



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELOS DE ESTIMATIVA DAS COMPONENTES
DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR DE DADOS
METEOROLÓGICOS**

LUCAS DOUGLAS NÓBREGA COELHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS**

**Brasília, DF
2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELOS DE ESTIMATIVA DAS COMPONENTES
DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR DE DADOS
METEOROLÓGICOS**

LUCAS DOUGLAS NÓBREGA COELHO

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARIO BENJAMIM BAPTISTA SIQUEIRA

MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO:

BRASILIA: NOVEMBRO DE 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELOS DE ESTIMATIVA DAS COMPONENTES DE RADIAÇÃO
SOLAR A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS**

LUCAS DOUGLAS NÓBREGA COELHO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

**Prof. Mario Benjamim Baptista Siqueira, Dr. (ENM-UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof. Antônio César Pinho Brasil Junior, Dr. (ENM-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. Jorge Andrés Cormane Angarita, Dr. (FGA-UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 23 DE NOVEMBRO DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

LUCAS DOUGLAS NÓBREGA COELHO

Modelos de estimativa das componentes de radiação solar a partir de dados meteorológicos.
[Distrito Federal] 2016.

xxi, 129p., 210 x 297 mm, (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2016).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica

1. Radiação Solar 2. Modelos de estimativa

3. Energia Solar 4. Modelagem

I. ENM/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COELHO, L. D. N. (2016). Modelos de estimativa das componentes de radiação solar a partir de dados meteorológicos. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM-148/2016, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Lucas Douglas Nóbrega Coelho

TÍTULO: Modelos de estimativa das componentes de radiação solar a partir de dados meteorológicos.

GRAU: Mestre

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente com propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Lucas Douglas Nóbrega Coelho
QR 304 Conjunto M Casa 18
CEP: 72504-513 Santa Maria/DF - Brasil

DEDICATÓRIA

*A minha mãe, pelo apoio e
incentivo até seu último suspiro.
E a Deus por me dar forças para
continuar e concluir mais esta etapa.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me concedido saúde e perseverança necessárias para que eu superasse as dificuldades que a vida nos prega e seguisse em frente rumo à conquista de mais uma importante etapa de minha vida.

Aos meus pais, Rafael e Luzia, e meu irmão Júnior por toda confiança, força e apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu professor orientador, Mario Benjamin Baptista Siqueira pela orientação, dedicação e constante incentivo, com os quais foi possível a concretização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica/UnB, incluindo seus professores e funcionários pelo serviço de excelência prestado.

Ao apoio financeiro do CNPq, através do Projeto 407076/2013-1 e ao projeto estratégico da ANEEL Jaiba Solar (PE-0394-1311/2011).

À minha companheira Camila pelo amor, incentivo e compreensão.

Para quem não sabe para onde quer ir, qualquer caminho serve (Lewis Carroll)

RESUMO

O conhecimento da variabilidade temporal da radiação solar em determinada região é indispensável para qualquer projeto que envolva energia solar. Devido ao alto custo das medições de radiação solar, em virtude dos equipamentos de instrumentação, os modelos de estimativa das componentes de radiação solar em função de dados mais fáceis de serem medidos se tornaram uma alternativa viável e confiável.

O objetivo do trabalho é parametrizar e analisar modelos locais de estimativa mensal e sazonal da radiação global e da radiação difusa gerados a partir de dados históricos. Foram analisadas cinco cidades brasileiras de regiões e climas diversos: Brasília-DF, Cuiabá-MT, Palmas - TO, Petrolina-PE e Santa Maria - RS

Para a parametrização dos modelos, utilizou-se dados históricos de insolação, radiação global e radiação difusa do banco de dados do SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) e do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A validação dos modelos foi realizada entre a confrontação dos resultados estimados com dados reais para um ano, além da análise estatística dos indicadores RMSE, MBE, r^2 e coeficiente d de Willmott.

Os modelos para previsão da radiação solar global e difusa média mensal obtiveram em ambas as cidades, independente do clima, excelentes estimativas, com valores estimados bem próximos dos valores reais e indicadores estatísticos promissores. Comparando estes resultados para escalas de tempo sazonais também mostraram boa concordância, porém o modelo mensal local foi o mais adequado.

Os modelos com melhores resultados foram utilizados para gerar séries históricas de radiação solar e suas componentes a partir de dados de horas de insolação, sendo possível analisar a tendência destas séries pelo método de Mann-Kendall, conhecendo assim a disponibilidade temporal destes recursos.

Palavras-chave: Previsão, Estimativa, Radiação, Modelagem.

ABSTRACT

The knowledge of the temporal variability of solar radiation in a particular region is essential for any project involving solar energy. Due the difficulties of the solar radiation measurements, consequence of the high cost of instrumentation, the estimation models of solar radiation from easier-to -measure data, has become a feasible and trustworthy alternative.

The objective of the work is to parameterize and analyze local models of monthly and sazonal estimate of global and diffuse radiation generated from historical data. Five Brazilian cities from different regions and diverse climates had been analyzed: Brasilia-DF, Cuiabá-MT, Palmas-TO, Petrolina-PE and Santa Maria-RS.

For parameterization of the models, we used historical data sunstroke, global radiation and diffuse radiation SONDA database (National Organization System of Environmental Data) and INMET (National Meteorological Institute). The validation of the models was performed in a comparison of the estimated results with real data for one year, besides the statistical analysis of the indicators RMSE, MBE, and Willmott coefficient.

The models for predicting the monthly average solar global and diffuse radiation obtained in both cities, regardless of climate, excellent estimates, with estimated values very close to the actual values and promising statistical indicative. Comparing these results to seasonal time scales also showed good agreement, but the site monthly model was the most appropriate.

The models with better results were used to generate historical series of solar radiation and its components from hours of insolation data, it is possible to analyze the trend of this series by Mann-Kendall method, so knowing the temporal availability of these resources.

Keywords: Prevision, Estimate, Radiation, Modeling.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	1
1.1OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2.REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 SOL	5
2.2CONSTANTE SOLAR	6
2.3RADIAÇÃO SOLAR	6
2.3.1 Direção da radiação solar	7
2.3.2 Radiação solar no topo da atmosfera	9
2.3.3 Componentes da radiação solar	11
2.3.4 Hora Solar	16
2.3.5 Brilho Solar	17
2.3.6 Número de horas do período diurno do dia	19
2.4 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÕES DA RADIAÇÃO SOLAR	19
2.5 SÉRIES HISTÓRICAS DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS	20
3.MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR	22
3.1 MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL	22
3.2 MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA	26
3.3 OBSERVAÇÕES EM RELAÇÃO AOS MODELOS ESTUDADOS	27
4.MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 METODOLOGIA DAS ANÁLISES E FERRAMENTAS	28
4.1.1 Regressão linear por mínimos quadrados	28
4.1.2 Ajuste de curvas com a linearização de equações não lineares	29
4.1.3 Regressão polonomial	29
4.2 TESTES ESTATÍSTICOS PARA VALIDAÇÃO	30
4.2.1 Erro de desvio médio – MBE (Mean Bios Error)	31
4.2.2 Erro quadrático médio – RMSE (Root Mean Square Error)	31
4.2.3 Coeficiente d de Willmott	32
4.2.4 Coeficiente de determinação r^2	32

4.2.5 Teste de Mann-Kendall	32
4.3 CIDADES ANALISADAS	34
4.3.1 Brasília	34
4.3.2 Cuiabá	35
4.3.3 Palmas	35
4.3.4 Petrolina	35
4.3.5 Santa Maria	35
4.4 BANCOS DE DADOS	35
4.5 TRATAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DESCRITIVA	38
4.6 MÉTODO DE ANÁLISES	40
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	43
5.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	44
5.2 MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL	46
5.2.1 Modelos de estimativa da Radiação Solar Global Média Mensal	46
5.2.2 Modelos de estimativa da Radiação Solar Global Média Mensal Sazonal	54
5.3 MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA	65
5.3.1 Modelos de estimativa da Radiação Solar Difusa Média Mensal	65
5.3.2 Modelos de estimativa da Radiação Solar Difusa Média Mensal Sazonal	73
5.4 MODELOS ÚNICOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA	83
5.5 SÉRIES HISTÓRICAS DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR DE DADOS DE HORAS DE INSOLAÇÃO	93
6. CONCLUSÕES	100
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Foto do Sol.....	5
Figura 2.2 - Ângulo de zênite, ângulo azimutal da superfície, ângulo azimutal solar e inclinação para uma superfície inclinada.....	8
Figura 2.3 - Orbita da Terra em torno do SOL.....	9
Figura 2. 4 - Radiação no topo da atmosfera para diferentes latitudes.....	11
Figura 2.5 - Tipos de espalhamento da radiação incidente.....	14
Figura 2.6 - Formas da radiação solar na superfície terrestre.....	14
Figura 2.7 - A) Heliógrafo Campbell-Stokes e B) Fitas Heliográficas.	18
Figura 4.1 - Localização das cidades analisadas	34
Figura 4.2 - Fluxograma para geração dos dados históricos de radiação solar	42
Figura 5.1 - Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Brasília-DF; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Brasília-DF.....	47
Figura 5.2- a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Cuiabá-MT; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Cuiabá-MT.....	47
Figura 5.3 - a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Palmas-TO; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Palmas-TO.....	48
Figura 5.4- a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Petrolina-PE; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Petrolina-PE.....	48
Figura 5.5 - a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Santa Maria-RS; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Santa Maria-RS.....	49
Figura 5.6 - Tatura no interior da partícula: teste espacial de malha Comparação estimativa modelo linear e não linear vs medição real para Brasília.....	52

Figura 5.7– Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Cuiabá.....	52
Figura 5.8- Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Palmas	53
Figura 5.9- Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Petrolina.....	53
Figura 5.10- Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Santa Maria.....	54
Figura 5.11 - Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Brasília: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera.....	55
Figura 5.12 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Cuiabá: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera	56
Figura 5.13 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Palmas: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera	57
Figura 5.14 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Petrolina: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera	58
Figura 5.15 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Santa Maria: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera	59
Figura 5.16 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e mensal sazonal vs medição real para Brasília.....	62
Figura 5.17 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e mensal sazonal vs medição real para Cuiabá	63
Figura 5.18 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e mensal sazonal vs medição real para Palmas.....	63

Figura 5.19 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e mensal sazonal vs medição real para Petrolina.....	64
Figura 5.20 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e mensal sazonal vs medição real para Santa Maria.....	64
Figura 5.21 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Brasília.....	66
Figura 5.22 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Cuiabá	66
Figura 5.23 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Palmas.....	67
Figura 5.24 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Petrolina	67
Figura 5.25 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Brasília	71
Figura 5.26 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Cuiabá	72
Figura 5.27 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Palmas	72
Figura 5.28 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Petrolina	73
Figura 5.29 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Brasília: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera	74
Figura 5.30 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Cuiabá: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera.....	75
Figura 5.31 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Palmas: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera.....	76
Figura 5.32 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Petrolina: a) Verão; b) Outono; c)Inverno; d)Primavera.....	77

Figura 5.33 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Brasília.....	80
Figura 5.34 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Cuiabá.....	81
Figura 5.35 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Palmas.....	81
Figura 5.36 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Petrolina.....	82
Figura 5.37 – Relação índice de claridade e razão de insolação para o conjunto de dados das cinco cidades analisadas (Brasília, Cuiabá, Palmas, Petrolina e Santa Maria), juntamente com reta de aproximação linear	84
Figura 5.38 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa para o conjunto de dados de quatro cidades analisadas (Brasília, Cuiabá, Palmas e Petrolina), juntamente com linhas de aproximação polinomial 4º ordem e linear	84
Figura 5.39 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Brasília; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Brasília.....	88
Figura 5.40 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Cuiabá; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Cuiabá.....	89
Figura 5.41 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Palmas; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Palmas.....	90
Figura 5.42 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Petrolina; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Petrolina.....	91

Figura 5.43 – Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Santa Maria.....	92
Figura 5.44 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Brasília.....	95
Figura 5.45 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Cuiabá: a) Série de 1961 a 1988; b) Série histórica de 1996 a 2016.....	96
Figura 5.46 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Palmas.....	96
Figura 5.47 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Petrolina.....	97
Figura 5.48 – Série histórica de valores estimados de radiação global para a cidade de Santa Maria: a) Série de 1961 a 1984; b) Série histórica de 1991 a 2016.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre as diversas tecnologias de conversão de energia solar e as componentes da radiação solar de que dependem.....	15
Tabela 3.1 - Coeficientes de correlação determinados por RIBEIRO (1980).....	24
Tabela 4.1 - Série de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação solar global retirados do banco de dados do INMET	37
Tabela 4.2- Série de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação solar difusa retirados do banco de dados do SONDA.....	38
Tabela 4.3 - Quantidade de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação solar global após tratamento.....	39
Tabela 4.4 – Quantidade de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação difusa após tratamento.....	40
Tabela 5.1 - Análise Descritiva dos dados utilizados para parametrização e validação dos modelos de estimativa da radiação solar global.....	44
Tabela 5.2 – Análise Descritiva dos dados utilizados para parametrização e validação dos modelos de estimativa da radiação solar difusa.....	45
Tabela 5.3 – Coeficientes do modelo linear e indicativos estatísticos para estudo da radiação solar global média mensal para dados de validação.....	50
Tabela 5.4 - Coeficientes do modelo não linear e indicativos estatísticos para estudo da radiação solar global média mensal para dados de validação.....	50
Tabela 5.5 - Coeficientes dos modelos linear e indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar global média mensal sazonal para dados de validação.....	60
Tabela 5.6 - Porcentagem e valores médios mensais da disponibilidade de radiação solar difusa e direta no período de análise para dados de geração.....	68
Tabela 5.7 - Coeficientes dos modelos polinomial, linear e não linear para estimativa da radiação solar difusa média mensal.....	69

Tabela 5.8 - Indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar difusa média mensal dos modelos polinomial, linear e não linear para para dados de validação.....	70
Tabela 5.9 – Coeficientes dos modelos polinomial, linear e não linear para estimativa da radiação solar difusa média mensal sazonal.....	78
Tabela 5.10 – Indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar difusa média mensal sazonal dos modelos polinomial, linear e não linear para dados de validação.....	79
Tabela 5.11 – Coeficientes dos modelos únicos de estimativa da radiação solar global e difusa média mensal.....	85
Tabela 5.12 – Indicativos estatísticos estudo da estimativa da radiação solar global média mensal dos modelos únicos de estimativa para dados de validação.....	86
Tabela 5.13 – Indicativos estatísticos estudo da estimativa da radiação solar difusa média mensal dos modelos únicos de estimativa para dados de validação.....	86
Tabela 5.14 – Períodos de dados de horas de insolação para geração das séries históricas de radiação solar	94
Tabela 5.15 – Valores do teste Man-Kendall e análise de tendências	98

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{ger}, b_{ger}	Coefficiente modelo único corrigido de estimativa radiação solar global
a, b	Coefficientes modelo linear de estimativa da radiação solar global
a'', b''	Coefficientes estudados por Kimball
$a_{g,nl}, b_{g,nl}$	Coefficientes modelo não linear de estimativa da radiação solar global
$a_{d,l}, b_{d,l}, c_{d,l}, d_{d,l}$	Coefficientes modelo linear de estimativa da radiação solar difusa
$a_{d,nl}, b_{d,nl}, c_{d,nl}, d_{d,nl}$	Coefficientes modelo não linear de estimativa da radiação solar difusa
$a_{d,p}, b_{d,p}, c_{d,p}, d_{d,p}$	Coefficientes modelo polinomial de estimativa da radiação solar difusa
C	Cobertura média mensal de nuvens
d_r	Distância relativa Terra-Sol média diária
H	Radiação solar global (MJ/m ²)
H_b	Radiação solar direta na incidência (MJ/m ²)
H_d	Radiação solar difusa (MJ/m ²)
H_{sc}	Constante solar (W/m ²)
H_0	Radiação solar no topo da atmosfera (MJ/m ²)
J	Juliano (número do dia)
K_T	Índice de claridade
L_{ST}	Longitude do meridiano padrão para a hora oficial local
L_{loc}	Longitude oficial local
n	Horas de brilho solar
N	Número de horas período diurno do dia

Símbolos Gregos

ϕ_s	Ângulo de altitude solar
β	Inclinação
γ	Ângulo azimutal da superfície
γ_s	Ângulo de azimute solar
δ	Declinação solar
θ_s	Ângulo de incidência
θ_z	Ângulo de zênite
π	Pi
ϕ	Latitude
ω_s	Ângulo horário

1. INTRODUÇÃO

Em meados dos anos 50 surgiram às primeiras ideias para o aproveitamento do Sol como fonte de energia, com o desenvolvimento do processo de dopagem do silício pelo químico Calvin Fuller em 1954, entretanto estas foram descartadas, devido os baixos preços do petróleo e o mercado já desenvolvido desta tecnologia (PERLIN,1999). O uso dos combustíveis fósseis se tornou uma dependência dos mais diversos países, sendo utilizado de diversas formas para alavancar economias e trazer o desenvolvimento econômico e social. Com o aumento do preço do petróleo devido às diversas guerras, os olhos se voltaram novamente para a inesgotável energia solar.

A busca por novas fontes energéticas vem se tornando uma das missões mais difíceis e necessárias dos últimos anos, uma vez que grande parte da energia consumida no mundo ainda é proveniente de combustíveis fósseis, fonte esta de grande impacto ambiental.

O Brasil, apesar de possuir uma matriz energética privilegiada, todavia conta com uma importante participação da fonte hídrica (BEN, 2015), e por isso vem procurando diversificar as fontes para diminuir a vulnerabilidade energética frente às variabilidades climáticas que se apresentaram nos últimos anos e assim garantir a segurança no abastecimento. É o caso do investimento no desenvolvimento das tecnologias que envolvem as fontes renováveis. A maioria dos investimentos brasileiros na área de energia concentram-se no petróleo ou na geração hidroelétrica, duas áreas já desenvolvidas e consolidadas, ao contrário de países como China, Alemanha, Estados Unidos, potências mundiais que se empenham para o desenvolvimento em energia solar, eólica, geotérmica ou oceânica.

A demanda por energia no Brasil tende a aumentar nos últimos anos, como reflexo do crescimento econômico. Neste cenário as fontes renováveis terão importante papel, já que estas podem ser aproveitadas de muitas maneiras e em diversos processos, gerando problemas ambientais mínimos.

A energia proveniente do Sol é a fonte primária de energia para o Planeta, praticamente inesgotável e com efeitos diretos e indiretos sobre todos os fenômenos físicos e biológicos que ocorrem na superfície do planeta, o Sol já tem uma importância vital. Essa energia poderia ser utilizada de forma mais efetiva através: de sistemas de aquecimento de água, geração fotovoltaica, iluminação, co-geração com outras fontes, entre outros processos.

Esta fonte de energia poderia suprir uma parcela importante do consumo de energia a nível global, principalmente em regiões onde a incidência de energia solar é abundante (BEN, 2015).

Para o melhor aproveitamento desta fonte de energia, torna-se importante o conhecimento de sua disponibilidade e variabilidade temporal em determinada região, dentro de certa margem de segurança.

Embora a radiação solar na superfície terrestre possa ser medida diretamente por intermédio de instrumentos, como o piranômetro, o elevado custo tanto para instalação quanto para manutenção (assistência especializada), principalmente quando se tem interesse nas componentes da radiação difusa e direta, tem dificultado essas medições na maior parte do mundo.

Os dados das diferentes componentes da radiação solar podem ser encontrados por meio de banco de dados de estações solarimétricas instaladas no território brasileiro, estas estações são relativamente recentes em sua maioria, ao se comparar com as estações meteorológicas que medem horas de insolação.

Assim diversas pesquisas estão direcionadas ao desenvolvimento de modelos para sua estimativa levando em conta parâmetros mais fáceis de serem obtidos como horas de insolação, latitude, longitude e temperatura. A relação empírica entre índice de claridade (razão de radiação) e razão de insolação tem sido o método mais empregado com esse fim, tendo em vista que o número de horas de insolação pode ser obtido com equipamento de menor custo e por isso disponível em maior número.

Uma vez obtido tal modelo de estimativa, o mesmo pode ser utilizado para estimar a radiação em locais de condições climáticas semelhantes ao da região do modelo, servindo como base para dimensionar sistemas de geração tanto fotovoltaica quanto heliotérmica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Essa dissertação apresenta um estudo sobre a disponibilidade da radiação solar em cinco cidades brasileiras: Brasília – DF, Cuiabá – TO, Palmas – PA, Petrolina – PE e Santa Maria -RS; tendo como objetivo principal analisar o recurso solar nestas cidades a partir de dados históricos, propondo modelos de estimativas das componentes da radiação solar.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos podem citar:

- Parametrização de modelos de estimativa mensal e sazonal da radiação global para as cidades analisadas, a partir da relação entre índice de claridade e razão de insolação;
- Parametrização de modelos de estimativa mensal e sazonal da radiação difusa para as cidades analisadas, a partir da relação entre índice de claridade e a razão da radiação difusa e global;
- Avaliação do desempenho dos modelos a partir da comparação com medições reais, bem como, o desempenho entre os modelos;
- Validação dos modelos de estimativa com base em indicativos estatísticos;
- Encontrar o melhor modelo dos analisados para a estimativa da radiação solar global e da parcela difusa com base nos indicativos estatísticos analisados.
- Apresentar séries históricas de radiação global, difusa e direta a partir dos modelos de estimativa de melhor desempenho, com base na maior série de dados históricos horas insolação disponíveis e verificar a tendência destas séries por meio do teste de Mann-Kendall.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em sete capítulos. Este primeiro é uma introdução aos assuntos abordados, onde é apresentado o corpo do texto, sendo discutido o problema a ser abordado com os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo aborda conhecimentos básicos considerados no estudo da radiação solar, formando uma base de conhecimentos necessários para alcançar os objetivos do trabalho, sendo abordados, assuntos como as componentes da radiação solar, equipamentos de medições, equacionamentos pertinentes, entre outros.

O terceiro capítulo apresenta um levantamento bibliográfico sobre os trabalhos realizados no mundo, inclusive no Brasil, mostrando a correlação entre a variável radiação solar e variáveis climatológicas, como as horas de insolação. Métodos de estimativa da radiação solar global e difusa, bem como a proposta de novas correlações para estimar esses recursos, são apresentados.

O quarto capítulo aborda a metodologia utilizada nas análises do trabalho. Apresenta as cidades estudadas, bem como o banco de dados a ser analisado. Um apanhado sobre métodos de correlação e regressão entre variáveis, juntamente com testes estatísticos de validação de modelos de estimativa e o teste d Mann-Kendall para verificar a tendência de séries histórica de dados meteorológicos.

O quinto capítulo versa sobre a análise e discussão da aplicação dos modelos de estimativa da radiação solar global e difusa nas cidades analisadas, com o auxílio de análise gráfica e tabelas comparativas.

O sexto capítulo descreve as conclusões finais desta dissertação.

O sétimo capítulo finaliza o trabalho com as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOL

O Sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m. Esta é constituída de partículas nucleares entre as quais se encontra principalmente, os núcleos de hidrogênio (prótons). Ocorrem constantemente reações termonucleares em seu núcleo.

Estima-se que 90% da energia gerada do Sol ocorrem das reações nucleares no núcleo solar. O núcleo tem apenas 15% do volume solar, porém cerca de 40 % da massa solar, devido à densidade de 10^5 kg/m^3 , isso em um raio de 0,23 do raio total do Sol. A superfície solar é chamada de fotosfera, tem uma temperatura aproximada de 5700 K e densidade de 10^{-5} kg/m^3 . A fotosfera é a fonte da maior parte da radiação solar, também é responsável pela luz que torna o Sol visível (DUFFIE & BECKMAN, 2013). A Figura (2.1) mostra uma foto do Sol obtida pelo satélite SOHO (Solar & Heliospheric Observatory).

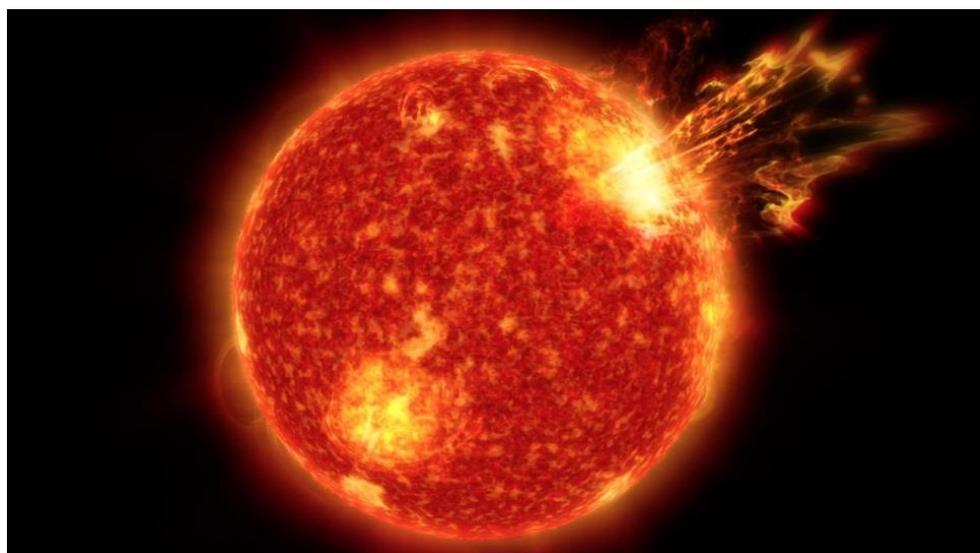


Figura 2.1 – Foto do Sol obtida pelo Observatório Heliosférico & Solar (SOHO) da Agência Espacial Americana (NASA). Fonte: NASA (2016)

O Sol gera uma energia radiante de aproximadamente $3,94 \times 10^{26}$ Watts dos quais são interceptados pela Terra aproximadamente $1,8 \times 10^{17}$ Watts (IQBAL, 1983). Na entrada da atmosfera a intensidade da radiação é modificada por espalhamento em moléculas, poeiras, partículas de aerossóis e vapor de água, pela absorção e pela reflexão na superfície terrestre.

2.2 CONSTANTE SOLAR

A radiação emitida pelo sol e sua relação espacial com a Terra resulta em uma intensidade quase fixa de radiação solar no topo da atmosfera da Terra, sendo esta a constante solar. Vale ressaltar que a radiação extraterrestre varia devido a órbita elíptica da terra, mesmo a constante solar sendo fixa.

A constante solar “ H_{sc} ” é a densidade de fluxo de radiação que incide numa superfície unitária, normal aos raios solares, em uma região fora da atmosfera da Terra e separada do Sol por uma distância igual à distância média entre Terra e o Sol (VIANELLO & ALVES, 2006).

Estudos pioneiros feitos inicialmente assumiram que o valor da constante solar seria de 1322 W/m^2 , sendo este revisto por JOHNSON (1954) para 1395 W/m^2 , estes estudos iniciais foram realizados com medições terrestres, utilizando extrapolações das medições para estimativas de transmissão atmosférica, para correção da radiação que já havia sido absorvida e espalhada.

Com a disponibilidade de aeronaves que voassem em elevadas altitudes, balões e naves espaciais foram realizadas medições da radiação solar no topo da atmosfera da Terra. Estas medições resultaram em um valor da constante solar de 1353 W/m^2 , valor este aceito pela NASA (1971).

O valor atual adotado pela World Radiation Center (WCR) para a constante solar é de 1367 W/m^2 , com uma incerteza de ordem de 1%. DUFFIE & BECKMAM (1991) e IQBAL (1981) utilizaram este valor em suas pesquisas. Assim, o valor da constante solar adotado neste trabalho será de 1367 W/m^2 .

2.3 RADIAÇÃO SOLAR

FROTA E SCHIFFER (2003) explicam que a radiação solar é uma energia eletromagnética de onda curta, que atinge a Terra após ser parcialmente absorvida pela atmosfera. Para DIAS (2003), a porcentagem de energia que chega à superfície é cerca de 47% daquela que atinge a camada superior à atmosfera, dependendo das condições climáticas e da latitude local.

Segundo ANGELOCCI et al., (2002) a radiação solar é a maior fonte de energia para a Terra, ela desencadeia todos os processos meteorológicos, influenciando diretamente na

temperatura do ar, pressão atmosférica, precipitação, umidade do ar, entre outros, além de afetar diretamente as atividades fisiológicas dos seres vivos.

Além da sua importância na definição climática nas diversas regiões do planeta, o conhecimento da incidência de radiação solar em escala local é fundamental para estudos agroclimáticos, além de estudos de viabilidade do aproveitamento desta fonte de energia para geração de energia elétrica (FILHO et. al. 2007).

O Brasil, por ser um país com dimensões continentais e possuir grande parte de seu território localizado próximo da linha do Equador, recebe com maior intensidade os raios solares, e conseqüentemente, os valores médios de radiação solar ao longo do ano são mais elevados. Fatores estes relevantes para o aproveitamento e conversão de energia solar em energia elétrica. Sendo esta uma fonte limpa e renovável, o Brasil possui um futuro promissor na exploração deste setor.

ANGELOCCI et al., (2002) explica que o potencial de energia solar disponível compreende o máximo possível de radiação solar incidente sobre a superfície do solo, para um determinado dia e local. Seu conhecimento é importante na estimativa da demanda máxima de evaporação, evapotranspiração, e em estudos e uso de tecnologias de engenharia solar, como painéis fotovoltaicos, aquecedores, secadores, instalações heliotérmicas, etc.

O conhecimento da trajetória da radiação solar até atingir a superfície terrestre é importante para estimativas de intensidade, quantidade e qualidade da radiação incidente sobre determinada localidade em diferentes épocas do ano. Para uma maior compreensão do comportamento da radiação solar que incide sobre uma superfície torna-se necessário definir as componentes da radiação solar: global, direta e difusa. No item 2.3.1 será apresentado brevemente algumas definições quanto às relações geométricas que envolvem a radiação incidente. No item 2.3.2 será apresentado breve explicação da radiação solar no topo da atmosfera, ou radiação solar extraterrestre, e no item 2.3.3 o foco será as componentes da radiação solar: direta e difusa; e a radiação solar total ou radiação global.

2.3.1 Direção da Radiação

Segundo BENFORD & BOCK (1939), as relações geométricas entre um plano e qualquer orientação relativa à Terra em qualquer instante e a radiação solar incidente, pode ser descrita em termo de ângulos. A Fig. (2.2) mostra alguns destes.

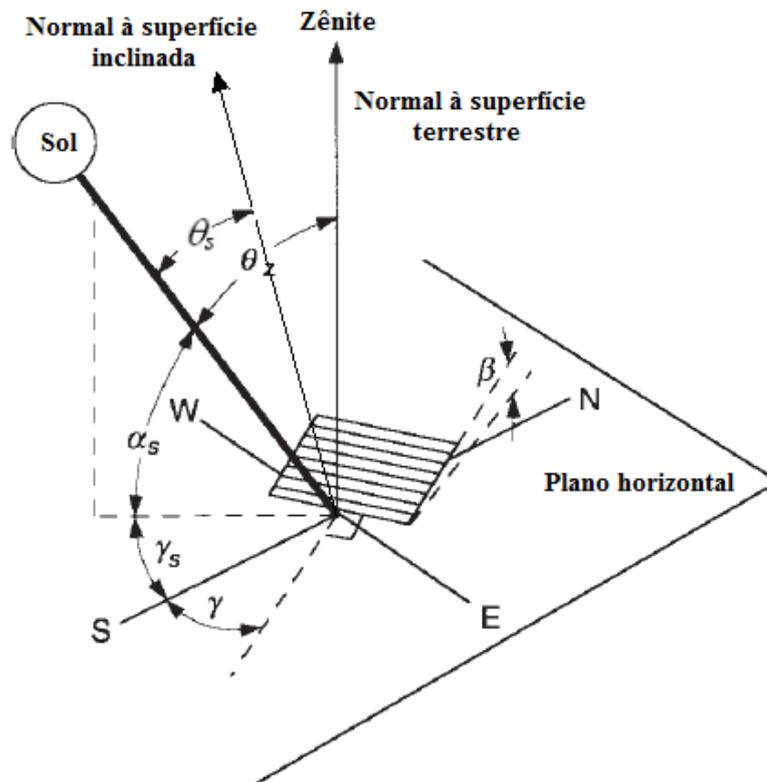


Figura 2.2 – Ângulo de zênite, ângulo azimutal da superfície, ângulo azimutal solar e inclinação para uma superfície inclinada. Adaptado de DUFFIE & BECKMAN, 2013.

Alguns ângulos considerados são os seguintes:

γ – *Ângulo azimutal da superfície*, é o afastamento em relação ao meridiano local, da projeção normal da superfície no plano horizontal.

ϕ - *Latitude*, posição angular norte ou sul em relação ao Equador, sendo o norte positivo, varia entre $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

β – *Inclinação*, ângulo entre o plano de uma superfície em questão e o plano horizontal, varia entre $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

ω_s – *Ângulo horário*, é o ângulo, medido no polo celeste, entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol. Vale 0° ao meio dia no tempo solar verdadeiro e diminui 15° a cada hora pela manhã e soma 15° a cada hora pela tarde.

Outros ângulos descrevem a posição do Sol no céu:

θ_z – *Ângulo de zênite*, é o ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície horizontal.

θ_s – *Ângulo de incidência*, é o ângulo entre a radiação direta sobre a superfície e a normal desta superfície.

α_s – *Ângulo da altitude solar*, é o ângulo entre a horizontal e a linha do Sol. É o complemento do ângulo zênite.

γ_s – *Ângulo de azimute solar*, é o ângulo entre a projeção da radiação direta sobre o plano horizontal e a linha que indica o polo Sul. Deslocamentos a leste do sul são negativos e a oeste, são positivos.

δ – *Declinação*, posição angular do Sol ao meio-dia solar (quando o sol está sobre o meridiano local) com relação ao plano do Equador, norte positivo, varia entre $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

2.3.2 Radiação Solar no Topo da Atmosfera ou Extraterrestre

A radiação solar no topo da atmosfera (H_0), também chamada de radiação extraterrestre, sofre basicamente duas variações principais a serem consideradas, a primeira é a variação da radiação emitida e a segunda é devido a distância Terra-Sol que varia ao longo do ano devido a excentricidade da órbita elíptica da Terra em torno do Sol, como pode ser visualizado na Fig. (2.3).

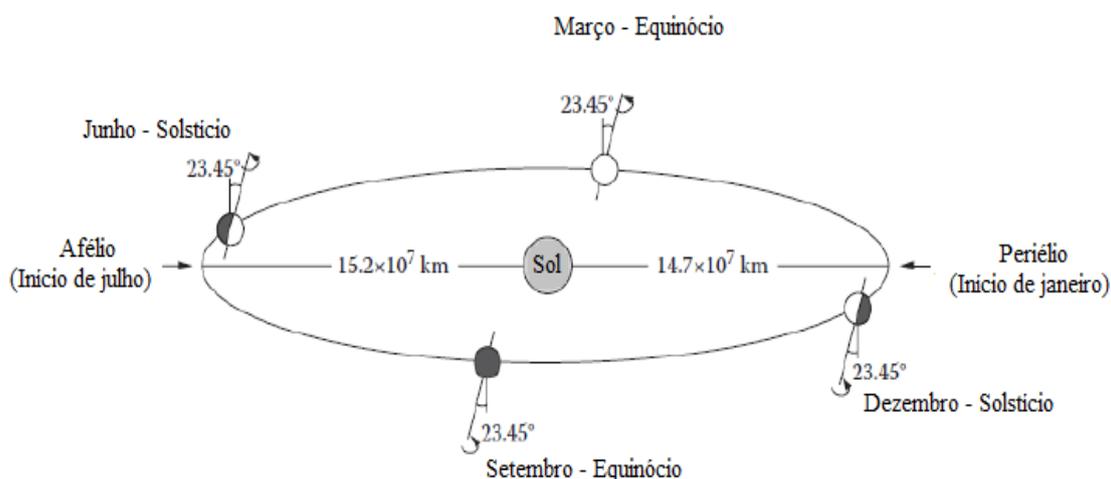


Figura 2.3 – Órbita da Terra em torno do SOL, adaptado de FOSTES et al., (2009)

Segundo IQBAL (1983) a radiação solar no topo da atmosfera pode ser calculada por meio da Eq. (2.1):

$$H_0 = H_{sc} d_r \cos \theta_z \quad (2.1)$$

Na Eq. (2.1), o termo H_{sc} é a constante solar com valor adotado de 1367 W/m^2 conforme tópico 2.2, d_r é distância relativa Terra-Sol média diária que pode ser calculada pela Eq. (2.2) e θ_z é o ângulo zenital e pode ser calculado pela Eq. (2.3)

$$d_r = \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360J}{365} \right) \quad (2.2)$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \phi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \delta \sin \phi) \quad (2.3)$$

O termo J na Eq. (2.2) é o número do dia do ano, ou Juliano.

Na Eq. (2.3), ϕ é a latitude do local, em graus, coordenada geográfica definida na esfera, no elipsoide de referência ou na superfície terrestre, que é o ângulo entre o plano do equador e a normal a superfície de referência, como já mencionado no item 2.3.1.

O termo δ é a declinação solar, em graus, calculada pela equação de COOPER (1969), apresentada na Eq. (2.4), que depende apenas da posição relativa Terra-Sol.

O termo ω_s representa o ângulo horário, calculado pela Eq. (2.5), este é formado pelo meridiano onde se encontra o Sol e o meridiano local, como já mencionado. A passagem do Sol pelo meridiano local divide o dia em duas partes simétricas. O período de rotação da Terra é de 24 horas, ou seja, este é o tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano local, isso significa que são percorridos aproximadamente 360° em 24h, correspondendo a $15^\circ/\text{hora}$.

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + J) \right] \quad (2.4)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.5)$$

Substituindo a Eq. (2.2) e a Eq. (2.3) na Eq. (2.1) temos uma melhor representação da equação que calcula a radiação no topo da atmosfera:

$$H_0 = H_{sc} \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360J}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \delta \sin \phi) \quad (2.6)$$

Na Figura (2.4) é possível visualizar o comportamento da radiação no topo da atmosfera para diferentes latitudes utilizando a Eq. (2.6) durante um ano.

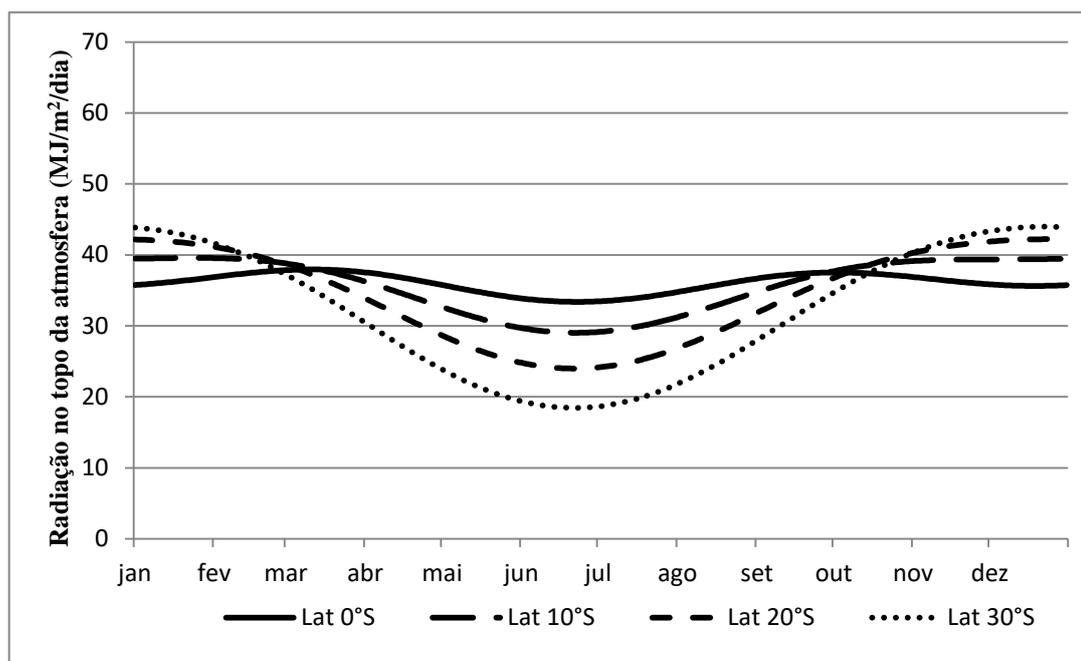


Figura 2.4 – Radiação no topo da atmosfera para diferentes latitudes

A radiação solar no topo da atmosfera é igual para os locais com latitudes semelhantes. A partir da Fig. (2.4) verifica-se que para latitudes menores há menos oscilação no valor da radiação no topo da atmosfera durante o ano, entretanto para latitudes maiores, temos maiores amplitudes. Na latitude 0°S a radiação no topo da atmosfera varia entre 33,39 MJ/m²/dia a 37,95 MJ/m²/dia, e a radiação na latitude 30°S varia de 18,45 MJ/m²/dia a 43,84 MJ/m²/dia. Apesar de no início do ano as latitudes maiores possuírem mais radiação disponível no topo da atmosfera, nestas regiões durante um ano recebem menos radiação no topo da atmosfera do que em latitudes menores, devido à inclinação que os raios solares chegam nestas regiões e a duração do dia nas altas latitudes.

2.3.3 Componentes da radiação solar

Ao se propagar na atmosfera, as ondas eletromagnéticas deparam-se com partículas suspensas, que atuam como espalhadoras e absorvedoras da radiação solar. Por esse motivo, apenas uma fração da radiação incidente no topo da atmosfera atinge a superfície da Terra

(DRECHMER, 2005). Devido a este espalhamento, tem-se no nível do solo, não somente radiação solar direta, formada por feixes de raios solares praticamente paralelos entre si, mas também a radiação difusa, que tem a sua origem no espalhamento das ondas eletromagnéticas. A totalidade da radiação solar que chega ao solo, ou seja, a soma das componentes direta e difusa denomina-se irradiação solar global, a medida mais comum da radiação solar é a radiação solar global sobre uma superfície horizontal (LECKNER, 1978; RICIÉRE et al., 1998).

A radiação solar difusa é a parcela de radiação que chega a superfície terrestre, através do espalhamento da radiação por gases e partículas suspensas na atmosfera. Segundo PEREIRA et al. (2002) esse processo é mais facilmente percebido em dias de céu nublado e em dias com alto teor de poeira, quando a radiação solar tem mais dificuldade de atingir diretamente a superfície, é medida por um piranômetro com anel de sombreamento.

A radiação solar direta consiste na parcela da energia radiante incidente no topo da atmosfera e que chega diretamente a superfície terrestre e que não sofre desvios em sua trajetória (LECKNER, 1978). A radiação direta normal é a radiação solar disponível através de um plano perpendicular à direção do Sol. Já a radiação direta horizontal é toda a radiação solar que chega em um plano horizontal.

A soma da radiação solar difusa e da radiação solar direta horizontal resulta na radiação solar global horizontal, que pode ser definida como o total de energia emitida pelo sol, que incide sobre a superfície terrestre. A radiação solar global é um elemento meteorológico de grande relevância, principalmente em atividades agropecuárias. Assim, é importante medir a disponibilidade de radiação solar global em um determinado local e período do ano. Seu monitoramento é realizado através de um piranômetro.

Neste trabalho serão adotadas as seguintes representações para as componentes da radiação solar: para a radiação solar direta, será adotado H_b , com referência ao termo *Beam Radiation*, para a radiação solar difusa, será adotado H_d , com referência ao termo *Diffuse Radiation*, e para a radiação total ou radiação global, o termo H .

A radiação direta na incidência (H_b) pode ser determinada através das medidas das radiações global e difusa na superfície horizontal, por meio da equação:

$$H_b = \frac{H - H_d}{\cos \theta_z} \quad (2.7)$$

Sendo as medidas de radiação solas em W/m^2 e o ângulo zenital (θ_z) em graus.

Dentre as diversas aplicações da radiação solar, destacam os usos em estudos relacionados à hidrologia, ao clima e ao manejo dos recursos hídricos, e ainda nos modelos de crescimento de plantas e na estimativa da evapotranspiração em projetos de sistemas de irrigação (ALMOROX et al., 2011).

Segundo SOUZA (2009), a radiação solar global, ao atravessar a atmosfera, sofre atenuação pelos fenômenos da reflexão, absorção e espalhamento:

- ❖ **Reflexão:** ocorre entre dois meios diferentes, quando parte da radiação que atinge esta interface é enviada de volta, a fração da radiação incidente que é refletida por uma superfície é o seu albedo, o albedo da Terra como um todo é de 30%, esse processo é causado principalmente pelas nuvens;
- ❖ **Absorção:** neste processo a radiação é convertida em calor, ou seja, sua energia é absorvida pelos gases, fator preponderante no aquecimento da atmosfera, os principais responsáveis são, vapor d'água, gás carbônico, ozônio, etc;
- ❖ **Espalhamento ou difusão:** é o resultado do espalhamento dos raios solares incidentes em algum tipo de partícula suspensa na atmosfera, estes se dispersam em todas as direções.

O espalhamento (difusão) pode ser seletivo, quando realizado por partículas com as mesmas dimensões que o comprimento de onda incidente (λ), é o caso de partículas de raio (r) de tamanho muito pequeno ($r < 0,1 \lambda$) comparado ao comprimento de onda, conhecido como *Rayleigh*, ou não-seletivo, quando produzido por partículas de tamanho maior que o comprimento de onda ($r > 0,1 \lambda$), conhecido como *Mie*. (VICTORIA, 2008; VIANELLO & ALVES, 2006). Os espalhamentos *Rayleigh* e *Mie* são os responsáveis pelas cores que, eventualmente, vemos no céu, na Figura (2.5) são possíveis comparar os dois tipos de espalhamento.

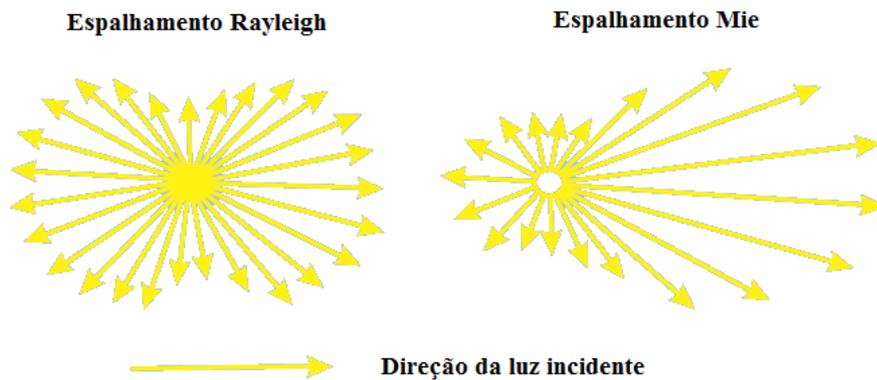


Figura 2.5 – Tipos de espalhamento da radiação incidente, adaptado de VICTORIA (2008)

A intensidade total da luz espalhada é muito influenciada pelo comprimento de onda da radiação (λ), sendo esta inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação, esta também depende do diâmetro da partícula. Esta influência do comprimento de onda explica o azul do céu, como o λ do azul é menor do que o do vermelho, ele é mais espalhado que este, chegando aos nossos olhos com maior intensidade (VICTORIA, 2008).

A Figura (2.6) apresenta resumidamente as diversas formas com que a radiação solar se apresenta na superfície terrestre.

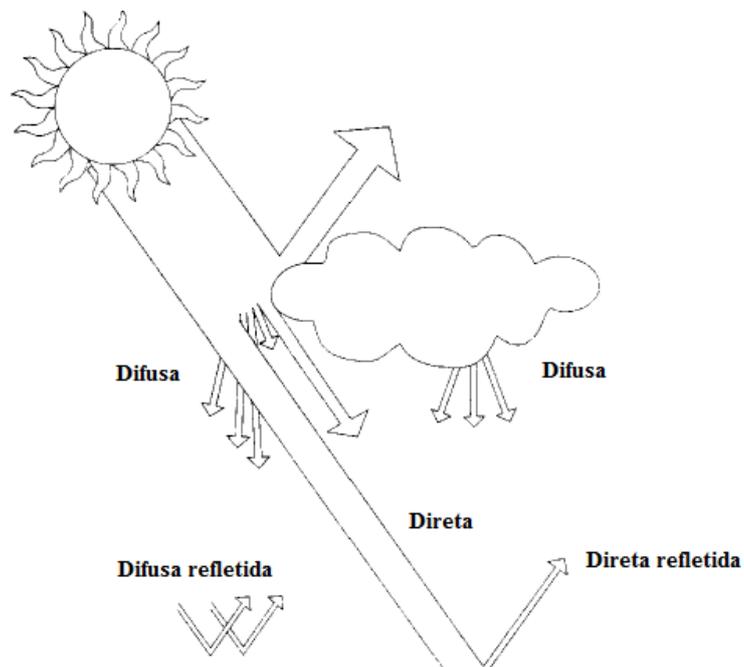


Figura 2.6 – Formas da radiação solar na superfície terrestre, adaptado de RUSSI (2012)

Na Figura (2.6) é possível verificar boa parte da radiação que na atmosfera da Terra é refletida ou absorvida, porém mesmo assim uma grande quantidade de radiação chega à superfície terrestre por meio de radiação direta ou difusa.

As diferentes tecnologias que fazem o aproveitamento da energia solar para a produção de energia eléctrica são influenciadas pelas diferentes componentes da radiação solar e sua variabilidade, ou seja, a natureza do recurso. A Tabela (2.1) foi construída com o intuito de relacionar algumas tecnologias solares com as diferentes componentes da radiação solar de que dependem:

Tabela 2.1 – Relação entre as diversas tecnologias de conversão de energia solar e as componentes da radiação solar de que dependem

Componente da radiação	Tecnologias de conversão e produtos
Radiação direta	Energia Heliotérmica (CSP), tem como produto calor e eletricidade.
	Concentrador Solar Fotovoltaico (CVP), tem como produto eletricidade
Radiação difusa	Clarabóia, tem como produto luz.
Radiação global no plano horizontal	Aquecedor solar, tem como produto calor
Radiação global no plano inclinado	Painel solar fotovoltaico painel solar térmico, seus produtos são eletricidade e calor, respectivamente.

A partir da Tab. (2.1) podemos concluir que as diferentes componentes da radiação solar possuem tecnologias de aproveitamento, sendo essencial o conhecimento destes recursos para o desenvolvimento de projetos e análise de viabilidade de implementação destas.

A forma mais simples para conhecer a disponibilidade da energia radiante do Sol que incide na superfície da Terra é a sua medida direta por meio de equipamentos específicos colocados na superfície. Os equipamentos fornecem medidas pontuais da radiação solar global com grande acurácia, mas, além de apresentarem custo elevado para grandes extensões

territoriais, como é o caso do Brasil, produzem resultados com elevado grau de incerteza devido aos processos de interpolação e extrapolação entre estações de superfície distribuídas de forma esparsa e muito heterogênea.

Muitos autores na literatura estrangeira mediram e analisaram as componentes da radiação solar ao redor do mundo, principalmente em países onde há um déficit de disponibilidade de energia, e grande necessidade de estudos na área.

ISLAM et al. (2009) analisaram dados de radiação solar global média mensal diária em Abu Dhabi, UAE, (lat. 24.43° N e long. 54.45° L) e outras quatorze cidades da Arábia Saudita (Abu Dhabi, Amman, Bahrain, Tunis, Alger, Riadh, Baghdad, Sala(oman), Doha, Casablanca, Sana, Mosul, Damas, Jerusalem e Kuwait). Os valores médios de radiação global obtidos variaram de 16,17 MJ/m² em Alger a 21,54 MJ/m² em Abu Dhabi. Os valores mínimos variam de 7,92 MJ/m² em Alger a 14,40 MJ/m² em Abu Dhabi. E os máximos variam de 20,88 MJ/m² em Sana a 30,24 MJ/m² em Amman.

HOVE & GOTTSCHÉ (1999) analisaram dados de radiação solar global em vinte localidades no Zimbábue (lat. 17.83° S e long. 31.05° L), West Nicholson, Bulawayo, Mt. Darwin, Beit Bridge, Buffalo Rang, Marondera, Masvigo, Nyanga, Kariba, Harare, Victoria Fal, Binga, Grand Reef, Gweru, Kadoma, Karoi, Makoholi, Matopos, Tsholotsho e Mukandi. Os valores médios variaram de 20,64 MJ/m² em Harare a 23,40 MJ/m² em Victoria Fal, os valores mínimos variaram de 15,00 MJ/m² em Buffalo Rang a 19,70 MJ/m² em Victoria Fal e os valores máximos variaram de 23,20 MJ/m² em Mukandi a 27,00 MJ/m² em Buffalo Rang.

ULGEN & HEPBASLI (2009) analisaram dados médios mensais diários de radiação solar global em três cidades da Turquia, Ankara, Istanbul e Izmir. Os valores médios variam de 14,08 MJ/m² em Istanbul a 16,92 MJ/m² em Izmir, os valores mínimos variam de 4,3 MJ/m² em Istanbul a 7,2 MJ/m² em Izmir e os valores máximos variam de 23,9 MJ/m² em Istanbul a 26,3 MJ/m² em Izmir.

Na literatura brasileira, SOUZA et al. (2005) analisaram dados médios mensais diários de radiação solar global na cidade de Maceió.

2.3.4 Hora solar

A hora solar é outra variável importante no cálculo da radiação solar, pois é o tempo especificado em todas as relações envolvendo a posição do Sol em um determinado momento.

É o tempo baseado no movimento angular aparente do Sol através do céu, com o meio dia solar sendo o instante em que o Sol cruza o meridiano do observador.

A Equação (2.8) é utilizada para o cálculo da hora solar:

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora oficial} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.8)$$

onde L_{st} é a longitude do meridiano padrão para a hora oficial local, L_{loc} é a longitude do local em questão, os valores de longitudes estão em graus oeste, ou seja, $0^\circ < L < 360^\circ$. O termo E representa a equação do tempo determinado pela Eq. (2.9) e dado em minutos.

$$E = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615c \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (2.9)$$

onde B é calculado pela Eq. (2.10).

$$B = (J - 1) \frac{360}{365} \quad (2.10)$$

Onde J é o número do dia do ano.

2.3.5 Brilho Solar

O brilho solar é o intervalo de tempo entre o nascer e o pôr do sol, ou o número de horas, nas quais, durante um dia, o sol é visível e que não esteja oculto por nuvens ou fenômenos atmosféricos de qualquer natureza (VAREJÃO-SILVA, 2006). Esta é uma variável meteorológica importante para diversos ramos da sociedade, agropecuária, geração de energia, turismo, planejamento de obras e outros.

O brilho solar é comumente denominado na literatura de insolação. Termo inapropriado para alguns pesquisadores, pois se originou do termo em inglês “INSOLATION”, abreviatura para densidade de fluxo de radiação solar global incidente (MOIANO DE PAULA, 2012).

O registro do brilho solar é realizado nas Estações Meteorológicas Convencionais com o heliógrafo, um aparelho simples, de fácil operação, barato e que necessita de pouca manutenção. O heliógrafo de Campbell – Stokes é o instrumento mais utilizado com este fim e consiste numa esfera de vidro de 10 cm de diâmetro, montada concentricamente numa secção de uma concha metálica, de tal modo que os raios solares são concentrados sobre uma fita heliográfica (VAREJÃO-SILVA, 2006).

As fitas heliográficas marcadas pelos raios solares são colocadas em diferentes posições durante o ano, de acordo com as estações e variação anual do fotoperíodo. A concentração dos raios solares sobre a fita provoca queimaduras contínuas ou interrompidas, dependendo se há ou não nebulosidade entre o equipamento e o Sol. Assim o registro de brilho solar é computado somando-se o tempo dos segmentos queimados na fita, tendo como unidade horas (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Na Figura (2.7) é apresentado um heliógrafo de Campbell-Stokes e fitas heliográficas utilizadas nas medições de brilho solar.

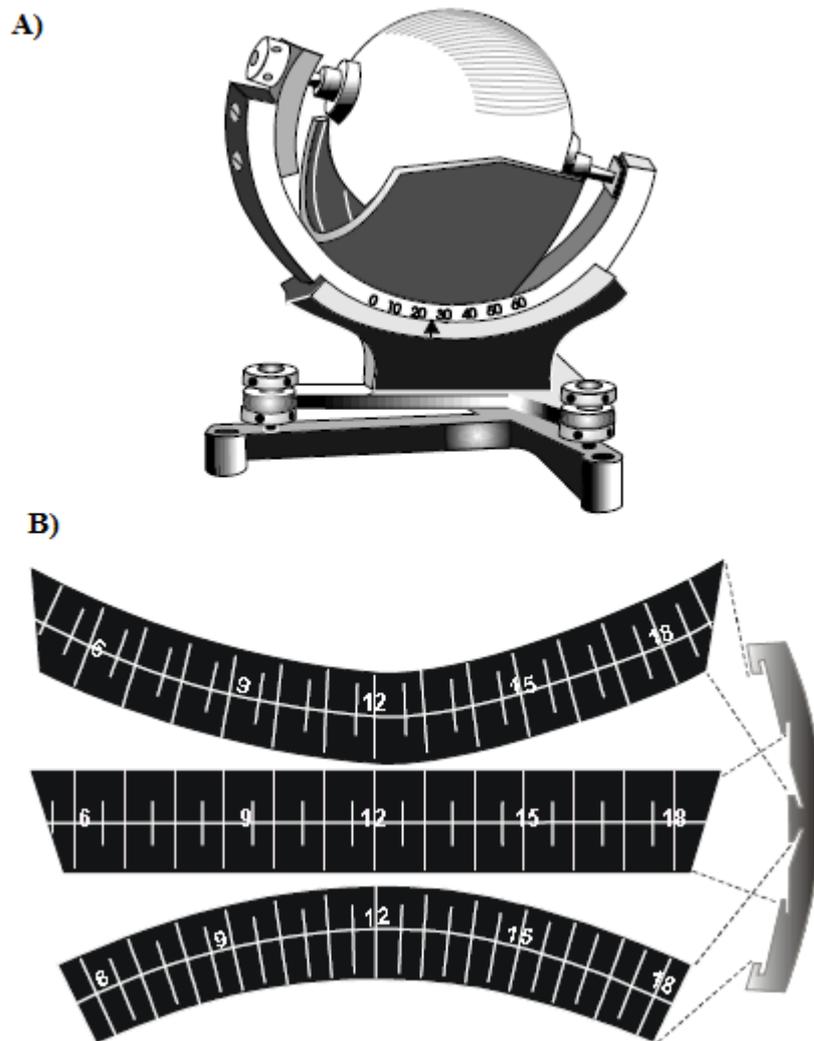


Figura 2.7 - A) Heliógrafo Campbell-Stokes e B) Fitas Heliográficas. Fonte: VAREJÃO-SILVA (2006)

Na Figura (2.7), verifica-se que há vários formatos de fitas heliográficas, estas possuem um formato para cada época do ano devido o declínio do Sol. As fitas curvas curtos

são fixadas entre 13 de Outubro e 28/29 de Fevereiro, as fitas retangulares de 1 de Março a 12 de Abril e de 1 de Setembro a 12 de Outubro e as fitas curvas cumpridos de 13 abril a 31 de Agosto (VAREJÃO-SILVA, 2006)

2.3.6 Número de horas do período diurno do dia

A duração máxima do período diurno do dia pode ser calculada pela equação a seguir (DUFFIE & BECKMAN, 2013):

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \text{ ou } N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.11)$$

2.4 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÕES DE RADIAÇÃO SOLAR

Antes de expor os principais equipamentos utilizados para realizar as medições de radiação solar é necessário se ater a algumas definições relativas ao tema.

A densidade de fluxo ou irradiância é a taxa de energia radiante que incide em uma superfície, por unidade de área. Podem ser consideradas como medições instantâneas, pois a cada segundo chega uma densidade de fluxo variável. No Sistema Internacional, a unidade de medida é o W/m^2 .

Ao integrar as densidades de fluxo incidentes por unidade de área num intervalo de tempo (geralmente hora ou dia), recebe o nome de irradiação, com unidades iguais a Wh/m^2 ou J/m^2 .

Dentre os instrumentos para medição de radiação solar podemos destacar o pireliômetro que mede apenas a radiação direta, enquanto o piranômetro mede a radiação global (direta + difusa).

Pireliômetro é o instrumento destinado a medir a irradiação solar direta, perpendicularmente à direção de sua propagação, ou seja, o instrumento segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor. Normalmente possui um sensor que isola a componente da luz na incidência normal eliminando as irradiações difusa e refletida. As medições de radiação direta são onerosas devido ao custo de aquisição e manutenção do equipamento (GOMES, 2006).

O piranômetro destina-se a medir a quantidade de radiação solar que atinge uma superfície plana, proveniente de todo o hemisfério. É usado para determinar a radiação global

e, eventualmente, têm sido empregados para estimar a radiação difusa. Normalmente estes apresentam como elemento de captação da radiação, um sensor do tipo termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, geralmente com colorações preta e branca e igualmente iluminadas (DIAS, 2007).

Para a medição da radiação difusa em superfícies horizontais, na literatura são apresentados dois métodos. Um método se baseia no sombreamento de um piranômetro por meio de um pequeno disco que rastreia o movimento relativo do Sol ou por meio de um anel de sombreamento. No método do disco de sombreamento, a radiação direta é bloqueada por um disco móvel, permitindo somente a incidência da radiação difusa no piranômetro. A necessidade de rastrear o Sol eleva o custo de aquisição e manutenção do sistema (DAL PAI, 2005). No método do sombreamento pelo anel, o anel intercepta a radiação solar direta e a variação solar é acompanhada pelo deslocamento de translação periódico do anel ou do piranômetro, sem a necessidade do rastreamento solar, exigindo apenas correções mecânicas diárias. Entretanto, parte da radiação difusa também é bloqueada pelo anel, levando a necessidade do uso de fatores de correção (DRUMMOND, 1956; OLIVEIRA et al., 2003).

As medições de radiação solar nas décadas passadas eram de difícil realização, principalmente devido o alto custo dos equipamentos para tal, como o Pireliômetro e o Piranômetro, e manutenção especializada. Estes equipamentos não eram disponíveis em muitas estações meteorológicas convencionais no Brasil até o final da década de 1990 (VAREJÃO-SILVA, 2006). Por isso, não raramente para se ter uma série histórica longa de radiação solar necessita-se estima-la através de variáveis meteorológicas de mais fácil medição, cujos equipamentos funcionam nas estações por longo período, como por exemplo o heliógrafo, que mede o brilho solar.

2.5 SÉRIES HISTÓRICAS DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

Uma série histórica de dados é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo (MORETTIN & TOLOI, 2004). Exemplos de séries são registro de velocidade do vento, precipitação pluviométrica, temperatura do ar, radiação solar, entre outros.

Atualmente, as medições de variáveis meteorológicas tem despertado o interesse de pesquisadores em todo o planeta (MOLION, 2008; VON STORCH, 2004), com o objetivo de quantificar possíveis alterações nos elementos climáticos ou na sua variabilidade temporal.

O tratamento dos dados no que diz respeito à consistência destes na análise de uma série histórica é etapa essencial para um bom estudo. É importante ao trabalhar com séries longas de observações remover dados inconsistentes, e assim determinar indicativos estatísticos que comprovem a homogeneidade dos dados (PETERSON et al., 1998).

ESTEFANEL et al., (1990) estudou a variação da radiação solar global registrada nas estações agrometeorológicas de Santa Maria, São Gabriel e Júlio de Castilhos todas no Rio Grande do Sul, sendo que tiveram que eliminar vários anos de observação em função da constatação da falta de consistência nos dados. BERLATO (1971) analisou dados de radiação solar global em várias cidades do Rio Grande do Sul e encontrou falta de homogeneidade nos dados, ao analisar a razão de brilho solar.

A análise de tendências em séries históricas também ter despertado o interesse de pesquisadores em estudos de tendências de elementos meteorológicos para associar a estudos de mudança climática. Segundo MORETTIN & TOLOI (2004) uma série possui tendência quando o sentido de deslocamento das observações ao longo dos anos apresenta um acréscimo ou decréscimo.

Em relação à tendência das séries históricas de brilho solar e radiação solar, existem diversos estudos (KAISER & QIAN, 2002; YANG et al., 2009; CUSTÓDIO et al., 2009) que analisam a correlação destas associadas a fatores climáticos e localização geográfica.

Um dos objetivos na análise de séries históricas de variáveis climáticas é a detecção ou não de tendência, neste fator a visualização gráfica se torna uma ferramenta importante, por permitir identificar a variabilidade e tendência, verificando se há ou não um acréscimo ou decréscimo de tais variáveis (MORETTIN & TOLOI, 2004). Porém a análise gráfica é muito subjetiva, variando conforme observador, por isso a importância de se testar estatisticamente a presença de tendência. Entre os testes mais utilizados e recomendados, está o teste de Mann-Kendall. Tal teste será detalhado no capítulo da Metodologia.

3. MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR

Antes de apresentar os modelos utilizados nesta pesquisa é necessário apresentar um índice que será frequentemente abordado, o índice de claridade ou transmissividade atmosférica (K_T), dado pela razão entre a radiação global (H) pela radiação extraterrestre em superfície horizontal (H_0). O K_T é um número adimensional, cujos valores variam entre 0 e 1, este representa a quantidade de irradiação efetiva que chega à superfície terrestre em relação a quantidade que existe no topo da atmosfera.

LIU & JORDAN (1960) dividiram o índice de claridade em intervalos e apresentaram a seguinte classificação: $0 < K_T < 0,30$, dias de céu completamente nublado; $0,30 < K_T < 0,65$, dias de céu parcialmente nublado; e $0,65 < K_T < 1$, dias de céu limpo.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é o principal órgão responsável em prover informações meteorológicas confiáveis à sociedade brasileira, através do monitoramento e análise de diversos parâmetros meteorológicos como temperatura, umidade, insolação, radiação, entre outros em suas estações meteorológicas. Essas estações meteorológicas são distribuídas ao longo do território brasileiro, porém verifica-se que estas são centralizadas nas regiões mais desenvolvidas do país, deixando grande parte do território sem monitoramento, inclusive grandes áreas agrícolas. Apenas, recentemente as estações convencionais (sensores isolados registram continuamente os parâmetros meteorológicos, que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo e este os envia a um centro coletor) têm sido substituídas por estações automáticas (uma unidade de memória central ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora). Ao se falar na medição da radiação solar, poucas estações do INMET fazem tal trabalho, segundo LIMA (2005) apenas 58 estações medem a radiação solar efetivamente, entretanto 232 medem horas de insolação, uma variável mais fácil de ser medida a um menor custo.

Uma alternativa para tal problema é o uso de modelos teóricos, que estimam a radiação solar a partir de outras variáveis climáticas, tal como duração do período diurno do dia e horas de insolação (BOISVERT et al., 1990; ANGSTROM, 1924).

3.1 MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

O modelo mais utilizado para estimar a radiação solar global a partir de medições de horas de insolação ou número efetivo de horas de brilho solar é o de Angström-PreScott

(PRESCOTT, 1940). ANGSTRON (1924) apresentou uma equação em que o quociente entre radiação solar global (\bar{H}) e a radiação extraterrestre (\bar{H}_0) foi linearmente correlacionado com o quociente do número de horas de brilho solar (\bar{n}) pela insolação máxima possível (\bar{N}). PRESCOTT (1940) simplificou a equação para que os coeficientes linear (a) e angular (b) pudessem ser obtidos a partir de ajustes estatísticos, sendo o método denominado de Angström-Prescott (Eq. 3.1).

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (3.1)$$

onde,

\bar{H} = Radiação Solar Global recebida em uma superfície horizontal (MJ/m² dia)

\bar{H}_0 = Radiação Solar Extraterrestre em superfície horizontal (MJ/m² dia)

\bar{n} = Brilho solar (h/dia)

\bar{N} = Duração do período diurno do dia (h/dia)

a, b = coeficientes empíricos estimados através de regressão linear

As barras na Equação (3.1) indicam valores médios mensais e a soma dos coeficientes ($a + b$) representa a fração que corresponde à transmissividade atmosférica média na ausência absoluta de nuvens ($\bar{n}/\bar{N} = 1$). A partir de Prescott, 1940, muitos pesquisadores direcionaram seus estudos a desenvolver modelos para estimar a radiação solar difusa, direta e global a partir de horas de brilho solar.

A transmissividade de céu claro da atmosfera é dada pela soma dos coeficientes a e b da equação acima. Alguns autores que analisaram tal modelo encontraram os valores de transmissividade de 75% para a cidade de Jaboticabal (SP) (SANTOS et al., 1983) e em torno de 70% para a cidade de Botucatu (SP) (CURY-LUNARDI & CATANEO, 1993)

O modelo de Angström-Prescott é o mais utilizado para estimar a radiação solar global (ESTEFANEL et al., 1990). Essa equação foi utilizada para estimar a radiação global em diferentes países do planeta, LI et al., (2011) empregando o modelo de Angström-Prescott para uma série de dados de 15 anos de quatro diferentes estações meteorológicas estimou a radiação solar global no Tibet, China, com erros inferiores a 10% em todas localidades estudadas.

Na Nigéria KOLEBAGE e MUSTAPHA (2012) utilizou o modelo de Angström-Prescott em quatro diferentes regiões climáticas do país, encontrando elevada acurácia e precisão ao estimar a radiação global nessas regiões.

MUZATHIK et al., (2011) por meio dos seguintes indicativos estatísticos: erro percentual médio, erro quadrático médio, desvio das médias e coeficiente d de Willmott; verificou que o modelo de Angström-Prescott obteve alta precisão e confiabilidade na estimativa da radiação solar global média mensal na região de Kuala Terengganu, Malásia.

Outros autores também analisaram o comportamento do modelo de Angström-Prescott para estimar a radiação global em outros países como na China (LIU et al., 2009), no Japão (YANG et al., 2001) e na Austrália (SUEHRCKES, 2000).

No Brasil diversos autores apresentaram os valores desses coeficientes para diferentes localidades brasileiras. CAMPELO JUNIOR (1998), utilizou o modelo para a cidade de Santo Antônio do Leverger (MT), BLANCO & SENTELHAS (2002) estimaram a radiação global média mensal com precisão de 89% e exatidão de 97% para a cidade de Piracicaba (SP), DANTAS et al., (2003) obteve um coeficiente de determinação médio de 0,89 para cidade de Lavras (MG), ESCOBEDO et al., (2012) utilizou uma série histórica de oito anos para encontrar os valores das constantes para a cidade de Botucatu (SP) e BERUSKI et al., (2015) analisou o modelo para a cidade de Ponta Grossa (PR).

RIBEIRO (1980) citado por ASSIS *et al.*, (1998), publicou uma tabela de valores de coeficientes a e b baseados na Equação de Angström-Prescott para diferentes localidades do Brasil. A Tabela (3.1) mostra os valores das constantes de 5 estações analisadas, no trabalho não determina o período de observação.

Tabela 3.1 – Coeficientes de correlação determinados por RIBEIRO (1980), a partir da Equação de Angström-Prescott para 5 localidades do Brasil. Adaptada de ASSIS *et al.*, (1998).

Localidade	Latitude (°)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>
Fortaleza, CE	3,72°	0,239	0,460	0,70
João Pessoa, PB	7,12°	0,267	0,385	0,65
Salvador, BA	13,02°	0,239	0,455	0,69

Belo Horizonte, MG	19,93°	0,238	0,368	0,61
Curitiba, PR	25,43°	0,173	0,335	0,51

Avaliações das variações sazonais dos coeficientes a e b foram observadas em diversos trabalhos, bem como a recomendação em muitos casos de uma única equação regional, diante da pequena diferença dos resultados desta com os resultados das equações sazonais. OCCHIPITINI (1959) estabeleceu equações de estimativa da radiação solar global para as quatro estações do ano e uma para o ano todo na cidade de Cananéia (SP). TARIFA (1972), analisando o comportamento da equação de Angström-PreScott para o município de Presidente Prudente (SP), determinando duas equações sazonais, sendo uma para primavera-verão e outra para outono-inverno, que por não apresentarem diferenças estatísticas significativas, permitiram estabelecer uma única relação válida para o ano todo.

CARDON & AMORIN NETO (1983) determinaram equações para estações seca e chuvosa para a cidade de Petrolina (PE), as quais demonstraram a necessidade da divisão do período em função da época do ano para melhores estimativas.

GLOVER & McCULLOCH (1958) observaram que o coeficiente a é muito influenciado pela latitude do local e pouco pelo tipo de nuvem, o mesmo não ocorrendo com b . A influência da latitude foi estudada por estes na Nova Zelândia, propondo uma modificação no modelo de Angström-PreScott, na qual o coeficiente linear, a , pode ser substituído pelo produto de um coeficiente linear geral, a_{ger} , e o cosseno da latitude local, ou seja,

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a_{ger} \cdot \cos(\phi) + b \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (3.2)$$

A correlação entre a cobertura média mensal de nuvens (\bar{C}) expressa como décimos de céu obscurecido por nuvens com \bar{H}/\bar{H}_0 , também foi encontrada na literatura, sendo derivada do estudo de KIMBALL (1919). Esta correlação tem a forma

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a'' + b'' (\bar{C}) \quad (3.3)$$

BENNETT (1965) comparou as correlações de \bar{H}/\bar{H}_0 com \bar{C} e com \bar{n}/\bar{N} , e concluiu que a melhor correlação está com \bar{n}/\bar{N} . Ele relata que dados de cobertura de nuvens são estimados visualmente, e não há necessariamente uma relação direta entre a presença parcial de cobertura de nuvens e a radiação solar a qualquer momento particular. Assim, não podendo ser tão boa uma relação estatística entre \bar{H}/\bar{H}_0 e \bar{C} como há entre \bar{H}/\bar{H}_0 e \bar{n}/\bar{N} .

Neste trabalho será proposta uma nova equação de estimativa da radiação global média mensal a partir da razão de insolação, levando em consideração um ajuste não linear, (função de potência) da razão \bar{H}/\bar{H}_0 com \bar{n}/\bar{N} , como mostrado na Eq. (3.4), para comparação com o modelo clássico de Angström-PreScott, tal modelo será abordado como modelo não linear ou de potência no presente trabalho.

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a_{g,nl} \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^{b_{g,nl}} \quad (3.4)$$

As constantes $a_{g,nl}$ e $b_{g,nl}$ do modelo da Eq. (3.4) serão encontradas a partir de um ajuste dos pontos $(\bar{n}/\bar{N}, \bar{H}/\bar{H}_0)$ gerando uma função de potência característica. Vale ressaltar que para ausência absoluta de nuvens ($\bar{n}/\bar{N} = 1$), a constante $a_{g,nl}$ é igual a soma das constantes do modelo linear ($a + b$).

3.2 MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA

LIU & JORDAN (1960), relataram que para locais livres de poeiras e com baixa umidade relativa na atmosfera a fração difusa da radiação solar sobre uma superfície horizontal se correlaciona linearmente com o índice de claridade.

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = a_{d,l} + b_{d,l} \bar{K}_T \quad (3.5)$$

ERBS et al., (1982) desenvolveram uma correlação da fração difusa média mensal da radiação solar (\bar{H}_d/\bar{H}) com o índice de claridade (\bar{K}_T) por meio de um polinômio de terceiro grau.

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = a_{d,p} + b_{d,p} \bar{K}_T + c_{d,p} \bar{K}_T^2 + d_{d,p} \bar{K}_T^3 \quad (3.6)$$

As constantes $a_{d,p}$, $b_{d,p}$, $c_{d,p}$ e $d_{d,p}$ são encontradas a partir de um ajuste polinomial da fração difusa da radiação solar média mensal \bar{H}_d/\bar{H} e do índice de claridade \bar{K}_T .

Neste trabalho será proposta uma nova correlação da fração difusa da radiação solar com o índice de claridade, levando em consideração que o melhor ajuste de $\overline{H_d}/\overline{H}$ e $\overline{K_T}$ se dá por meio de uma função não linear ou de potência, como mostrado na Eq. (3.7), para comparação com o modelo de ERBS et al., (1982) e o de LIU & JORDAN (1960), tal modelo será abordado como modelo não linear no presente trabalho.

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = a_{d,nl}(\overline{K_T})^{b_{d,nl}} \quad (3.7)$$

3.3 OBSERVAÇÕES EM RELAÇÃO AOS MODELOS ESTUDADOS

O modelo de estimativa da radiação global linear (Angström-Prescott) e o não linear (função de potência) serão abordados nas análises de resultados deste trabalho, realizando uma comparação entre os modelos e entre as cidades analisadas.

Os modelos de estimativa da radiação difusa (polinomial, linear e não linear) serão implementados para quatro cidades de análise (Brasília, Cuiabá, Palmas e Petrolina) realizando uma comparação entre os modelos e o comportamento dos mesmos nas cidades analisadas.

A influência da latitude na estimativa da radiação solar global será abordada nos resultados deste trabalho, verificando se a metodologia abordada por GLOVER & McCULLOCH (1958) pode corrigir a influência da latitude no modelo linear de Angström-Prescott.

A partir de indicativos estatísticos e análises gráficas os melhores modelos para estimativa da radiação global média mensal e sazonal, e para estimativa da radiação difusa média mensal e sazonal, serão utilizados para criar uma série histórica de dados de radiação a partir de dados históricos de horas de insolação disponíveis para cada cidade analisada analisando a tendência ou não destas por meio de teste estatístico.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 METODOLOGIA DAS ANÁLISES E FERRAMENTAS

4.1.1 Regressão Linear por Mínimos Quadrados

A regressão linear por mínimos quadrados é um procedimento no qual os coeficientes a_1 e a_0 da função linear $y = a_0 + a_1x$ são determinados de tal forma que essa leve ao melhor ajuste de um determinado conjunto de pontos. O menor ajuste é definido como o menor erro total calculado com a soma dos quadrados dos resíduos de acordo com a Eq. (4.1).

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_1x_i + a_0)]^2 \quad (4.1)$$

Como todos os valores de x_i e y_i são conhecidos, E na Eq. (4.1) é uma função não linear de duas variáveis, a_1 e a_0 . A função E tem um mínimo nos valores de a_1 e a_0 nos quais as derivadas parciais de E em relação a cada variável são iguais a zero. Calculando as derivadas parciais e as igualando a zero, obtêm-se um sistema de duas equações lineares com incógnitas a_1 e a_0 , e podem ser escritas como:

$$na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_1 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.2)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_1 = \sum_{i=1}^n y_ix_i \quad (4.3)$$

A solução do sistema é:

$$a_0 = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n y_ix_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4.4)$$

$$a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_ix_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4.5)$$

As Equações (4.4) e (4.5) fornecem os valores de a_1 e a_0 que levam ao melhor ajuste dos n pontos do conjunto de dados. O Método dos Mínimos Quadrados resulta em uma linha que se ajusta aos dados com a quantidade mínima de variação, não é um método perfeito de

previsão, a linha de regressão é uma previsão aproximada de um valor de Y para um dado valor de X.

4.1.2 Ajuste de curvas com a linearização de equações não lineares

No tópico anterior foi abordado o método dos mínimos quadrados para ajuste linear de n pontos, porém em alguns casos uma função não linear leva a um ajuste melhor dos dados do que o uso de uma função linear. Neste trabalho serão propostos modelos por meio do ajuste não linear dos pontos estudados, por meio de uma função de potência do tipo:

$$y = bx^m \quad (4.6)$$

É possível utilizar o método mostrado no tópico anterior para o ajuste deste tipo de função modificando-a de tal forma que a nova equação seja linear com termos contendo as variáveis originais. Como:

$$\ln(y) = \ln(bx^m) = m\ln(x) + \ln(b) \quad (4.7)$$

A Equação (4.7) é linear, onde os termos da forma clássica, $y = a_0 + a_1x$, se transformam em $y = \ln(y)$, $a_1 = m$, $x = \ln(x)$ e $a_0 = \ln(b)$. Por meio do método dos mínimos quadrados, é possível conhecer a_0 e a_1 , conhecidas estas, as constantes b e m na Eq. (3.6) são calculadas com $m = a_1$ e $b = e^{a_0}$.

4.1.3 Regressão Polinomial

A regressão polinomial neste trabalho será abordada para descobrir os coeficientes de um polinômio de terceiro grau conforme a literatura (ERBS et al., 1982) que melhor ajuste a fração difusa da radiação solar com o índice de claridade. Seja um polinômio de ordem m usado no ajuste da curva:

$$f(x) = a_mx^m + a_{m-1}x^{m-1} + \dots + a_1x + a_0 \quad (4.8)$$

Então para um conjunto de n pontos (x_i, y_i) sendo m menor que $n-1$, o erro total calculado assim como no método dos mínimos quadrados será:

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0)]^2 \quad (4.9)$$

Como todos os pares (x_i, y_i) são conhecidos, a Eq. (4.9) é uma função não linear das $m+1$ variáveis. Calculando as derivadas parciais de E na Eq. (4.9) e as igualando a zero, obtêm-se um conjunto de $m+1$ equações lineares para os coeficientes. Como os ajustes polinomiais aqui abordados serão de ordem 3 ($y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$), teremos um sistema de quatro equações lineares em função das incógnitas a_0, a_1, a_2 e a_3 , que pode ser escrito como:

$$n a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_3 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.10)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \quad (4.11)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \quad (4.12)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^3 \quad (4.13)$$

A solução do sistema de Equações (4.10) – (4.13) fornece os valores dos coeficientes a_0, a_1, a_2 e a_3 do ajuste.

4.2 TESTES ESTATÍSTICOS PARA VALIDAÇÃO

O desempenho de métodos de estimação é avaliado através de validação cruzada. Neste procedimento um conjunto de valores observados é comparado com outro conjunto de valores estimados a partir de variáveis explicativas do mesmo local e mesmo intervalo de tempo. Como já comentado, neste trabalho os modelos estimam a radiação solar a partir de dados de horas de insolação, estes dados estimados são comparados com dados reais armazenados nos bancos de dados do INMET, para radiação global, e do SONDA, para radiação difusa.

Os resultados destas séries de valores observados e estimados são utilizados para validar o modelo. Vários critérios podem ser utilizados para validar o modelo de estimação, neste trabalho os critérios estatísticos escolhidos levaram em consideração a utilização destes em outras pesquisas envolvendo modelos de estimação. Os índices estatísticos utilizados no trabalho foram RMSE e MBE sugeridos por IQBAL (1983) e POWELL, G. L. (1983), d de WILLMOTT (1981) e r^2 sugerido por LAPPONNI (2005). Nesta seção também será apresentado o teste de Mann-Kendall

4.2.1 Erro de Desvio Médio – MBE (Mean Bias Error)

Este critério é capaz de fornecer a informação sobre a tendência do modelo para, ou subestimar (negativo) ou superestimar (positivo) valores, já que o sinal da diferença é mantido (IQBAL, 1983).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i) \quad (4.14)$$

Onde, E_i representa os valores estimados, O_i representa os valores reais observados e N representa o número de observações. Dividindo as estatísticas MBE pelo valor médio dos dados de estimados, obtêm-se os valores relativos em porcentagem. Um valor baixo deste critério é desejável, iremos adotar como critério satisfatório valores entre 5% e -5%, conforme o trabalho de IQBAL (1983).

4.2.2 Erro Quadrático Médio – RMSE (Root Mean Square Error)

Descreve o desvio médio absoluto entre um modelo individual e os valores observados (POWELL, G. L., 1983).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2} \quad (4.15)$$

Quanto menor o RMSE, mais preciso é o modelo, logo, melhor a estimativa. Contudo o menor erro acrescido na soma pode produzir um significativo incremento. Dividindo o valor de RMSE pelo valor médio dos dados de estimados, obtêm-se os valores relativos em

porcentagem. Um valor baixo deste critério é desejável, iremos adotar como critério satisfatório valores abaixo de 10%, conforme a literatura (IQBAL, 1983).

4.2.3 Coeficiente d de Willmott

O índice “d” de Willmott (1981), também chamado de índice de concordância de Willmott, determina a exatidão do método e indica o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos valores observados, expressa o ajustamento entre os valores medidos e estimados, este varia de zero a um, onde quanto mais próximo de um, melhor a concordância dos dados. BERUSKI et al., (2015) utilizou-se este índice para avaliar modelos de estimativa na cidade de Ponta Grossa, Paraná.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E'_i| - |O'_i|)^2} \quad (4.16)$$

O termo $|E'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $(E_i - \bar{O}_i)$, onde \bar{O}_i representa a média de O_i e $|O'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $(O_i - \bar{O}_i)$.

4.2.4 Coeficiente de determinação – r^2

O coeficiente de determinação é sempre um número positivo entre zero e um, que quanto maior for o r^2 , melhor será o poder de explicação do modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. Este indica o grau de dispersão dos pontos em relação à média, o chamado erro aleatório.

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.17)$$

O termo $\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ corresponde à variação explicada e $\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$ corresponde à variação não explicada.

4.2.5 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall é um teste não paramétrico proposto inicialmente por SNEYERS (1975), este é sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para

avaliação da tendência em séries temporais de dados meteorológicos (SILVA et al., 2010). Neste teste, considera-se que, na hipótese de estabilidade de uma série de dados, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples).

BACK (2001) descreve esse método considerando uma série temporal Y_i de N termos a ser analisada ($1 \leq i \leq N$). Primeiramente, realiza-se a soma $t_n = \sum_{i=1}^N m_i$ do número de termos m_i da série, relativo ao valor Y_i cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($Y_j < Y_i$). Para séries com grande número de termos (acima de 30), adota-se sob a hipótese nula (H_0) de tendência, t_n apresentará uma distribuição normal com média e variância dada, respectivamente por Eq. (4.18) e Eq. (4.19):

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \quad (4.18)$$

$$Var(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72} \quad (4.19)$$

Testando a significância estatística de t_n para a hipótese nula, usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores da série estatística $U(t_n)$ por meio da seguinte equação:

$$U(t_n) = \frac{[t_n - E(t_n)]}{\sqrt{Var(t_n)}} \quad (4.20)$$

Após a determinação dos valores de $U(t_n)$ verifica-se o valor da probabilidade α_1 , sendo $\alpha_1 = \text{prob}(|U| > |U(t_n)|)$, calculada por meio de uma tabela normal reduzida. Considerando α_0 o nível de significância do teste, a hipótese nula é aceita se $\alpha_1 > \alpha_0$. Caso a hipótese nula seja rejeitada, implicará a existência de tendência significativa, sendo que o sinal da estatística $U(t_n)$ indica se a tendência é decrescente (negativo) ou crescente (positivo). Admitindo o nível de significância de 5%, ou seja, $\alpha_0 = 0,05$, em sua versão sequencial, a Eq. (4.21) é calculada no sentido direto da série, partindo do valor de $i = 1$ até $i = N$, gerando a estatística $-1,96 < U(t_n) < 1,96$ (o valor de 1,96 corresponde a $\alpha_0 = 0,05$, 95% da área da distribuição). Ou seja, caso $U(t_n)$ da série de dados dê entre o intervalo $-1,96 < U(t_n) < 1,96$ não há tendência significativa, fora deste intervalo há tendência significativa crescente (caso positivo) ou decrescente (caso negativo).

4.3 CIDADES ANALISADAS

A escolha das cidades analisadas neste trabalho levou em consideração o período de dados disponíveis, visando a maior quantidade de dados para análise, e as localizações geográficas destas. As cidades estudadas foram: Brasília - DF, Cuiabá - MT, Palmas - TO, Petrolina - PE e Santa Maria - RS. Os dados meteorológicos foram obtidos nos sites do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). Na Fig. (4.1) é possível visualizar a localização das cidades no mapa do Brasil.

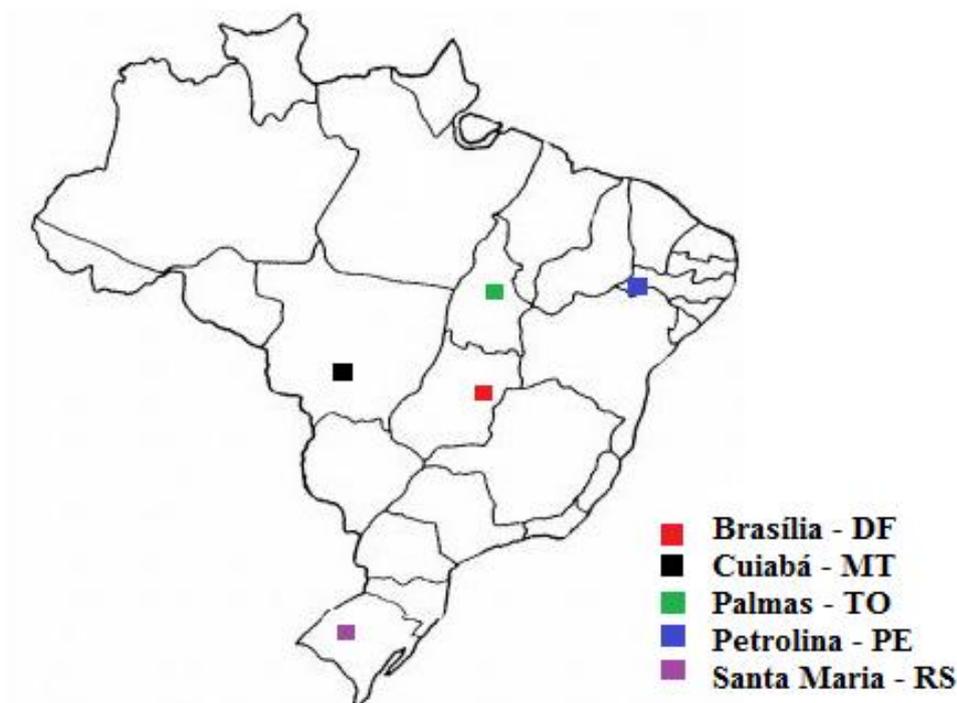


Figura 4.1 – Localização das cidades analisadas

4.3.1 Brasília

A cidade de Brasília está localizada no Distrito Federal, Região Centro-Oeste do País, 15°50'16'' de latitude SUL e 47°42'48'' de longitude OESTE. Seu clima é o tropical de altitude com estação seca, característico de planalto e serras. Há duas estações bem características: estação chuvosa de Outubro a Março e a estação seca de Abril a Setembro. A temperatura média atinge valores em torno de 22°C, sendo o pico nos meses de primavera.

4.3.2 Cuiabá

A cidade de Cuiabá está localizada no estado de Mato Grosso, Região Centro-Oeste do País, 15°50'16'' de latitude SUL e 47°42'48'' de longitude OESTE. Seu clima é o tropical úmido, com temperaturas elevadas e alto índice pluviométrico. As chuvas se concentram de Outubro a Maio, enquanto o resto do ano condiz com a estação seca. A temperatura média mensal fica em torno de 27°C, nos meses de Outubro a Março, no entanto frequentemente a temperatura atinge os 40°C.

4.3.3 Palmas

A cidade de Palmas está localizada no estado de Tocantins, Região Norte do País, 10°12'46'' de latitude SUL e 48°21'37'' de longitude OESTE. Seu clima é o tropical com estação seca. Clima quente todo ano, as variações de temperatura entre o mês mais quente (Setembro) e o mais frio (Julho) é muito pequena.

4.3.4 Petrolina

A cidade de Petrolina está localizada no estado de Pernambuco, Região Nordeste do País, 09°23'55'' de latitude SUL e 40°30'03'' de longitude OESTE. Seu clima é tropical semi-árido, caracterizado pela escassez e irregularidade das precipitações com chuvas no verão e forte evaporação, como consequência das altas temperaturas. Essas características climáticas fazem com que a disponibilidade solar seja maior que disponível nos valores médios para outras regiões. A temperatura apresenta variações médias entre 24°C e 28°C.

4.3.5 Santa Maria

A cidade de Santa Maria está localizada no estado do Rio Grande do Sul, Região Sul do País, 29°41'02'' de latitude SUL e 53°48'25'' de longitude OESTE. Seu clima é o subtropical úmido, sofre influência da posição e intensidade da Alta Subtropical do Atlântico. A temperatura máxima é de 24°C, em média, e a temperatura mínima é de 14°C, em média.

4.4 BANCOS DE DADOS

Para a geração das constantes dos modelos de estimativa da radiação solar global média mensal e da radiação solar difusa média mensal utilizaram dados meteorológicos de dois bancos de dados, um do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e um do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA).

O INMET é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que tem como missão institucional prover informações meteorológicas à sociedade brasileira e influir construtivamente no processo de tomada de decisão, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do País. Esta missão é alcançada por meio do monitoramento, análise e previsão de tempo e de clima.

O Sistema de Coleta e Distribuição de Dados meteorológicos do Instituto (temperatura, velocidade do vento, pressão atmosférica, entre outras variáveis) é dotado de estações de sondagem de ar superior, estações meteorológicas de superfície (operadas manualmente) e de estações automáticas. Nas estações meteorológicas automáticas a coleta de dados é feita através de sensores para medição de parâmetros meteorológicos. As medidas são tomadas, em intervalos de minuto a minuto, e integralizadas para no período de uma hora, entre as variáveis está a radiação solar global.

O Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET é um banco de dados para apoiar as atividades de ensino e pesquisa e outras aplicações em meteorologia, meio ambiente, energia, entre outras. No BDMEP estão acessíveis os dados diários a partir de 1961 das estações convencionais para as quais se disponha, em forma digital, de pelo menos 80% dos dados que foram registrados naquele período. Dentre as variáveis disponibilizadas para consultas está, horas de insolação.

Os dados de Radiação Solar Global e de Horas de Insolação dos bancos de dados do INMET foram utilizados para parametrizar os modelos de estimativa de radiação solar global média mensal. O período utilizado para cada cidade levou em consideração a maior série histórica de dados disponíveis, estes foram divididos em dados para geração dos modelos e dados para validação dos modelos, ver Tab. (4.1).

Tabela 4.1 – Série de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação solar global retirados do banco de dados do INMET

Cidade	Período de dados para parametrização do modelo		Período de dados para validação do modelo	
	<i>Início</i>	<i>Fim</i>	<i>Início</i>	<i>Fim</i>
Brasília, DF	Maio/2000	Dezembro/2014	Janeiro/2015	Março/2016
Cuiabá, MT	Janeiro/2003	Dezembro/2014	Janeiro/2015	Março/2016
Palmas, TO	Dezembro/2004	Dezembro/2014	Janeiro/2015	Março/2016
Petrolina, PE	Julho/2007	Dezembro/2014	Janeiro/2015	Março/2016
Santa Maria, RS	Janeiro/2002	Dezembro/2014	Janeiro/2015	Março/2016

O Projeto SONDA, coordenado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE), em conjunto com o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) tem como objetivo gerar uma base de dados solarimétricos e meteorológicos que atenda a essa demanda de informações imposta pelos setores da sociedade envolvidos na pesquisa, desenvolvimento, planejamento e investimento no uso e aplicações de energias renováveis, principalmente a energia solar e eólica.

Todos os dados coletados na rede SONDA são disponibilizados ao público através do endereço website da rede SONDA. Antes da disponibilização, os dados passam por um processo de qualificação com o objetivo de identificar dados suspeitos para reforçar sua confiabilidade ou até mesmo para servir de alerta para a manutenção dos equipamentos.

No SONDA os dados são medidos a cada segundo e valores médios são armazenados com a resolução temporal de um minuto. Dentre as variáveis medidas, estão a radiação solar global e a radiação solar difusa.

Os dados de Radiação Solar Global e de Radiação Solar Difusa do banco de dados do SONDA foram utilizados para parametrizar os modelos de estimativa de radiação solar difusa média mensal. Nesta análise não parametrizamos modelos de estimativa da radiação difusa

para a cidade de Santa Maria – RS, pois a mesma não é uma estação pertencente ao projeto SONDA, sendo assim não se obteve dados históricos de radiação difusa para parametrizar os modelos para esta cidade, sendo analisado somente o recurso de radiação solar global nesta cidade. O período utilizado para cada cidade analisada levou em consideração a maior série histórica de dados disponíveis, estes foram divididos em dados para geração dos modelos e dados para validação dos modelos, ver Tab. (4.2).

Tabela 4.2 – Série de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação solar difusa retirados do banco de dados do SONDA

Cidade	Período de dados para parametrização do modelo		Período de dados para validação do modelo	
	<i>Início</i>	<i>Fim</i>	<i>Início</i>	<i>Fim</i>
Brasília, DF	Fevereiro/2005	Dezembro/2013	Janeiro/2014	Dezembro/2014
Cuiabá, MT	Janeiro/2006	Dezembro/2011	Janeiro/2012	Dezembro/2012
Palmas, TO	Dezembro/2005	Dezembro/2013	Janeiro/2014	Dezembro/2014
Petrolina, PE	Julho/2004	Dezembro/2013	Janeiro/2014	Dezembro/2014

4.5 TRATAMENTO DE DADOS

No tópico 4.4 foram abordados os Bancos de Dados utilizados na pesquisa para parametrização dos modelos de estimativa da radiação solar global média mensal e da radiação solar difusa média mensal.

Para a parametrização dos modelos primeiramente foi necessário realizar um tratamento nos dados, excluindo dados inconsistentes (dados indicados com erros de medição) e transformando os dados em médias mensais.

Para os modelos de estimativa da radiação solar global, foram utilizados dados do INMET, sendo que os dados de radiação solar foram disponibilizados em dados horários, assim foi necessário integralizar estes para dados diários, e após realizar a média mensal dos

dados. Já os dados de insolação foram disponibilizados em horas de insolação diária, realizou-se a média mensal destes dados.

Para os modelos de estimativa da radiação solar difusa, foram utilizados dados do SONDA, sendo que os dados de radiação solar foram disponibilizados em minuto a minuto, assim foi necessário integralizar estes para dados horários, por seguinte em dados diários, e ao final realizar a média mensal, este tratamento foi realizado tanto para os dados de radiação solar global quanto os de radiação solar difusa .

Após o tratamento de dados para a utilização destes na parametrização dos modelos de estimativa da radiação solar global média mensal e da radiação solar difusa média mensal, alguns meses foram desconsiderados e por seguinte excluídos da análise por ter sido adotado no trabalho a necessidade de no mínimo 90% dos dados diários no mês para consideração da média deste na parametrização do modelo. Assim a quantidade de meses utilizados para cada cidade pode ser visualizada na Tab. (4.3) para a análise da radiação solar global média mensal e na Tab. (4.4) para a análise da radiação solar difusa média mensal.

Tabela 4.3 – Quantidade de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação solar global após tratamento

Cidade	Quantidade de dados (mensais) analisados para parametrização	Quantidade de dados utilizados para parametrização (pós-tratamento)	Quantidade de dados (mensais) analisados para validação	Quantidade de dados utilizados para validação (pós-tratamento)
Brasília, DF	176	143 (81,25%)	15	14 (93,33%)
Cuiabá, MT	144	109 (75,69%)	15	15 (100%)
Palmas, TO	121	121 (100%)	15	15 (100%)
Petrolina, PE	90	87 (96,66%)	15	15 (100%)
Santa Maria, RS	156	154 (98,72%)	15	15 (100%)

Tabela 4.4 – Quantidade de dados utilizados nos modelos de estimativa da radiação difusa após tratamento

Cidade	Quantidade de dados (mensais) analisados para parametrização	Quantidade de dados utilizados para parametrização (pós-tratamento)	Quantidade de dados (mensais) analisados para validação	Quantidade de dados utilizados para validação (pós-tratamento)
Brasília, DF	107	96 (89,72%)	12 (100%)	12 (100%)
Cuiabá, MT	72	72 (100%)	12 (100%)	12 (100%)
Palmas, TO	105	103 (98,1%)	12 (100%)	12 (100%)
Petrolina, PE	114	106 (93%)	12 (100%)	12 (100%)

Na Tabela (4.3) é possível visualizar que a cidade de Petrolina foi a que teve menor número de amostras para a parametrização dos modelos de estimativa da radiação solar global média mensal, já na Tab. (4.4) verifica-se que a cidade de Cuiabá foi a que teve menor número de amostras para a parametrização dos modelos de estimativa da radiação solar difusa média mensal.

4.6 MÉTODOS DE ANÁLISES

Na seção anterior foi apresentado um resumo dos dados utilizados para parametrização dos modelos de estimativa da radiação solar global e difusa média mensal nas quatro cidades estudadas. Estes dados foram tabulados e tratados utilizando recursos do software Microsoft Office Excel juntamente com programação em MATLAB.

Os dados organizados por meio do Excel foram importados para análise no MATLAB, na qual foi realizada a programação para os diferentes ajustes apresentados nos tópicos anteriores, bem como análise estatística e gráfica.

No caso dos modelos de estimativa da radiação solar global média mensal tanto as constantes do modelo linear (Modelo de Angström-Prescott) quanto do modelo não linear (função de potência) foram geradas por meio das relações de $\overline{K_T}$ e $\overline{n}/\overline{N}$ para a série histórica

de dados de cada cidade conforme Tabelas (4.1) e (4.3), período e quantidade de dados, respectivamente. Uma regressão linear entre os pares $(\bar{n}/\bar{N}, \bar{K}_T)$ baseada no método dos mínimos quadrados conforme apresentado no tópico 4.1.1 gerou valores de a e b de melhor representação, primeiramente para um modelo mensal. Para o modelo sazonal os dados foram divididos conforme as estações do ano: verão (Dezembro, Janeiro e Fevereiro), outono (Março, Abril e Maio), inverno (Junho, Julho e Agosto) e primavera (Setembro, Outubro e Novembro); e em seguida gerou-se uma equação de estimativa para cada estação.

Para a parametrização dos modelos de estimativa da radiação solar difusa média mensal as constantes dos modelos polinomial, linear e de potência foram geradas por meio das relações de \bar{H}_d/\bar{H} e \bar{K}_T para a série histórica de dados de cada cidade conforme Tabelas (4.2) e (4.4), período e quantidade de dados, respectivamente. Para o modelo sazonal os dados foram divididos conforme as estações do ano e em seguida gerou-se uma equação de estimativa para cada estação.

Parametrizou-se dois modelos gerais de estimativa, um utilizou-se todos os dados médios mensais de Radiação Solar Global analisados, gerando um modelo único de estimativa médio mensal da Radiação Solar Global. No outro todos os dados médios mensais de Radiação Solar Difusa foram considerados para gerar um modelo único de estimativa média mensal da Radiação Solar Difusa. A mesma metodologia foi utilizada para parametrização de modelos sazonais únicos de estimativa média mensal da radiação solar global e difusa.

Nos modelos únicos de estimativa da Radiação Solar Global analisou-se a influência da latitude, encontrando o coeficiente a_{ger} médio das cidades analisadas, descontando assim a influência da latitude e o coeficiente angular médio, b_m . Esta análise foi realizada no intuito de tentar corrigir o fator da localização das cidades no modelo único por meio de um mesmo parâmetro para todas as cidades, neste caso a latitude, ou seja, teremos dois coeficientes únicos a_{ger} e b_m , e um coeficiente variável de acordo com a localização de cada cidade, $\cos(\phi)$.

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a_{ger} \cdot \cos(\phi) + b_m \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (4.21)$$

Vale ressaltar que a análise do modelo não linear para estimar a radiação global ou difusa foi introduzida no intuito de testar tal metodologia na geração de modelos de estimativa, já que os mesmos não foram retirados da literatura.

A geração de séries históricas de radiação solar global, difusa e direta média mensal se deu a partir da escolha dos melhores modelos de estimativa dos analisados de cada cidade, estes modelos possuem como entrada dados de horas de insolação. Analisando séries históricas disponíveis de horas de insolação do banco de dados do INMET, foi possível gerar dados de radiação global, e partir destes dados de radiação global foi possível gerar dados históricos de radiação difusa, e por seguinte radiação direta, conforme fluxograma abaixo.

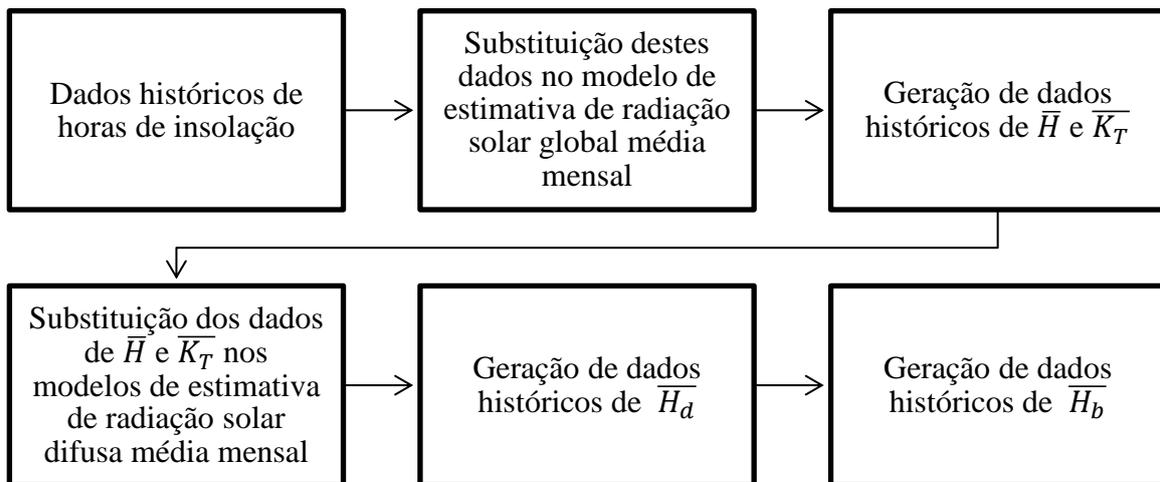


Figura 4.2 – Fluxograma para geração dos dados históricos de radiação solar

Tendo apenas como entrada, dados históricos de horas insolação, é possível estimar as componentes da radiação solar por meio dos modelos de estimativa, tornando estes ferramentas para analisar o comportamento da radiação solar em determinada região, auxiliando em projetos que envolvam a geração de energia a partir da radiação solar.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados do estudo da disponibilidade da radiação solar em cinco cidades brasileiras Brasília – DF, Cuiabá – MT, Palmas – TO, Petrolina – PE e Santa Maria – RS a partir de dados históricos, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior. Com o objetivo de facilitar a metodologia da análise, esses resultados serão apresentados na seguinte sequência:

- ✓ Análise estatística descritiva dos dados tratados
- ✓ Parametrização dos modelos (linear e função de potência) de estimativa de radiação solar global média mensal para cada cidade a partir da relação entre índice de claridade e razão de insolação, juntamente com análise dos indicadores estatísticos.
- ✓ Parametrização dos modelos (linear e função de potência) de estimativa de radiação solar global média mensal sazonal para cada cidade a partir da relação entre índice de claridade e razão de insolação, juntamente com análise dos indicadores estatísticos.
- ✓ Parametrização dos modelos (linear, função de potência e polinomial) de estimativa de radiação solar difusa média mensal para cada cidade a partir da relação entre índice de claridade e a fração difusa da radiação solar, juntamente com análise dos indicadores estatísticos.
- ✓ Parametrização dos modelos (linear, função de potência e polinomial) de estimativa de radiação solar difusa média mensal sazonal para cada cidade a partir da relação entre índice de claridade e a fração difusa da radiação solar, juntamente com análise dos indicadores estatísticos.
- ✓ Parametrização de modelos únicos de estimativa de radiação solar global e difusa média mensal com análise dos indicadores estatísticos e da influência da longitude nos resultados de estimativa da radiação global.
- ✓ Caracterização de séries históricas de radiação global, difusa e direta normal a partir dos modelos parametrizados que obtiveram melhor desempenho, com base em uma série de dados históricos de horas insolação e análise de tendências nestas séries.

5.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Os dados tratados foram submetidos primeiramente a uma análise de estatística descritiva para descrever e resumir estes dados, foram extraídos os eventos mínimos, máximos, a média e o desvio padrão destes, estes podem ser visualizados na Tab. (5.1) para os dados de parametrização e validação do modelo de estimativa da radiação global e na Tab. (5.2) para os dados utilizados na parametrização e validação do modelo de estimativa da radiação difusa.

Tabela 5.1 – Análise Descritiva dos dados utilizados para parametrização e validação dos modelos de estimativa da radiação solar global

Cidade	Análise	Dados médios mensais para parametrização		Dados médios mensais para validação	
		Radiação Solar Global (MJ/m ² dia)	Horas de Insolação	Radiação Solar Global (MJ/m ² dia)	Horas de Insolação
Brasília, DF	Mínimo	13,69	2,76	14,83	3,56
	Máximo	23,70	9,77	23,81	9,20
	Média	18,38	6,61	19,46	6,93
	Desvio Padrão	2,01	1,91	2,96	1,66
Cuiabá, MT	Mínimo	11,84	4,30	13,08	5,43
	Máximo	19,00	8,97	18,49	8,92
	Média	15,65	6,78	15,97	6,66
	Desvio Padrão	1,43	0,94	1,68	0,84
Palmas, TO	Mínimo	12,93	2,91	14,69	4,63
	Máximo	20,32	10,49	22,69	9,11
	Média	16,96	6,97	17,58	6,86

	Desvio Padrão	1,62	1,98	2,05	1,71
Petrolina, PE	Mínimo	15,30	5,81	16,26	5,59
	Máximo	25,80	11,20	24,40	10,44
	Média	21,42	8,71	21,17	8,87
	Desvio Padrão	2,61	1,04	2,75	1,35
Santa Maria, RS	Mínimo	6,20	2,98	7,38	2,93
	Máximo	25,78	9,36	22,28	7,86
	Média	15,60	6,26	15,41	5,80
	Desvio Padrão	5,65	1,65	4,69	1,39

Tabela 5.2 – Análise Descritiva dos dados utilizados para parametrização e validação dos modelos de estimativa da radiação solar difusa

Cidade	Análise	Dados médios mensais para parametrização		Dados médios mensais para validação	
		Radiação Solar Global (MJ/m ² dia)	Radiação Solar Difusa (MJ/m ² dia)	Radiação Solar Global (MJ/m ² dia)	Radiação Solar Difusa (MJ/m ² dia)
Brasília, DF	Mínimo	13,72	3,09	16,79	4,00
	Máximo	23,88	11,43	22,80	10,82
	Média	19,15	7,45	19,39	7,14
	Desvio Padrão	2,05	2,48	2,25	2,41
Cuiabá, MT	Mínimo	13,96	3,80	15,76	4,29
	Máximo	22,77	9,84	20,45	9,07
	Média	17,86	7,23	18,17	7,03

	Desvio Padrão	1,91	1,75	1,50	1,88
Palmas, TO	Mínimo	14,08	2,52	15,83	3,86
	Máximo	22,45	8,63	22,01	7,83
	Média	18,10	6,00	18,36	6,19
	Desvio Padrão	1,86	1,80	2,08	1,40
Petrolina, PE	Mínimo	14,51	5,10	15,40	6,21
	Máximo	24,81	9,78	22,90	10,03
	Média	19,67	7,61	19,34	7,86
	Desvio Padrão	2,52	1,04	2,76	1,22

Por meio das Tabelas (5.1) e (5.2) é possível comentar algumas características referente às variáveis analisadas. A cidade de Petrolina foi a que teve os maiores valores de Insolação, Radiação Global e Radiação Difusa de todas as cidades, isto se deve a sua localização geográfica mais próxima à linha equatorial, recebendo assim maior quantidade de energia solar. A cidade de Cuiabá foi a que teve menor Desvio Padrão para Radiação Global e Insolação, o que demonstra que esta dentre as cidades é a que tem menor oscilação entre os valores máximos e mínimos de radiação global e insolação. A cidade de Santa Maria possui o maior Desvio Padrão e a menor média e mínimo para a Radiação Solar Global.

5.2 MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

5.2.1 Modelos de Estimativa da Radiação Solar Global Média Mensal

Neste tópico serão apresentados os modelos de estimativa da radiação solar global média mensal nas cinco cidades analisadas (Brasília – DF, Cuiabá – MT, Palmas – TO, Petrolina – PE e Santa Maria – RS). Para a parametrização destes modelos foram utilizados os dados tratados conforme apresentado na metodologia, as relações entre o índice de claridade e a razão de insolação juntamente com as linhas de aproximação, são apresentadas nas Figuras de (5.1) a (5.5), tanto para o modelo linear de Angstrom-PreScott (Eq. 3.1) quanto para o modelo de não linear ou de potência (Eq. 3.4).

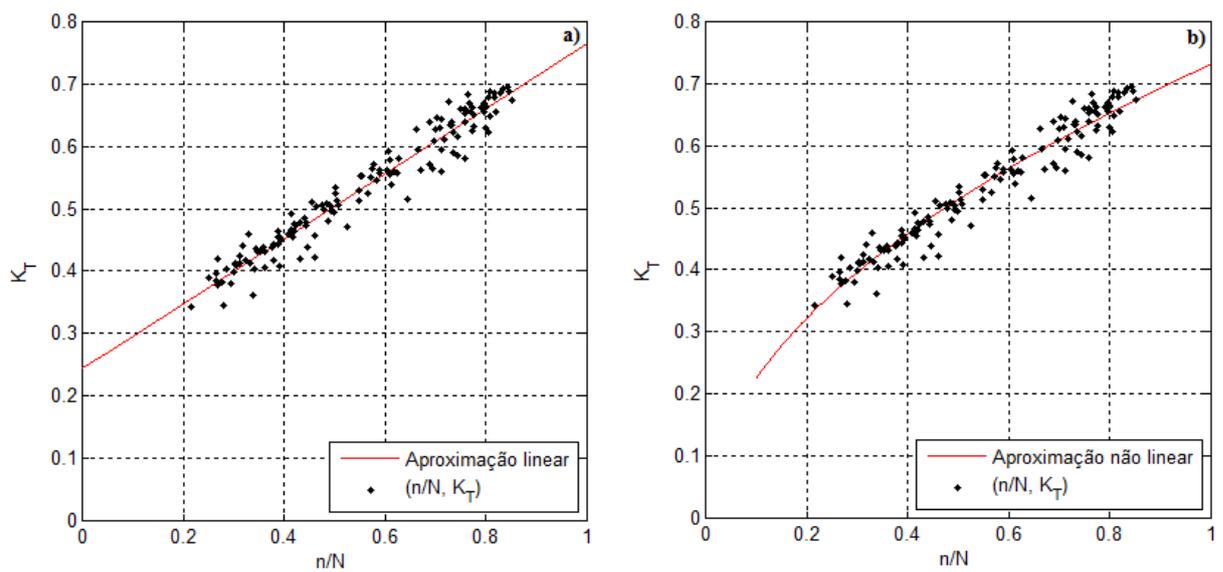


Figura 5.1 – a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Brasília-DF; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Brasília-DF.

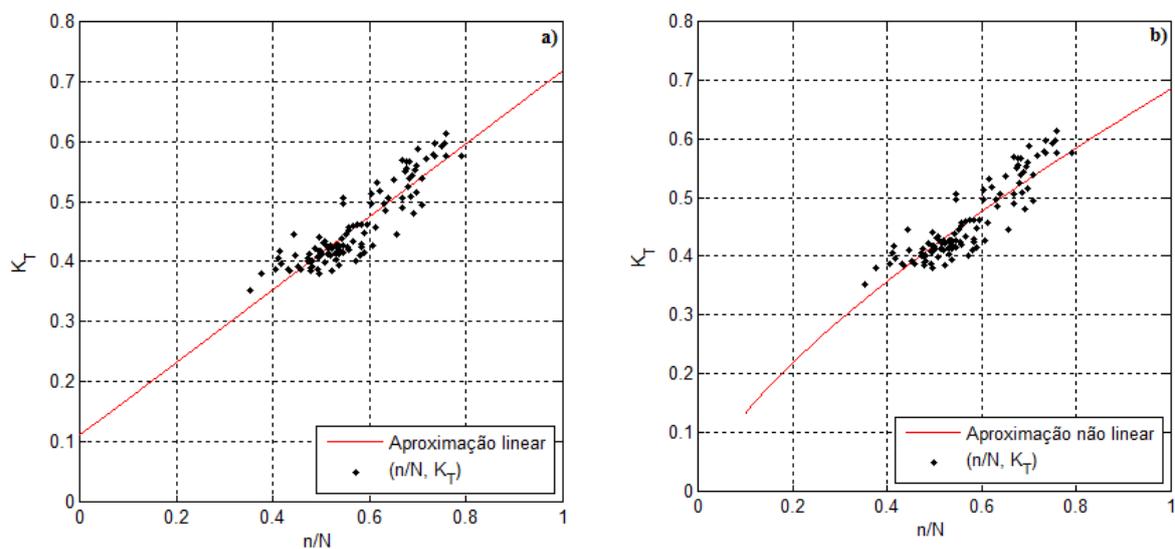


Figura 5.2 – a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Cuiabá-MT; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Cuiabá-MT.

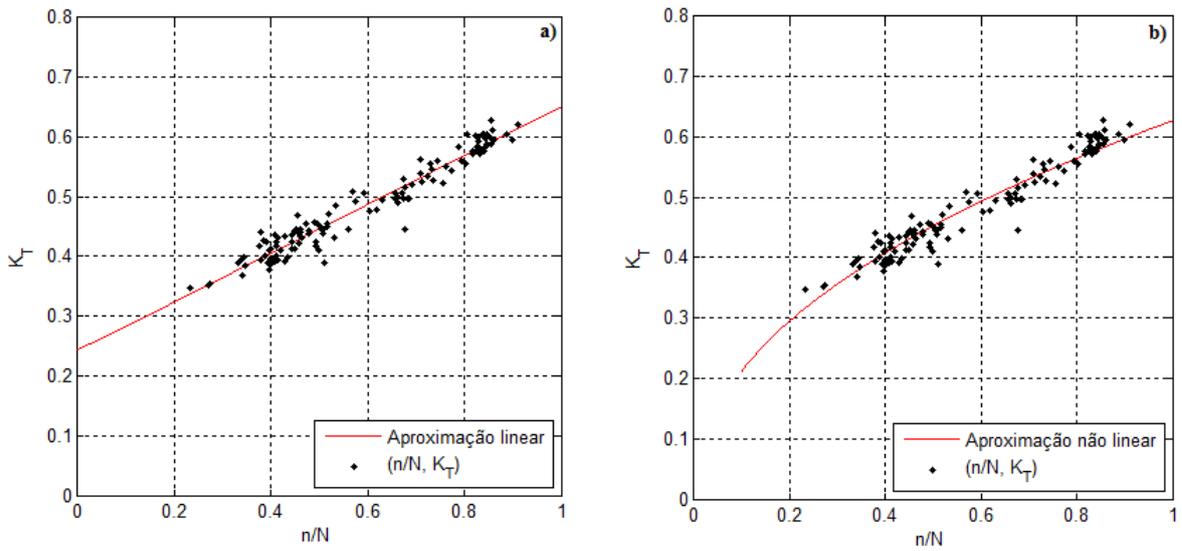


Figura 5.3 – a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Palmas-TO; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Palmas-TO.

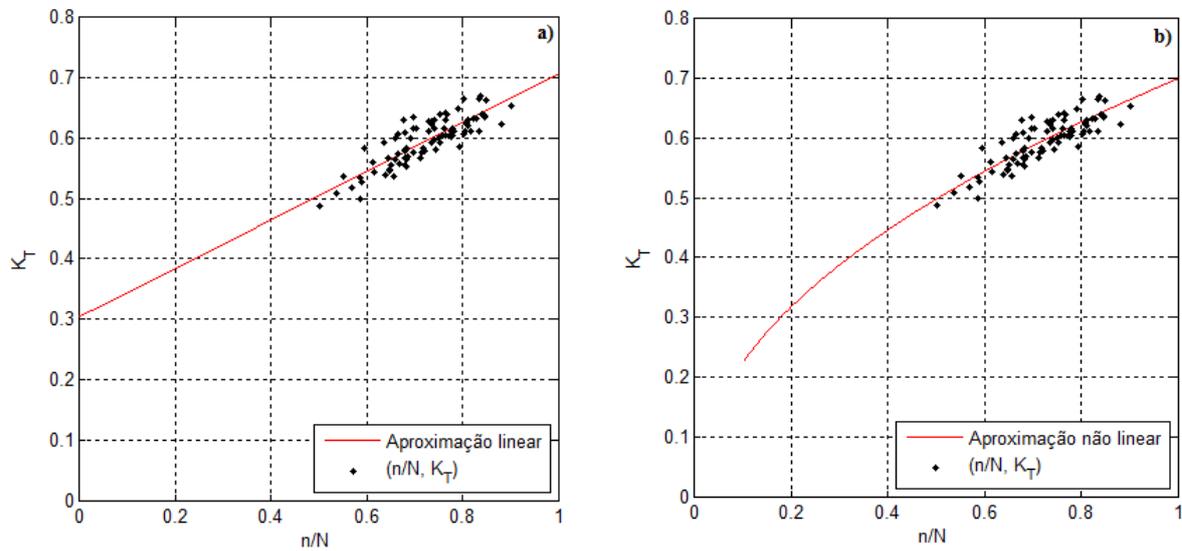


Figura 5.4 – a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Petrolina-PE; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Petrolina-PE.

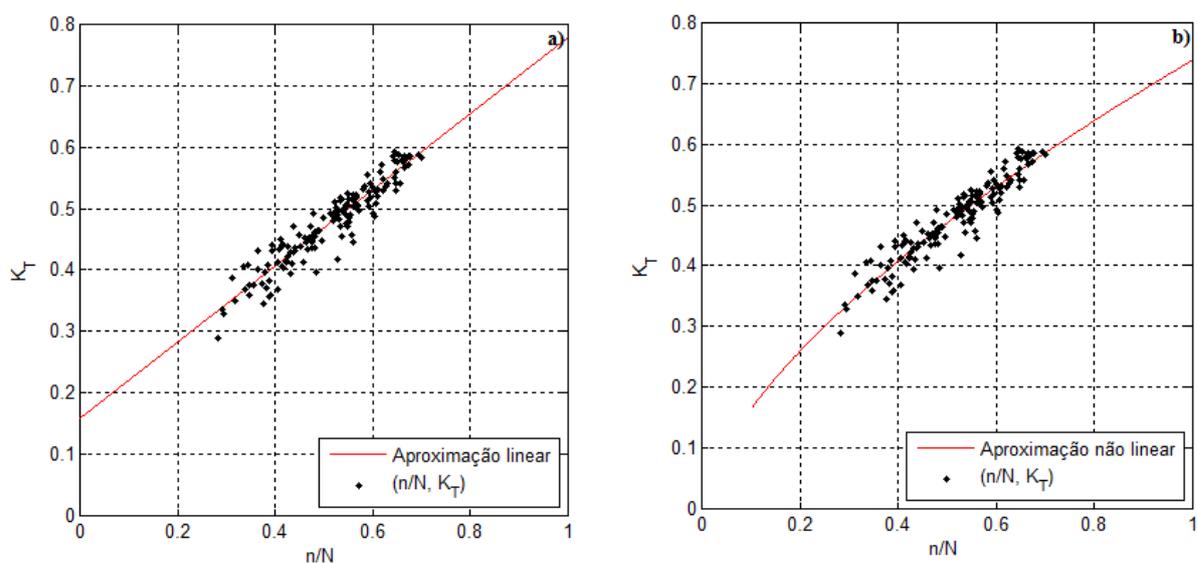


Figura 5.5 – a) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com reta de aproximação linear para Santa Maria-RS; b) Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com curva de aproximação não linear para Santa Maria-RS.

Nas Figuras de (5.1) a (5.5) verifica-se que ambas as curvas de aproximação (linear ou não linear) possuem uma boa concordância com os pontos $(\bar{n}/\bar{N}, \bar{K}_T)$. Há variações nos máximos e mínimos do \bar{K}_T entre as cidades, em Brasília ele varia entre 0,35 e 0,7, já em Cuiabá e Palmas este varia entre 0,4 e 0,6, em Petrolina entre 0,5 e 0,7, e por último em Santa Maria entre 0,35 e 0,6. Estes valores demonstram que na cidade de Petrolina tem-se um melhor recurso de radiação solar global, sendo este sempre superior a 50% da radiação no topo da atmosfera, variando pouco ao longo do ano sempre entre 50% e 70%, este valor está inteiramente ligado aos altos valores de horas insolação na cidade. Em Santa Maria a radiação solar global fica entre 35% e 60% da radiação no topo da atmosfera, sendo o intervalo com menores valores de radiação solar global das cidades. Nas outras cidades há uma grande variação deste recurso solar.

Nas Tabelas (5.3) e (5.4) são apresentados os coeficientes das parametrizações linear e não linear, respectivamente, juntamente com os valores dos indicadores estatísticos utilizados para validação destas ao estimar a radiação solar global média mensal.

Tabela 5.3 – Coeficientes do modelo linear e indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar global média mensal para dados de validação

Cidades	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>	r^2	RMSE	MBE	d de Willmott
Brasília, DF	0,2443	0,5227	0,767	0,9466	2,58%	0,22%	0,9926
Cuiabá, MT	0,1121	0,6081	0,7202	0,8127	4,35%	-0,05%	0,9671
Palmas, TO	0,2438	0,4073	0,6511	0,9396	4,43%	-2,60%	0,9587
Petrolina, PE	0,3041	0,4035	0,7076	0,8436	3,22%	2,71%	0,9881
Santa Maria, RS	0,1586	0,6205	0,7791	0,8924	2,45%	-1,36%	0,9983

Tabela 5.4 – Coeficientes do modelo não linear e indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar global média mensal para dados de validação

Cidades	$a_{g,nl}$	$b_{g,nl}$	r^2	RMSE	MBE	d de Willmott
Brasília, DF	0,7313	0,5099	0,9373	3,05%	0,54%	0,9898
Cuiabá, MT	0,6846	0,7108	0,7860	4,57%	-0,55%	0,9653
Palmas, TO	0,6268	0,4992	0,9202	4,51%	-2,24%	0,9565
Petrolina, PE	0,6995	0,4910	0,7303	3,49%	2,54%	0,9817
Santa Maria, RS	0,7386	0,6504	0,8836	2,59%	-1,38%	0,9980

Na Tabela (5.3) os coeficientes (a , b) variam para cada cidade, o coeficiente independente (a) traduz a fração da radiação máxima a que, em média, atinge a superfície. Assim verifica-se que em Petrolina há mais radiação solar chegando à superfície e em Cuiabá há menos radiação solar chegando a superfície. Já a transmissividade atmosférica destas cidades analisadas variam entre 0,6511 (Palmas) e 0,7791 (Santa Maria). Na Tabela (5.4) os coeficientes ($a_{g,nl}$, $b_{g,nl}$) do modelo em questão também variam de cidade para cidade,

verifica-se que o coeficiente $a_{g,nl}$ de cada cidade possui valores próximos da soma dos coeficientes a e b do modelo linear (transmissividade) o que já era de se esperar.

Analisando os indicativos estatísticos na Tab. (5.3) verifica-se que o modelo linear apresenta excelentes ajustes com os pontos $(\bar{n}/\bar{N}, \bar{K}_T)$, por apresentarem os valores de r^2 próximos de 1, o mesmo não ocorre com o modelo não linear (Tab. 5.4) que possui valores menores para cada cidade em comparação com o modelo linear. Analisando os indicativos voltados para validação dos modelos (RMSE, MBE, d de Willmott) verifica-se que o modelo linear possui resultados melhores do que o modelo não linear, obtendo valores menores de erro (RMSE) e de superestimação ou subestimação (MBE), e melhores resultados quanto o ajuste entre dados reais e dados estimados. Verifica-se que ambos os modelos atenderam os critérios adotados na metodologia em relação aos indicativos estatísticos (RMSE < 10% e MBE < 5%), isso mostra que ambos os modelos são satisfatórios para estimar a radiação solar global média mensal nestas cidades.

Utilizando o modelo linear de cada cidade para estimar a radiação global durante todo o período de dados de geração analisados, para verificar as diferenças entre o valor estimado e o valor observado apenas por questão de curiosidade do comportamento do modelo, verificaram-se bons indicativos estatísticos, o que já se esperava: Brasília (RMSE 4,31%), Cuiabá (RMSE 6,07%), Palmas (RMSE 4,01%), Petrolina (3,54%) e Santa Maria (RMSE 3,44%). Os valores de MBE ficaram próximos de zero e os valores de d de Willmott próximos de um. Verifica-se que os valores de RMSE foram maiores para os dados de geração do que para os dados de validação, pois neste caso utilizamos um banco de dados maior, e este erro leva em consideração a soma do resíduo entre valor estimado e valor observado.

Verifica-se por meio das Tabelas (5.3) e (5.4) que em três cidades (Cuiabá, Palmas e Santa Maria) os modelos subestimam a radiação solar global média mensal (MBE negativo), enquanto duas cidades (Brasília e Petrolina) superestimam, este fato pode ser visualizado nas Figuras (5.6) a (5.10) que mostram os valores estimados pelo modelo linear e o não linear para o período de validação citado na metodologia juntamente com os valores reais observados em cada cidade.

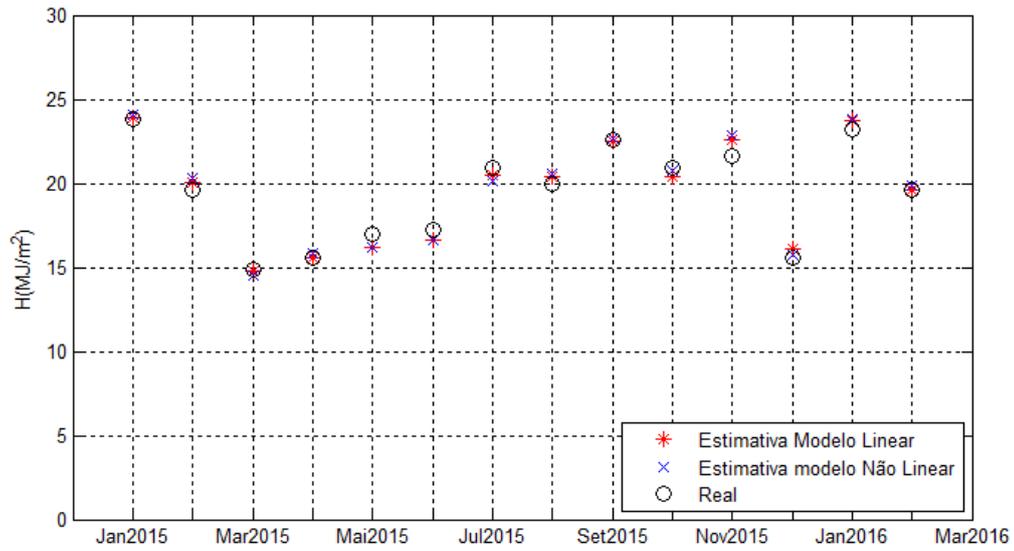


Figura 5.6 – Comparação estimativa modelo linear e não linear vs medição real para Brasília

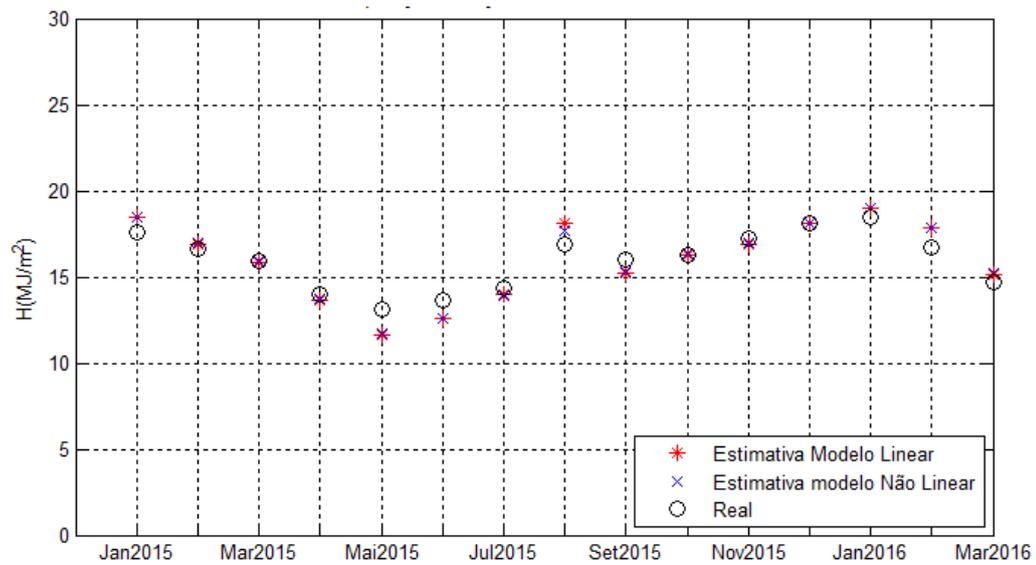


Figura 5.7 – Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Cuiabá

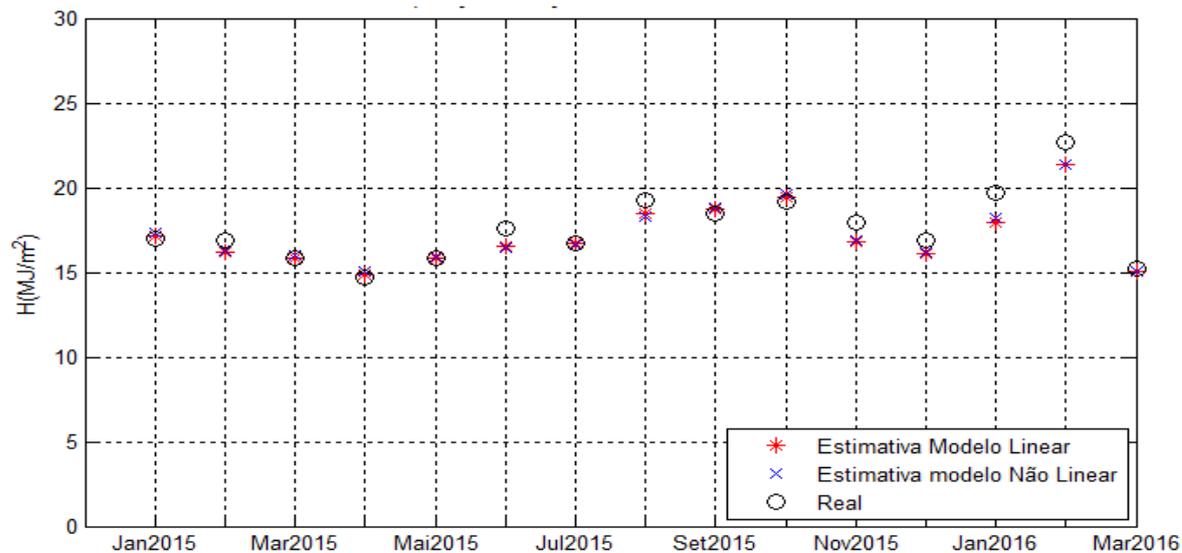


Figura 5.8 – Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Palmas

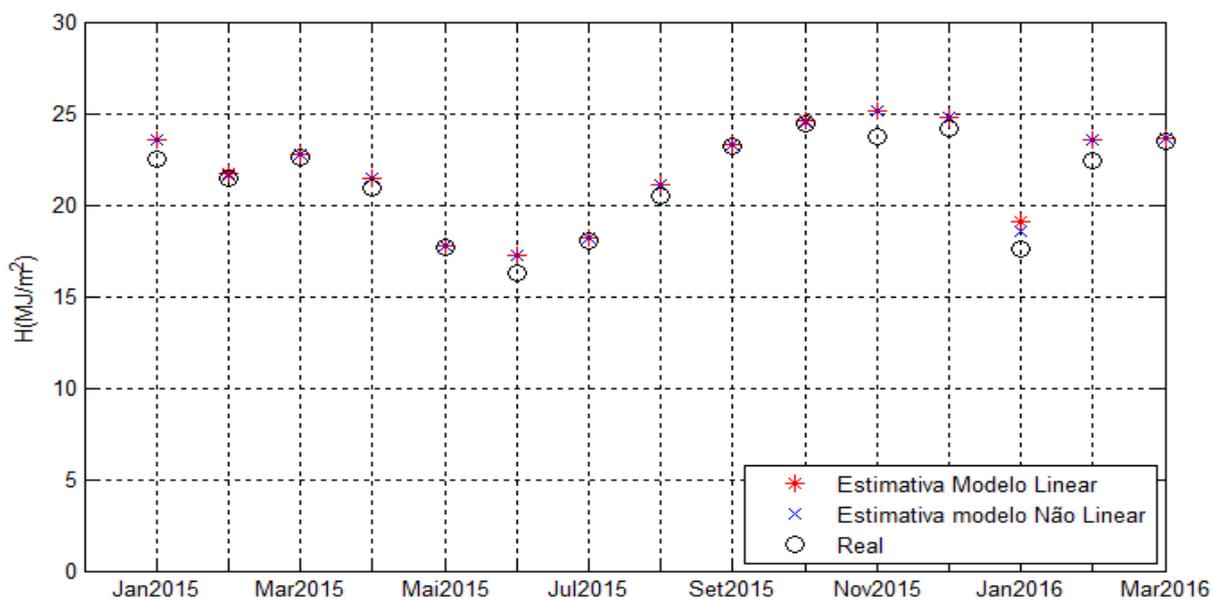


Figura 5.9 – Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Petrolina

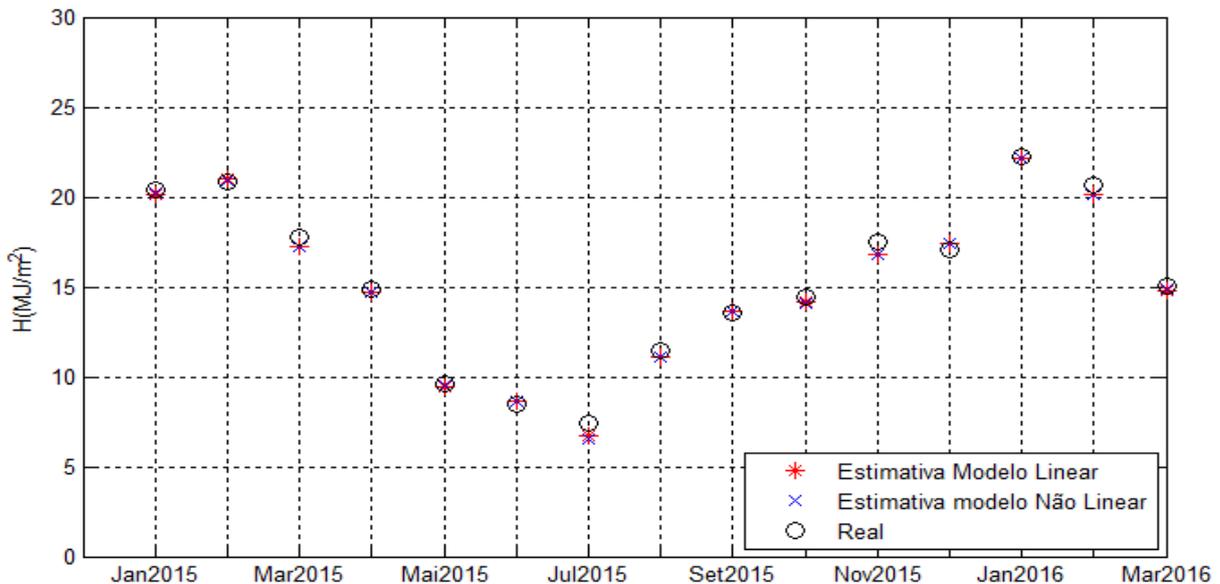


Figura 5.10 – Comparação estimativa radiação global média mensal modelo linear e não linear vs medição real para Santa Maria

Verifica-se pelas Figuras (5.6) a (5.10) que o modelo linear e o não linear estimam a radiação solar global média mensal com ótima precisão e pequeno erro, porém o modelo linear possui uma melhor estimativa. A variação dos valores de radiação solar global média mensal para cada cidade ao longo dos meses analisados mostra que os modelos são típicos ou locais, podendo estes somente ser aplicados para outro local, na mesma área de cobertura da estação ou com características climatológicas semelhantes, para os quais não se disponham de registros de radiação global. Outro fato relevante é que independente do clima da cidade os modelos se ajustam, o que mostra a eficiência de tal metodologia para estimar a radiação solar global.

5.2.2 Modelos de Estimativa da Radiação Solar Global Média Mensal Sazonal

Neste tópico serão apresentados os modelos de estimativa da radiação solar global média mensal sazonal nas cinco cidades analisadas (Brasília – DF, Cuiabá – MT, Palmas – TO, Petrolina – PE e Santa Maria – RS). Para a parametrização destes modelos foram utilizados os dados tratados divididos em estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera) conforme mencionado na metodologia. As relações entre o índice de claridade e a fração da radiação difusa para cada estação juntamente com as linhas de aproximação, são apresentadas nas Figuras de (5.11) a (5.15), tanto para o modelo linear de Angstrom-Prescott (Eq. 3.1) quanto para o modelo de não linear (Eq. 3.4).

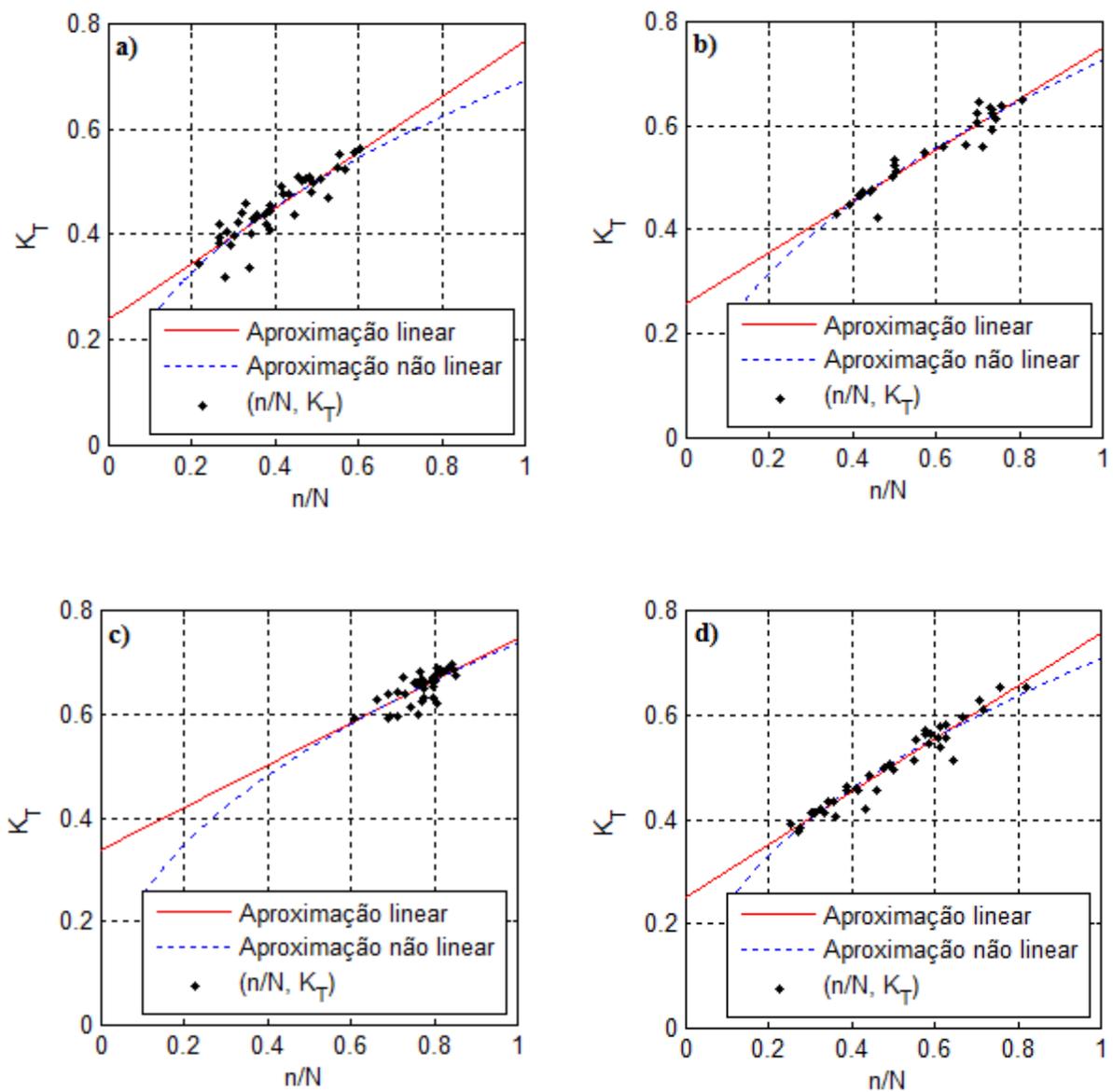


Figura 5.11 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Brasília: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

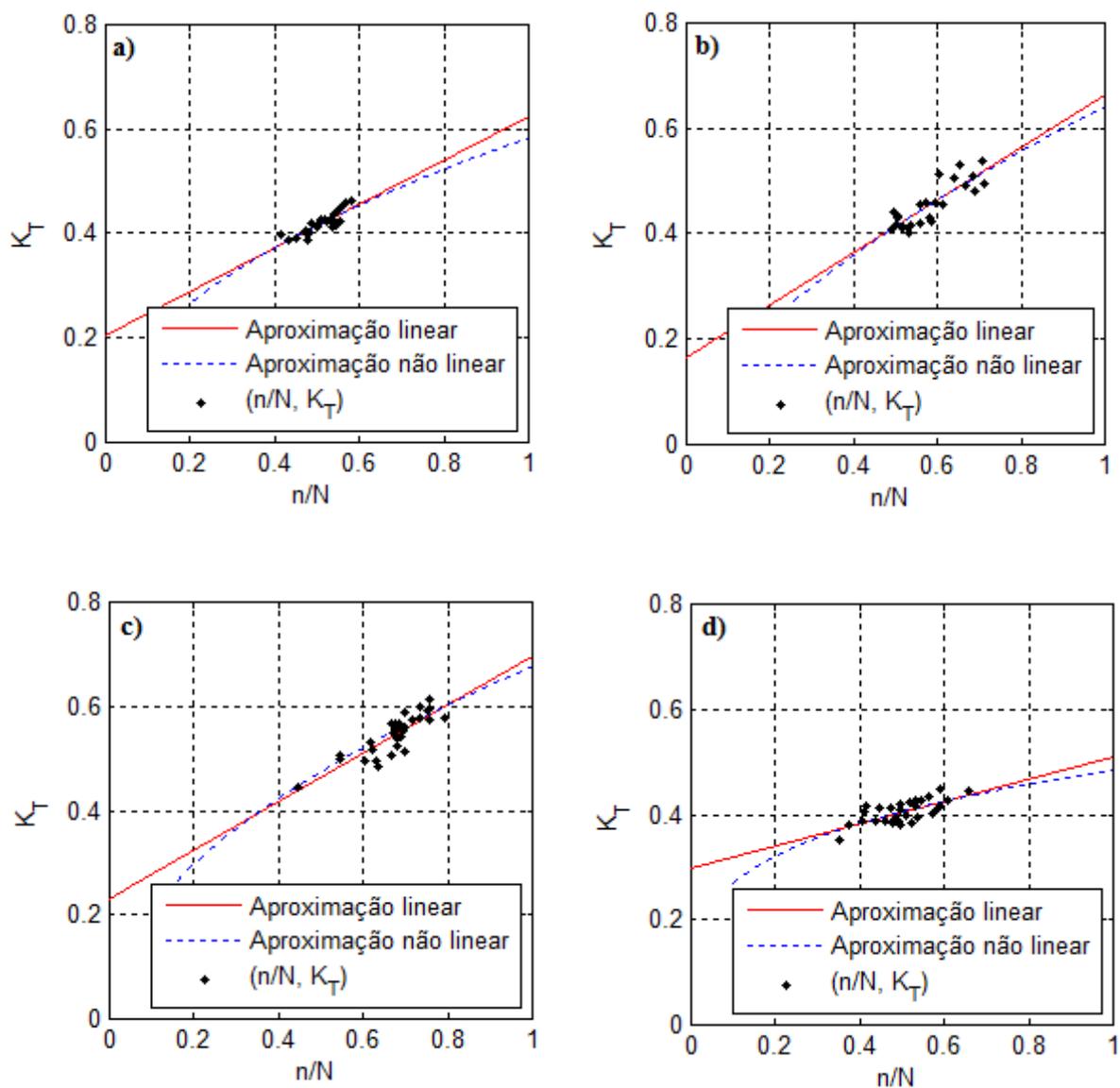


Figura 5.12 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Cuiabá: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

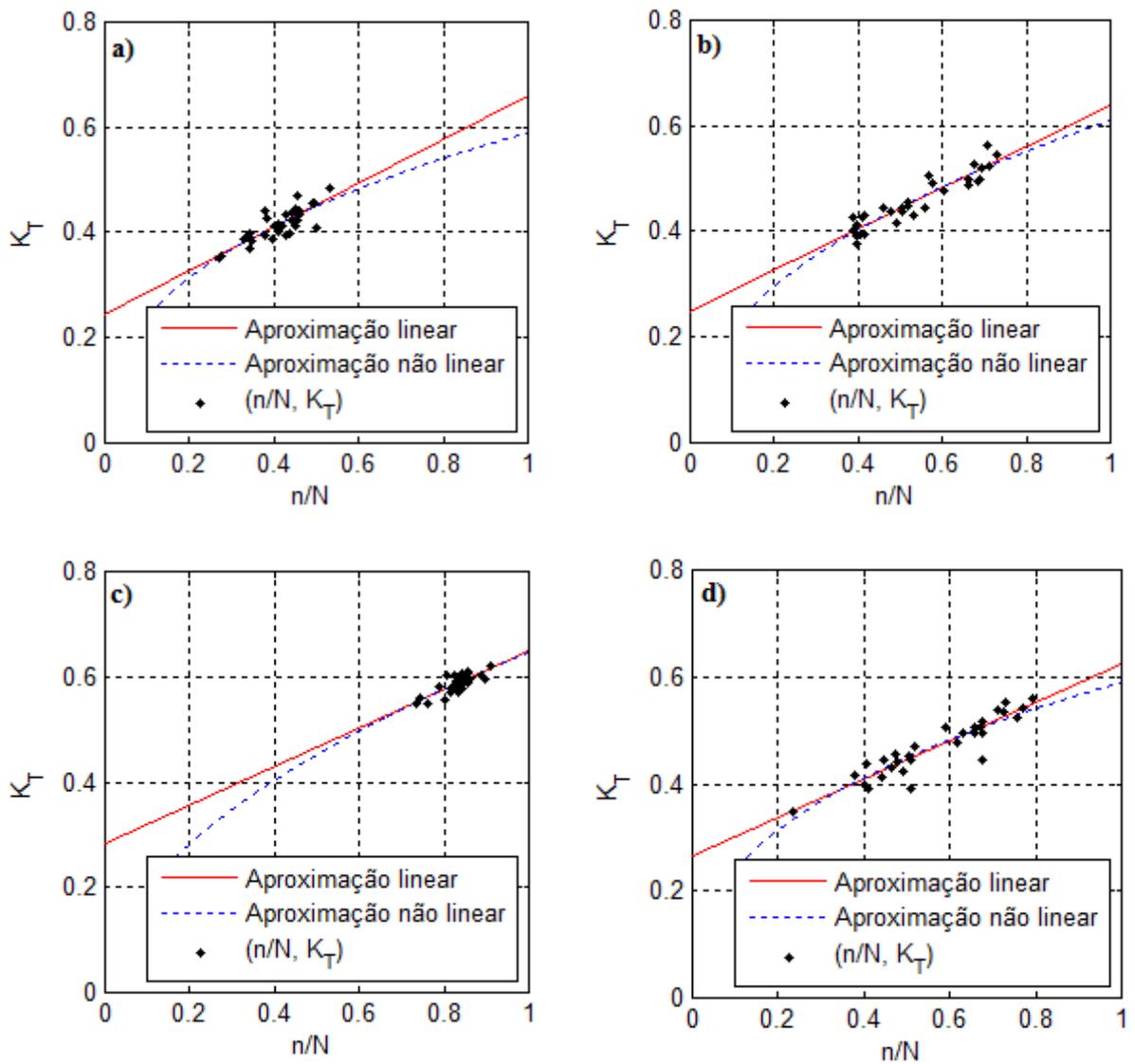


Figura 5.13 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Palmas: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

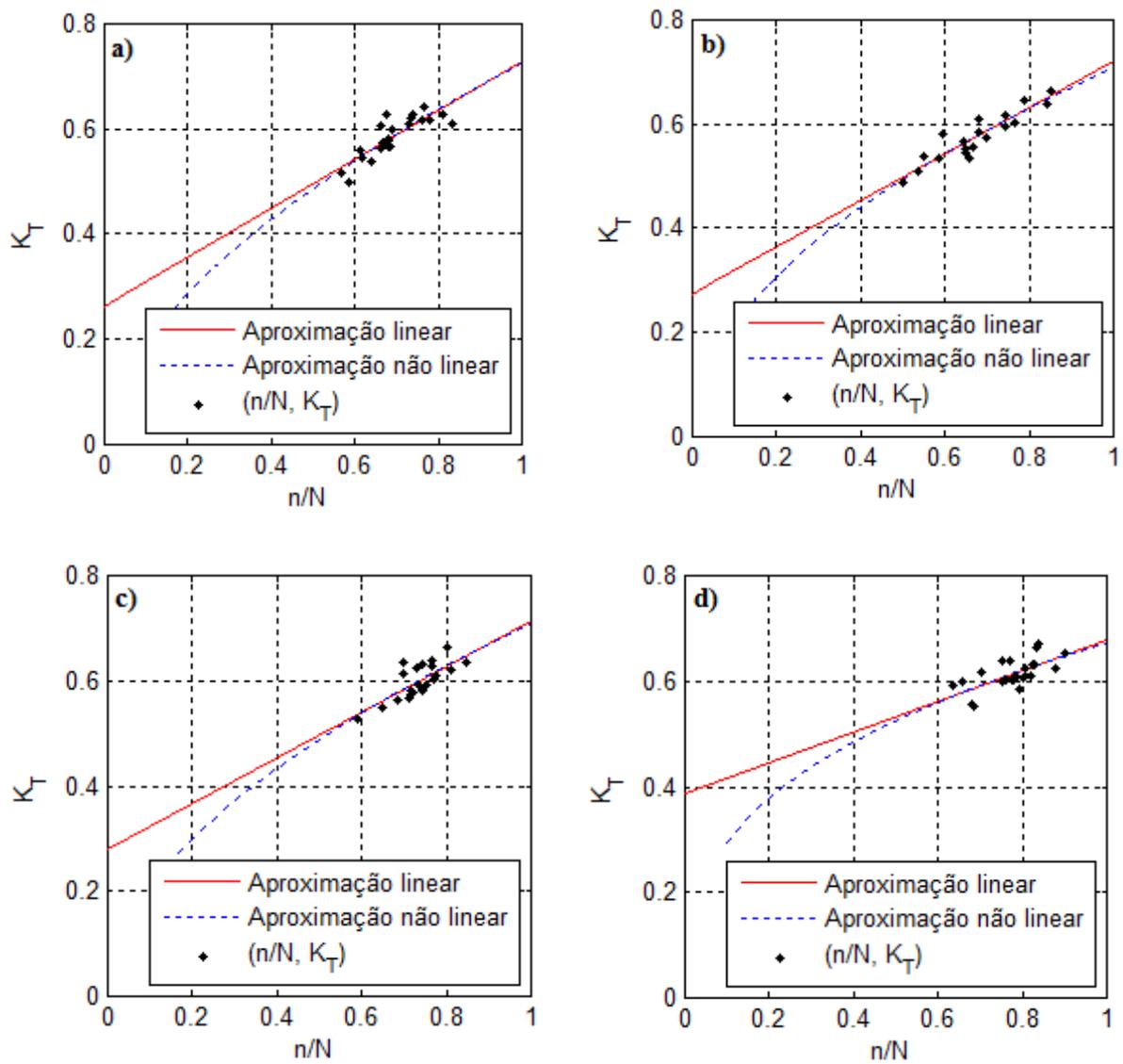


Figura 5.14 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Petrolina: a) Verão; b) Outono; c) Inverno;

d) Primavera

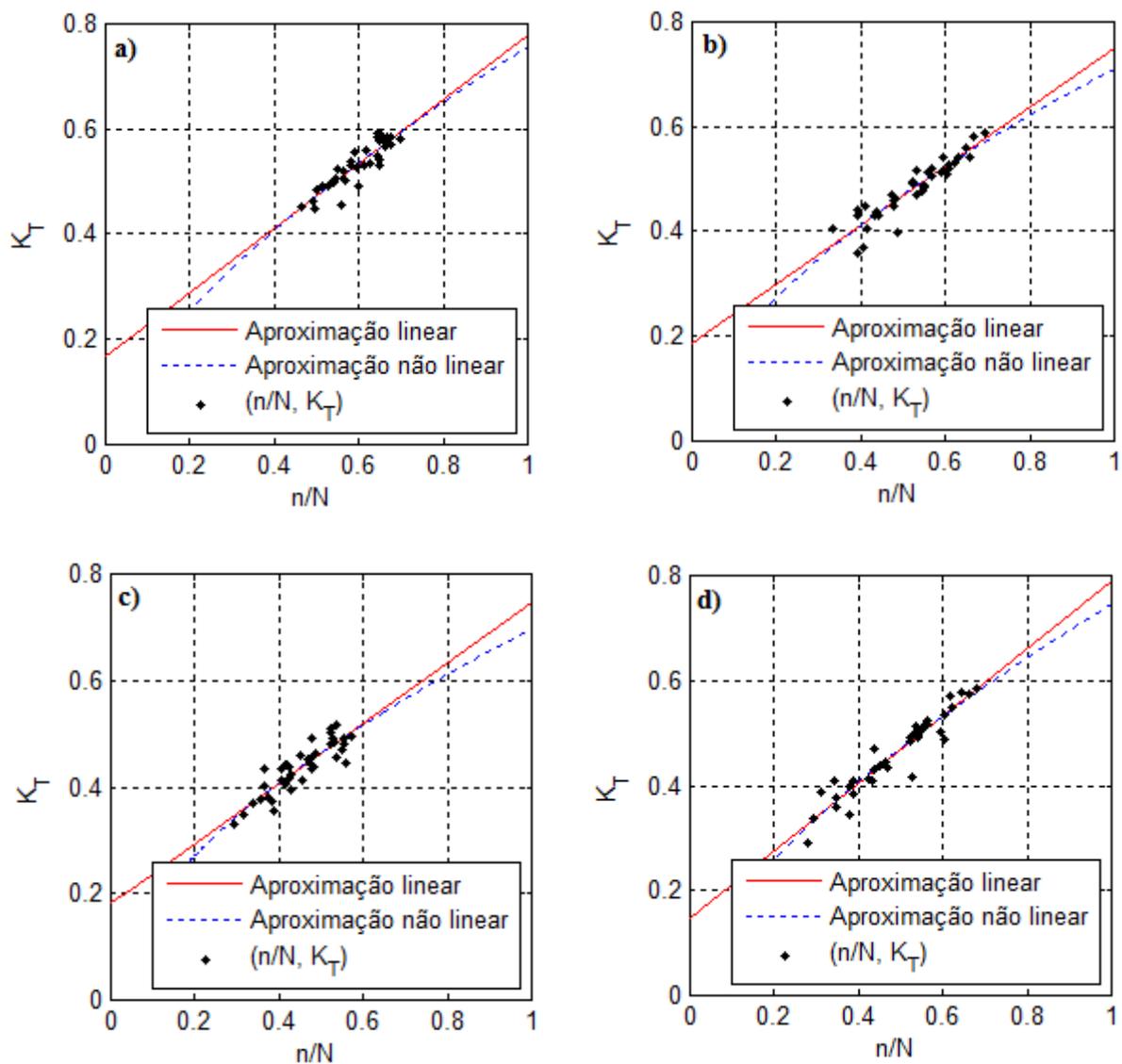


Figura 5.15 – Relação índice de claridade e razão de insolação, juntamente com linhas de aproximação linear e não linear para Santa Maria: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

Nas Figuras de (5.11) a (5.15) verifica-se que as aproximações, linear e não linear, são praticamente idênticas nas regiões em que os pontos estão distribuídos, logo o resultado destas quanto a qualidade dos dados estimados são bem próximas. Em Brasília o inverno possui pontos com $\overline{K_T}$ concentrados acima de 0,6. Em Cuiabá no verão e na primavera os pontos se concentram com $\overline{K_T}$ entre 0,4 e 0,5. Em Palmas durante o inverno $\overline{K_T}$ fica entre 0,55 e 0,6. Em Petrolina todas as estações possuem $\overline{K_T}$ que se concentram entre 0,5 e 0,65.

Já na cidade de Santa Maria verifica-se uma distribuição pontos com $\overline{K_T}$ variando muito em ambas as estações.

Na Tabela (5.5) são apresentados os coeficientes da parametrização linear, juntamente com os valores dos indicadores estatísticos utilizados para validação desta ao estimar a radiação solar global média mensal sazonal. Não foram apresentados os coeficientes do modelo não linear e os indicadores estatísticos para este caso, pois este apresentou resultados piores do que modelo linear em todas as cidades analisadas (assim como na análise do modelo médio mensal) e buscando uma melhor apresentação dos resultados, sem excesso de informações, optou-se por não apresentá-los.

Tabela 5.5 – Coeficientes dos modelos linear e indicadores estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar global média mensal sazonal para dados de validação

Cidades	Estação	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>	<i>r</i>²	RMSE	MBE	d
Brasília, DF	Verão	0,2402	0,5280	0,7682	0,7986	2,57%	2,17%	0,9913
	Outono	0,2571	0,4949	0,752	0,9081	0,47%	0,14%	0,9962
	Inverno	0,3384	0,4086	0,747	0,5323	2,10%	-2,03%	0,9887
	Primavera	0,2503	0,5080	0,7583	0,9441	1,88%	-0,63%	0,9609
	Sazonal Total	-	-	-	-	2,12%	0,32%	0,9981
Cuiabá, MT	Verão	0,2048	0,4199	0,6247	0,7440	2,37%	0,68%	0,8862
	Outono	0,1639	0,4994	0,6633	0,7243	6,57%	<u>-5,08%</u>	0,9011
	Inverno	0,2305	0,4683	0,6988	0,7374	5,74%	3,86%	0,9357
	Primavera	0,2988	0,2121	0,5109	0,4920*	6,73%	<u>-6,22%</u>	0,5989
	Sazonal Total	-	-	-	-	4,91%	-2,00%	0,9198
Palmas, TO	Verão	0,2436	0,4171	0,6607	0,6801	5,09%	-3,83%	0,9557
	Outono	0,2471	0,3934	0,6405	0,8691	0,72%	-0,34%	0,9897

	Inverno	0,2829	0,3672	0,6501	0,5879	3,33%	-2,08%	0,9070
	Primavera	0,2648	0,3598	0,6246	0,8503	3,69%	-2,44%	0,8162
	Sazonal Total	-	-	-	-	3,86%	-2,69%	0,9557
Petrolina, PE	Verão	0,2617	0,4687	0,7304	0,6989	4,61%	4,23%	0,9490
	Outono	0,2730	0,4494	0,7224	0,8525	2,13%	1,66%	0,9888
	Inverno	0,2807	0,4357	0,7164	0,5774	3,44%	3,01%	0,9652
	Primavera	0,3888	0,2909	0,6797	0,5454	2,59%	1,00%	0,7258
	Sazonal Total	-	-	-	-	3,46%	2,81%	0,975
Santa Maria, RS	Verão	0,1670	0,6135	0,7805	0,8242	1,77%	0,72%	0,9875
	Outono	0,1856	0,5658	0,7514	0,8565	2,75%	-2,15%	0,9954
	Inverno	0,1806	0,5656	0,7462	0,7727	4,80%	-3,61%	0,9849
	Primavera	0,1472	0,6440	0,7912	0,9028	3,38%	-2,43%	0,9738
	Sazonal Total	-	-	-	-	2,69%	-1,57%	0,9865

A divisão dos dados analisados por estações foi abordada por diversos autores (CARDON & AMORIN NETO, 1983; CURY-LUNARDI et al, 1993), tendo alguns resultados melhores do que os modelos de estimativa mensal e outros piores, no caso em questão verifica-se que a divisão dos dados em estações trouxe melhorias significativas em algumas estações em relação aos resultados estatísticos apresentados na Tab. (5.5) para o modelo de estimativa média mensal, porém em outras, estimativas ruins, que extrapolaram os limites dos indicativos estatísticos estabelecidos para validação dos modelos (ver itens sublinhados na Tab. 5.5). Porém ao analisar a utilização dos modelos sazonais juntos para estimar a radiação solar global durante o período de validação que varre todas as estações, chegou-se a bons resultados, são os indicativos apresentados nas linhas “Sazonal Total” da Tab. (5.5). Isto ocorre pois estes indicativos estatísticos analisam o conjunto de dados como um todo, e quanto mais dados, mais dissolvidos são os erros.

Verifica-se também que os coeficientes a e b dos modelos lineares sazonais sofrem variações em relação aos coeficientes dos modelos mensais apresentados na Tab. (5.3). Além

disto, a transmissividade atmosférica varia entre as estações, em Brasília os valores de transmissividade são bem próximos em todas as estações, o mesmo ocorre para outras cidades como Palmas, Petrolina e Santa Maria, somente em Cuiabá que houve uma diferença significativa entre as estações neste item na qual no inverno tenho transmissividade de 0,6988 enquanto na primavera 0,5109.

Nas Figuras de (5.16) a (5.20) são apresentados à confrontação das estimativas por meio dos modelos lineares de estimativa média mensal e de estimativa média mensal sazonal, pelo fato dos modelos lineares terem gerado melhores resultados, juntamente com os dados reais observados para cada cidade.

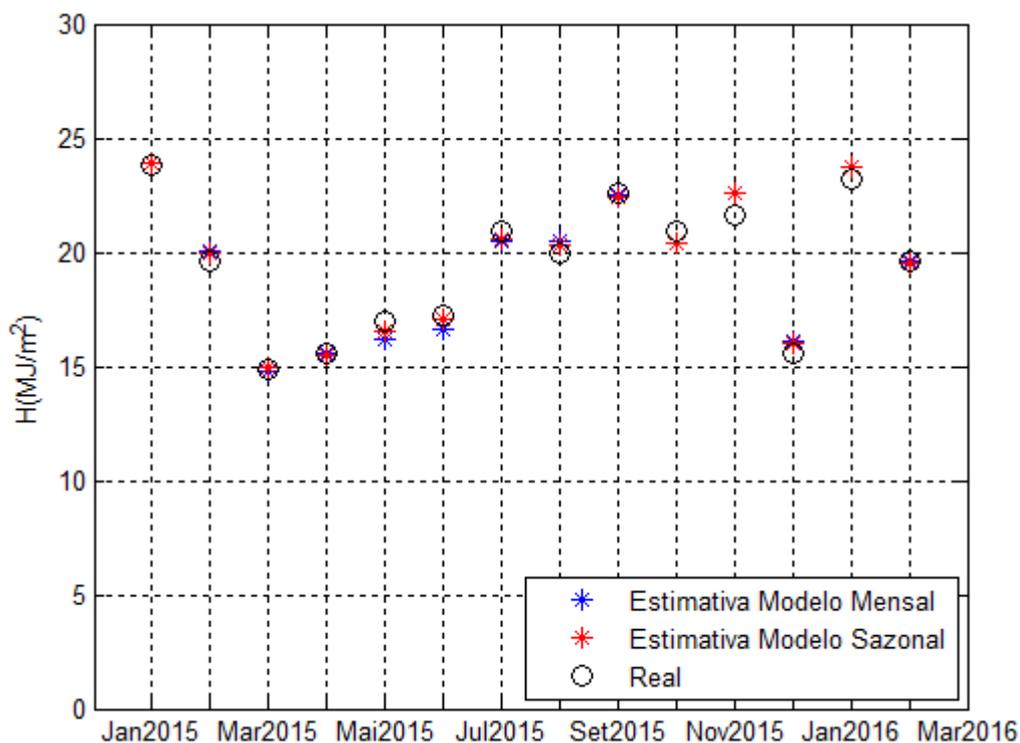


Figura 5.16 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e mensal sazonal vs medição real para Brasília

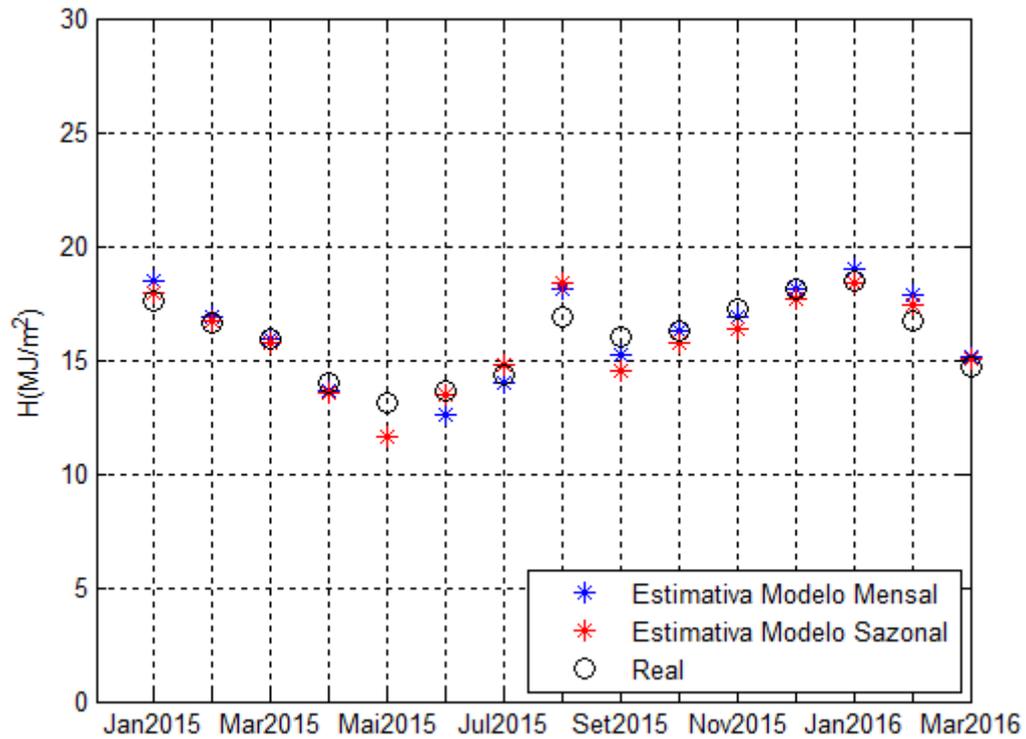


Figura 5.17 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e sazonal vs medição real para Cuiabá

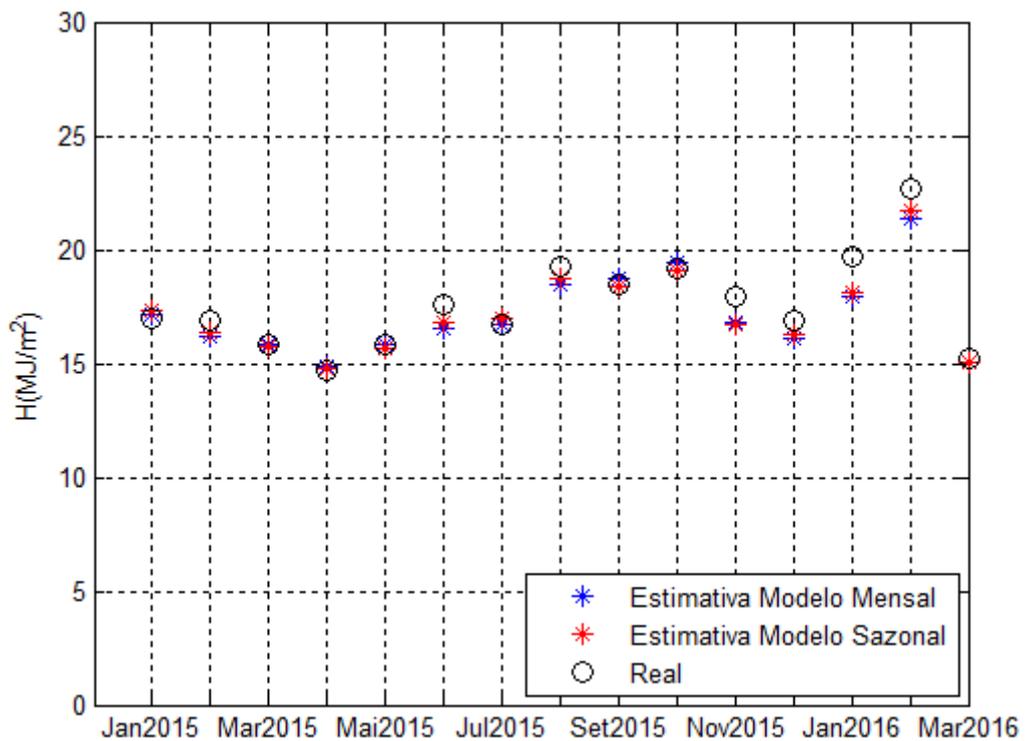


Figura 5.18 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e sazonal vs medição real para Palmas

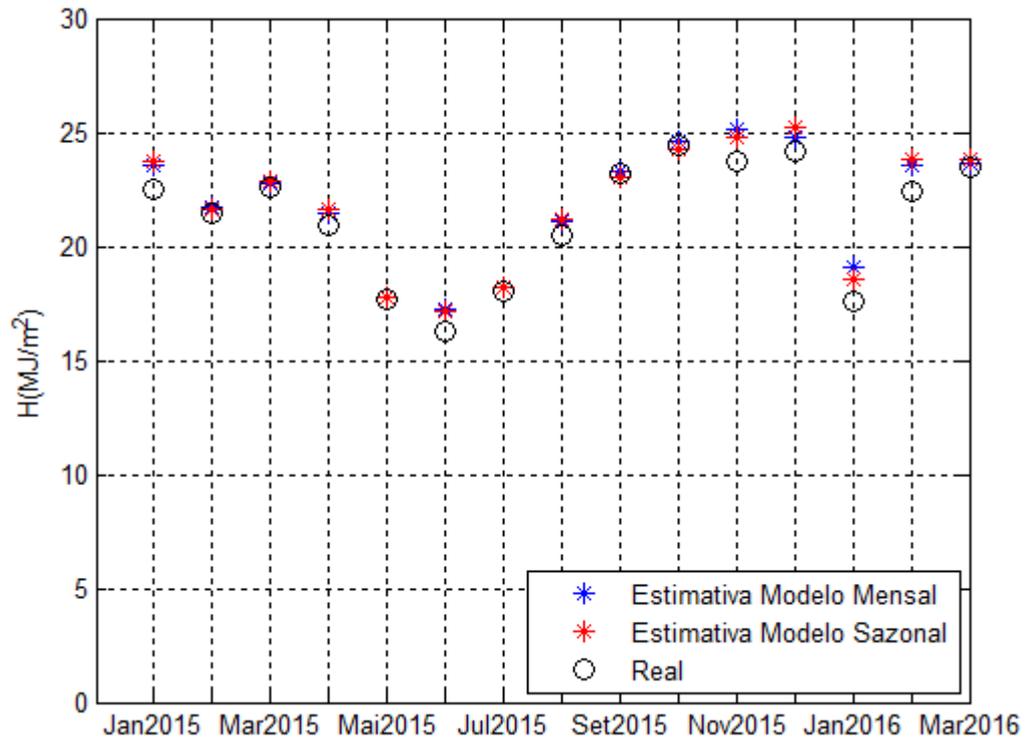


Figura 5.19 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e sazonal vs medição real para Petrolina

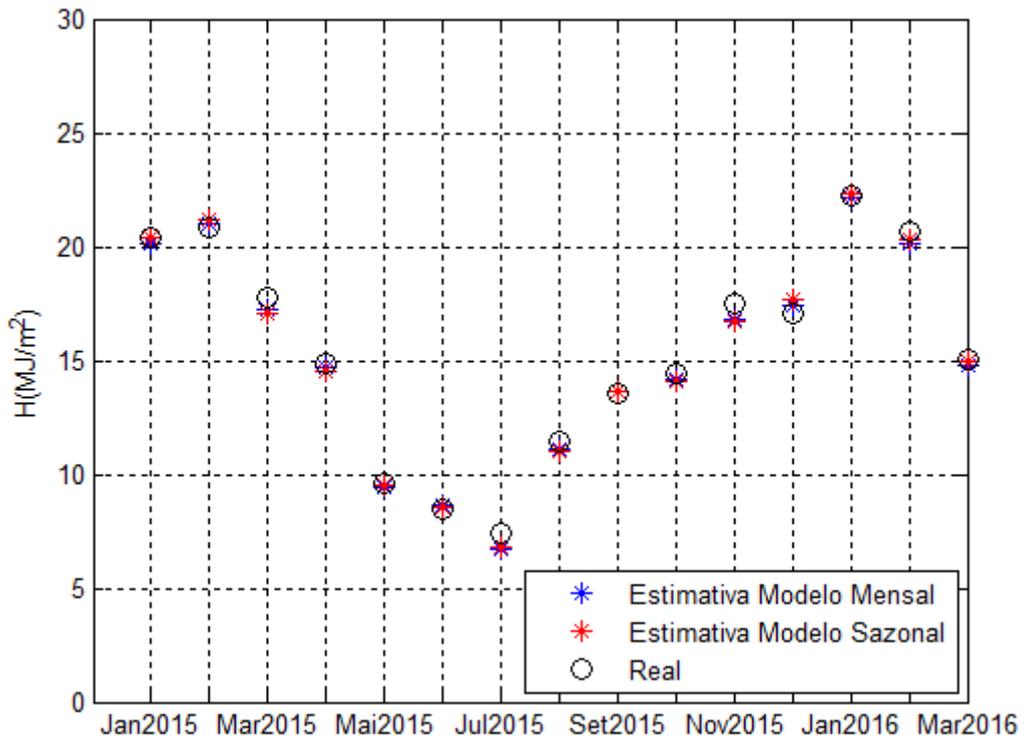


Figura 5.20 – Comparação estimativa radiação solar global modelos lineares mensal e sazonal vs medição real para Santa Maria

Verifica-se pelas Figuras (5.16) a (5.20) que os modelos de estimativa média mensal e de estimativa média mensal sazonal obtiveram resultados muito próximos entre si, e conseqüentemente ambos estimaram a radiação solar global com precisão quando comparamos os valores estimados com os valores reais. Verifica-se que em algumas cidades os modelos sazonais obtiveram melhores estimativas, como é o caso de Palmas, já em outras como Cuiabá, o modelo mensal gerou melhores estimativas. Pode-se concluir que a divisão dos dados em estações do ano não houve melhora nos resultados das estimativas

Observa-se que no outono e inverno se concentram em geral os menores valores de Radiação Solar Global (Figuras 5.16 a 5.20), porém analisando os gráficos que geraram os modelos de estimativa para cada estação (Figuras 5.11 a 5.15) verifica-se que estes não são devidos a maior nebulosidade, já que os valores da razão de insolação são altos, assim como de $\overline{K_T}$, sendo portando função da menor quantidade de energia disponível no topo da atmosfera, este fato é válido para todas as cidades.

5.3 MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA

5.3.1 Modelos de Estimativa da Radiação Solar Difusa Média Mensal

Neste tópico serão apresentados os modelos de estimativa da radiação solar difusa média mensal nas quatro cidades analisadas (Brasília – DF, Cuiabá – MT, Palmas – TO e Petrolina – PE). Para a parametrização destes modelos foram utilizados os dados tratados conforme apresentado na metodologia, as relações entre o índice de claridade e a fração da radiação difusa juntamente com as linhas de aproximação, para o modelo linear (Eq. 3.5), polinomial de 3º ordem (Eq. 3.6) e não linear (Eq. 3.7). Estes são apresentadas nas Figuras de (5.21) a (5.24). Na Tabela (5.6) são apresentados os percentuais da disponibilidade da radiação média mensal difusa e direta para as cidades analisadas levando em consideração os dados das séries utilizadas para geração dos modelos.

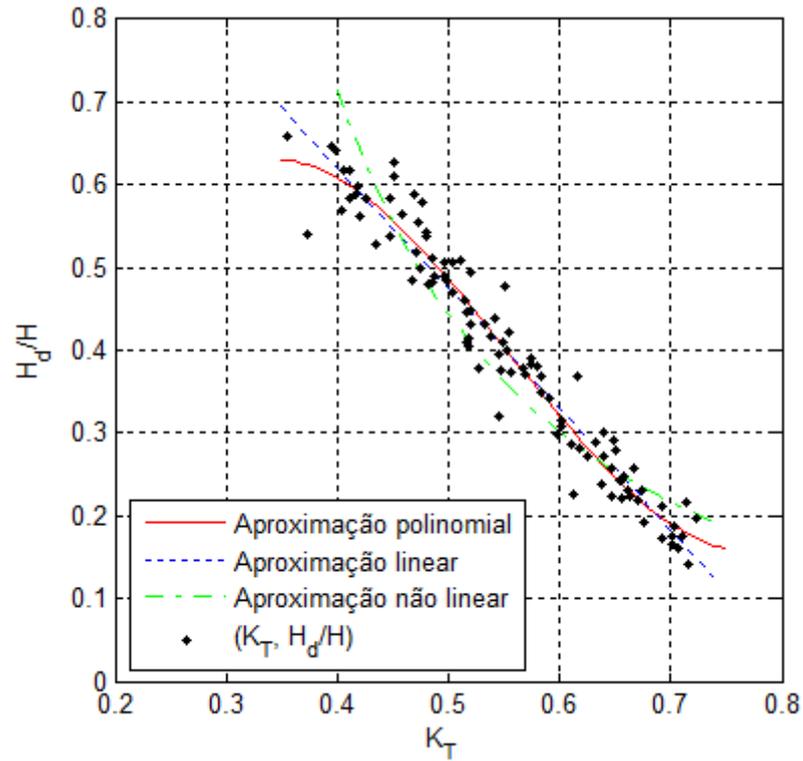


Figura 5.21 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Brasília

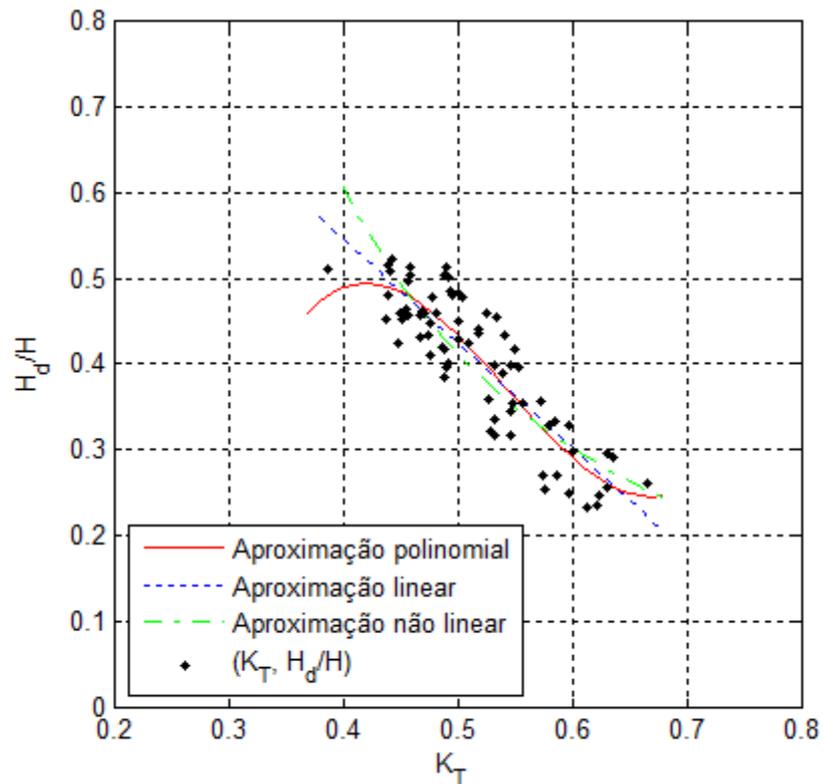


Figura 5.22 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Cuiabá

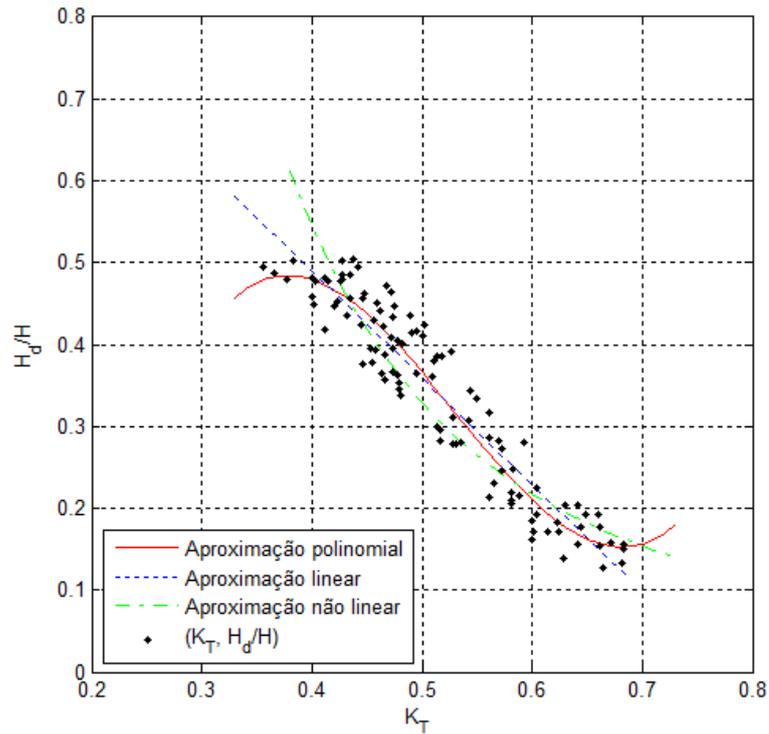


Figura 5.23 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Palmas

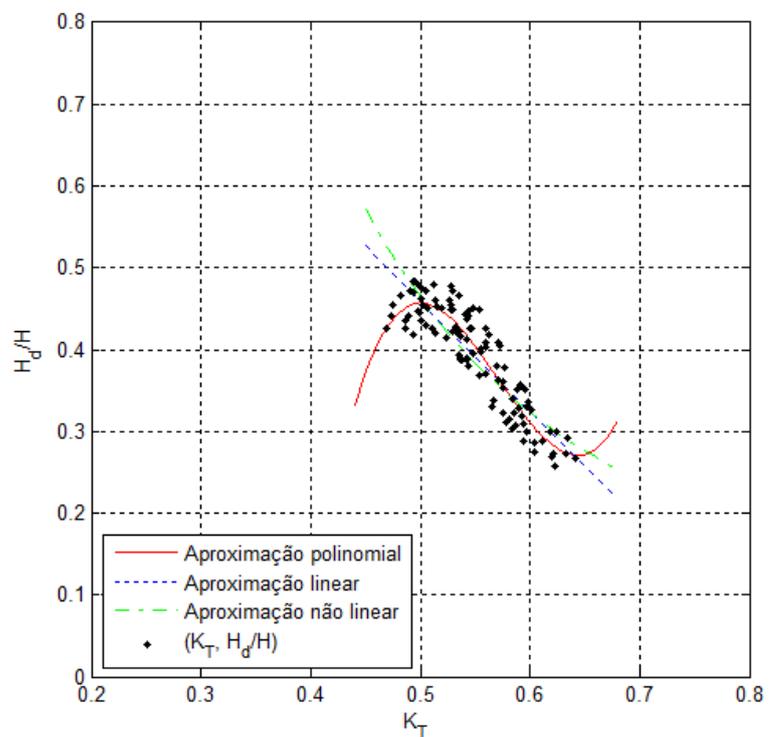


Figura 5.24 – Relação índice de claridade e fração de radiação difusa, com linhas de aproximação polinomial, linear e não linear para a cidade de Petrolina

Tabela 5.6 – Porcentagem e valores médios mensais da disponibilidade de radiação solar difusa e direta no período de análise para dados de geração

Mês	Análises	Brasília		Cuiabá		Palmas		Petrolina	
		H_b	H_d	H_b	H_d	H_b	H_d	H_b	H_d
Jan	Percentual	47,76%	52,24%	52,13%	47,87%	58,78%	41,22%	62,40%	37,60%
	Média (MJ/m ²)	8,90	9,73	9,12	8,38	9,90	6,94	14,42	8,69
Fev	Percentual	52,44%	47,56%	45,85%	54,15%	54,07%	45,93%	60,59%	39,41%
	Média (MJ/m ²)	10,21	9,26	7,53	8,89	9,00	7,65	13,69	8,90
Mar	Percentual	51,99%	48,01%	46,26%	53,74%	52,17%	47,83%	62,14%	37,86%
	Média (MJ/m ²)	9,41	8,69	7,13	8,28	8,27	7,58	14,05	8,56
Abr	Percentual	58,92%	41,08%	50,79%	49,21%	58,96%	41,04%	62,70%	37,30%
	Média (MJ/m ²)	10,40	7,25	7,49	7,26	9,08	6,32	12,55	7,47
Mai	Percentual	70,24%	29,76%	59,80%	40,20%	66,34%	33,66%	60,44%	39,56%
	Média (MJ/m ²)	12,02	5,09	8,35	5,61	10,37	5,26	10,62	6,95
Jun	Percentual	76,06%	23,94%	69,80%	30,20%	80,42%	19,58%	62,39%	37,61%
	Média (MJ/m ²)	12,99	4,09	9,95	4,30	13,79	3,36	10,74	6,48
Jul	Percentual	79,01%	20,99%	70,67%	29,33%	81,18%	18,82%	62,00%	38,00%
	Média (MJ/m ²)	14,12	3,75	10,61	4,40	14,33	3,32	11,37	6,97
Ago	Percentual	78,66%	21,34%	66,69%	33,31%	79,53%	20,47%	65,56%	34,44%
	Média (MJ/m ²)	15,71	4,26	11,24	5,61	15,24	3,92	13,39	7,03
Set	Percentual	70,33%	29,67%	46,50%	53,50%	70,27%	29,73%	70,36%	29,64%
	Média (MJ/m ²)	14,30	6,04	6,93	7,97	13,35	5,65	16,08	6,77
Out	Percentual	55,64%	44,36%	44,91%	55,09%	59,40%	40,60%	68,83%	31,17%
	Média (MJ/m ²)	10,79	8,60	6,90	8,47	10,64	7,27	16,38	7,42
Nov	Percentual	42,66%	57,34%	47,01%	52,99%	55,20%	44,80%	65,11%	34,89%
	Média (MJ/m ²)	7,46	10,03	7,75	8,74	9,16	7,43	15,35	8,23
Dez	Percentual	42,80%	57,20%	50,94%	49,06%	53,35%	46,65%	64,27%	35,73%
	Média (MJ/m ²)	7,70	10,30	8,87	8,54	8,90	7,78	14,50	8,06

Analisando os resultados apresentados nas Fig. (5.21) a (5.24) na cidade de Brasília a fração da radiação solar difusa na radiação solar global chega a 65%, maior percentual entre as cidades, a fração difusa nesta cidade varia entre 15% e 65%. Nas outras cidades esta fração varia entre 22% e 50%, 15% e 50% e 25% a 45%, para Cuiabá, Palmas e Petrolina, respectivamente, verifica-se que em Petrolina a fração difusa nunca representou mais que 50% da radiação solar global, logo nesta cidade a disponibilidade de radiação solar direta permanece sempre acima de 50% da radiação solar global, sendo esta cidade um ótimo local para investimento em geração de energia Heliotérmica, que transforma a radiação solar direta em energia térmica e subsequente em energia elétrica. Os resultados apresentados na Tab. (5.6) confirmam as observações mencionadas, vale destacar as altas médias de disponibilidade de radiação direta na cidade de Petrolina e na cidade de Palmas, porém esta última apesar de ter grande disponibilidade de radiação direta, a radiação que chega é de menor intensidade do que em Petrolina.

Na Tab. (5.7) são apresentados os coeficientes dos modelos gerados para cada cidade, juntamente com os valores de r^2 que mostra o poder de explicação do modelo. Verifica-se também que o modelo de aproximação polinomial é o que melhor se ajusta aos pares de dados de $(\overline{K_T}, \overline{H_d}/\overline{H})$, tal fato pode ser comprovado por meio dos indicativos estatísticos apresentados na Tab. (5.8), na qual mostra que este modelo apresenta menor erro, menor subestimação ou superestimação e melhor ajuste entre dados estimados e dados reais do que os outros dois modelos.

Tabela 5.7 – Coeficientes dos modelos polinomial, linear e não linear para estimativa da radiação solar difusa média mensal

Cidades	Modelos	$a_{d,p}, a_{d,l}, a_{d,nl}$	$b_{d,p}, b_{d,l}, b_{d,nl}$	$c_{d,p}$	$d_{d,p}$	r^2
Brasília – DF	Polinomial	-0,825	9,946	-20,936	12,568	0,950
	Linear	1,203	-1,458	-	-	0,943
	Não Linear	0,100	-2,137	-	-	0,884
Cuiabá – MT	Polinomial	-4,058	27,435	-53,204	32,602	0,782
	Linear	1,035	-1,221	-	-	0,759
	Não Linear	0,125	-1,719	-	-	0,739
Palmas – TO	Polinomial	-2,343	18,361	-37,778	23,784	0,912
	Linear	1,011	-1,303	-	-	0,895

	Não Linear	0,069	-2,258	-	-	0,859
Petrolina - PE	Polinomial	-22,231	122,483	-217,65	126,882	0,858
	Linear	1,132	-1,346	-	-	0,832
	Não Linear	0,118	-1,97	-	-	0,768

Tabela 5.8 – Indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar difusa média mensal dos modelos polinomial, linear e não linear para dados de validação

Cidades	Modelos	RMSE	MBE	d
Brasília – DF	Polinomial	5,61%	1,66%	0,991
	Linear	6,25%	1,74%	0,984
	Não Linear	8,54%	2,83%	0,979
Cuiabá – MT	Polinomial	5,73%	1,39%	0,986
	Linear	6,04%	1,62%	0,983
	Não Linear	6,71%	1,78%	0,980
Palmas – TO	Polinomial	5,49%	-1,70%	0,958
	Linear	8,00%	-1,74%	0,897
	Não Linear	9,23%	-2,15%	0,865
Petrolina - PE	Polinomial	7,80%	-3,23%	0,977
	Linear	8,36%	-3,69%	0,972
	Não Linear	<u>13,16%</u>	-4,19%	0,926

Na Tabela (5.7) os coeficientes variam para cada cidade, sendo que o modelo polinomial foi o modelo que apresentou valores de r^2 mais próximos de 1, mostrando que este modelo dentre os analisados se ajusta melhor aos pontos $(\overline{K_T}, \overline{H_d}/\overline{H})$. Já na Tab. (5.8) verifica-se que este modelo foi o que apresentou melhores indicativos estatísticos, apresentando menor erro médio, menor sub ou superestimação e melhor ajuste entre os dados estimados e os dados observados (dados reais).

Ambos os modelos apresentaram resultados satisfatórios ao estimarem a radiação solar difusa média mensal, com exceção do modelo não linear para a cidade de Petrolina – PE que extrapolou o limite estabelecido na metodologia para o RMSE, todos os outros obtiveram resultados dentro dos limites estabelecidos para validação destes.

Utilizando o modelo polinomial de cada cidade para estimar a radiação difusa durante todo o período de dados de geração analisados, para verificar as diferenças entre o valor estimado e o valor observado apenas por questão de curiosidade do comportamento do modelo, verificaram-se bons indicativos estatísticos, o que já se esperava: Brasília (RMSE 8,01%), Cuiabá (RMSE 9,07%), Palmas (RMSE 10%) e Petrolina (6,01%). Os valores de MBE ficaram próximos de zero e os valores de d de Willmott próximos de um. Verifica-se que os valores de RMSE foram maiores para os dados de geração do que para os dados de validação, pois neste caso utilizamos um banco de dados maior, e este erro leva em consideração a soma do resíduo entre valor estimado e valor observado, o que neste caso foi maior.

Em duas cidades (Palmas e Petrolina) os modelos subestimam a radiação solar difusa média mensal (MBE negativo), enquanto duas cidades (Brasília e Cuiabá) superestimam, este fato pode ser visualizado nas Figuras (5.25) a (5.28) que mostram os valores estimados pelos modelos para o período de validação citado na metodologia juntamente com os valores reais observados em cada cidade.

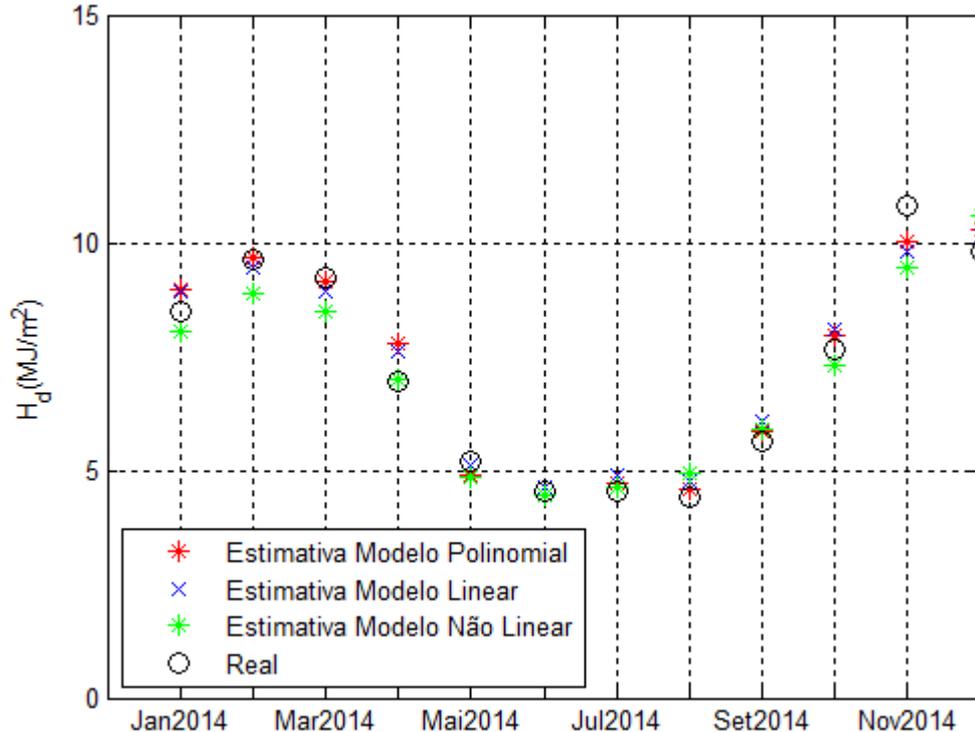


Figura 5.25 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Brasília

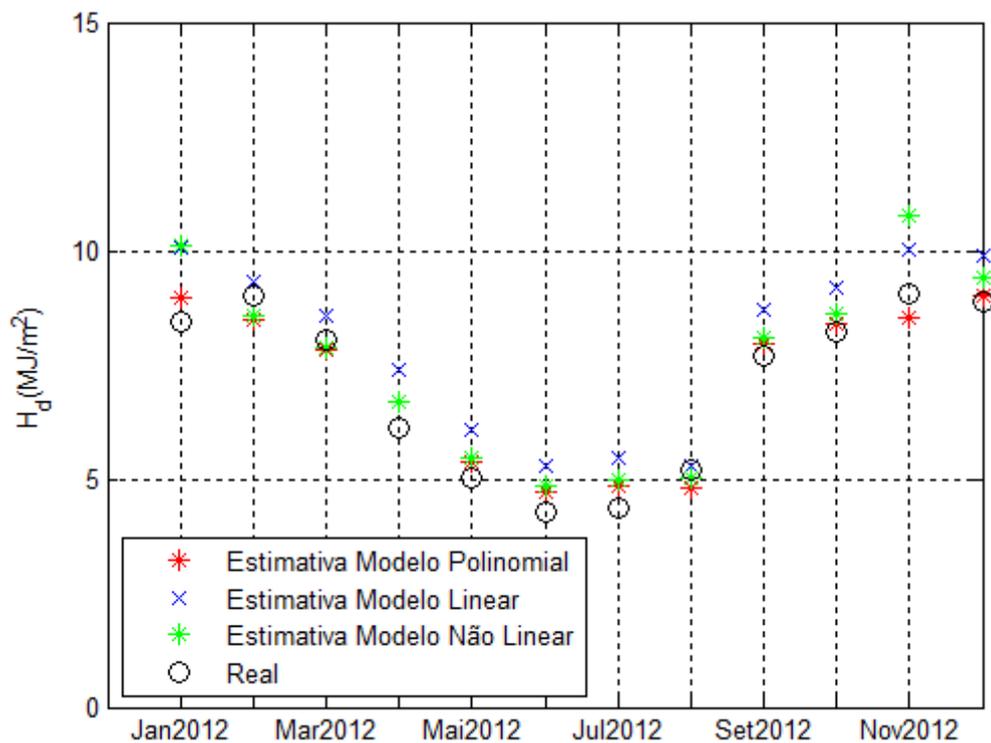


Figura 5.26 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Cuiabá

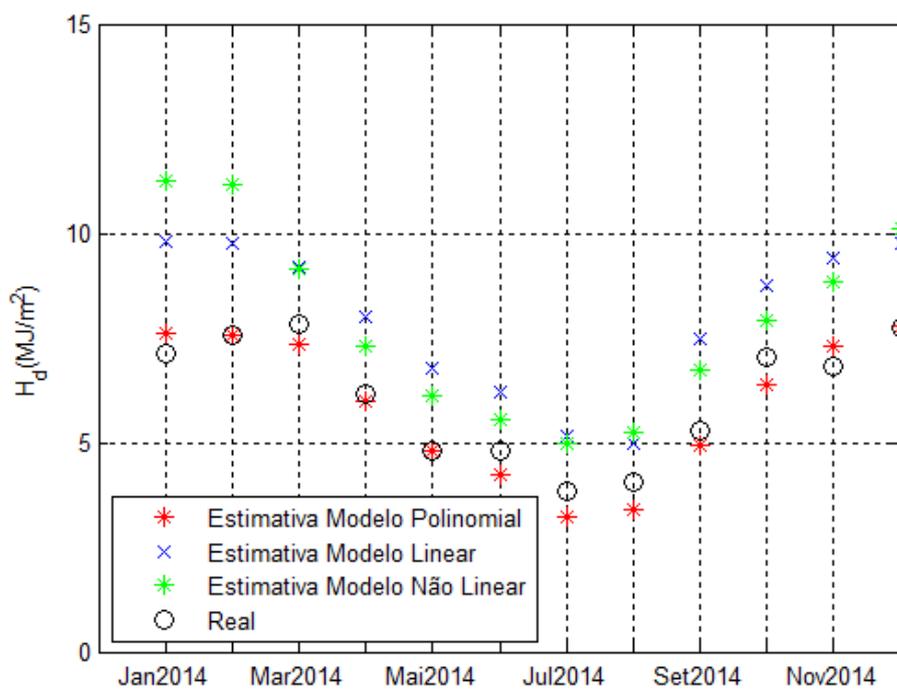


Figura 5.27 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Palmas

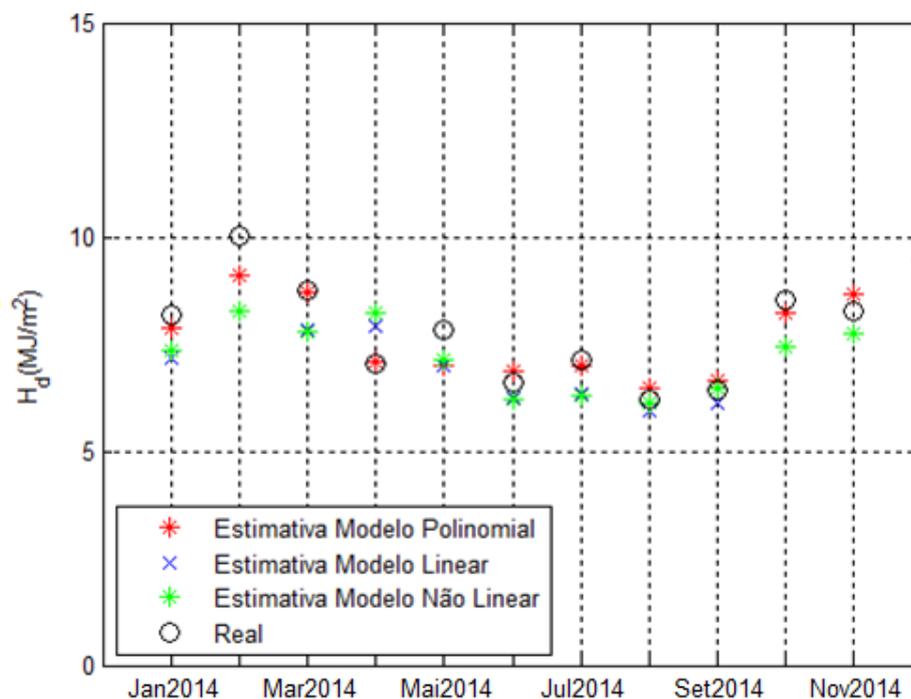


Figura 5.28 – Comparação estimativa radiação difusa modelos polinomial, linear e não linear vs medição real para Petrolina

As Figuras (5.25) a (5.28) mostram que o modelo polinomial estima a radiação solar difusa média mensal com melhor precisão do que os outros modelos. Também se verifica que as estimativas de radiação difusa possuem mais erros do que os resultados apresentados para estimativa da radiação global.

A variação dos valores de radiação solar difusa média mensal para cada cidade ao longo dos meses analisados e a diferença nos coeficientes de cada modelo mostram que os modelos são locais podendo ser aproveitados para estimar a radiação solar difusa em locais com características climatológicas semelhantes, porém não entre as cidades analisadas por estarem em regiões climáticas diferentes. Outro fato relevante é que independente do clima da cidade os modelos se ajustam, o que mostra a eficiência de tal metodologia para estimar a radiação solar difusa.

5.3.2 Modelos de Estimativa da Radiação Solar Difusa Média Mensal Sazonal

Serão apresentados os modelos de estimativa da radiação solar difusa média mensal sazonal em quatro cidades analisadas (Brasília – DF, Cuiabá – MT, Palmas – TO e Petrolina – PE). Para a parametrização destes modelos foram utilizados os dados tratados divididos em

estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera) conforme mencionado na metodologia. Para a parametrização destes modelos foram utilizados os dados tratados conforme apresentado na metodologia, as relações entre o índice de claridade e a fração da radiação difusa juntamente com as linhas de aproximação, para o modelo linear (Eq. 3.5), polinomial de 3º ordem (Eq. 3.6) e não linear (Eq. 3.7), são apresentadas nas Figuras de (5.29) a (5.32).

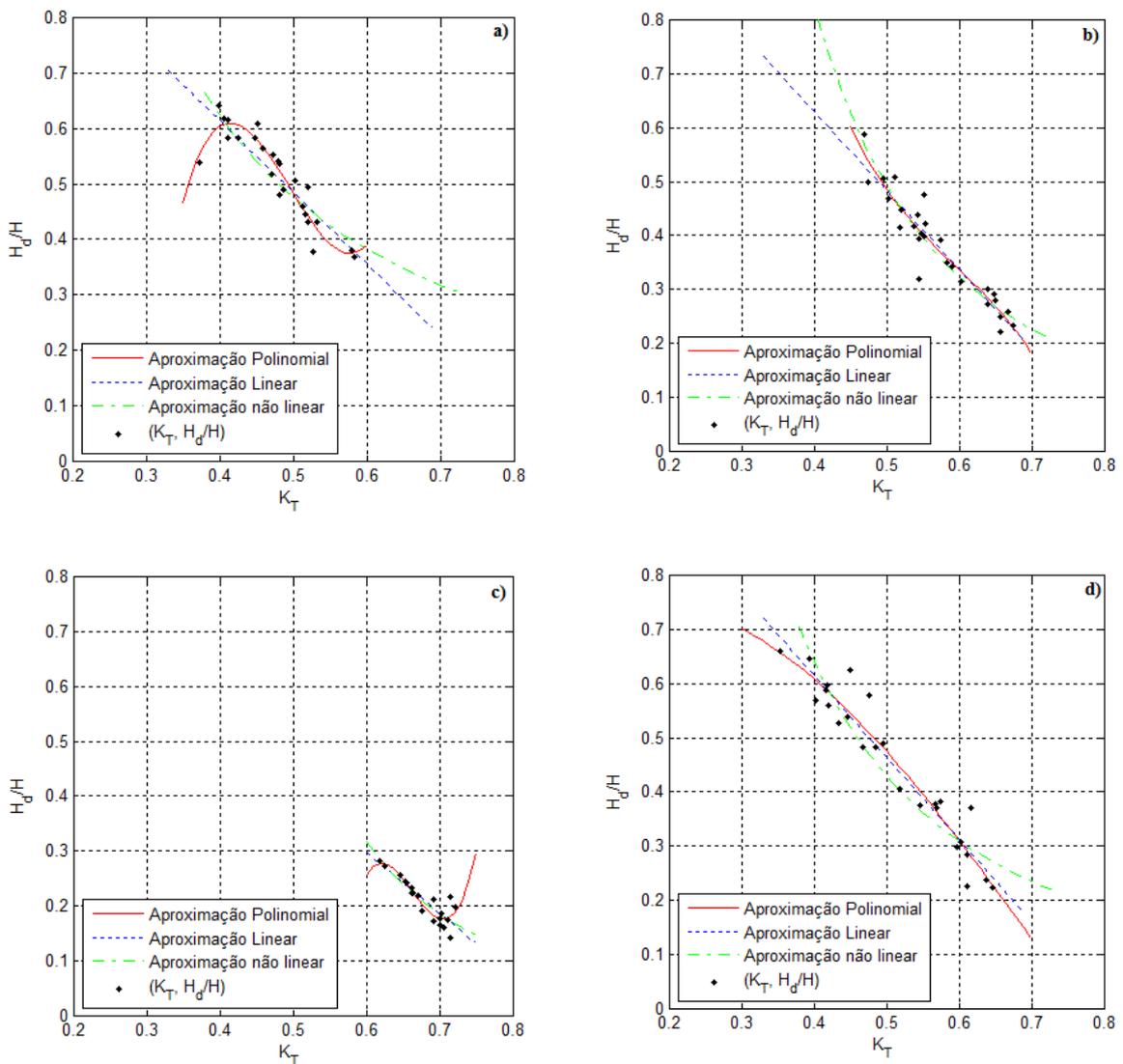


Figura 5.29 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Brasília: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

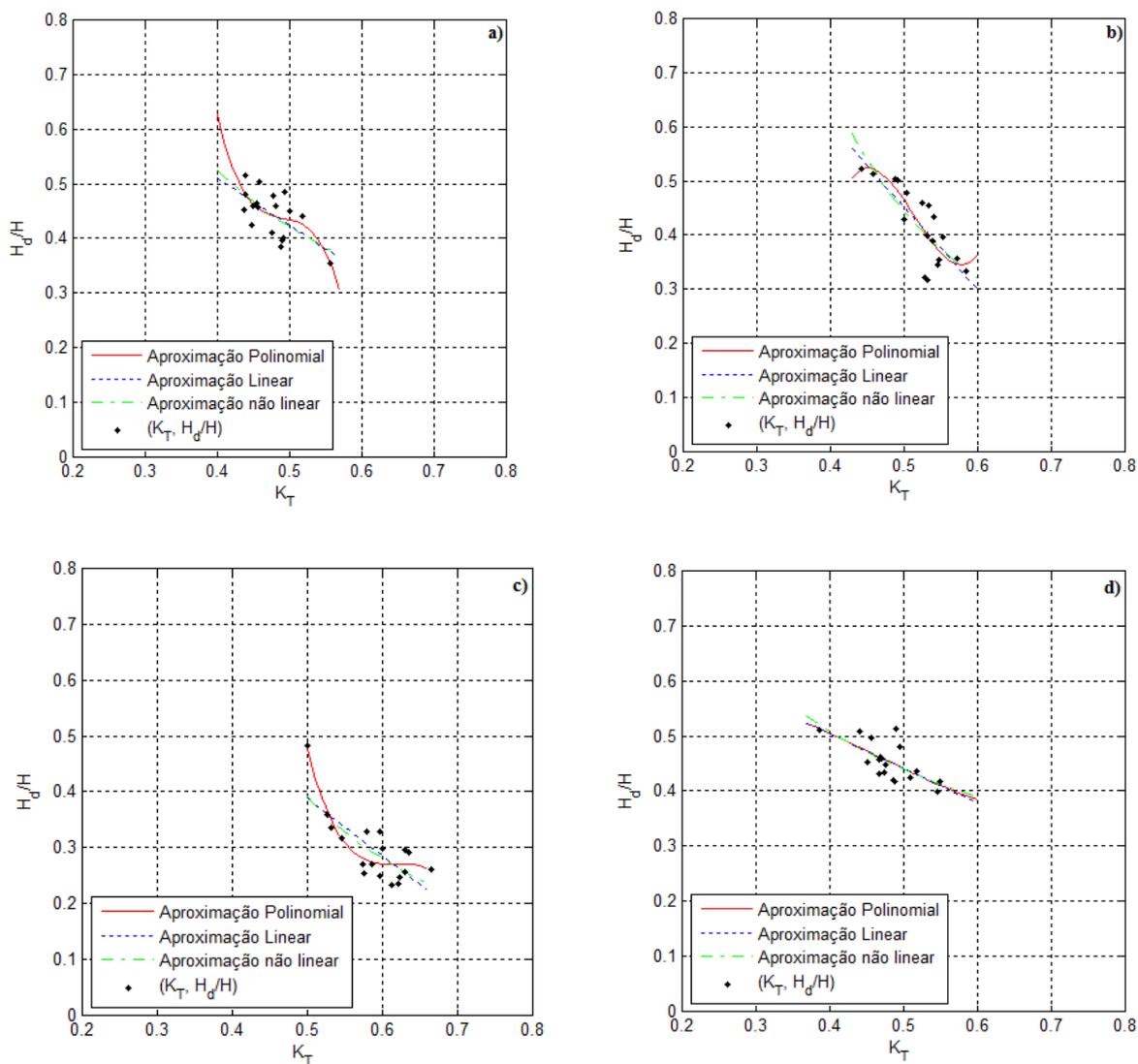


Figura 5.30 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Cuiabá: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

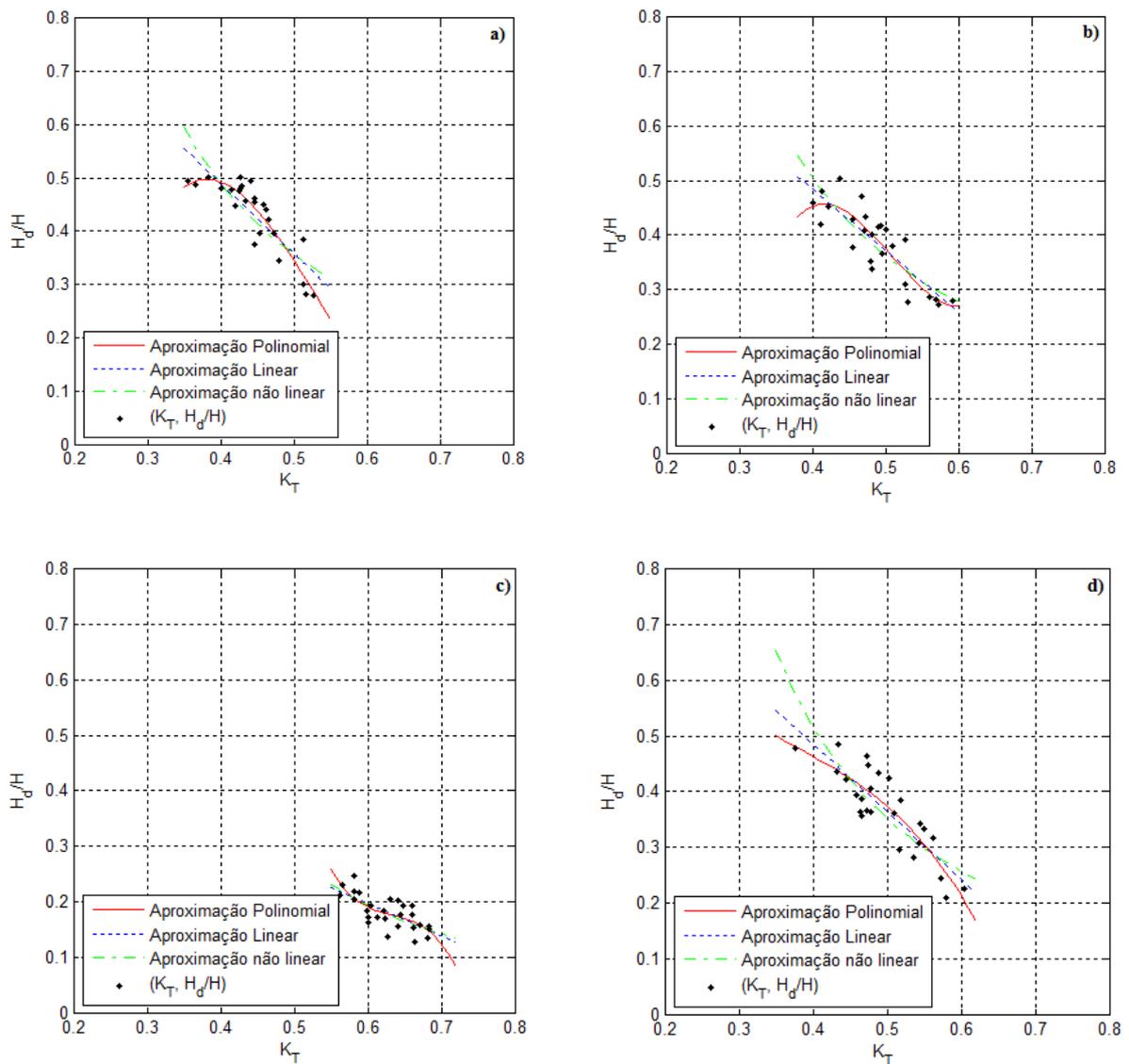


Figura 5.31 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Palmas: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

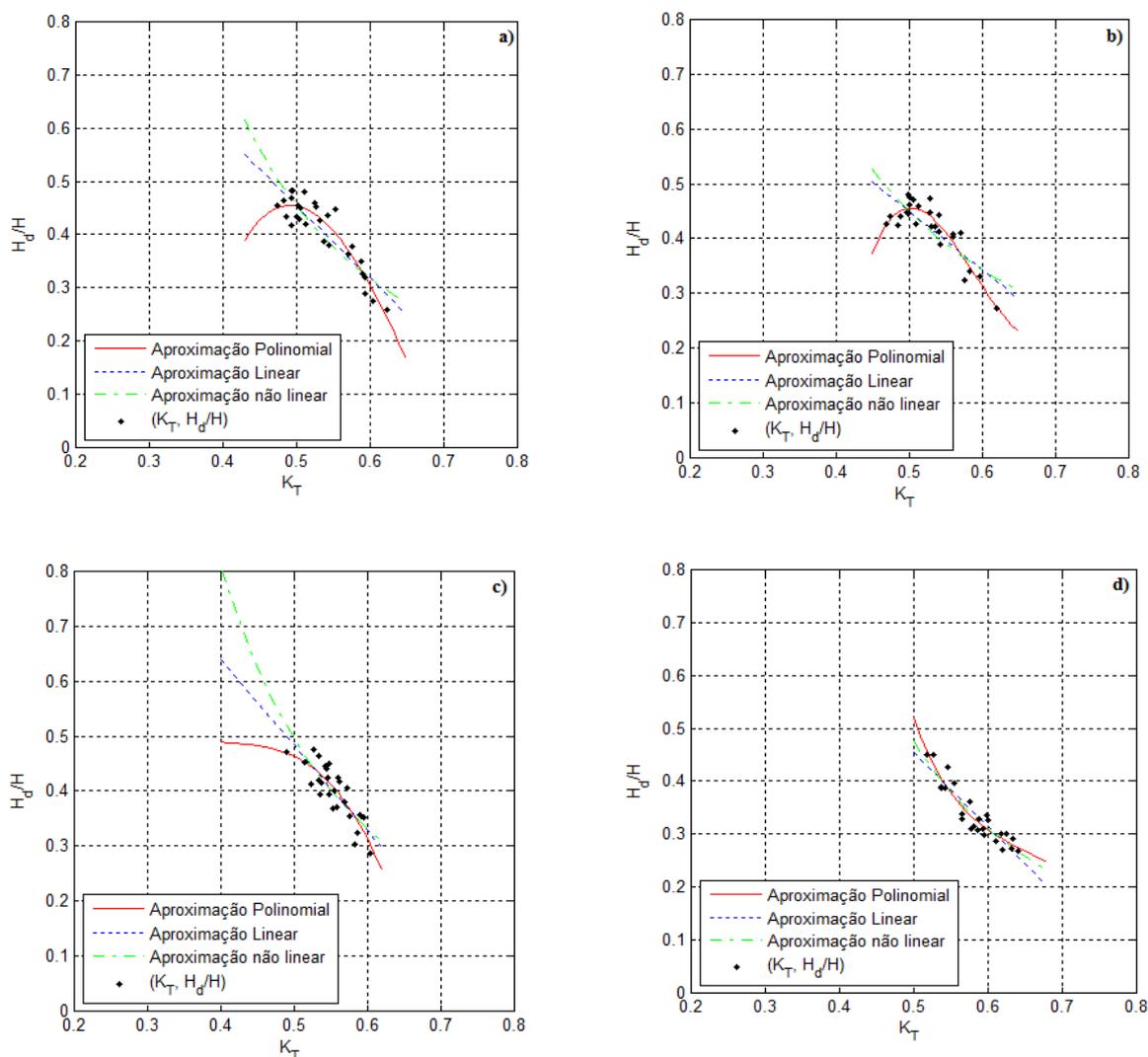


Figura 5.32 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa, juntamente com linhas de aproximação para Petrolina: a) Verão; b) Outono; c) Inverno; d) Primavera

Analisando os resultados apresentados nas Fig. (5.29) a (5.32) é possível visualizar algumas diferenças no comportamento da fração difusa da radiação solar entre as estações do ano. Em Brasília a fração difusa varia muito ao longo do ano nas estações verão, outono e primavera, porém no inverno esta componente se concentra com valores entre 15% e 30% da radiação global. Em Cuiabá a fração difusa já se comporta de forma mais concentrada entre limites pouco distantes, variando entre 40% e 50% na maior parte das análises, porém é no inverno que esta fração possui seus menores valores, variando entre 20% e 35%. Em Palmas assim como em Brasília e Cuiabá no inverno a fração difusa possui seus menores valores variando entre 15% e 25%, enquanto nas outras estações a variação fica entre 30% e 50%. Já na cidade de Petrolina há algumas particularidades em relação às outras cidades, na qual a

fração de radiação difusa fica entre 30% e 50% em quase todo período de análise, não ocorrendo diferenças significativas entre as estações, como ocorreu nas análises das outras cidades.

Verifica-se que a componente difusa representa uma boa parcela da radiação solar global, chegando ser superior a 50% em alguns casos, logo o estudo do melhor aproveitamento desta componente para geração de energia solar não pode ser abandonado ou esquecido.

Na Tabela (5.9) são apresentados os coeficientes dos modelos polinomiais sazonais gerados para cada cidade, juntamente com os valores de r^2 que mostra o poder de explicação do modelo e na Tab. (5.10) é possível visualizar o comportamento destes ao estimar a radiação solar difusa por meio dos indicadores estatísticos analisados. Não foram apresentados os coeficientes do modelo linear e do não linear, e os valores dos seus indicadores estatísticos, pois assim como na análise do modelo de estimativa média mensal estes obtiveram resultados piores do que o modelo polinomial, sendo assim buscando uma melhor apresentação dos resultados, sem excesso de informações, optou-se por não apresentá-los.

Tabela 5.9 – Coeficientes dos modelos polinomial, linear e não linear para estimativa da radiação solar difusa média mensal sazonal

Cidades	Estação	$a_{d,p}$	$b_{d,p}$	$c_{d,p}$	$d_{d,p}$	r^2
Brasília – DF	Verão	-11,83	78,88	-163,37	109,76	0,905
	Outono	6,13	-26,6	42,47	-23,75	0,896
	Inverno	-100,19	457,94	-693,31	348,48	0,839
	Primavera	0,61	1,46	-4,47	1,99	0,929
Cuiabá – MT	Verão	26,78	-160,51	326,48	-221,77	0,429
	Outono	-23,03	140,96	-277,88	179,32	0,675
	Inverno	30,80	-148,36	240,26	-129,50	0,794
	Primavera	0,41	1,65	-4,93	3,52	0,464
Palmas – TO	Verão	-3,46	25,55	-52,21	32,75	0,822
	Outono	-6,62	44,35	-90,38	59,36	0,751
	Inverno	25,4	-118,93	187,36	-98,22	0,548
	Primavera	1,33	-5,25	11,75	-10,21	0,758
Petrolina –	Verão	-6,54	34,89	-55,13	26,67	0,874

PE	Outono	-17,75	96,33	-167,19	94,67	0,856
	Inverno	2,25	-12,62	30,23	-24,32	0,732
	Primavera	13,71	-61,15	93,75	-48,47	0,887

Tabela 5.10 – Indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar difusa média mensal sazonal dos modelos polinomial, linear e não linear para dados de validação

Cidades	Estação	RMSE	MBE	d
Brasília – DF	Verão	5,83%	4,47%	0,841
	Outono	<u>12,64%</u>	<u>8,15%</u>	0,926
	Inverno	6,61%	4,72%	0,577
	Primavera	7,81%	-4,90%	0,976
	Sazonal Total	7,83%	2,99%	0,9897
Cuiabá – MT	Verão	1,91%	-1,28%	0,813
	Outono	8,28%	<u>7,21%</u>	0,941
	Inverno	3,30%	-1,62%	0,955
	Primavera	5,98%	0,69%	0,490
	Sazonal Total	4,97%	2,22%	0,976
Palmas - TO	Verão	5,62%	4,69%	<u>0,486</u>
	Outono	4,96%	-0,36%	0,979
	Inverno	<u>12,44%</u>	<u>-12,16%</u>	0,512
	Primavera	<u>11,86%</u>	-2,87%	0,579
	Sazonal Total	7,69%	-2,35%	0,789
Petrolina - PE	Verão	7,31%	<u>-6,31%</u>	0,816
	Outono	6,57%	-3,50%	0,892
	Inverno	4,65%	3,40%	0,713
	Primavera	6,76%	-3,35%	0,892
	Sazonal Total	5,87%	-3,85%	0,956

Na Tabela (5.9) são apresentados os coeficientes dos modelos polinomiais, como já dito anteriormente este dentre os modelos analisados obteve melhores resultados. Verifica-se que em algumas estações temos valores de r^2 baixos, o que demonstra que nestes modelos não se há um bom ajuste entre a curva e os pontos parametrizados.

Já na Tab. (5.10) analisando as estações separadamente verifica-se que os modelos não foram consistentes ao ponto de se manterem dentro dos critérios de validação para os indicadores estatísticos, em pelo menos uma das estações os modelos apresentaram ou RMSE acima de 10%, ou MBE acima de 5%. Porém ao analisar a utilização dos modelos sazonais juntos para estimar a radiação solar difusa durante o período de validação, chegou-se a bons resultados, são os indicadores apresentados nas linhas “Sazonal Total” da Tab. (5.9), todos eles dentro dos limites estabelecidos para os indicadores estatísticos. Esta análise nos diz que a divisão dos dados por estações para o estudo da fração da radiação difusa, para estimativas de períodos que passem por todas as estações, não analisando estas separadamente, é válida e pode gerar bons resultados. Porém analisando cada estação separadamente os resultados podem variar, já que estes indicadores estatísticos analisam o conjunto de dados como um todo, e quanto mais dados os erros vão se anulando.

Nas Figuras (5.33) a (5.36) são apresentados a confrontação dos valores estimados da radiação difusa pelos modelos mensais sazonais e pelos modelos mensais juntamente com os valores reais observados em cada cidade.

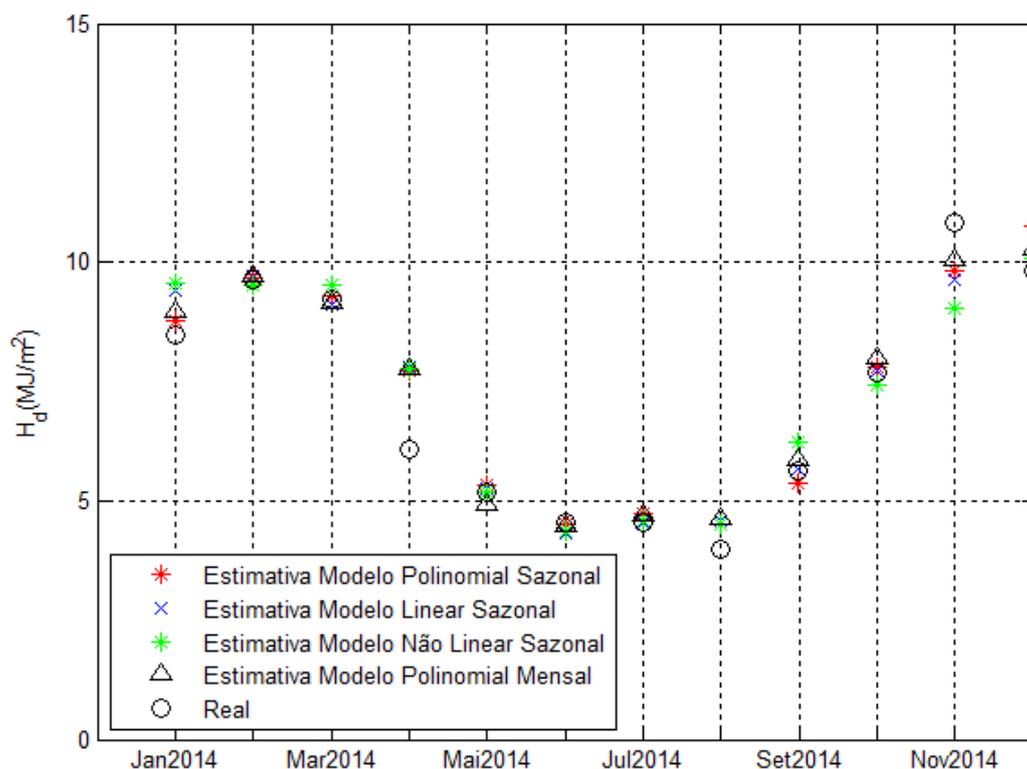


Figura 5.33 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Brasília

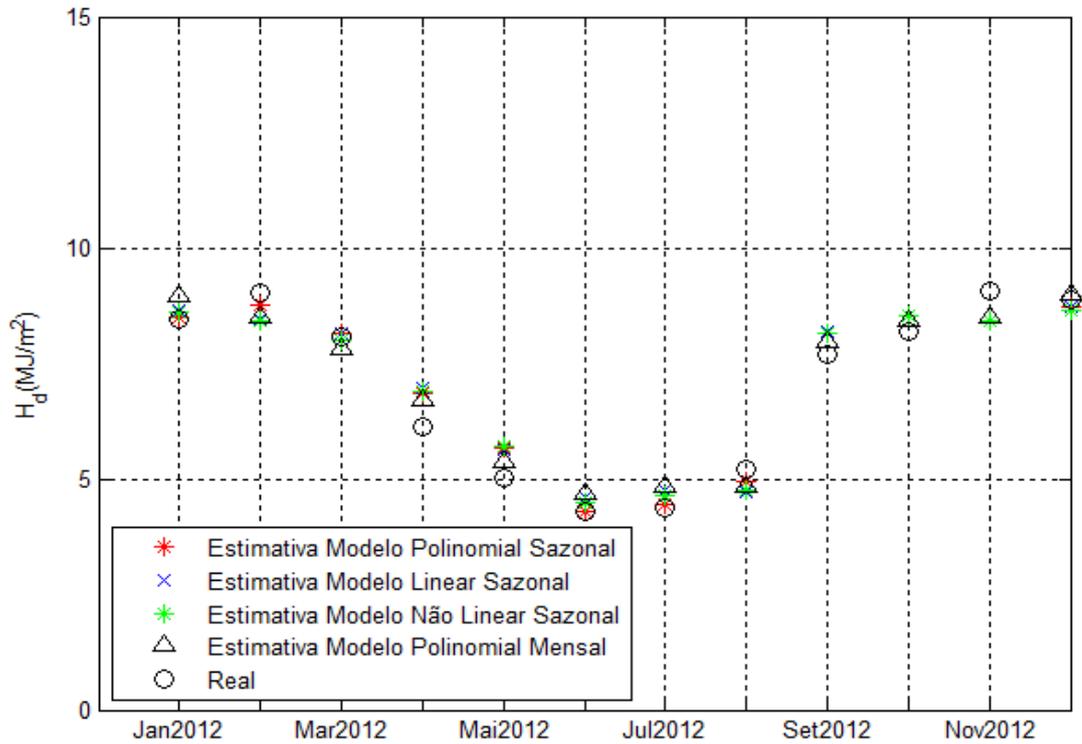


Figura 5.34 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Cuiabá

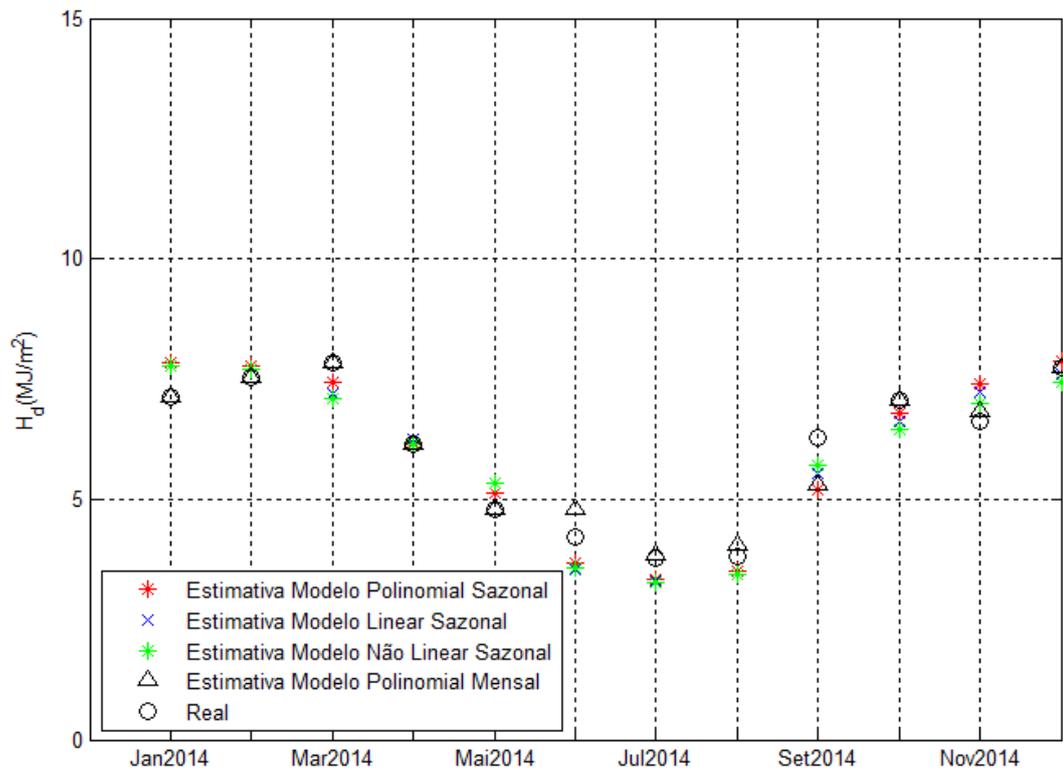


Figura 5.35 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Palmas

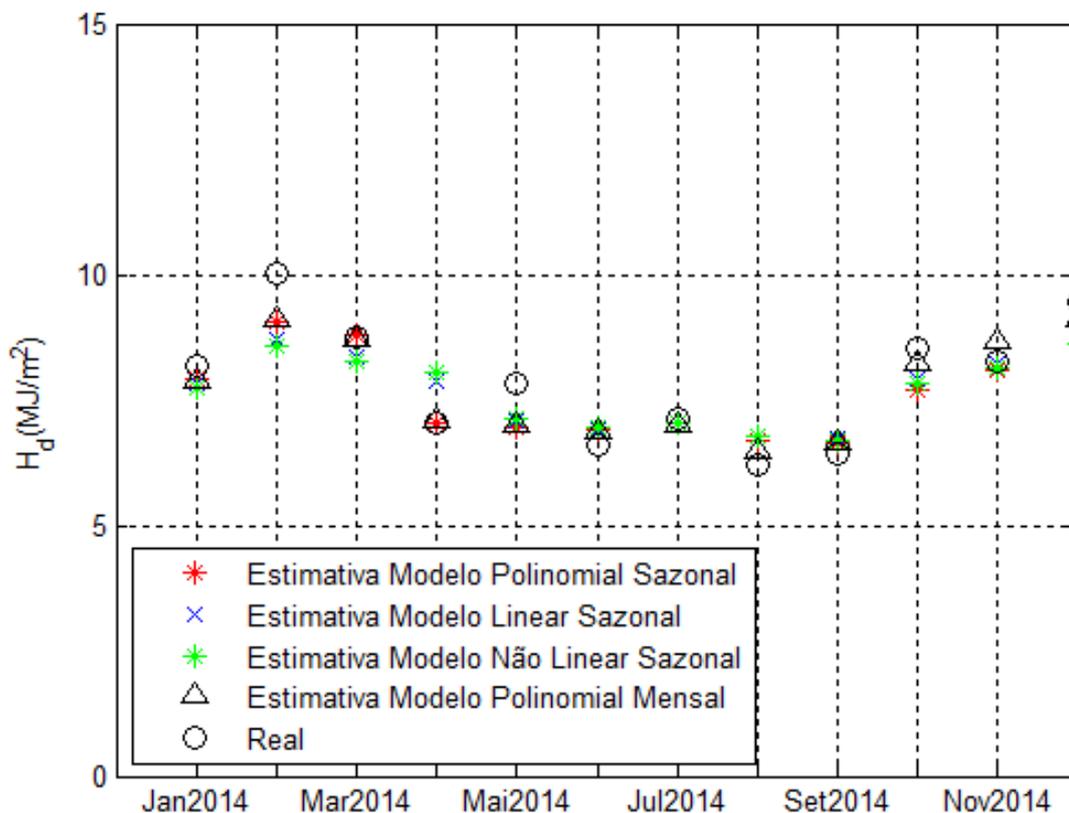


Figura 5.36 – Comparação estimativa radiação difusa modelos sazonais (polinomial, linear e não linear), modelo mensal e medição real para Petrolina

Analisando os resultados apresentados nas Fig. (3.33) a (3.36) verifica-se que os modelos de estimativa média mensal sazonal não conseguiram melhorar a estimativa realizada pelo modelo mensal, somando com os resultados insatisfatórios dos indicadores estatísticos para estes modelos, pode-se concluir que a divisão dos dados em estações do ano não traz melhores estimativas da radiação difusa média mensal nesse caso. Vale destacar, que os dados de radiação difusa analisados neste trabalho são de séries históricas menores do que os dados de radiação global, e a diminuição de pontos dificulta a geração de modelos de aproximação representativos. Ao dividirmos os dados em estações diminuimos ainda mais os dados para a geração dos modelos, e isto contribui aos resultados aqui encontrados.

5.4 MODELOS ÚNICOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA

Utilizando os dados das cidades analisadas, em conjunto, foi possível parametrizar um modelo único de estimativa da radiação solar global média mensal para as cinco cidades analisadas neste recurso e de um modelo único de estimativa da radiação solar difusa média mensal.

O modelo único para estimativa da radiação solar global média mensal é um modelo linear, optou-se por este ajuste devido os melhores resultados apresentados frente o modelo de potência ambos abordados na seção 5.1. Neste modelo também foi levado em consideração um ajuste a partir da latitude de cada localidade, conforme GLOVER & McCULLOCH (1958), para verificar se a correção da influência da latitude no coeficiente linear melhora, piora ou se torna insignificante nas estimativas. Para isto primeiramente calculou-se o a_{ger} descontando a influência da latitude ($a_{ger} = a/\cos(\phi)$) para cada localidade, e depois um a_{ger} médio único, para o coeficiente angular utilizou-se a média dos coeficientes locais, após substituiu-se estes no modelo da Eq. (3.2).

Já para a parametrização do modelo único de estimativa da radiação solar difusa média mensal optou-se por gerar um modelo polinomial pelo fato deste modelo ter obtido os melhores resultados nas análises anteriores e um modelo linear por questão de curiosidade devido a distribuição dos pontos analisados.

Nas Figuras (5.37) e (5.38) são apresentadas a análise dos conjuntos de dados para parametrização dos modelos únicos de estimativa da radiação solar global e da radiação solar difusa, respectivamente.

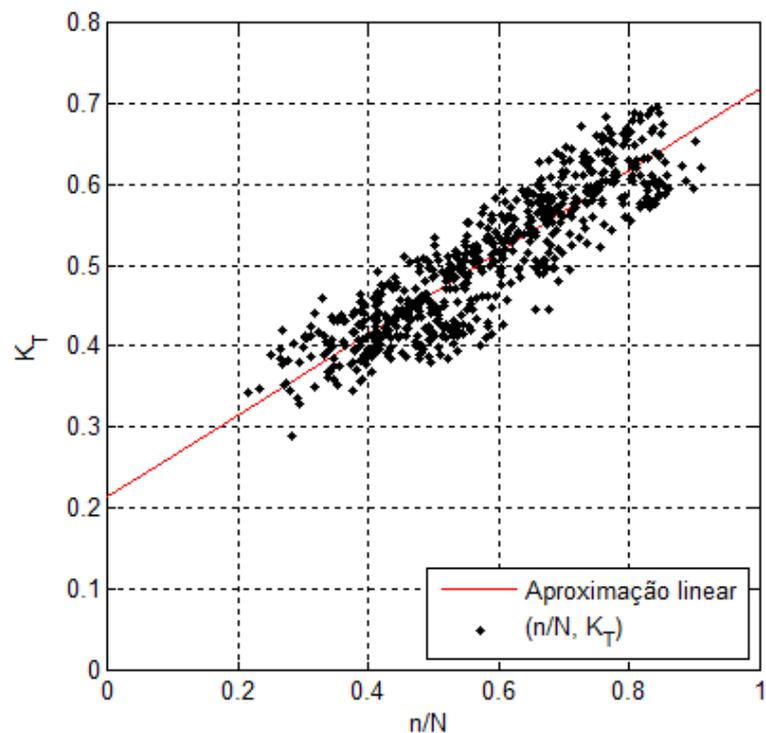


Figura 5.37 – Relação índice de claridade e razão de insolação para o conjunto de dados das cinco cidades analisadas (Brasília, Cuiabá, Palmas, Petrolina e Santa Maria), juntamente com reta de aproximação linear

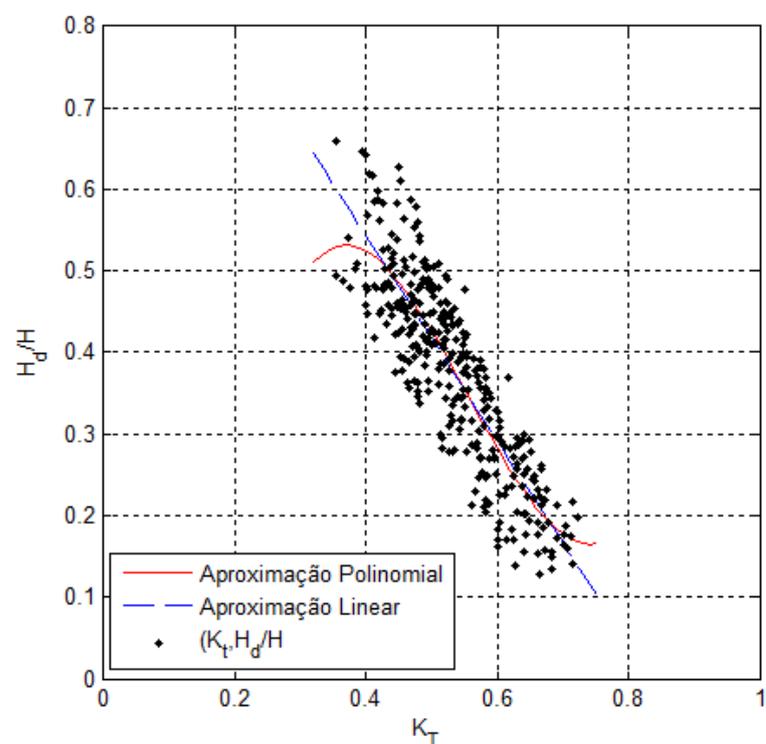


Figura 5.38 – Relação índice de claridade e fração da radiação difusa para o conjunto de dados de quatro cidades analisadas (Brasília, Cuiabá, Palmas e Petrolina), juntamente com linhas de aproximação polinomial 4º ordem e linear

As curvas de aproximação apresentadas nas Fig. (5.27) e (5.38) se ajustam aos pontos, porém há uma maior dispersão destes em relação às curvas. Na Tab. (5.11) são apresentados os coeficientes dos modelos gerados, juntamente com os valores de r^2 .

Tabela 5.11 – Coeficientes dos modelos únicos de estimativa da radiação solar global e difusa média mensal

Estimativa	Modelos	Coeficientes	r^2
Estimativa Radiação Global	Linear	$a = 0,214 \quad b = 0,504$	0,796
	Linear Corrigido	$a_{ger} = 0,2215 \quad b_{ger} = 0,5124$	0,757
Estimativa Radiação Difusa	Polinomial	$a_{d,p} = -1,272 \quad b_{d,p} = 11,722$ $c_{d,p} = -23,80 \quad d_{d,p} = 14,301$	0,765
	Linear	$a_{d,l} = 1,048 \quad a_{d,l} = -1,261$	0,755

Na Tabela (5.11) verifica-se que ambos os modelos possuem altos valores de r^2 , porém os modelos locais possuem valores mais altos deste indicativo. Para analisar o comportamento destes modelos apresentados na Tab. (5.11) ao estimarem a radiação solar global ou difusa média mensal utilizou-se os indicativos estatísticos apresentados na metodologia.

Na Tab. (5.12) é possível visualizar os valores destes indicativos, para estimativa por meio do modelo único, do modelo único corrigido pela latitude local e do modelo gerado somente com dados locais das cidades para radiação global e na Tab. (5.13) a comparação dos modelos para estimativa da radiação difusa.

Tabela 5.12 – Indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar global média mensal dos modelos únicos de estimativa para dados de validação

Cidades	Modelos	RMSE	MBE	d
Brasília – DF	Único Linear	8,20%	-7,87%	0,938
	Único Linear Corrigido pela latitude	7,67%	-7,36%	0,935
	Local Linear	2,58%	0,22%	0,992
Cuiabá – MT	Único Linear	10,37%	9,17%	0,817
	Único Linear Corrigido pela latitude	11,67%	10,55%	0,816
	Local Linear	4,57%	-0,05%	0,962
Palmas _ TO	Único Linear	4,82%	2,52%	0,953
	Único Linear Corrigido pela latitude	4,67%	2,44%	0,953
	Local Linear	4,51%	-2,60%	0,955
Petrolina - PE	Único Linear	3,98%	2,11%	0,941
	Único Linear Corrigido pela latitude	3,69%	2,26%	0,941
	Local Linear	3,49%	2,71%	0,978
Santa Maria - RS	Único Linear	3,25%	-1,36%	0,996
	Único Linear Corrigido pela latitude	2,97%	-1,24%	0,996
	Local Linear	2,45%	-1,36%	0,998

Tabela 5.13 – Indicativos estatísticos para estudo da estimativa da radiação solar difusa média mensal dos modelos únicos de estimativa para dados de validação

Cidades	Modelos	RMSE	MBE	d
Brasília – DF	Único Polinomial	13,84%	-11,61%	0,954
	Único Linear	14,40%	-11,18%	0,947
	Local Polinomial	5,61%	1,66%	0,991
Cuiabá – MT	Único Polinomial	5,75%	0,4%	0,987

	Único Linear	5,96%	-0,44%	0,985
	Local Polinomial	5,73%	1,39%	0,986
Palmas _ TO	Único Polinomial	13,53%	12,4%	0,903
	Único Linear	14,02%	12,93%	0,984
	Local Polinomial	5,49%	-1,70%	0,958
Petrolina - PE	Único Polinomial	14,75%	-12,0%	0,768
	Único Linear	15,29%	-12,36%	0,743
	Local Polinomial	7,80%	-3,23%	0,977

Na Tabela (5.12) verifica-se que ambos os modelos únicos analisados não obtiveram resultados satisfatórios em relação aos indicativos estatísticos, obtendo estes bons resultados em algumas cidades (Palmas, Petrolina e Santa Maria) e resultados ruins em outras (Brasília e Cuiabá). O modelo único corrigido pelo cosseno da latitude do local a ser estimada a radiação solar global de maneira geral obteve melhores resultados do que o modelo único sem correção, porém esta melhora não foi suficiente para obter resultados melhores do que os modelos gerados com os dados locais de cada cidade.

Analisando os resultados dos modelos únicos de estimativa da radiação solar difusa, apresentados na Tab. (5.13), verifica-se que tanto o modelo único polinomial quanto o linear de forma geral apresentaram péssimos resultados dos indicativos estatísticos, com exceção de Cuiabá – MT, o que mostra que estes não são confiáveis para estimarem a radiação difusa nestas localidades. Sendo assim, frente os resultados aqui apresentados a melhor maneira de estimar a radiação difusa, é por meio de modelos locais.

Nas Figuras de (5.39) a (5.43) é apresentada a confrontação dos valores estimados pelos modelos únicos e pelos modelos locais com os valores reais para cada cidade.

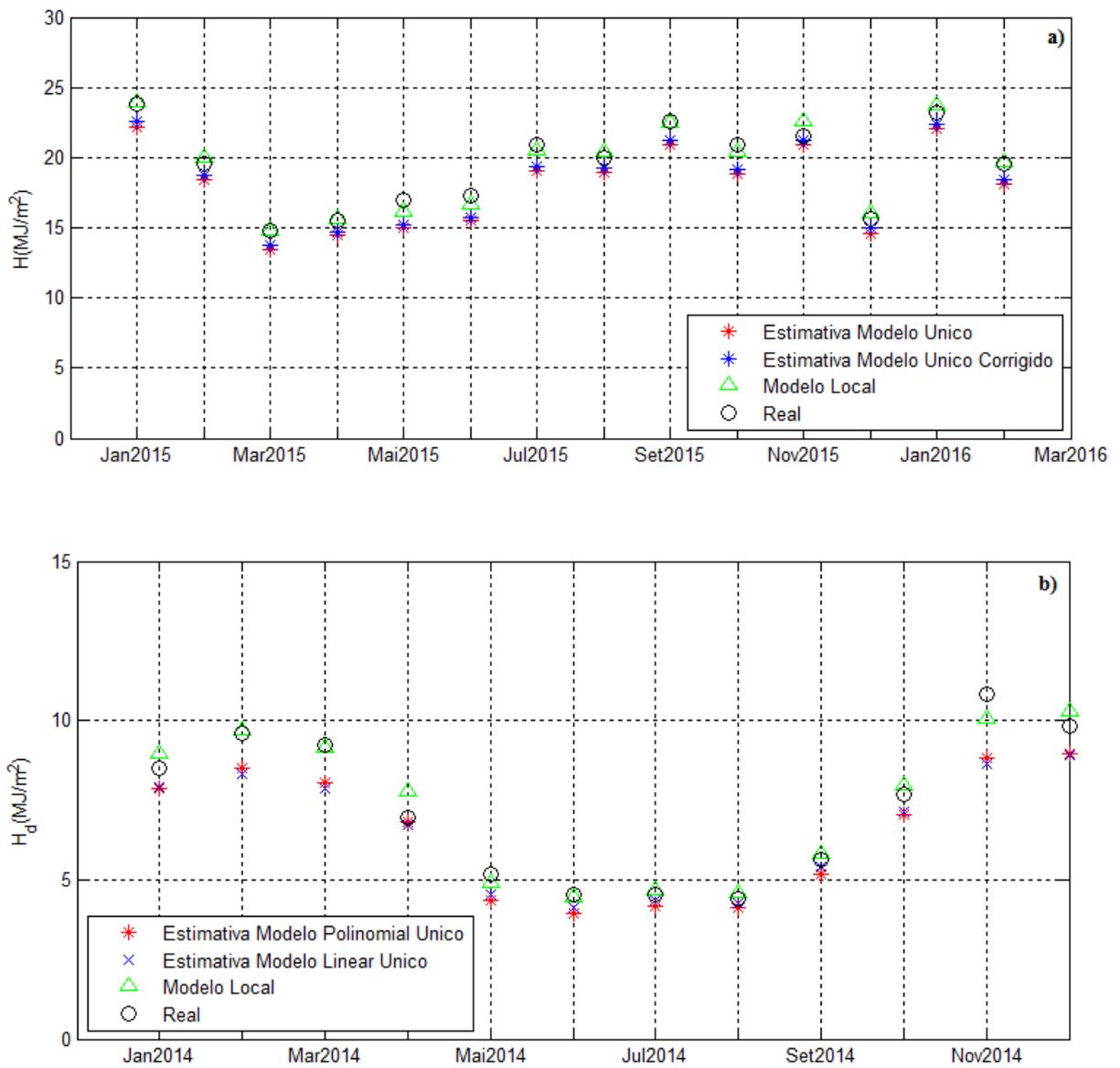


Figura 5.39 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Brasília; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Brasília

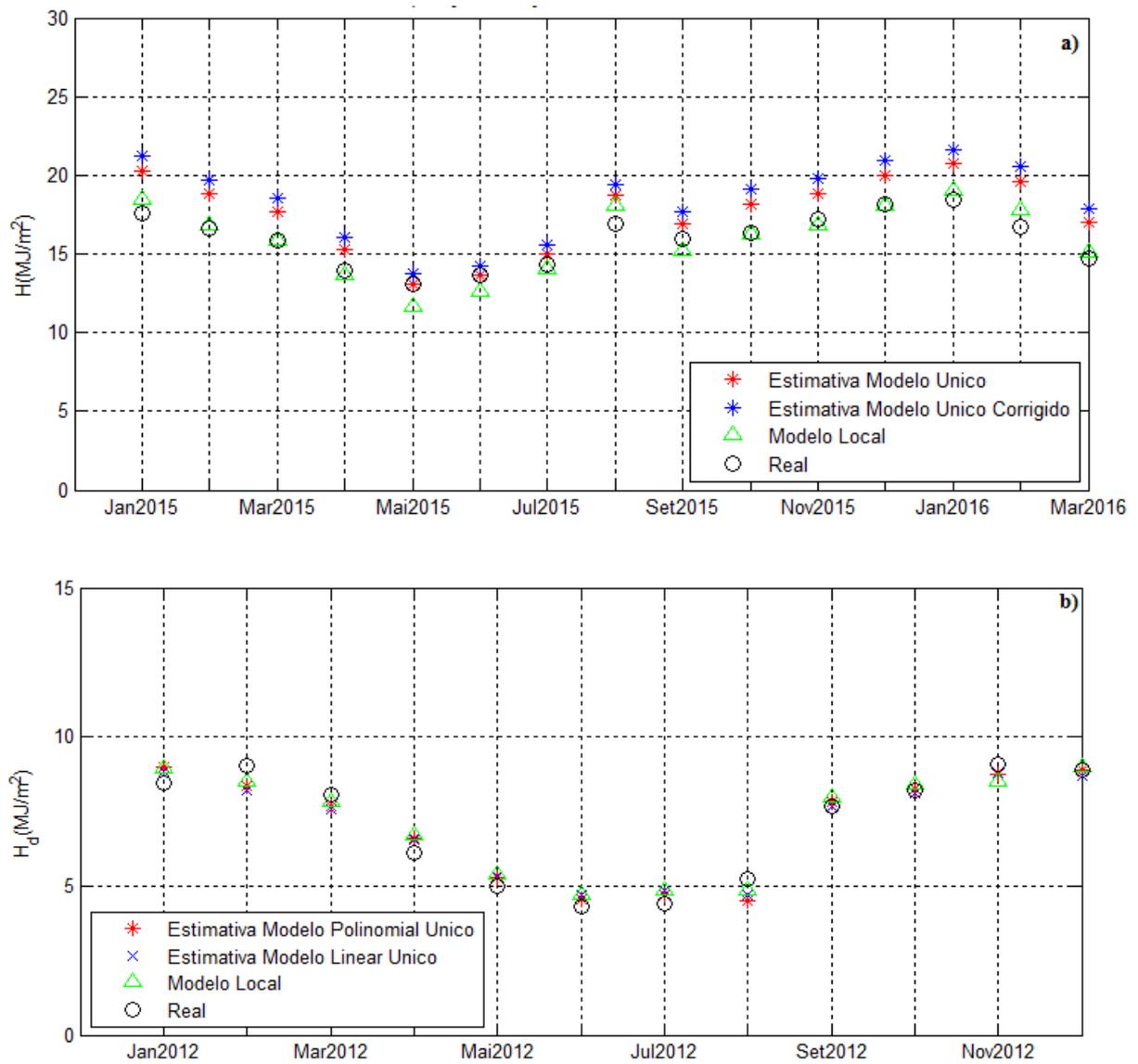


Figura 5.40 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Cuiabá; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Cuiabá

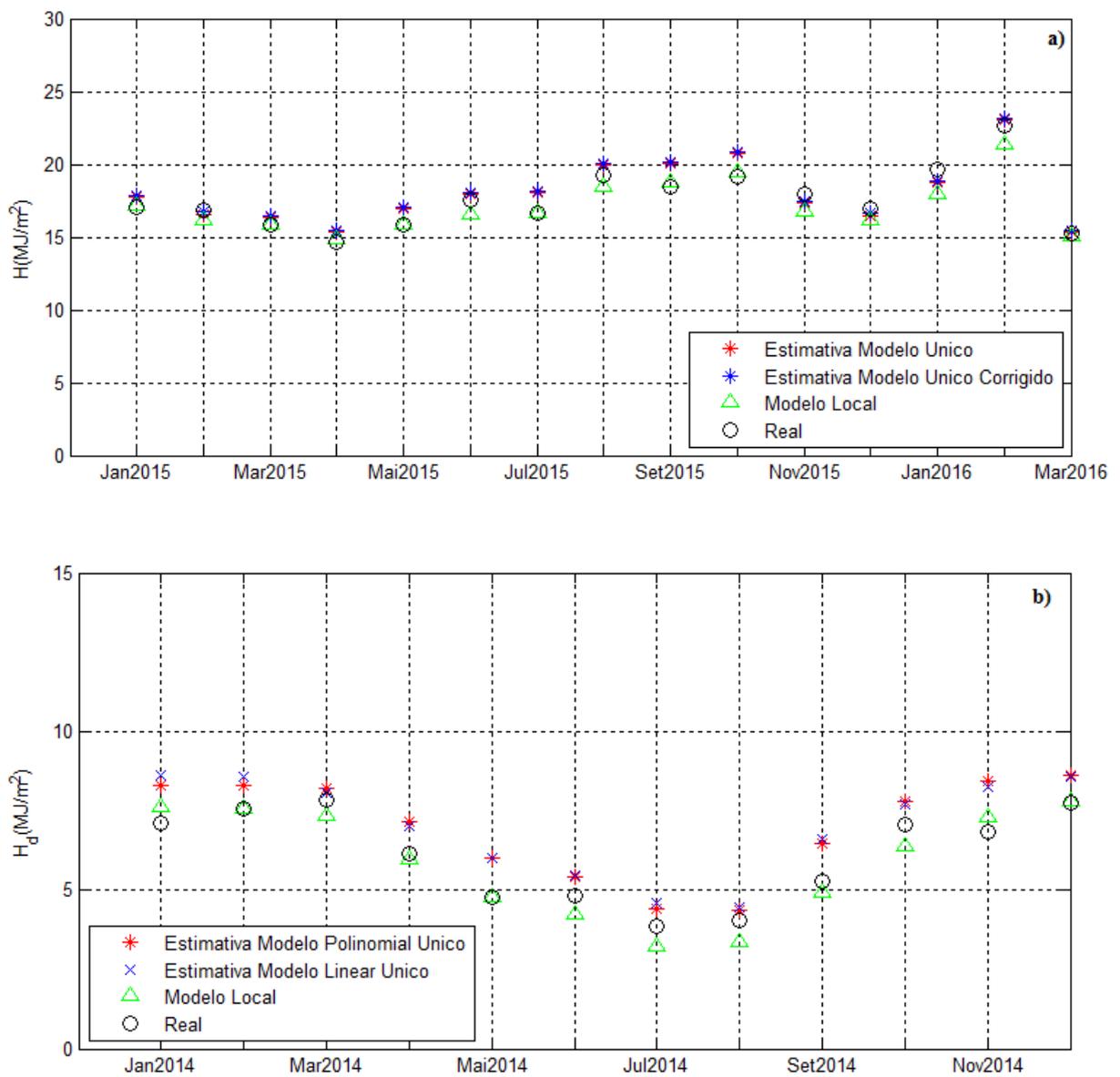


Figura 5.41 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Palmas; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Palmas

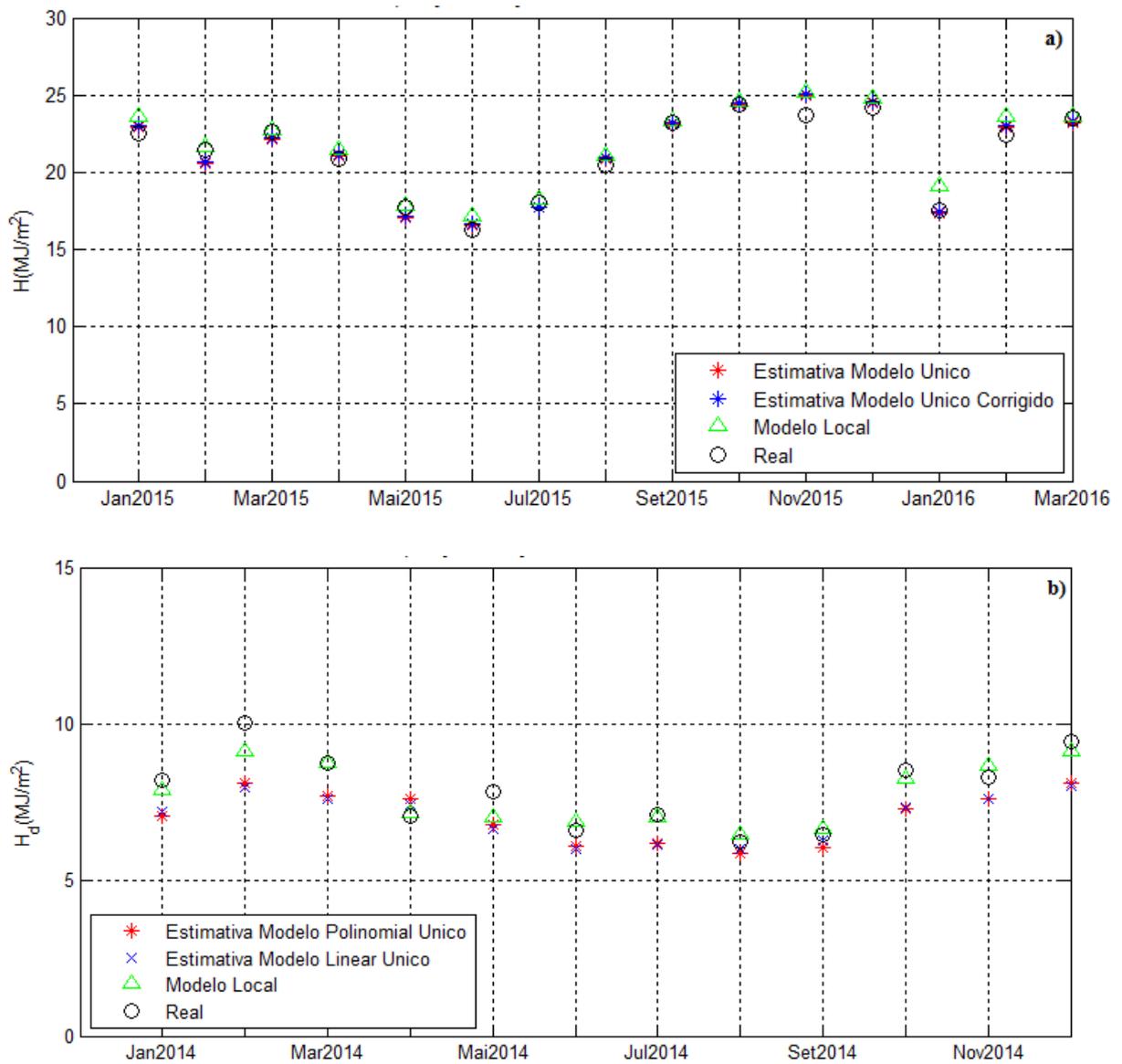


Figura 5.42 – a) Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Petrolina; b) Comparação estimativa radiação difusa modelos únicos (polinomial e linear), modelo polinomial local e medição real para Petrolina

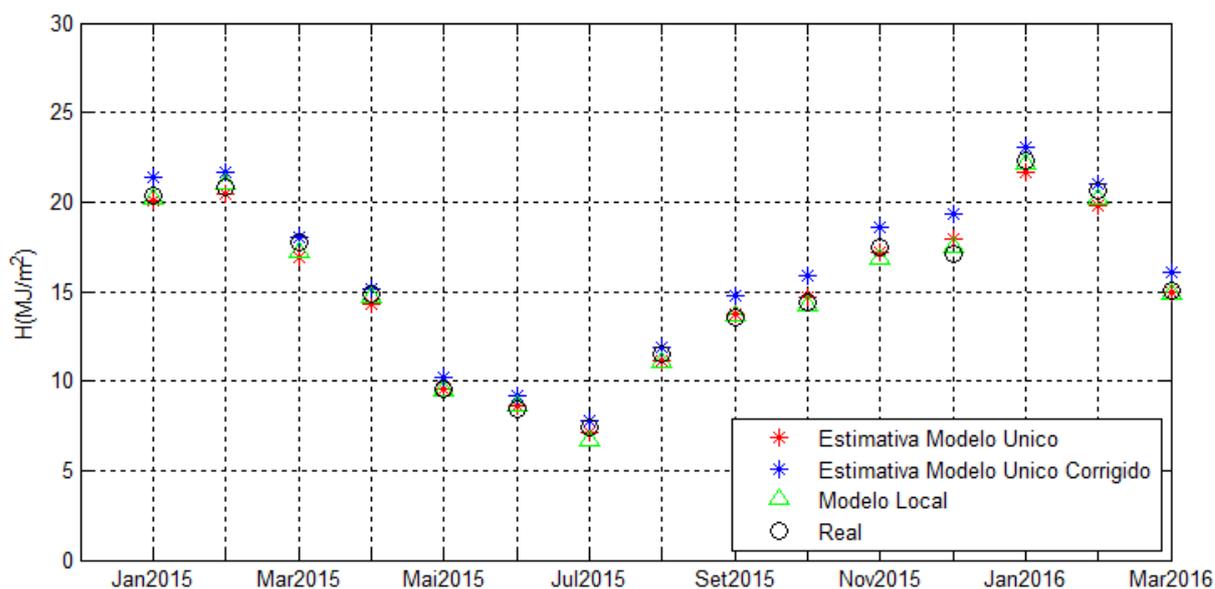


Figura 5.43 – Comparação estimativa radiação global modelos únicos (único e único corrigido pela latitude local), modelo linear local e medição real para Santa Maria

As Figuras de (5.39) a (5.43) confirmam a análise feita a partir dos indicadores estatísticos obtidos ao estimar a radiação global ou difusa por meio dos modelos únicos e dos modelos locais, na qual se verifica que tanto para estimar a radiação global quanto a difusa os modelos locais se mostram mais adequados e confiáveis.

Por estarmos analisando cidades de climas, regimes de chuvas e regiões diferentes a análise de um modelo único que englobe todas estas características nos gerando boas estimativas de radiação é difícil, logo esta abordagem possa ser mais bem adequada para cidades próximas com climas e regimes de chuvas semelhantes, podendo assim mapear esta região delimitada pelas cidades gerando um modelo único de estimativa para estas.

5.5 SÉRIES HISTÓRICAS DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR DE DADOS DE HORAS DE INSOLAÇÃO

Diante dos resultados apresentados verifica-se que o modelo linear gerado com os dados de cada cidade (modelo local) foi o que obteve melhores estimativas da radiação solar global, sendo possível estimar tal recurso a partir de dados de horas de insolação. E o modelo polinomial local foi o que melhor estimou a radiação difusa nas localidades estudadas, tendo como entrada dados médio mensais de índice claridade ($\overline{K_T}$). Ambos os modelos atenderam os critérios dos indicativos estatísticos para validação destes. Logo, apenas com os dados de horas de insolação é possível estimar a radiação global, encontrando os valores de $\overline{K_T}$, e utilizando estes para estimar a radiação difusa.

Assim é possível utilizar tais modelos para gerar séries históricas de radiação global e difusa, e conhecendo estas, de radiação direta, a partir de dados de horas de insolação, dados estes medidos nas Estações Meteorológicas Convencionais a um longo período de tempo. Assim é possível conhecer a disponibilidade e a variabilidade ao longo do tempo do recurso solar. O teste de Mann-Kendall é o mais adequado para avaliação da tendência em séries temporais de dados meteorológicos como horas de insolação e radiação solar.

Na Tabela (5.14) são apresentados os períodos dos dados de horas de insolação utilizados para geração das séries históricas.

Tabela 5.14 – Períodos de dados de horas de insolação para geração das séries históricas de radiação solar

Cidade	Períodos da série histórica de dados de horas de insolação	
	<i>Início</i>	<i>Fim</i>
Brasília, DF	Abril/1962	Março/2016
Cuiabá, MT	Janeiro/1961	Março/2016
Palmas, TO	Maior/1994	Março/2016
Petrolina, PE	Outubro/1978	Março/2016
Santa Maria, RS	Janeiro/1961	Março/2016

Nas Figuras (5.44) a (5.48) são apresentadas as séries históricas de radiação solar global, difusa e direta, para as cidades analisadas em cada recurso. Na cidade de Cuiabá a análise foi dividida em duas séries históricas devido à interrupção dos dados de horas de insolação entre 1988 e 1996, na qual não havia valores válidos, logo gerou uma série de 1961 a 1988 e outra de 1996 a 2016. O mesmo ocorreu para Santa Maria, na qual se gerou uma série de 1961 a 1984 e 1991 a 2016. Na Tab. (5.15) são apresentados os valores obtidos pelo teste de Man-Kendall para análise das tendências destas séries geradas

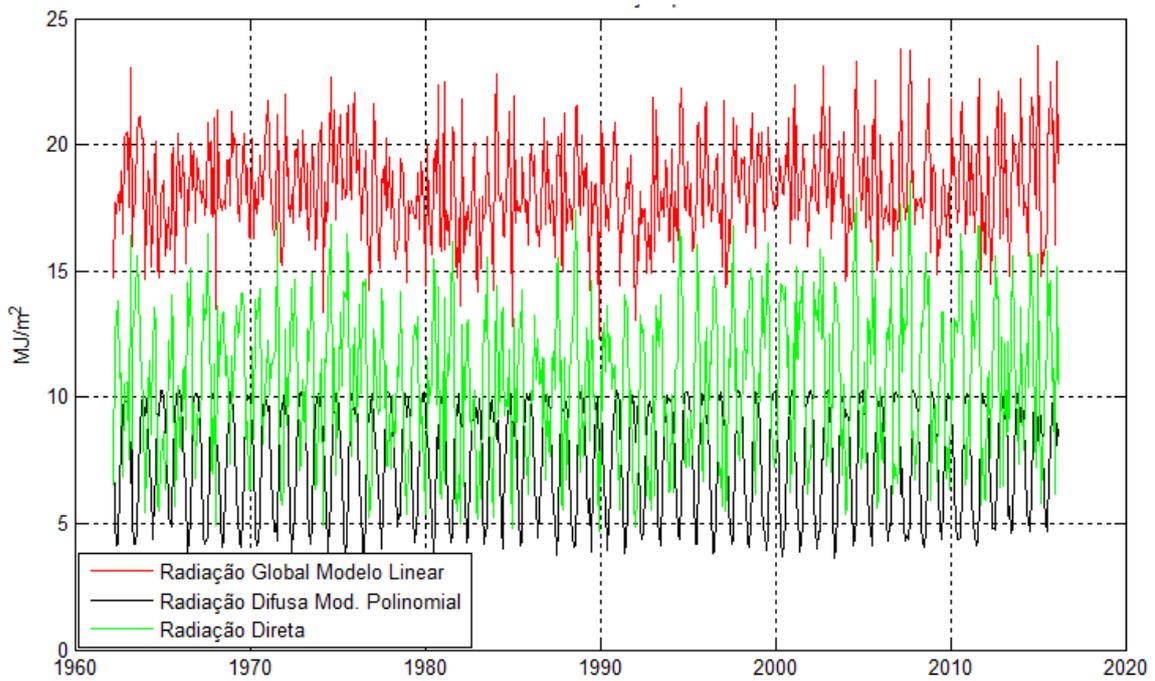
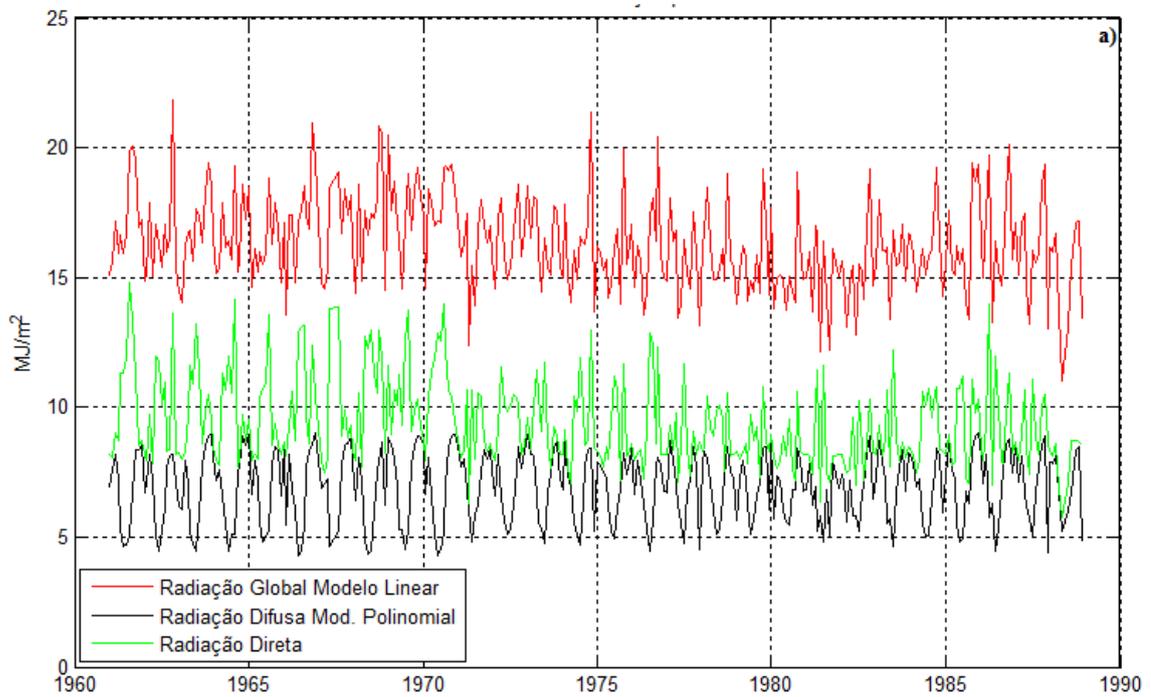


Figura 5.44 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Brasília



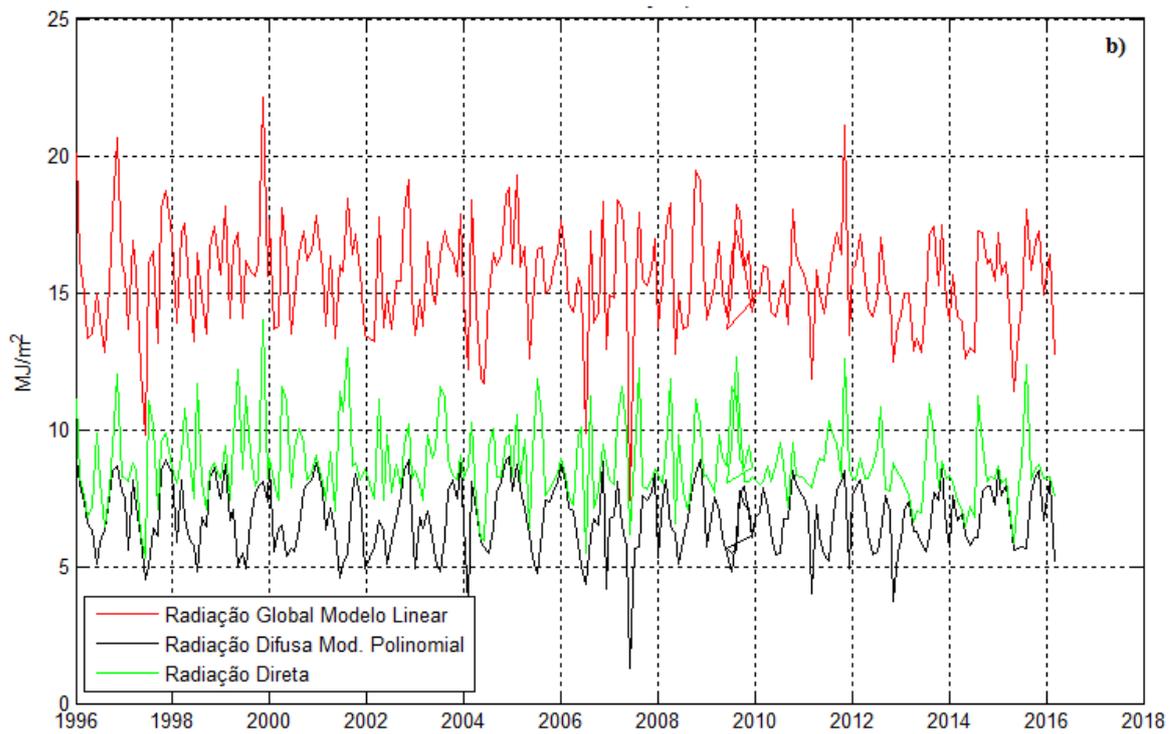


Figura 5.45 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Cuiabá: a) Série de 1961 a 1988; b) Série histórica de 1996 a 2016;

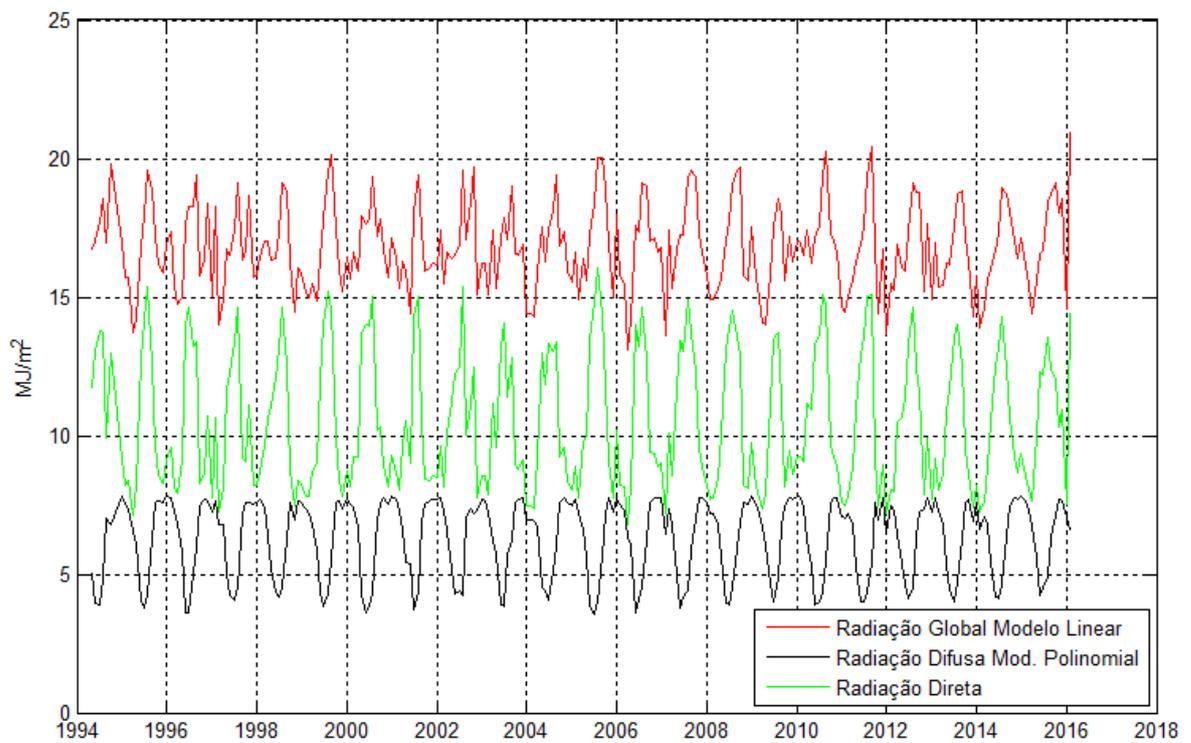


Figura 5.46 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Palmas

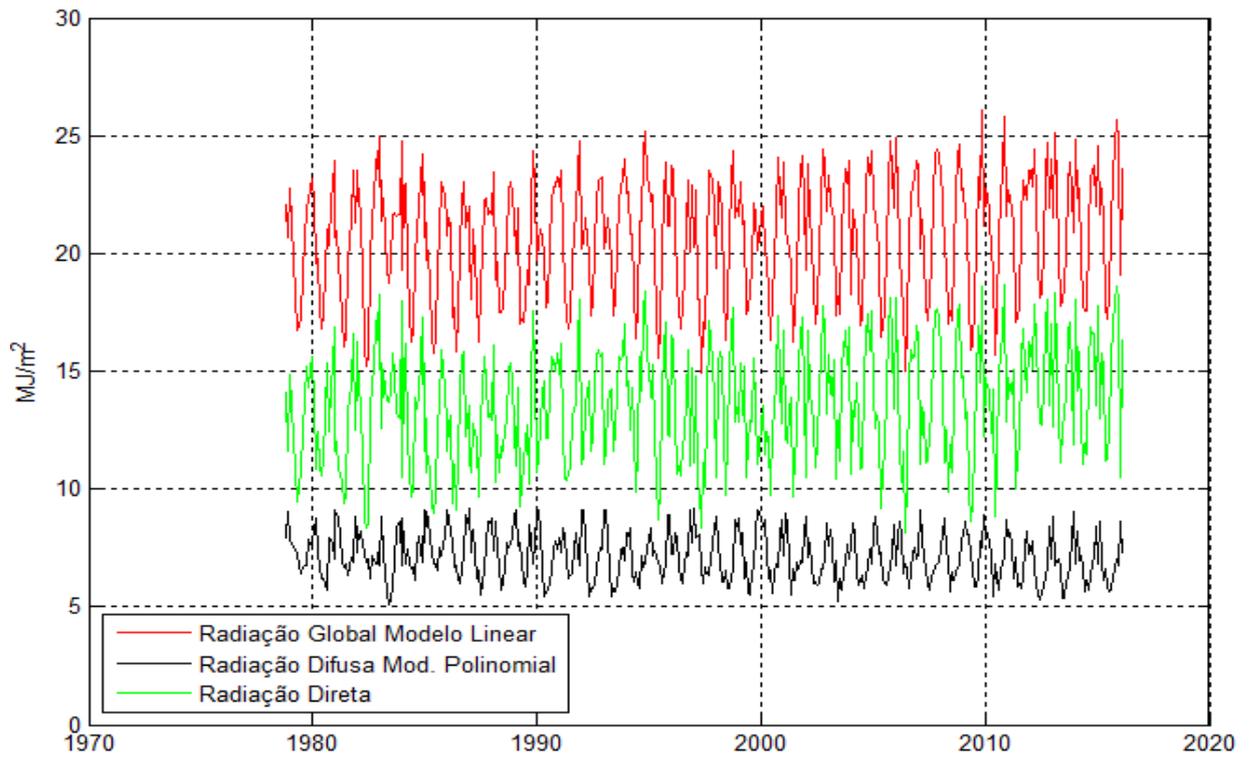
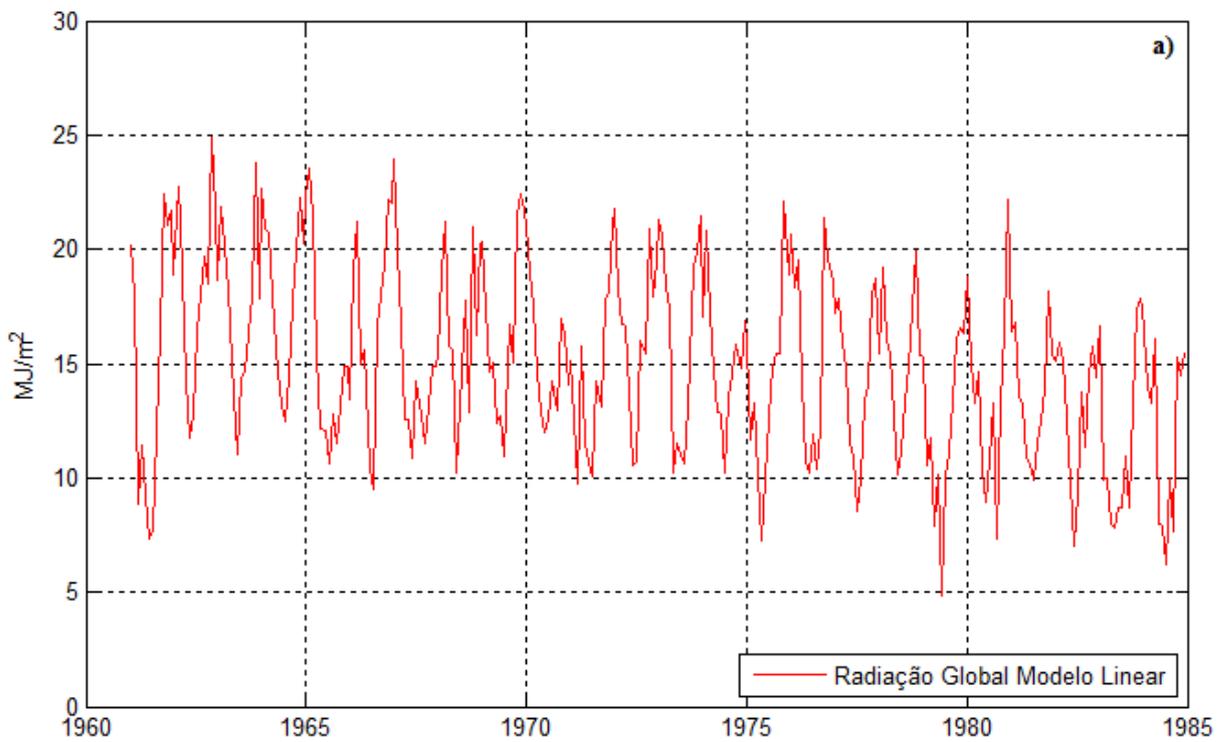


Figura 5.47 – Série histórica de valores estimados de radiação global, difusa e direta para a cidade de Petrolina



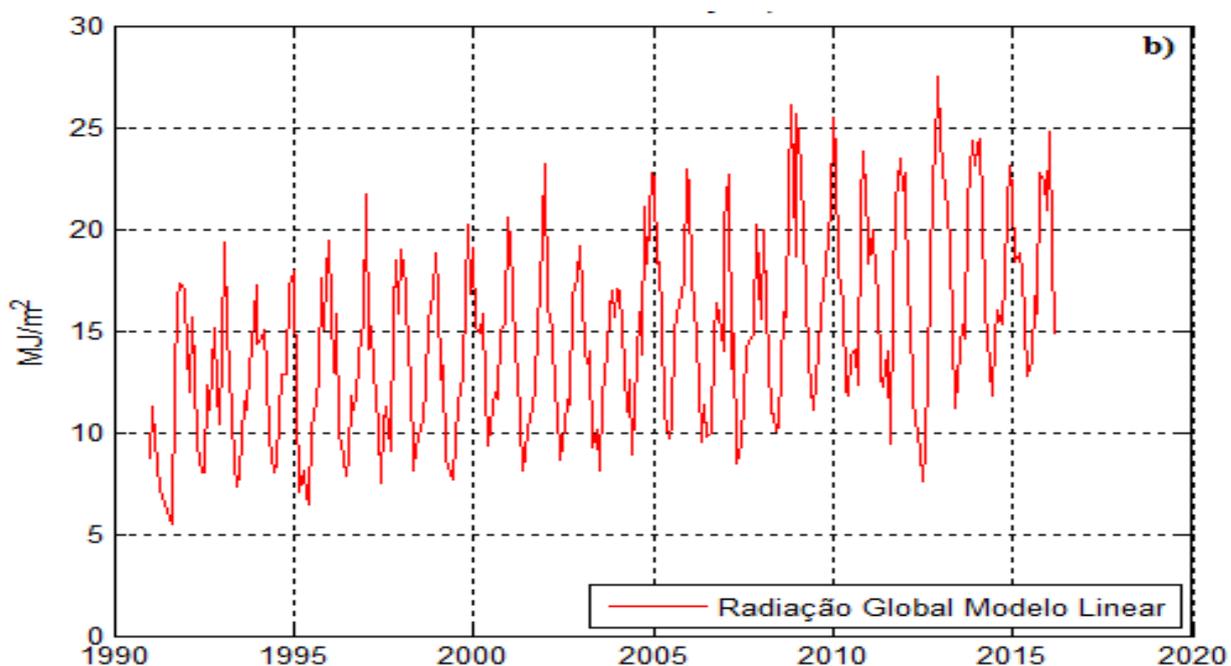


Figura 5.48 – Série histórica de valores estimados de radiação global para a cidade de Santa Maria: a) Série de 1961 a 1984; b) Série histórica de 1991 a 2016;

Tabela 5.15 – Valores do teste Mann-Kendall e análise de tendências

Cidades	Valores de $U(t_n)$ teste Mann-Kendall		Tendência (Rad Global /Rad Difusa)	Significância da Tendência
	Radiação Global	Radiação Difusa		
Brasília, DF	0,3625	0,9623	Positiva/Positiva	Não
Cuiabá, MT (série 1)	-0,014	0,94	Negativa/Positiva	Não
Cuiabá, MT (série 2)	0,08	0,47	Positiva/Positiva	Não
Palmas, TO	0,9585	0,8022	Positiva/Positiva	Não
Petrolina, PE	0,02	0,007	Positiva/Positiva	Não
Santa Maria, RS (Série 1)	-2,02	-	Negativa/-	Sim
Santa Maria, RS (Série 2)	2,15	-	Positiva/-	Sim

Analisando as séries históricas apresentadas nas Fig. (5.44) a (5.48) e os resultados do teste de Mann-Kendall apresentados na Tab. (5.15) verifica-se que a única cidade que gerou uma série histórica com tendências foi Santa Maria, na qual entre o ano de 1961 e 1984 gerou uma série com tendências negativas, ou seja, durante este período houve uma redução da radiação solar global nesta localidade, já na série entre 1991 e 2016 houve uma tendência positiva na série histórica, logo houve um aumento da disponibilidade deste recurso solar. Nas outras cidades verifica-se que houve variações nas séries, porém estas não se mostraram significativas através do teste de Mann-Kendall.

Verifica-se que a parcela difusa da radiação solar possui considerável participação, sendo necessário o melhor aproveitamento deste recurso para geração de energia.

A análise de tendências em séries históricas de radiação solar é importante para conhecermos a disponibilidade temporal deste recurso ao longo dos anos e assim utilizar tais dados para dimensionamento de projetos de geração Fotovoltaica ou Heliotérmica.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e análises aqui apresentados é possível destacar algumas conclusões relevantes do trabalho:

- Os modelos foram parametrizados para cinco cidades do Brasil, de climas e regiões diversa e independente destes fatores estes geraram excelentes resultados ao estimar a radiação solar global e difusa.
- Dos modelos estudados o que obteve melhores resultados para estimar a radiação solar global foi o modelo linear de Angström-Prescott. Estes apresentaram RMSE abaixo de 5% e MBE abaixo de 3%, levando a boas estimativas da radiação solar global média mensal em todas as cidades analisadas. Os resultados deixam evidente a correlação que há entre $\overline{K_T}$ e \bar{n}/\bar{N} .
- O modelo mais adequado para estimar a radiação solar difusa foi o modelo polinomial de 3º ordem. A aplicação deste gerou boas estimativas da radiação solar difusa média mensal com RMSE abaixo de 8% e MBE variando entre - 4% e 2% nas análises das cidades estudadas. A fração difusa $\overline{H_d}/\bar{H}$ se correlaciona com $\overline{K_T}$.
- A estimativa destes recursos (radiação solar global e difusa) por meio de modelos sazonais não melhorou os resultados dos modelos mensais locais.
- Os resultados apontam que os modelos para estimar a radiação solar global e difusa aqui apresentados, são modelos locais, adequados para aquela região característica.
- Um modelo único com os mesmos parâmetros para estimar o recurso solar em todas as cidades analisadas não se mostrou eficaz. A correção encontrada na literatura para corrigir a influência da latitude no coeficiente linear do modelo de Angström-Prescott não foi suficiente para validar tal modelo único, isto se deve por estarmos analisando cidades de climas e regimes de chuvas diferentes e estas não podem ser tratadas como um conjunto, esta metodologia pode ser eficaz para modelos únicos de estimativa em regiões climatologicamente semelhantes.
- Os modelos validados na pesquisa podem ser utilizados para análise de séries históricas de radiação solar, podendo analisar a tendência positiva, negativa ou estacionária destas e assim contribuir para entender o comportamento e a disponibilidade deste recurso.
- Ao analisar as séries históricas das cidades estudadas por meio do teste de Mann-Kendall verificou-se que esta não foi conclusiva, são análises pontuais, sendo necessária

a análise de um conjunto de estações em uma mesma região climatológica para diminuir as influências externas.

- A falta de um banco de dados único de insolação e radiação, e melhores dados para a análise comparativa dos valores estimados e valores reais podem ter influenciado os resultados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A radiação solar por ser um recurso inesgotável e uma fonte de energia renovável, sua estimativa é primordial para o dimensionamento de projetos que envolvam o aproveitamento deste recurso, sendo os modelos de estimativas alternativas de conhecer a disponibilidade deste recurso com custo relativamente baixo.

No presente trabalho foram apresentados modelos de estimativa média mensal e média mensal sazonal da radiação global e difusa, com base em dados históricos retirados do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e do Instituto de Meteorologia (INMET). Estes modelos possuem como entrada de dados valores de horas de insolação e índice de claridade.

A possibilidade de parametrizar modelos locais para estimar a radiação global e suas componentes é algo importante para a análise de longo prazo de projetos de geração de energia solar em regiões que não possuem um banco de dados específico, pois estes modelos podem vir a ser utilizados em regiões climaticamente semelhantes, gerando dados difíceis de serem medidos (radiação global e difusa) a partir de dados facilmente medidos (horas de insolação), podendo assim ter um conhecimento prévio do recurso solar nesta região.

Um estudo mais detalhado do comportamento destes modelos, ao estimarem o recurso solar de cidades vizinhas das aqui analisadas, pode traduzir a abrangência espacial destes modelos, encontrando uma área ótima de utilização.

Por fim, uma conclusão mais robusta sobre o comportamento temporal das componentes da radiação solar, se daria agrupando diversas estações de regiões climatologicamente semelhantes e aplicando a metodologia descrita ao conjunto de dados verificando a semelhança e a possibilidade do uso de modelos locais para outras regiões nestas características.

A análise realizada no trabalho levou em consideração dados médios mensais, isto fez com que não fosse possível visualizar o comportamento das componentes da radiação solar em seus extremos (baixos e altos valores), já que os dados médios não conseguem traduzir estes valores dos extremos, como dias com muita radiação solar global disponível K_T próximo de 1,00 ou de dias muito nublados K_T próximos de 0,00. Para tal objetivo o ideal seria análises de dados diários, que considerariam estes extremos para a parametrização dos modelos.

Os resultados deste estudo já foram apresentados em três congressos: VI CBENS (Congresso Brasileiro de Energia Solar), XXII CREEM (Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica) e XIX CBMET (Congresso Brasileiro de Meteorologia). Estas contribuíram para a melhoria e conclusão do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMOROX, J.; HONTORIA, C.; BENITO, M. Models for obtaining daily global solar radiation with measure dair temperature data in Madrid (Spain). **Applied Energy**, London, v.88, p.1703-1709, 2011.
- ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. 1.ed., Guaíba, RS: Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2002, 475p.
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **American Meteorology society**. Washington DC, v. 50, p. 121-126, 1924.
- ASSIS, F. N. et al. Aplicabilidade de Modelos de Estimativa da Radiação Solar Global”, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.6, nº 1, p. 283-291, 1998.
- BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.
- BERLATO, M. A. Radiação Solar Global no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Agronomia Sul riograndense**, v. 7, n. 2, p. 115-131, 1971.
- BEN, **Balanco Energético NAcional**. Balanco energético Nacional 2015 – Ano base 2014 [online]: <https://ben.epe.gov.br/>, 2016.
- BENNETT, I., Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States. **Solar Energy**, 9, 145 (1965).
- BENFORD F; BOCK J. E. Transaction of the Illumination. **Engineering Society**, v. 34, p.200-203 (1939).
- BERUSKI, G. C.; LEITE, M. L.; VIRGENS FILHO, J. S.; ADACHESKI, P. A.; OLIVEIRA, A. V. Análise probabilística da velocidade média e caracterização da direção predominante do vento no município da Lapa/PR. **Revista RA'E GA**, v. 17, p. 65-75, 2009.
- BERUSKI, G. C.; PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 205-213, 2015.
- BOISVERT J. B., HAYHOE, H. N., DUBE, P. A. Improving the estimation of global radiation across Canada. **Agricultural Forest Meteorology, Amsterdam**, v. 51, p. 275-286, 1990.
- BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Antsgröm-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 02, p. 295-300, 2002.

- CAMPELO JUNIOR, J. H. Relação sazonal entre radiação solar global e insolação no Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 06, n. 02, p. 193-1999, 1998.
- CARDON, D.A., AMORIN NETO, M.S. Relação entre radiação solar global e a insolação na região de Petrolina (PE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 1983, Campinas. **Anais do III Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**.Campinas, 1983. p.123-8.
- COOPER, P. I., (1969). **The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills**.Solar Energy, 12, 3.
- CURY-LUNARDI, D.M., CATANEO, A. Estimativas sazonais da radiação solar global em função da insolação, para a região de Botucatu-SP. **Cult. Agron.**, São Paulo, v.2, 1993.
- CUSTÓDIO, M. S.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Nebulosidade diurnal no Rio Grande doSul: Climatologia e tendência temporal. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 15, n. 1, p. 45-52, 2009.
- DAL PAI, A. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. 2005. 87f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a Região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 06, p. 1260-1263, 2003.
- DIAS, C. A. A. **Procedimentos de medição e aquisição de dados de uma torremicrometeorológica em Sinop-MT**. 89 f. 2007.Dissertação (Mestrado em Física e MeioAmbiente), Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2007.
- DRUMMOND, A. J. **On the measurements of sky radiation**. Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bio klimatologie, v. 07, p. 413-436, 1956.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., 1991. **Solar Engineering of Thermal Process**, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., 2013. **Solar Engineering of Thermal Process**, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- DRECHMER, P. A. O. **Comportamento e correção da radiação difusa obtida com o anel de sombreamento**. 2005. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)– Centro de

- Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2005.
- ERBS, D. G., S. A. Klein, and J. A. Duffie. Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation. **Solar Energy**, v. 28, p. 293-300, 1982.
- ESCOBEDO, J. F.; TERAMOTO, E. T.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J; CODATO, G. Equações de estimativa das frações solar direta e difusa em função do índice de claridade e razão de insolação. **Avances Energías Renovables y Medio Ambiente**. v. 16, p. 1153-1160, 2012.
- ESTEFANEL, A. B. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS. I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p.203-218, 1990.
- FILHO, E. I. F., SA, M. M. F. Influência das variáveis do terreno na radiação solar. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis, Brasil. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE, 2007. p. 5751-5753.
- FOSTER, R., LORENZ E., GIRODO A. **SOLAR ENERGY: Renewable Energy sources and the Environment**, 2009.
- FROTA, A. B.: SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico. São Paulo: Studio Nobel 2003. 243p.
- GOMES, E. N. **Medidas e modelos de estimativa da radiação direta na incidência**. 2006. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.
- GLOVER, J., McCULLOCH, J.S.F. The empirical relation between solar radiation and hours of sun shine.Q. J. R. **Meteorol. Soc.**, v.84, p.172-5, 1958.
- HOVE, T., GOTTSCHKE, J. Mapping Global, Diffuse and beam solar radiation over Zimbabwe. **Renewable Energy**, Zimbabwe, v. 18, p. 535-556, 1999.
- INMET, **Instituto Nacional de Meteorologia** [online]: <http://www.inmet.gov.br>, 2016.
- IQBAL, M. “**An Introduction to solar radiation**”. Academic Press, New York, 1983.
- ISLAM, M. D.; KUBO, I.; OHADI, M.; ALILI, A. A. Measurement of solar energy radiation in Abu Dhabi, UAE. **Applied Energy**, v. 86, p. 511-515, 2009.
- JOHNSON, F. S., The solar constant. **Journal of Meteorology**, v.11, p. 431-439, 1954.

- KAISER, D. P.; Y, QIAN. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954-1998: Indication of increased haze pollution? **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 21, 1-4, 2002.
- KIMBALL, H. H. Variation sin the total and luminous solar radiation with geographical position in the United States, **Mon. WeatherRev.** 47, v. 763-93, 1919.
- KOLEBAJE, O. T.; MUSTAPHA, L. O. On the performance of some predictive models for global solar radiation estimate in tropical stations: Port Harcourt and Lokoja. **The African Review of Physics**, v. 7, n. 15, p. 145-163, 2012.
- LECKNER, B. The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface – elements of a model., *Solar Energy*, vol. 20, pp 141-150, 1978.
- LI, H.; MA, W.; LIAN, Y.; WANG, X.; ZHAO, L. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3141-3145, 2011.
- LIMA, E.P. **Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais.** 2005. 67f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2005.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v.03, n. 04, p. 01-19, 1960.
- LIU, X. Y.; MEI, X.; LI, Y.; ZHNG, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J.; PORTER, J. R. Calibration of the Angström-Prescott coefficients (a, b) under different time-scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**.v.149, p. 697-710, 2009.
- MUZATHIK, A. M.; NIK, W. B. W.; IBRAHIM, M. Z.; SAMO, K. B.; SOPIAN, K.; ALGHOUL, M. A. Daily global solar radiation estimate based on sunshine hours. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 6, n. 1, p. 75-80, 2011.
- MOIANO DE PAULA, G. **Tendência histórica e variabilidade do brilho solar e modelagem da radiação solar em Santa Maria – RS.** 2012. 198f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria. 2012.
- MOLION, L. C. B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3-4, p. 7-24, 2008.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C., **Análise de Séries Temporais.** 1º Edição, São Paulo: Ed. Blucker, 2004.

- NASA. **National Aeronautics and Space Administration**. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/faintyong.jpg>>. Acesso em: Junho de 2016.
- NASA SP-8055, **National Aeronautics and Space Administration**. *Solar Electromagnetic Radiation*. May, 1971.
- OCCHIPITINI, G.A. **Radiação solar global e insolação em Cananéia**. São Paulo: Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1959.
- OLIVEIRA, A. P. **Investigação da camada limite planetária na região de Iperó**. 2003. 225 f. Tese (Livre-Docência), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2003.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuaria, 2002. 478 p.
- PERLIN, JOHN. **From Space to Earth (The Story of Solar Electricity)**. Harvard University Press, 1999.
- PETERSON, T. C. et al. Homo geneity adjustment so *fin situ* atmospheric climate data: a review. **Internactional Journal of Climatology**, v.18, n. 13, p. 1493-1517, 1998.
- PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**, v.64, p.14–118, 1940.
- RICIERI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. 1998. 198 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu. 1998.
- RUSSI M. **Projeto e análise da eficiência de um sistema solar misto de aquecimento de água e de condicionamento térmico de edificações para Santa Maria – RS**. 2012. 173p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria. 2012.
- SANTOS, R., ANDRE, R.G.B., VOLPE, C.A. Estimativa da Radiação solar global em Jaboticabal, SP. **Científica** (São Paulo), v.11, p.31-9, 1983.
- SILVA, R. A. et al. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n.5, 2010.
- SNEYERS, R. Sur l’analyse statistique des séries d’observations. Genève: Organisation Meteorologique Mondial, 192 p. 1975.
- SONDA, **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – CPTEC/INPE**. [online]: <http://www.cptec.inpe.br/sonda/>, 2016.

- SOUZA, J.L. DE; NICÁCIO, R.M.; MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**. v. 30, p. 1203 - 1220, 2005.
- SOUZA, A. P. **Evoluções, frações e estimativas das irradiações global, direta e difusa em superfícies inclinadas**. 2009. 130f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual; Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. 2009.
- SUEHRCKE, H. On the relationship between duration of sun shine and solar radiation on the earth's surface: Angstrom Equation Revisited. **Solar Energy**. v.68, n.5, p. 417-425, 2000.
- TARIFA, J.R. Estimativa da radiação solar em função da insolação para Presidente Prudente. **Cad. Ciênc. Terra**, n.22, p.1-15, 1972.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**, Recife, 2006. Versão digital 2.
- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. 4ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 449 p.
- VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetros com sensores fotoelétricos**. 2008. 95f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Meteorologia. Universidade de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Pelotas, 2008.
- VON STORCH, H. Reconstructing Past Climate from Noisy Data. **Science**, Washington, v. 306, p. 679-682, 2004.
- YANG, K. G.; HUANG, G. W.; TAMAI, N. A hybrid model for estimating global solar radiation. **Solar Energy**, v. 70, n. 1, p. 13-22, 2001.
- YANG, Y. H.; ZHAON, N.; HAO X. H.; LI C. Q. Decreasing trend of sun shine hours and related driving forces in North China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 97, n. 1-2, p. 91-98, 2009.
- ULGEN, K.; HEPBASLI, A. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p.149-156, 2009.