in mid-latitude cyclones. viii: A model for the 'seeder-feeder' process in warm-frontal rainbands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.40, pp. 1185-1206, 1983.

SCHAAKE, J. C. *et al.*, Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales, *Journal of Geophysical Research*, v.101, pp.7461-7475, 1996.

SHETTLE, E.P.; FENN, R.W. Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties. AFGL-TR-79-0214, 675, 94 p., 1979.

SIEBESMA, A. P.; SOARES, P. M. M.; TEIXEIRA, J. A combined eddy-diffusivity mass-flux approach for the convective boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.64, pp. 1230–1248, 2007.

SILVA, P. E. D., MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B. Quality control of solar radiation data within Sonda Network in Brazil: Preliminary results. *International Solar Energy Society – Eurosun 2014 Conference Proceedings*, pp. 16–19, Aix-les-Bains, França, 2014

SMITH, H. J. P. et alii. FASCODE – Fast atmospheric signature code. Air Force Geophysics Laboratory Report AFGL-TR-78-0081. Hanscom AFB, Massachusetts, EUA, 149p., 1978.

SOARES, P. M. M.; MIRANDA, P. M. A.; SIEBESMA, A. P.; TEIXEIRA, J. An eddy-diffusivity/mass-flux parametrization for dry and shallow cumulus convection. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.130, pp. 3365–3383, 2004.

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Acesso em 20/03/2019. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>

SOUZA, J. G; MENDES, C. L.; COSTA, R. S. Otimização computacional do modelo BRASIL-SR. XIX Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho – WSCAD 2018. Anais pp. 243-252. São José dos Campos, 2018.

STEPHENS, G. L. Radiation profiles in extended water clouds. II: parametrization schemes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.35, pp. 2123-2132, 1978.

STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; RASCHKE, E. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, v.29, pp. 586-603, 1990.

SUNDQVIST, H. Physically-based modeling and simulation of climate and climatic changes, Part I, chapter Parameterization of condensation and associated clouds in models for weather prediction and general circulation simulation, pp. 433–461. M. E. Schlesinger, Ed., Reidel, 1988.

SUNDQVIST, H; BERGE, E; KRISTJANSSON, J. E. Condensation and cloud studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Monthly Weather Review*, v.117, pp. 1641–1657, 1989.

TOGAWA, A. B. Previsão da irradiância solar por rastreamento de nuvens utilizando imagens. Projeto (Graduação) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

TROEN, I. B.; MAHRT, L. A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation. *Boundary-Layer Meteorology*, v.37, pp. 129–148, 1986.

UCAR – The University Corporation for Atmospheric Research. NWP Model Fundamentals – version 2. Boulder, Colorado, USA, 2009.

UCAR – The University Corporation for Atmospheric Research. Influence of Model Physics on NWP Forecasts – version 2. Boulder, Colorado, USA, 2009.

UCAR – University Corporation for Atmospheric Research. Understanding assimilation systems: how models create their initial conditions. COMET® Program web course. 2009.

VIANELLO, R. L. e ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Editora UFV, 2002.

VIGNOLA, F. et alii. Solar and Infrared Radiation Measurements. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, 2012. .

WMO – World Meteorological Organization. A preliminary cloudless standart atmosphere for radiation computation. WCP-112, TD-No. 24, 53 p., 1986.

WMO – World Meteorological Organization. International Pyrheliometer Comparisson IPC-XII. WMO IOM Report no. 124, Davos, Switzerland, 2015

WMO *et al.* Valuing Weather and Climate: Economic Assessment of Meteorological and Hydrological Services. World Meteorological Organization, World Bank Group, Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, and United States Agency for International Development, WMO No. 1153, 2015.

YANG, F.; MITCHELL, K.; HOU, Y.; DAI, Y; ZENG, X.; WANG, Z.; LIANG, X.. Dependence of land surface albedo on solar zenith angle: Observations and model parameterizations. Journal of Applied Meteorology and Climatology, v.47, pp. 2963–2982, 2008.

YAMASOE, M. A. Processos radiativos na atmosfera: fundamentos. Oficina de textos, São Paulo, 2016.

YAMASOE, M. A. Apostila da disciplina de Meteorologia Física II – ACA 0326. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. p. 72-85.

ZHANG, L.; TIAN, G.; LI, J.; Yu, B. Applications of Absorption Spectroscopy Using Quantum Cascade Lasers. Applied Spectroscopy, v. 68, pp. 1095-1107, 2014.

ZHAO, Q.; CARR, F. H. A prognostic cloud scheme for operational nwp models. Monthly Weather Review, v.125, pp. 1931–1953, 1997.

Apêndice A – Avaliação mensal da qualidade dos dados solarimétricos

Figura 55 – Detalhamento mensal da avaliação de qualidade de dados solarimétricos.

ANÁLISE DENSIDADE				
aux	n	f	sum	p
1	0	780	0	0,0000
781	1	10	10	0,0115
791	2	8	26	0,0298
799	3	4	38	0,0436
803	4	5	58	0,0665
808	6	3	76	0,0872
811	7	1	83	0,0952
812	8	4	115	0,1319
816	10	1	125	0,1433
817	12	1	137	0,1571
818	13	1	150	0,1720
819	14	1	164	0,1881
820	16	2	196	0,2248
822	18	2	232	0,2661
824	19	1	251	0,2878
825	22	2	295	0,3383
827	23	1	318	0,3647
828	25	1	343	0,3933
829	27	1	370	0,4243
830	32	1	402	0,4610
831	34	3	504	0,5780
834	36	1	540	0,6193
835	40	1	580	0,6651
836	41	1	621	0,7122
837	42	1	663	0,7603
838	45	1	708	0,8119
839	48	1	756	0,8670
840	56	1	812	0,9312
841	60	1	872	1,0000

ANÁLISE DENSIDADE				
aux	n	f	sum	p
1	0	787	0	0,0000
788	1	5	5	0,0060
793	2	5	15	0,0179
798	3	7	36	0,0430
805	4	1	40	0,0478
806	5	1	45	0,0538
807	7	3	66	0,0789
810	8	1	74	0,0884
811	10	3	104	0,1243
814	12	1	116	0,1386
815	13	2	142	0,1697
817	16	2	174	0,2079
819	17	3	225	0,2688
822	18	2	261	0,3118
824	20	1	281	0,3357
825	21	2	323	0,3859
827	22	1	345	0,4122
828	23	1	368	0,4397
829	24	1	392	0,4683
830	26	1	418	0,4994
831	29	1	447	0,5341
832	30	1	477	0,5699
833	33	1	510	0,6093
834	35	1	545	0,6511
835	36	1	581	0,6941
836	37	1	618	0,7384
837	38	1	656	0,7838
838	45	3	791	0,9450
841	46	1	837	1,0000

ANÁLISE DENSIDADE				
aux	n	f	sum	p
1	0	770	0	0,0000
771	1	13	13	0,0133
784	2	4	21	0,0214
788	3	5	36	0,0367
793	4	7	64	0,0652
800	5	6	94	0,0958
806	7	3	115	0,1172
809	9	2	133	0,1356
811	10	1	143	0,1458
812	12	2	167	0,1702
814	13	1	180	0,1835
815	16	3	228	0,2324
818	17	2	262	0,2671
820	18	1	280	0,2854
821	19	2	318	0,3242
823	21	1	339	0,3456
824	22	1	361	0,3680
825	23	1	384	0,3914
826	25	2	434	0,4424
828	27	2	488	0,4975
830	28	1	516	0,5260
831	32	1	548	0,5586
832	33	1	581	0,5923
833	35	1	616	0,6279
834	36	1	652	0,6646
835	37	1	689	0,7023
836	40	1	729	0,7431
837	41	1	770	0,7849
838	43	1	813	0,8287
839	52	1	865	0,8818
840	53	1	918	0,9358
841	63	1	981	1,0000

		ANÁLISE DENSIDADE				
		aux	n	f	sum	p
1.40	0.00	1	0	772	0	0.0000
1.30	0.00	773	1	16	16	0.0143
1.25	0.00	789	2	3	22	0.0197
1.20	0.00	792	3	4	34	0.0305
1.15	0.00	796	4	2	42	0.0376
1.10	0.00	798	5	3	57	0.0511
1.05	0.00	801	6	2	69	0.0618
1.00	0.00	803	7	3	90	0.0806
0.95	0.00	806	8	3	114	0.1022
0.90	0.00	809	10	1	124	0.1111
0.85	0.00	810	11	3	157	0.1407
0.80	0.00	813	13	2	183	0.1640
0.75	0.00	815	15	1	198	0.1774
0.70	0.00	816	16	4	262	0.2348
0.65	0.00	820	17	1	279	0.2500
0.60	0.00	821	18	1	297	0.2661
0.55	0.00	822	19	1	316	0.2832
0.50	0.00	823	21	1	337	0.3020
0.45	0.00	824	23	1	360	0.3226
0.40	0.00	825	24	1	384	0.3441
0.35	0.00	826	26	1	410	0.3674
0.30	0.00	827	27	2	464	0.4158
0.25	0.00	829	32	1	496	0.4444
0.20	0.00	830	35	1	531	0.4758
0.15	0.00	831	36	3	639	0.5726
0.10	0.00	834	38	1	677	0.6066
0.05	0.00	835	46	1	723	0.6478
0.00	0.00	836	53	1	776	0.6953
	0.00	837	57	1	833	0.7464
	0.00	838	65	1	898	0.8047
	0.00	839	70	1	968	0.8674
	0.00	840	74	2	1116	1.0000

		ANÁLISE DENSIDADE				
		aux	n	f	sum	p
1.40	0.00	1	0	765	0	0.0000
1.30	0.00	766	1	19	19	0.0159
1.25	0.00	785	2	6	31	0.0260
1.20	0.00	791	3	8	55	0.0461
1.15	0.00	799	4	5	75	0.0629
1.10	0.00	804	5	2	85	0.0712
1.05	0.00	806	6	1	91	0.0763
1.00	0.00	807	8	2	107	0.0897
0.95	0.00	809	9	1	116	0.0972
0.90	0.00	810	10	2	136	0.1140
0.85	0.00	812	11	1	147	0.1232
0.80	0.00	813	12	1	159	0.1333
0.75	0.00	814	13	1	172	0.1442
0.70	0.00	815	14	1	186	0.1559
0.65	0.00	816	16	2	218	0.1827
0.60	0.00	818	20	2	258	0.2163
0.55	0.00	820	21	1	279	0.2339
0.50	0.00	821	22	2	323	0.2707
0.45	0.00	823	23	2	369	0.3093
0.40	0.00	825	24	1	393	0.3294
0.35	0.00	826	27	1	420	0.3821
0.30	0.00	827	32	1	452	0.3789
0.25	0.00	828	33	1	485	0.4065
0.20	0.00	829	34	1	519	0.4350
0.15	0.00	830	40	1	559	0.4686
0.10	0.00	831	41	1	600	0.5029
0.05	0.00	832	42	1	642	0.5381
0.00	0.00	833	46	1	688	0.5767
	0.00	834	48	2	784	0.6572
	0.00	836	53	1	837	0.7016
	0.00	837	62	1	899	0.7536
	0.00	838	66	1	965	0.8089
	0.00	839	67	1	1032	0.8650
	0.00	840	68	1	1100	0.9220
	0.00	841	93	1	1193	1.0000

		ANÁLISE DENSIDADE				
		aux	n	f	sum	p
1.40	0.00	1	0	775	0	0.0000
1.35	0.00	776	1	8	8	0.0062
1.30	0.00	784	2	7	22	0.0169
1.25	0.00	791	4	2	30	0.0231
1.20	0.00	793	5	6	60	0.0462
1.15	0.00	799	6	4	84	0.0646
1.10	0.00	803	8	3	108	0.0831
1.05	0.00	806	9	4	144	0.1108
1.00	0.00	810	10	1	154	0.1185
0.95	0.00	811	11	4	198	0.1523
0.90	0.00	815	13	1	211	0.1623
0.85	0.00	816	14	1	225	0.1731
0.80	0.00	817	19	1	244	0.1877
0.75	0.00	818	22	1	266	0.2046
0.70	0.00	819	25	1	291	0.2238
0.65	0.00	820	26	1	317	0.2438
0.60	0.00	821	28	1	345	0.2654
0.55	0.00	822	29	1	374	0.2877
0.50	0.00	823	30	1	404	0.3108
0.45	0.00	824	33	1	437	0.3362
0.40	0.00	825	34	1	471	0.3623
0.35	0.00	826	35	1	506	0.3892
0.30	0.00	827	37	1	543	0.4177
0.25	0.00	828	39	1	582	0.4477
0.20	0.00	829	41	2	664	0.5108
0.15	0.00	831	42	1	706	0.5431
0.10	0.00	832	44	2	794	0.6108
0.05	0.00	834	45	1	839	0.6454
0.00	0.00	835	53	2	945	0.7269
	0.00	837	55	1	1000	0.7692
	0.00	838	64	1	1064	0.8185
	0.00	839	66	1	1130	0.8692
	0.00	840	82	1	1212	0.9323
	0.00	841	88	1	1300	1.0000

[illegible] [illegible]