

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**A INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE
INCLINAÇÃO NA INCIDÊNCIA DE
RADIAÇÃO SOLAR EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

Por,
João Victor Figueredo Lima
Pedro H. S. A. Gonçalves

Brasília, 22 de Junho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**A INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE
INCLINAÇÃO NA INCIDÊNCIA DE
RADIAÇÃO SOLAR EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

Por,
João Victor Figueredo Lima
Pedro H. S. A. Gonçalves

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mario B. B. Siqueira (ENM-UnB)(Orientador) _____

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho (ENM-UnB) _____

Prof. Rafael Amaral Shayani (ENE-UnB) _____

Brasília/DF, Junho de 2018.

DEDICATÓRIA(S)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela força e coragem durante esta jornada, aos meus pais e todos amigos e familiares.

Pedro Henrique S. de A. Gonçalves

Dedico este trabalho a Deus, à minha família e a todos que me incentivaram e me apoiaram durante esses anos da minha vida.

João Victor Figueredo Lima

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por minha vida, por me permitir viver tudo isso e por me dar forças nos dias difíceis. A minha mãe e minha vó por seus incessantes cuidados, aos meus tios por todo apoio e paciência e aos meus amigos, em especial Emerson, Igor e Thierre, por toda ajuda e incentivo. Aos meus professores que se dedicaram em repassar todos seus conhecimentos. Sou grato ao meu amigo Pedro, que me acompanhou nesse trabalho, se dedicou e fez com que esse trabalho se concretizasse. Por fim, sou grato ao meu orientador, Mario, o qual foi de extrema importância nesse trabalho.

João Victor Figueredo Lima

Agradeço a Deus por todas as vezes que eu não via escapatória desse lugar e por Ele ter sido meu refúgio em maus momentos. Agradeço também aos meus pais, amigos e familiares que me deram todo apoio durante a graduação. Por fim, sou grato ao meu amigo João, que sem ele não seria possível realizar esse trabalho, ao meu orientador, Mário, e aos meus amigos Igor e Thierre, que foram de grande ajuda.

Pedro Henrique S. de A. Gonçalves

RESUMO

Energias renováveis têm sido cada vez mais exploradas. Fontes energéticas provenientes de recursos naturais ganharam destaque no mundo atual por sua sustentabilidade. Elas apresentam um grande potencial e são menos prejudiciais ao meio ambiente do que as derivadas de combustíveis fósseis. Dentre a diversa gama de sistemas energéticos, optou-se em analisar energia solar, em especial, a produção de energia por painéis fotovoltaicos.

Existem diversos parâmetros que influenciam na geração de energia, como: a orientação da placa, o ângulo de inclinação com relação ao solo (β), fatores climáticos, temperatura e altitude. Optou-se em analisar a influência do ângulo de inclinação da placa, com o intuito de implementar mais fatores posteriormente.

A partir do modelo teórico do cálculo de irradiância para uma superfície inclinada, foram simulados os ângulos ótimos de inclinação que fornecessem os maiores valores de radiação em painéis fotovoltaicos. Posteriormente os resultados foram comparados com valores gerados a partir do software SAM. Incluiu-se nas análises a influência da altitude e do albedo na irradiância total. O enfoque especial foi para a cidade de Brasília-DF. Também foram realizadas simulações para diferentes latitudes, abrangendo todo o território nacional.

O sentido de inclinação da placa é influenciado pelo hemisfério em que ela se encontra. Para o hemisfério sul, as placas ficam voltadas para o norte, enquanto que para o hemisfério norte as placas ficam voltadas para o hemisfério sul. É comum a instalação de placas com uma inclinação semelhante à latitude local. Entretanto, por meio de simulações a partir do modelo teórico e dos dados do SAM foram encontradas faixas que otimizaram a interceptação da radiação total.

Por conseguinte, foram analisadas as combinações de ângulo de inclinação e orientação do painel fotovoltaico que otimizaram a quantidade de irradiância normal total que atinge a placa, para diferentes cidades ao longo do Brasil, e concluiu-se que fatores de altitude e clima influenciam consideravelmente na radiação incidente no painel.

É importante frisar que no modelo teórico foi considerado céu claro isotrópico ao longo de todo ano, uma altitude padrão de 400 m para todo território brasileiro e desconsiderou-se a influência da temperatura.

Palavras-chave: Energia solar, Painel fotovoltaico, ângulo de inclinação, Radiação máxima

ABSTRACT

Renewable energies have been increasingly explored. Energy fuels from natural resources have gained prominence in the world today due to their sustainability. They have great potential and are less harmful to the environment than those derived from fossil fuels. Among the diverse range of energy systems, it was opted to analyze solar energy, particularly, the production of energy by photovoltaic panels.

There are several parameters that influence energy generation, such as: plate orientation, tilt angle to the soil (β), climatic factors, temperature and altitude. It has been decided to analyze the influence of the tilt angle of the panel, in order to implement more factors.

From the theoretical model of the irradiance calculation for a sloped surface, the optimum tilt angles were simulated to provide the highest values of irradiation in photovoltaic panels. Afterwards the results were compared with values generated from the SAM software. It has been included in the analysis the influence of altitude and albedo on total irradiation. A special focus was given to the city of Brasilia-DF. Also simulations were performed for different latitudes, covering the entire national territory.

The direction of plate inclination is influenced by the hemisphere in which it is. For the southern hemisphere, the plates are oriented to the north, while to the north hemisphere the plates are facing the southern hemisphere. Usually the panels are set with a tilt angle to local latitude. However, throughout simulations from the theoretical model and SAM data, tracks were found that optimized the interception of total irradiation.

Therefore, the combinations of tilt angle and orientation of the photovoltaic panel that optimized the amount of total normal irradiation reaching the plate were analyzed for different cities throughout Brazil, and it was concluded that altitude and climate factors influence considerably the irradiation incident on the panel.

It is important to emphasize that in the theoretical model it was considered a clear isotropic sky throughout the year, a standard altitude of 400 m for the whole Brazilian territory and the influence of temperature was disregarded.

Keywords: Solar energy, photovoltaic panel, optimum tilt angle, maximum radiation.

*“...Dormia
A nossa pátria mãe tão distraída
Sem perceber que era subtraída
Em tenebrosas transações...”*

(Chico Buarque)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	ESPECTROSCOPIA	2
2.2	O EFEITO FOTOELÉTRICO	4
2.3	DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA NO FÓTON SOLAR	8
2.4	INFLUÊNCIA TEMPERATURA	9
2.5	INCIDÊNCIA SOLAR SOBRE OS PAINÉIS	10
2.6	VARIAÇÃO DISTÂNCIA TERRA-SOL	11
2.7	MOVIMENTO DE ROTAÇÃO DA TERRA	12
2.8	INFLUÊNCIA DA MASSA DE AR (AM)	13
2.9	VARIAÇÃO DA DIREÇÃO DE INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES AO LONGO DO ANO	14
2.10	ÂNGULOS SOLARES	18
2.11	FORMAS DE RADIAÇÃO	19
3	METODOLOGIA	22
3.1	ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO PARA CÉU CLARO	22
3.1.1	RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE SOBRE UMA SUPERFÍCIE NORMAL	23
3.1.2	RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE SOBRE UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL	23
3.1.3	FATOR DE ATENUAÇÃO DA ATMOSFERA	24
3.1.4	RADIAÇÃO DIRETA	25
3.1.5	RADIAÇÃO DIFUSA	26
3.2	FATOR GEOMÉTRICO R_b	27
3.2.1	RADIAÇÃO EM UMA SUPERFÍCIE INCLINADA: CÉU ISO- TRÓPICO	28
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
4.1	DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIAÇÃO GLOBAL NO BRASIL	29
4.2	INFLUÊNCIA DO ALBEDO	31
4.3	VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SAZONAL E DIÁRIA	33
4.4	ORIENTAÇÃO ÓTIMA PARA DIFERENTES CIDADES	41

4.4.1	Belém-PA	43
4.4.2	Manaus-AM	47
4.4.3	Petrolina-PE	49
4.4.4	Bom Jesus da Lapa-BA	51
4.4.5	Cuiabá-MT	53
4.4.6	Brasília-DF	55
4.4.7	Belo Horizonte-MG	57
4.4.8	São Paulo-SP	59
4.4.9	Curitiba-PR	61
4.4.10	Santa Maria-RS	63
5	CONCLUSÃO	67
6	APÊNDICE I - GRÁFICOS DNI E DHI MENS AIS, SAZONAIS E DIÁRIOS	70
6.1	Belém-PA	70
6.1.1	GRÁFICOS DNI E DHI MENS AIS	70
6.1.2	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	76
6.1.3	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	77
6.2	Manaus-AM	78
6.2.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	84
6.2.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	85
6.3	Petrolina-PE	86
6.3.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	92
6.3.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	93
6.4	Bom Jesus da Lapa-BA	94
6.4.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	100
6.4.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	101
6.5	Cuiabá-MT	102
6.5.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	108
6.5.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	109
6.6	Brasília-DF	110
6.6.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	116
6.6.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	117
6.7	Belo Horizonte-MG	118
6.7.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	124
6.7.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	125

6.8	São Paulo-SP	126
6.8.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	132
6.8.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	133
6.9	Curitiba-PR	134
6.9.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	140
6.9.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	141
6.10	Santa Maria-RS	142
6.10.1	GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS	148
6.10.2	GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS	149

Lista de Figuras

2.1	<i>Espectro de radiação solar visível. (Fonte: Peter Hermes Furian / Shutterstock.com)</i>	2
2.2	<i>Representação de um átomo de silício com $N=14$. (Fonte: Frontin, et al., 2017)</i>	4
2.3	<i>Estruturas cristalinas do silício puro, do tipo n com fósforo e do tipo p com boro. (Fonte: http://nerdeletrico.blogspot.com.br/2011/09/uma-introducao-aos-semicondutores.html)</i>	5
2.4	<i>Funcionamento de uma célula fotovoltaica. (Fonte: Frontin, et al., 2017)</i>	6
2.5	<i>Diagrama de energia de uma junção p-n, sob iluminação. Fonte: (Frontin, et al., 2017)</i>	7
2.6	<i>Perdas espectrais em uma célula solar. Fonte: (Frontin, et al., 2017)</i>	7
2.7	<i>Distribuição Espectral da radiação solar. (Fonte: http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html)</i>	8
2.8	<i>Curvas I_xV e P_xV. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)</i>	9
2.9	<i>Curva I_xV superposta à curva de potência. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)</i>	9
2.10	<i>Influência da temperatura e da irradiância na curva I_xV. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)</i>	10
2.11	<i>Mapa da irradiação solar global no Brasil. Fonte: (Pereira, et al., 2006)</i>	11
2.12	<i>Variação da radiação extraterrestre com os meses do ano. (Fonte: Autor)</i>	12
2.13	<i>Movimento diário do Sol de leste para oeste. (Fonte: http://www.astrosurf.com/skyscapes/disc/analema/analema.html)</i>	13
2.14	<i>Trajetória dos raios solares na atmosfera. (Fonte: (Frontin, et al., 2017)</i>	14
2.15	<i>Tipos de radiação incidente na Terra. (Fonte: Pereira, et al., 2006)</i>	15
2.16	<i>Eixo de rotação da Terra inclinado em relação ao plano da elíptica. (Fonte: http://www.petroleoecologia.com.br/)</i>	15
2.17	<i>Caminho percorrido pela Terra no seu movimento em torno do Sol. (Fonte: http://www.coladaweb.com/geografia/solsticios-equinocios)</i>	16
2.18	<i>Trajetória aparente do Sol entre o Equador e o Trópico de Capricórnio. (Fonte: http://www.casadaciencia.ufrj.br/CienciaParaPoetas/Astronomia/Tuparetama/arqueoastronomia/arquivos/17.html)</i>	17
2.19	<i>Carta Solar Brasília no dia 21 de junho (solstício de inverno). (Fonte: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?langpt#top)</i>	17
2.20	<i>Carta Solar Brasília no dia 21 de dezembro (solstício de verão). (Fonte: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?langpt#top)</i>	18
2.21	<i>Ângulos solares. (Fonte Campos, 2014)</i>	18
2.22	<i>Fluxo de energia radiante importante em um processo térmico. (Fonte Duffie e Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes 1980)</i>	20

2.23	<i>Representação dos ângulos para a relação entre a radiação solar e uma placa plana particular. (Fonte Duffie e Beckman, Solar Engineering of Thermal Proseces 1980)</i>	21
3.1	<i>Seção da terra mostrando β, ϕ e θ. Tem-se $\phi - \beta$ para uma superfície voltada para o sul. (Fonte: Duffie & Beckman, 2013)</i>	27
4.1	<i>Variação de Irradiação (I_t) anual com a altitude.</i>	29
4.2	<i>Irradiação global horizontal anual simulada.</i>	30
4.3	<i>Total diário da irradiação global horizontal. Fonte: (ATLAS)</i>	30
4.4	<i>Albedo para diferentes superfícies. Fonte: Silvestre (2016)</i>	31
4.5	<i>Albedo para $\rho = 0$.</i>	32
4.6	<i>Albedo para $\rho = 0,5$.</i>	32
4.7	<i>Albedo para $\rho = 1$.</i>	33
4.8	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Brasília.</i>	34
4.9	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Brasília.</i>	34
4.10	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Brasília-DF.</i>	35
4.11	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Brasília-DF.</i>	35
4.12	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Brasília-DF.</i>	36
4.13	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Brasília-DF.</i>	36
4.14	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Brasília-DF.</i>	37
4.15	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Brasília-DF.</i>	37
4.16	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Brasília-DF.</i>	38
4.17	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Brasília-DF.</i>	38
4.18	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Brasília-DF.</i>	39
4.19	<i>Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Brasília-DF.</i>	39
4.20	<i>Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas para Brasília.</i> . .	40
4.21	<i>Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas para Brasília.</i> . .	40
4.22	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Belem-PA - $\phi = -1,38^\circ$</i>	43
4.23	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Belem-PA - $\phi = -1,38^\circ$</i>	43

4.24	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belém-PA - $\phi = -1, 38^\circ$</i>	44
4.25	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belém-PA - $\phi = -1, 38^\circ$</i>	44
4.26	<i>Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Belem-PA - $\phi = -1, 38^\circ$</i>	45
4.27	<i>Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Belem-PA - $\phi = -1, 38^\circ$</i>	46
4.28	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Manaus-AM $\phi = -3, 13^\circ$</i>	47
4.29	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Manaus-AM $\phi = -3, 13^\circ$</i>	47
4.30	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Manaus-AM $\phi = -3, 13^\circ$</i>	48
4.31	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Manaus-AM $\phi = -3, 13^\circ$</i>	48
4.32	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Petrolina-PE $\phi = -9, 35^\circ$</i>	49
4.33	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Petrolina-PE $\phi = -9, 35^\circ$</i>	49
4.34	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Petrolina-PE $\phi = -9, 35^\circ$</i>	50
4.35	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Petrolina-PE $\phi = -9, 35^\circ$</i>	50
4.36	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13, 27^\circ$</i>	51
4.37	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13, 27^\circ$</i>	51
4.38	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13, 27^\circ$</i>	52
4.39	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13, 27^\circ$</i>	52
4.40	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Cuiabá-MT $\phi = -15, 65^\circ$</i>	53
4.41	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Cuiabá-MT $\phi = -15, 65^\circ$</i>	53
4.42	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Cuiabá-MT $\phi = -15, 65^\circ$</i>	54
4.43	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Cuiabá-MT $\phi = -15, 65^\circ$</i>	54
4.44	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Brasília-DF $\phi = -15, 87^\circ$</i>	55
4.45	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Brasília-DF $\phi = -15, 87^\circ$</i>	55
4.46	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Brasília-DF $\phi = -15, 87^\circ$</i>	56
4.47	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Brasília-DF $\phi = -15, 87^\circ$</i>	56
4.48	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Belo Horizonte-MG $\phi = -19, 85^\circ$</i>	57

4.49	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Belo Horizonte-MG $\phi = -19, 85^\circ$.</i>	57
4.50	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belo Horizonte-MG $\phi = -19, 85^\circ$.</i>	58
4.51	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belo Horizonte-MG $\phi = -19, 85^\circ$.</i>	58
4.52	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em São Paulo-SP $\phi = -23, 62^\circ$.</i>	59
4.53	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em São Paulo-SP $\phi = -23, 62^\circ$.</i>	59
4.54	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em São Paulo-SP $\phi = -23, 62^\circ$.</i>	60
4.55	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em São Paulo-SP $\phi = -23, 62^\circ$.</i>	60
4.56	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Curitiba-PR $\phi = -25, 52^\circ$.</i>	61
4.57	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Curitiba-PR $\phi = -25, 52^\circ$.</i>	61
4.58	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Curitiba-PR $\phi = -25, 52^\circ$.</i>	62
4.59	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Curitiba-PR $\phi = -25, 52^\circ$.</i>	62
4.60	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Santa Maria-RS $\phi = -29, 7^\circ$.</i>	63
4.61	<i>Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Santa Maria-RS $\phi = -29, 7^\circ$.</i>	63
4.62	<i>Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Santa Maria-PR $\phi = -29, 7^\circ$.</i>	64
4.63	<i>Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Santa Maria-PR $\phi = -29, 7^\circ$.</i>	64
6.1	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Belém-PA.</i>	70
6.2	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Belém-PA.</i>	70
6.3	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Belém-PA.</i>	71
6.4	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Belém-PA.</i>	71
6.5	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Belém-PA.</i>	72
6.6	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Belém-PA.</i>	72
6.7	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Belém-PA.</i>	73

6.8	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Belém-PA.	73
6.9	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Belém-PA.	74
6.10	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Belém-PA.	74
6.11	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Belém-PA.	75
6.12	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Belém-PA.	75
6.13	: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Belém-PA. .	76
6.14	: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Belém-PA. .	76
6.15	Varição do DNI normalizado ao longo do dia em Belém-PA.	77
6.16	Varição do DHI normalizado ao longo do dia em Belém-PA.	77
6.17	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Manaus-AM.	78
6.18	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Manaus-AM.	78
6.19	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Manaus-AM.	79
6.20	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Manaus-AM.	79
6.21	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Manaus-AM.	80
6.22	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Manaus-AM.	80
6.23	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Manaus-AM.	81
6.24	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Manaus-AM.	81
6.25	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Manaus-AM.	82
6.26	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Manaus-AM.	82
6.27	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Manaus-AM.	83
6.28	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Manaus-AM.	83
6.29	: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Manaus-AM.	84
6.30	: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Manaus-AM.	84
6.31	Varição do DNI normalizado ao longo do dia em Manaus-AM.	85

6.32	<i>Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Manaus-AM.</i>	85
6.33	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Petrolina-PE.</i>	86
6.34	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Petrolina-PE.</i>	86
6.35	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Petrolina-PE.</i>	87
6.36	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Petrolina-PE.</i>	87
6.37	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Petrolina-PE.</i>	88
6.38	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Petrolina-PE.</i>	88
6.39	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Petrolina-PE.</i>	89
6.40	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Petrolina-PE.</i>	89
6.41	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Petrolina-PE.</i>	90
6.42	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Petrolina-PE.</i>	90
6.43	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Petrolina-PE.</i>	91
6.44	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Petrolina-PE.</i>	91
6.45	<i>: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Petrolina-PE.</i>	92
6.46	<i>: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Petrolina-PE.</i>	92
6.47	<i>Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Petrolina-PE.</i>	93
6.48	<i>Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Petrolina-PE.</i>	93
6.49	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Bom Jesus da Lapa-BA.</i>	94
6.50	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Bom Jesus da Lapa-BA.</i>	94
6.51	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Bom Jesus da Lapa-BA.</i>	95
6.52	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Bom Jesus da Lapa-BA.</i>	95
6.53	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Bom Jesus da Lapa-BA.</i>	96
6.54	<i>: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Bom Jesus da Lapa-BA.</i>	96

6.55	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Bom Jesus da Lapa-BA.	97
6.56	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Bom Jesus da Lapa-BA.	97
6.57	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Bom Jesus da Lapa-BA.	98
6.58	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Bom Jesus da Lapa-BA.	98
6.59	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Bom Jesus da Lapa-BA.	99
6.60	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Bom Jesus da Lapa-BA.	99
6.61	: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Bom Jesus da Lapa-BA.	100
6.62	: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Bom Jesus da Lapa-BA.	100
6.63	Varição do DNI normalizado ao longo do dia em Bom Jesus da Lapa-BA.	101
6.64	Varição do DHI normalizado ao longo do dia em Bom Jesus da Lapa-BA.	101
6.65	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Brasília-DF.	102
6.66	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Brasília-DF.	102
6.67	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Brasília-DF.	103
6.68	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Brasília-DF.	103
6.69	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Brasília-DF.	104
6.70	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Brasília-DF.	104
6.71	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Brasília-DF.	105
6.72	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Brasília-DF.	105
6.73	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Brasília-DF.	106
6.74	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Brasília-DF.	106
6.75	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Brasília-DF.	107

6.76	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Brasília-DF.	107
6.77	: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF. .	108
6.78	: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF. .	108
6.79	Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Brasília-DF.	109
6.80	Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Cuiabá-MT.	109
6.81	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Brasília-DF.	110
6.82	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Brasília-DF.	110
6.83	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Brasília-DF.	111
6.84	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Brasília-DF.	111
6.85	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Brasília-DF.	112
6.86	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Brasília-DF.	112
6.87	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Brasília-DF.	113
6.88	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Brasília-DF.	113
6.89	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Brasília-DF.	114
6.90	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Brasília-DF.	114
6.91	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Brasília-DF.	115
6.92	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Brasília-DF.	115
6.93	: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF. .	116
6.94	: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF. .	116
6.95	Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Brasília-DF.	117
6.96	Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Brasília-DF.	117
6.97	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Belo Horizonte-MG.	118
6.98	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Belo Horizonte-MG.	118
6.99	: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Belo Horizonte-MG.	119

6.100: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Belo Horizonte-MG.	119
6.101: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Belo Horizonte-MG.	120
6.102: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Belo Horizonte-MG.	120
6.103: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Belo Horizonte-MG.	121
6.104: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Belo Horizonte-MG.	121
6.105: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Belo Horizonte-MG.	122
6.106: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Belo Horizonte-MG.	122
6.107: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Belo Horizonte-MG.	123
6.108: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Belo Horizonte-MG.	123
6.109: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Belo Horizonte-MG.	124
6.110: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Belo Horizonte-MG.	124
6.111 Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Belo Horizonte-MG. . .	125
6.112 Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Belo Horizonte-MG. . .	125
6.113: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em São Paulo-SP.	126
6.114: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em São Paulo-SP.	126
6.115: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em São Paulo-SP.	127
6.116: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em São Paulo-SP.	127
6.117: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em São Paulo-SP.	128
6.118: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em São Paulo-SP.	128
6.119: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em São Paulo-SP.	129
6.120: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em São Paulo-SP.	129

6.121: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em São Paulo-SP.	130
6.122: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em São Paulo-SP.	130
6.123: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em São Paulo-SP.	131
6.124: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em São Paulo-SP.	131
6.125: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em São Paulo-SP.	132
6.126: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em São Paulo-SP.	132
6.127 Variação do DNI normalizado ao longo do dia em São Paulo-SP.	133
6.128 Variação do DHI normalizado ao longo do dia em São Paulo-SP.	133
6.129: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Curitiba-PR.	134
6.130: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Curitiba-PR.	134
6.131: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Curitiba-PR.	135
6.132: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Curitiba-PR.	135
6.133: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Curitiba-PR.	136
6.134: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Curitiba-PR.	136
6.135: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Curitiba-PR.	137
6.136: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Curitiba-PR.	137
6.137: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Curitiba-PR.	138
6.138: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Curitiba-PR.	138
6.139: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Curitiba-PR.	139
6.140: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Curitiba-PR.	139
6.141: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Curitiba-PR.	140
6.142: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Curitiba-PR.	140
6.143 Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Curitiba-PR.	141
6.144 Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Curitiba-PR.	141

6.145: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Santa Maria-RS.	142
6.146: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Santa Maria-RS.	142
6.147: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Santa Maria-RS.	143
6.148: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Santa Maria-RS.	143
6.149: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Santa Maria-RS.	144
6.150: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Santa Maria-RS.	144
6.151: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Santa Maria-RS.	145
6.152: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Santa Maria-RS.	145
6.153: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Santa Maria-RS.	146
6.154: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Santa Maria-RS.	146
6.155: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Santa Maria-RS.	147
6.156: Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Santa Maria-RS.	147
6.157: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Santa Maria-RS.	148
6.158: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Santa Maria-RS.	148
6.159 Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Santa Maria-RS.	149
6.160 Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Santa Maria-RS.	149

Lista de Tabelas

2.1 Energia dos fótons predominantes na radiação solar. (Fonte: Frontin, et al., 2017)	8
2.2 Relação entre tempo solar verdadeiro e ângulo solar. Fonte: (Frontin, et al., 2017)	13
3.1 Fatores de correção para diferentes climas. Fonte: (Hottel, 1976)	25
4.1 Dependência da irradiância com a altura solar (α). Fonte: (GREENPRO, 2004)	41
4.2 Ângulos de inclinação (β) ótimo anual para todas as cidades	65

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

E	Energia.
h	Constante de Planck.
c	Velocidade da luz.
hs	Hora solar verdadeira.
AM	Massa de ar.
Rb	Fator geométrico.
h	insolação para um dia inteiro.
I_{sc}	Constante solar integrada em 1 hora.
A	Altitude.
a_0^*, a_1^*, ek^* ,	Parâmetros que contabilizam variação climática.
a_0, a_1, ek_0	Constantes climáticas.
r_0, r_1, er_k	Fatores de correção para climas diferentes.
G_{cnb}	Radiação direta normal para céu claro.
G_{sc}	Constante solar.
G_{on}	Radiação extraterrestre em relação ao plano normal.
G_o	Radiação extraterrestre sobre uma superfície horizontal.
G_{cb}, G_b	Radiação direta.
I_b	Radiação direta para o período de uma hora.
F_{c-s}	Fator de forma para o céu.
F_{c-g}	Fator de forma para o chão.
G_d	Radiação difusa.
I	Radiação global.
I_t	Radiação total em uma superfície inclinada.

Símbolos Gregos

λ	Comprimento de onda.
ν	Frequência de radiação.
ω	Velocidade angular.
θ	Incidência da radiação direta em uma superfície.
θ_z	Zenite solar.
δ	Declinação solar.
α	Altitude solar.
ϕ	Latitude.
ψ	Azimute solar.
β	Inclinação da placa.
γ	Azimute da placa.

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

No mundo atual, fontes de energias renováveis (solar, geotérmica, eólica, biomassa, etc) são cada vez mais pesquisadas e aplicadas, devido principalmente ao seu grande potencial, variedade, abundância e disponibilidade. Dentre os sistemas de energia renovável, o sistema que utiliza painéis fotovoltaicos é considerado vantajoso, particularmente pelo seu sistema distribuído de energia.

Os painéis usam a energia solar para a produção de energia através do efeito fotoelétrico. A quantidade de energia elétrica produzida está diretamente relacionada a quantidade de radiação projetada nos módulos, ou seja, quanto mais luz, mais energia (Calabrò, 2012). Para interceptar o máximo de energia possível, o painel deve ser posicionado de tal maneira que a radiação solar o intercepte perpendicularmente. Quando o painel solar não está diretamente posicionado para o sol, ele não capta o máximo de luz que poderia e por consequência não produz seu máximo de energia (Kacira, M. et al. 2003) .

Na produção de energia busca-se a máxima performance possível. Para uma estrutura solar, isso é obtido através de especificações de construção, design, instalação e orientação. Fatores locais de clima e altitude também influenciam na eficiência do sistema. Além disso, tem um indicador da eficiência, que é influenciada pelo azimute (com relação ao Equador) e seu ângulo de inclinação (com relação ao solo). Isso se deve ao fato de que ambos afetam a quantidade de radiação solar que atinge a superfície do coletor (Safdarian, F. & Nazari, M. E. 2015). Historicamente, o ângulo de inclinação da placa é determinado como aproximadamente a latitude do local, sendo que no hemisfério norte o coletor é orientado para o sul e no hemisfério sul, orientado para o norte (Li, D. H., Lam, T. N. 2007).

1.2 OBJETIVOS

Esse projeto de graduação verificará a influência da orientação no painel fotovoltaico de forma a interceptar a maior quantidade de irradiância normal a ele. Onde serão analisadas as combinações de latitude e de azimute por meio de programa computacional e a verificação por meio de dados de arquivos climáticos desenvolvido pelo NREL (National Renewable Energy Laboratory), através da ferramenta computacional SAM (System Advisor Model). Este projeto também tem por objetivo verificar qual a melhor configuração possível de painel, tendo em vista as seguintes cidades brasileiras: Belém-PA, Manaus-AM, Petrolina-PE, Bom Jesus da Lapa -BA, Cuiabá-MT, Brasília-DF, Belo Horizonte-MG, São Paulo-SP, Curitiba-PR, Santa Maria-RS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESPECTROSCOPIA

A espectroscopia é o estudo da luz através de suas cores componentes, que aparecem quando a luz passa através de um prisma ou de uma rede de difração. A sequência de cores formada é o espectro e pode ser observada na Fig.2.1. (Filho, et al., 2004).

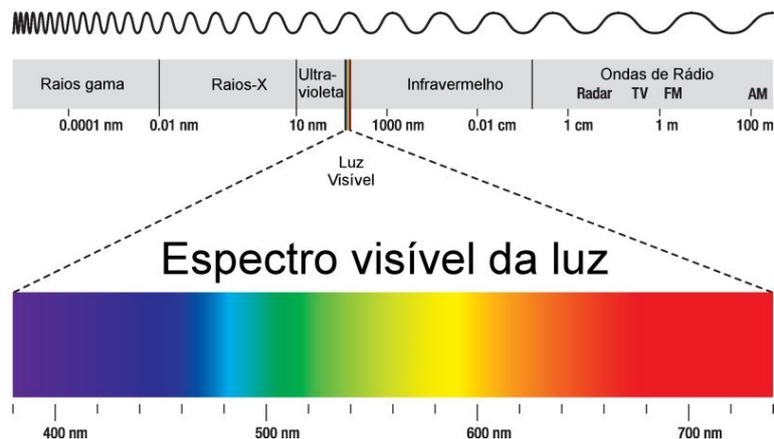


Figura 2.1: *Espectro de radiação solar visível.* (Fonte: Peter Hermes Furian / Shutterstock.com)

Isaac Newton demonstrou, em 1665-66, que a luz branca, como a luz do Sol, ao passar por um prisma se decompõe em luz de diferentes cores, formando um espectro como o arco-íris. Posteriormente em 1802, William Hyde Wollaston (1766-1828), percebeu que quando a luz solar passa por uma fenda, e depois por um prisma, surgiam linhas escuras no espectro, que foram por ele interpretadas como limite das cores, onde tais linhas são imagens da fenda do espectrógrafo em diferentes comprimentos de onda.

Até 1820 o alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826) já havia contado 574 linhas escuras no espectro solar, que posteriormente ficaram conhecida como linhas de Fraunhofer. Tais linhas foram nomeadas com letras maiúsculas (A, B, C, etc) para linhas mais fortes e minúsculas para as mais fracas, começando com A no vermelho. Na verdade, Fraunhofer utilizava as linhas do espectro solar para calibrar instrumentos (vidros e prismas). Com pequenas variações na quantidade e mistura de quartzo (SiO_2), cal (CaO) e soda (carbonato de sódio, Na_2CO_3) que compõem o vidro, fez com que os prismas deslocassem o comprimento de onda em diferentes ângulos.

Em 1856, o químico alemão Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) criou um bico de gás (bico de Bunsen), cuja característica era ter uma chama incolor e quando um elemento era posto sobre a chama, as cores emitidas eram da substância e não da chama. Posteriormente, o físico Gustava Robert Kirchhoff (1824-1887) que era colaborador de Bunsen, sugeriu a passagem das cores por um prisma de forma que ficassem mais distinguidas. Posicionaram um prisma na frente de um conjunto de lentes e passaram a identificar as linhas com os elementos químicos. Descobriram que cada elemento gerava uma série de linhas diferentes, onde essas linhas eram todas brilhantes,

enquanto que as linhas de Fraunhofer eram escuras.

O objetivo de Kirchhoff era confirmar que as linhas escuras D descobertas por Fraunhofer eram linhas de sódio. Para demonstrar, ele passou a luz de um sólido quente através de uma chama de sódio, a luz que passava pela chama apresentava as mesmas linhas escuras do Sol, na posição das linhas de sódio. Kirchhoff então concluiu que o Sol era um gás ou sólido quente, envolto por um gás mais frio. A partir de suas experiências ele formulou as três leis empíricas da espectroscopia, que estabeleciam:

- Espectro contínuo: Um corpo opaco quente, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo.
- Espectro de emissão: um gás transparente (pouco denso), produz um espectro de linhas brilhantes. O número e a cor (posição) dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás.
- Espectro de absorção: se um espectro contínuo passar por um gás a temperatura mais baixa, o gás frio causa a presença de linhas escuras (absorção). O número e a posição dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás.

No início do século XX, os cientistas começaram a estabelecer as bases para a compreensão da formação dos espectros à medida que começaram a aprender mais sobre a estrutura dos átomos e a natureza da luz.

Em 1909 Ernest Rutherford (1871-1937), auxiliado por Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), conduziram um experimento onde partículas alfa (íons de hélio) foram bombardeadas em uma folha de ouro, resultando que 1 em cada 20000 partículas incidentes eram refletidas na mesma direção de incidência. Eles demonstraram que os átomos são compostos de um pequeno núcleo, com carga elétrica positiva, rodeado por uma nuvem de elétrons, com carga negativa. Se esses elétrons estivessem parados, seriam atraídos para o núcleo devido a ação de força coulombiana.

Rutherford propôs que os elétrons estariam girando em torno do núcleo em órbitas circulares. Entretanto, isso não resolvia o problema da estabilidade do núcleo, pois cargas elétricas aceleradas emitem energia e a perda de energia faria os elétrons espiralarem em direção ao núcleo, emitindo radiação em todos os comprimentos de onda e tornando os átomos instáveis. Sabemos, porém, que os átomos são estáveis, além disso, era conhecido através dos estudos dos espectros de emissão que, quando os átomos emitem radiação, o fazem em certos comprimentos de onda específicos de cada elemento e não em todos os comprimentos de onda. Isso levantou suspeitas de que as leis da mecânica clássica não se aplicavam totalmente aos átomos, propiciando assim o surgimento da mecânica quântica.

O cientista alemão Max Planck (1858-1947), em 1900, criou o modelo da quantização de luz, segundo o qual a matéria emite luz em pacotes de energia, que ele denominou de quanta. Em 1905 o cientista alemão Albert Einstein (1879-1955), estudando o efeito fotoelétrico, usou

a ideia da quantização e assumiu que cada quantum de luz, ou fóton, tem uma energia E dada pela Eq (2.1) .

$$E = \lambda\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

Onde λ representa o comprimento de onda e ν é a frequência de radiação. O h é a constante de Planck, é exibida na Eq (2.2) , e c é a velocidade da luz, representada na Eq (2.3) .

$$h = 6,63 \times 10^{-34} Js \quad (2.2)$$

$$c = 300000 km/s \quad (2.3)$$

Em 1924, Louis de Broglie (1892-1987) mostrou que o momento de cada fóton p , ou qualquer partícula, é dado pela Eq (2.4) .

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c} \quad (2.4)$$

Louis de Broglie também propôs que os elétrons de um átomo só pudessem ocupar níveis quantizados, o que mais tarde foi melhor explicado com a formulação da mecânica quântica por Erwin Schrödinger (1887-1961).

2.2 O EFEITO FOTOELÉTRICO

Em 1839 o físico francês Edmond Becquerel (1820-1891) descobriu o efeito fotoelétrico, que consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Para uma melhor compreensão, é necessário estudar previamente os conceitos sobre os átomos, elétrons e banda de energia.

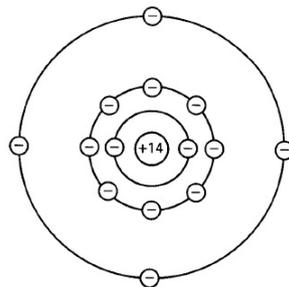


Figura 2.2: Representação de um átomo de silício com $N=14$. (Fonte:Frontin, et al., 2017)

Os elementos são compostos de prótons e nêutrons, que estão concentrados em seu núcleo, e elétrons que orbitam em sua volta com diferentes níveis de energia. Quanto menor a energia do elétron, maior será sua proximidade do núcleo. Isso pode ser observado na Fig. 2.2 .

O átomo de silício, apresentado na Fig. 2.2 , com número atômico $N=14$, possui três órbitas ao redor do núcleo. Como o silício tem 4 elétrons em sua camada mais externa, ele faz quatro ligações covalentes com outros 4 átomos vizinhos, permitindo que todos tenham suas órbitas completas, com 8 elétrons cada, criando uma estrutura cristalina. Entretanto, essa ligação covalente pode ser quebrada caso o elétron receba energia suficiente para se afastar ainda mais do núcleo, ficando livre de sua atração. Quando isso acontece, uma lacuna fica na banda de valência, devido à ausência do elétron, criando assim um par elétron-lacuna, devido ao aumento de energia do elétron.

Caso esse elétron livre altamente energizado seja canalizado para um circuito, será criada uma corrente elétrica. Porém, em uma configuração na qual haja somente silício, tal fenômeno não ocorre, pois o elétron associa-se novamente com a lacuna, deixando a banda de condução e retornando para a banda de valência, convertendo a energia obtida em calor. Para que a corrente seja produzida é necessário um processo de aceleração do elétron livre para fora do material, que pode ser realizado através de um campo elétrico.

O material das células solares possui um campo elétrico permanente, gerado por meio da dopagem do material semiconductor. Quando átomos com cinco elétrons de ligação na última camada de valência são adicionados ao silício, por exemplo, o fósforo, a estrutura cristalina é realizada de tal forma que os 4 elétrons do fósforo sejam ligados ao silício, mas o quinto elétron não realiza nenhuma ligação, ficando assim fracamente ligado ao núcleo. Quando esse elétron recebe pouca energia térmica, disponível a temperatura ambiente, ele é então liberado e enviado para a banda de condução. Sendo assim, o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n .

Se átomos com três elétrons na última camada de valência forem adicionados ao silício, como por exemplo o boro, uma das ligações das 4 ligações do silício não será formada, criando uma lacuna. Analogamente ao caso anterior, com pouca energia térmica, um elétron vizinho pode passar a essa posição, fazendo a lacuna deslocar-se. O boro é um aceitador de elétrons e denomina-se dopante p ou impureza p . Esses exemplos podem ser observados na Fig. 2.3.

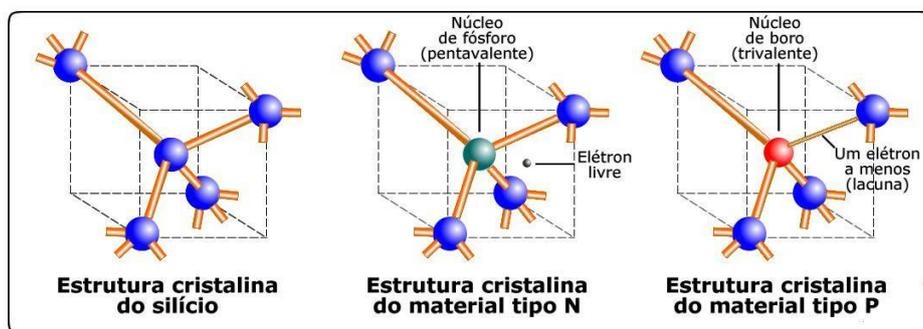


Figura 2.3: Estruturas cristalinas do silício puro, do tipo n com fósforo e do tipo p com boro. (Fonte: <http://nerdeletrico.blogspot.com.br/2011/09/uma-introducao-aos-semicondutores.html>)

Vale ressaltar que adicionar essas impurezas não torna o cristal carregado eletricamente, pois a quantidade de cargas negativas (elétrons) continua igual à das cargas positivas (prótons).

O que ocorre é que existem elétrons que não fazem parte da ligação covalente e, por isso, possuem maior liberdade para se movimentar.

Tanto um cristal p , quanto um cristal n , se comportam como condutores, pois ambos possuem portadores de carga livre. No caso do cristal tipo n os portadores são os elétrons, enquanto no cristal tipo p é a ausência de elétrons, ou seja, as lacunas. Então, quando o silício do tipo n entra em contato com o silício do tipo p , os elétrons livres do lado n preenchem as lacunas do lado p . Assim, a camada n fica positivamente carregada e a camada p negativamente carregada. Essas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente, dificultando a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p . O processo atinge o equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira de potencial capaz de barrar os elétrons livres remanescentes do lado n .

Tem-se assim, as condições necessárias para que ocorra o efeito fotoelétrico, pois quando um elétron do lado p recebe energia suficiente do fóton da luz solar e move-se para a banda de condução, criando o par elétron-lacuna, o campo elétrico permanente envia para o lado n , não permitindo sua volta, ao mesmo tempo que repele a lacuna para o extremo lado p .

Ao ligar-se contatos nas duas extremidades do material semiconductor dopado para que o elétron seja coletado da camada n , passe pela carga elétrica externa e retorne para a lacuna que o aguarda na camada p , tem-se a produção de energia elétrica. A energia gerada pelo painel solar é de procedência do fóton da radiação solar, o que possibilita o elétron migrar da banda de valência para a banda de condução.

O diagrama de energia para junção p-n, sob iluminação pode ser observado na Fig. 2.4

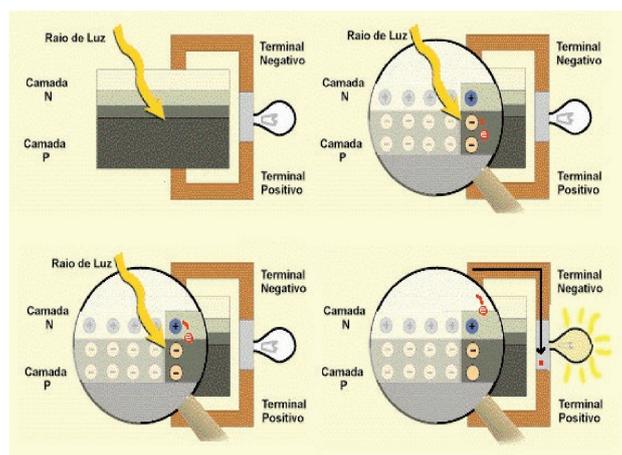


Figura 2.4: *Funcionamento de uma célula fotovoltaica.*
(Fonte: Frontin, et al., 2017)

Nos semicondutores existe uma banda proibida, onde não podem existir elétrons ou lacunas. Logo, o fóton deve fornecer energia suficiente para que o elétron ultrapasse essa banda proibida. O fator-chave para determinar se um fóton é absorvido ou transmitido é a sua energia (E_{ph}) e sua relação com a lacuna de energia (E_g) do material semiconductor. Têm-se as seguintes possibilidades acerca da incidência dos fótons. Com efeito, as três possibilidades são mostradas

na Fig. 2.5.

- $E_{ph} < E_g$: O fóton interage apenas fracamente com os semicondutores, passando por ele, que é o caso de fótons de baixa energia, como visto na Fig.2.6;
- $E_{ph} = E_g$: O fóton tem a energia certa para criar um par elétron-lacuna e depois é absorvido com eficiência, como pode se ver na zona vermelha na Fig. 2.6;
- $E_{ph} > E_g$: O fóton move o elétron para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência. O par elétron-lacuna libera energia em excesso para E_g como calor e libera a energia do elétron-lacuna, $E_{e-g} = E_g$ às extremidades da banda, que é o caso de fótons de alta energia, como visto na Fig. 2.6.

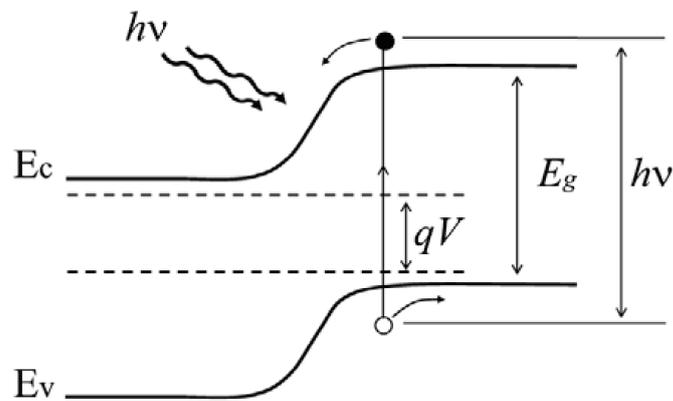


Figura 2.5: Diagrama de energia de uma junção p-n, sob iluminação. Fonte: (Frontin, et al., 2017)

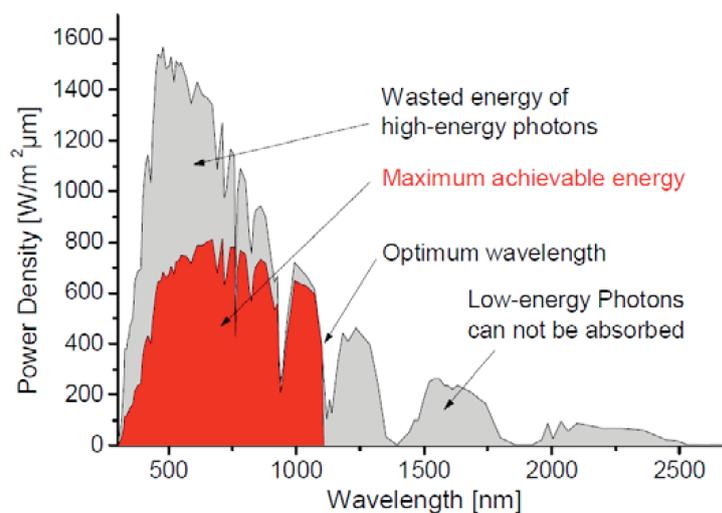


Figura 2.6: Perdas espectrais em uma célula solar. Fonte: (Frontin, et al., 2017)

2.3 DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA NO FÓTON SOLAR

O sol emite energia, principalmente, com radiação eletromagnética entre o ultravioleta e o infravermelho, como pode ser observado na Fig. 2.7 , onde o comprimento de onda varia de 0,2 a 3 μm .

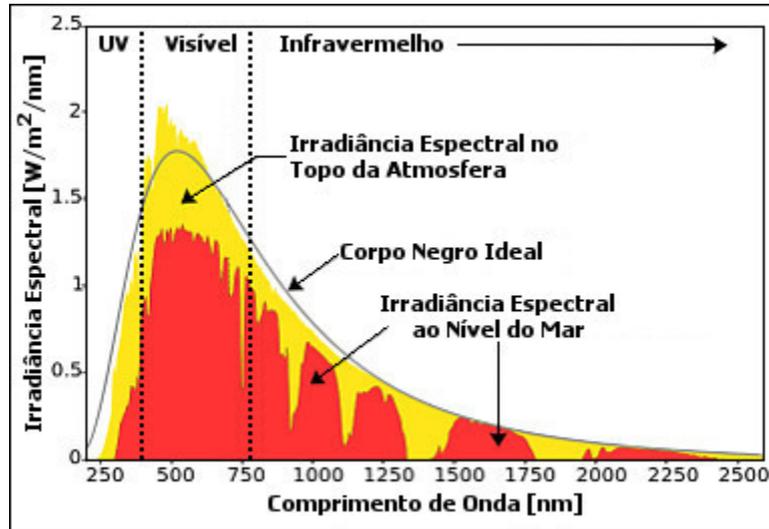


Figura 2.7: Distribuição Espectral da radiação solar. (Fonte: http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html)

Pela Eq. (2.1) é possível converter o comprimento de onda em energia do fóton, e a partir da distribuição espectral da radiação solar é possível perceber que a energia predominante na radiação solar, distribuída nas cores do espectro visível, é maior na radiação de menor comprimento de onda e maior temperatura. Isso pode ser observado na Tab. 2.1.

Tabela 2.1: Energia dos fótons predominantes na radiação solar. (Fonte: Frontin, et al., 2017)

Cor	Comprimento de Onda (nm)	Energia (eV)
Ultravioleta	0,200 a 0,380	3,26 a 6,20
Violeta	0,380 a 0,440	2,82 a 3,26
Azul	0,440 a 0,490	2,53 a 2,82
Verde	0,490 a 0,565	2,19 a 2,53
Amarelo	0,565 a 0,590	2,10 a 2,19
Laranja	0,590 a 0,630	1,97 a 2,10
Vermelho	0,630 a 0,780	1,59 a 1,97
Infravermelho	0,780 a 100	1,24 a 1,59

Tem-se então que os semicondutores que possuem a banda proibida da ordem de 1 eV são os mais adequados para as células solares, pois a maioria dos fótons possuem patamar superior a esse. Dentre os mais utilizados, podem ser citados: silício, arsenieto de gálio e telureto de cádmio.

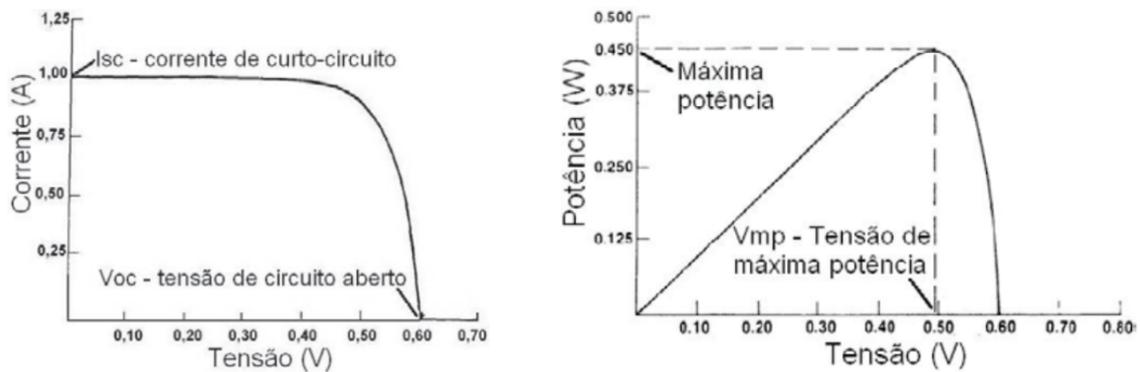
Porém, algumas considerações devem ser realizadas, por exemplo o silício, que possui um

valor de banda baixo, quando absorve uma grande quantidade de fótons, boa parte da energia é transformada em calor por possuir energia acima do potencial necessário. Caso contrário, um material com valor de banda mais alto, transforma menos energia em calor, todavia ele não absorve uma grande quantidade de fótons, deixando assim passar aqueles com energia inferior à sua banda.

Um outro fator que afeta o desempenho da absorção de fótons é a diminuição da banda de energia com o aumento da temperatura. Então uma grande exposição da célula solar ao Sol pode diminuir seu rendimento, o que será mais discutido a frente. Como uma maneira de melhorar a eficiência dos painéis fotovoltaicos é o emprego de mais de uma junção, em forma de cascata, possuindo diferentes bandas de energia, permitindo assim que a primeira absorva os fótons com mais energia, e possibilitando que os menos energéticos atravessem direto para a segunda junção, com uma banda menor, e assim por diante (Frontin, et al., 2017).

2.4 INFLUÊNCIA TEMPERATURA

As células fotovoltaicas possuem curvas características de corrente, tensão e potência, ilustradas nas Fig. 2.8a, 2.8b e 2.9 a seguir.



(a) Curva $I \times V$. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013) (b) Curva $P \times V$. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)

Figura 2.8: Curvas $I \times V$ e $P \times V$. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)

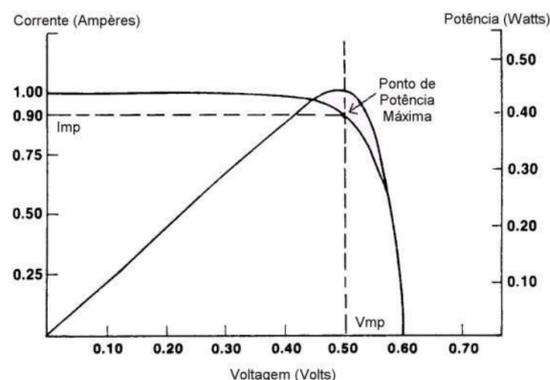
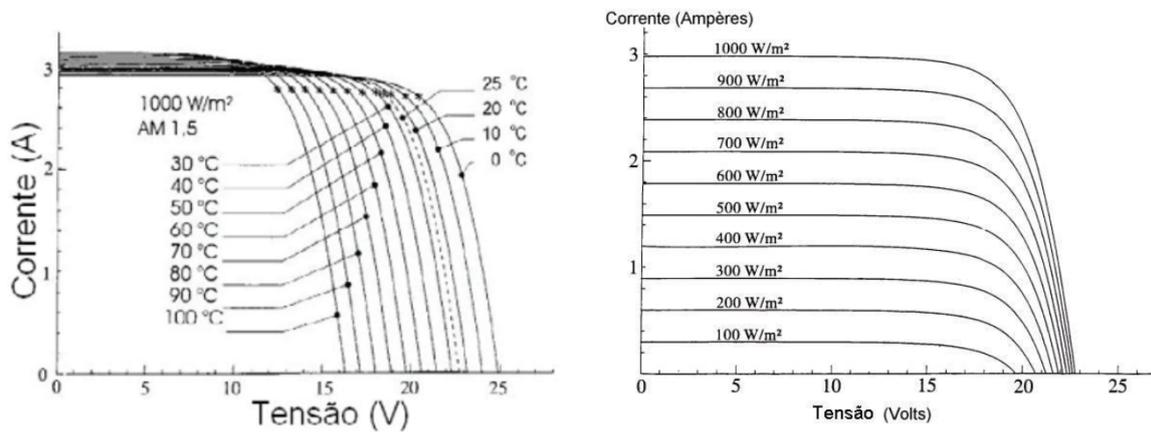


Figura 2.9: Curva $I \times V$ superposta à curva de potência. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)

A temperatura é um fator importante na geração de energia por painéis fotovoltaicos. Os gráficos são válidos em condições padrões de teste, com irradiância de $1kW/m^2$ e temperatura da célula de $25^{\circ}C$. Todavia, em uma aplicação real a temperatura da placa exposta a uma mesma irradiância será maior por estar diretamente exposta ao sol e por estar envolta de um invólucro como em um efeito estufa. Isso provoca uma alteração nas curvas características. A influência da variação da temperatura e da irradiância pode ser observada nas Fig 2.10a e 2.10b.



(a) Alteração curva $I \times V$ devido ao efeito da temperatura na célula.. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013) (b) Alteração curva $I \times V$ devido ao efeito da variação da irradiância incidente. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)

Figura 2.10: Influência da temperatura e da irradiância na curva $I \times V$. (Fonte: Jucá & Carvalho, 2013)

2.5 INCIDÊNCIA SOLAR SOBRE OS PAINÉIS

A energia solar é qualquer tipo de radiação eletromagnética proveniente do Sol. Toda a energia emitida pelo sol que atinge a superfície terrestre na forma de fótons, recebe o nome de radiação solar incidente. Diariamente os raios solares incidentes sobre a superfície da Terra proporcionam mais energia que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta durante um ano. O fluxo de radiação acumulado no tempo recebe o nome de irradiação, que normalmente é medida em $MJ/m^2.dia$. A grandeza que mede a radiação instantânea incidente sobre uma superfície é a irradiância, medida em W/m^2 (Campos, 2014).

Além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar representa uma fonte de energia, disponibilizando um enorme potencial de $1,5 \times 10^{18} kWh$ anualmente, que pode ser captado e convertido em outras formas de energia (Campos, 2014).

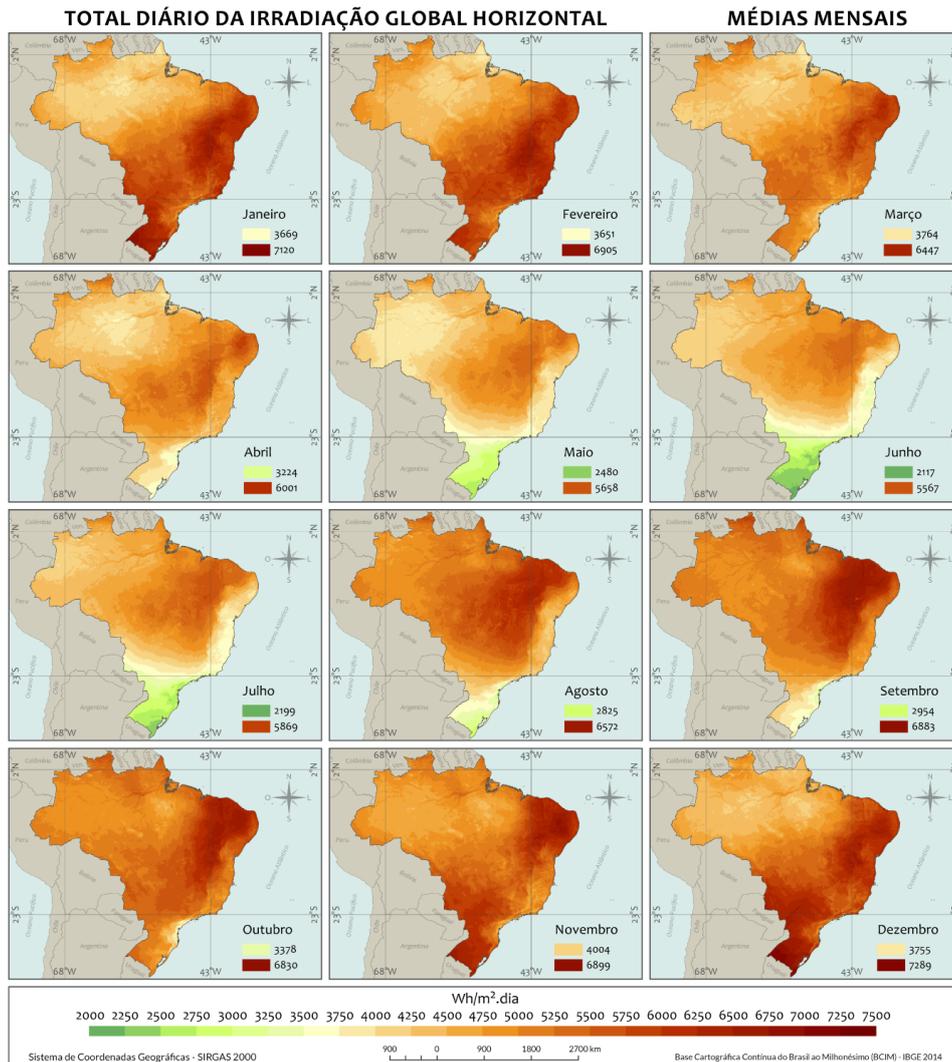


Figura 2.11: Mapa da irradiação solar global no Brasil. Fonte: (Pereira, et al., 2006)

No mapa apresentado na Fig. 2.11, pode-se verificar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas no país, variando de $4,24 \text{ kWh/m}^2\text{dia}$ até $6,5 \text{ kWh/m}^2\text{dia}$. De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia, a irradiância média gerada por dia pelo Sol é de 1367 W/m^2 , sendo denominada de constante solar (G_{sc}), definida como a irradiância sobre uma superfície normal aos raios solares, à distância média Terra-Sol, na ausência de atmosfera (Frontin, et al., 2017).

2.6 VARIAÇÃO DISTÂNCIA TERRA-SOL

O fato de a órbita terrestre ao redor do Sol possuir uma trajetória elíptica faz com que, em determinados períodos, o recurso solar seja disponibilizado de maneira não uniforme. A distância mínima, o periélio, é de $147,1 \times 10^6 \text{ km}$ e ocorre no dia 3 de janeiro, e a distância máxima, o afélio, é de $152,1 \times 10^6 \text{ km}$ e ocorre no dia 4 e 5 de outubro (Frontin, et al., 2017). Tem-se então que a distância média entre a Terra e o Sol é de $149,6 \times 10^6 \text{ km}$ (1ª Unidade

Astronômica UA). Por consequência desse intervalo, ocorre uma variação de $\pm 3\%$ do fluxo da radiação extraterrestre, que pode ser calculada através da Eq. (2.5).

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.5)$$

Onde G_{on} é a radiação extraterrestre medida em plano normal da radiação no n ésimo dia do ano. Essa variação da radiação durante os meses pode ser observada na Fig. 2.12, gerada pelos autores na plataforma MATLAB.

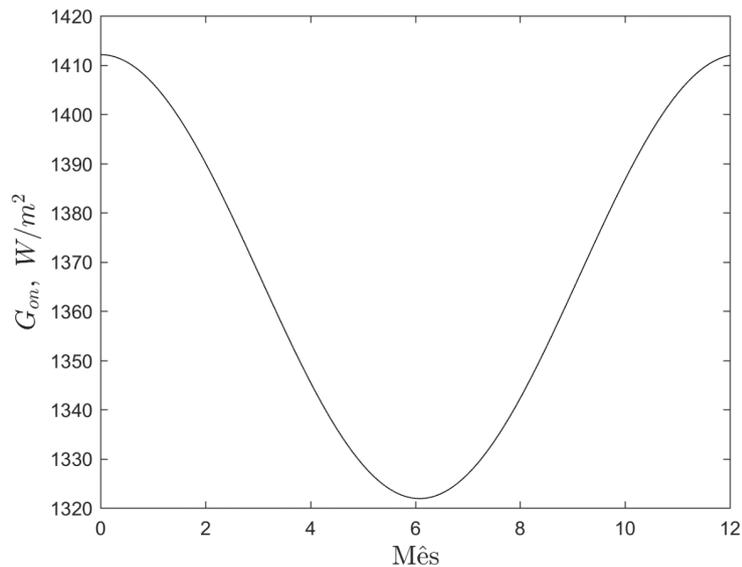


Figura 2.12: Variação da radiação extraterrestre com os meses do ano. (Fonte:Autor)

2.7 MOVIMENTO DE ROTAÇÃO DA TERRA

A Terra descreve um movimento de rotação ao redor de si a cada 24 horas, criando assim o dia e a noite, dando a sensação que o Sol se movimenta no sentido de leste para oeste diariamente. Tal movimento de rotação de 360° em aproximadamente 24 horas gera uma velocidade angular de 15° por hora, conhecida como ângulo de horário solar, definida como o ângulo diedro com a aresta no eixo de rotação da Terra, formada pelo semiplano que contém o Sol e o semiplano que contém o meridiano local. O esquema do movimento diário do sol pode ser observado na Fig 2.13.

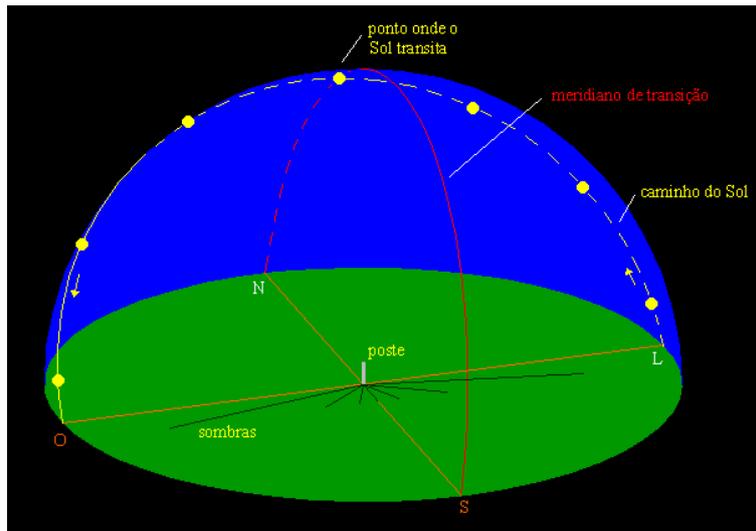


Figura 2.13: Movimento diário do Sol de leste para oeste. (Fonte: <http://www.astrosurf.com/skyscapes/disc/analema/analema.html>)

O símbolo atribuído para o ângulo horário é o ω , calculado através da Eq. (2.6), que varia de -180° à $+180^\circ$, sendo positivo para o período vespertino. Com efeito, o ângulo horário pode ser relacionado com as horas do dia, de modo que a relação entre o tempo solar verdadeiro (h_s) e o ângulo solar é descrita na Tab 2.2.

Tabela 2.2: Relação entre tempo solar verdadeiro e ângulo solar. Fonte: (Frontin, et al., 2017)

hs	...	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	...
ω	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	...

$$\omega = 15 (h_s - 12)^\circ \quad (2.6)$$

Entretanto, quando o ângulo solar estiver fora da faixa $-90^\circ < \omega < +90^\circ$ não há geração de energia fotovoltaica, pois será o período da noite, onde os raios solares não estão incidindo sobre o plano do painel. Portanto, o aproveitamento possível da energia solar ocorre em média em metade do dia (Frontin, et al., 2017).

2.8 INFLUÊNCIA DA MASSA DE AR (AM)

Os efeitos de absorção e espalhamento da radiação pela atmosfera são variáveis com o clima e condições atmosféricas (Duffie & Beckman, 1980). Pode-se definir a massa de ar como a razão entre o caminho óptico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção de zênite ao nível do mar (Frontin, et al., 2017). Existem diversas maneiras para estimar a quantidade de massa de ar. Geralmente elas estão em função do ângulo zenital. De acordo

com Duffie e Beckman (1980), uma forma de estimar a massa de ar é através da Eq. (2.7).

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.7)$$

Onde θ_z é ângulo entre a vertical e a linha do Sol, isto é, o ângulo de incidência da radiação direta com a superfície horizontal e pode ser observado na Fig. 2.14 (Duffie & Beckman, 1980).

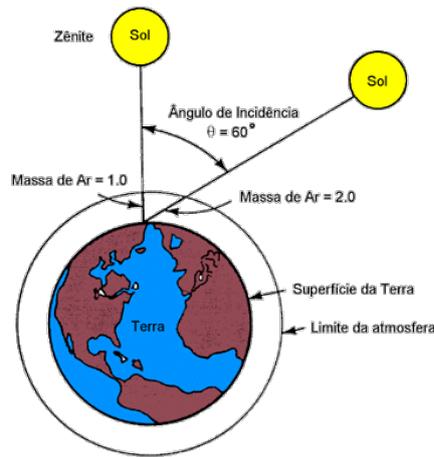


Figura 2.14: *Trajétória dos raios solares na atmosfera.*
(Fonte: (Frontin, et al., 2017))

A absorção e a dispersão de Rayleigh aumentam com a diminuição da altura solar. A dispersão devida a poluição do ar (difusão de Mie) varia consideravelmente conforme sua localização, sendo maior nas áreas industriais.

2.9 VARIAÇÃO DA DIREÇÃO DE INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES AO LONGO DO ANO

A radiação solar incidente sobre a Terra varia de acordo com a latitude local, hora e dia do ano. Isso ocorre devido à inclinação do eixo imaginário em torno do qual o planeta gira diariamente (movimento de rotação) e pela trajetória descrita pela Terra ao redor do Sol (movimento de translação). Pela a superfície do corpo terrestre ser quase esférica, isso faz com que a radiação solar não atinja sua superfície da mesma forma, devido à reflexão e absorção dos raios na atmosfera (GREENPRO, 2004). Somente parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, pois aproximadamente 19% é absorvida pelas nuvens e por outros gases, 30% são refletidas de volta ao espaço pelo solo, pelas nuvens e pela atmosfera e os 51% restantes da energia solar atingem o solo e é completamente absorvida (Pereira, et al., 2006). A Fig. 2.15 demonstra de forma didática o que acontece com a energia solar incidente na Terra.

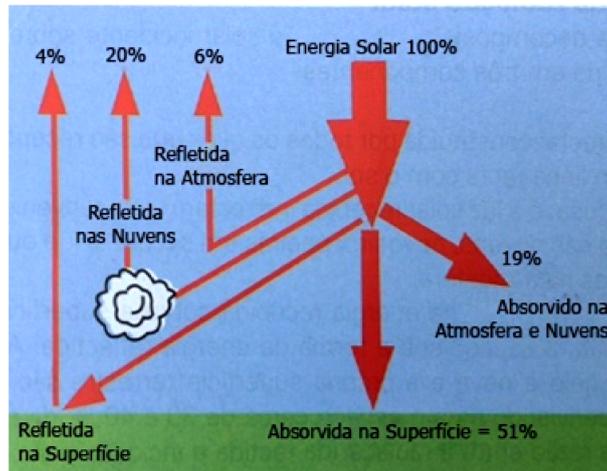


Figura 2.15: *Tipos de radiação incidente na Terra.*
(Fonte: Pereira, et al., 2006)

À medida que a Terra realiza o movimento de translação, a inclinação do eixo terrestre na direção da linha que liga a Terra ao Sol varia, sendo que o eixo em que o planeta gira ao redor de si é inclinado de $23,45^\circ$ em relação a este plano de movimento (plano da elíptica) e pode ser observado na Fig. 2.16 (Campos, 2014). O símbolo utilizado para a declinação solar é o δ , e a faixa de variação é de $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$, sendo, por convenção, positivo quando no hemisfério norte e negativo para o hemisfério sul. A Eq. (2.8) é utilizada para o cálculo da declinação solar, em graus, para cada dia do ano. A declinação calculada é de aproximadamente $0,4^\circ$ por dia, uma vez que a declinação solar permanece dentro de um intervalo de angulação (Frontin, 2017).

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360(284 + n)}{365} \right] \quad (2.8)$$

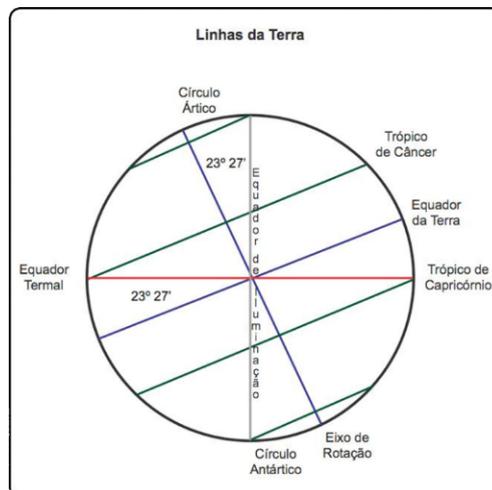


Figura 2.16: *Eixo de rotação da Terra inclinado em relação ao plano da elíptica.* (Fonte: <http://www.petroleoeecologia.com.br/>)

Essa inclinação do eixo da Terra faz com que a radiação incidida varie significativamente no decorrer do ano. Com isso, um observador situado no Trópico de Câncer tem a impressão de que o Sol está precisamente alinhado com ele no dia 22 de junho de cada ano o que se denomina Solstício e corresponde ao momento em que começa o verão no hemisfério norte, pois possui sua maior parte iluminada pelo Sol, enquanto que no hemisfério sul tem-se o início do inverno. Por outro lado, um observador no Trópico de Capricórnio tem a impressão de que o Sol está precisamente alinhado com ele no dia 22 de dezembro de cada ano, iniciando assim o verão no hemisfério sul e o inverno no hemisfério norte. Nos momentos que o movimento aparente do Sol está exatamente sobre o Equador ocorrem os equinócios nos dias 21 de março e 23 de setembro, dando início ao outono e à primavera nos hemisférios sul e norte, respectivamente. Temos assim as estações do ano, definidas na Fig. 2.17 com base no movimento de translação da Terra.

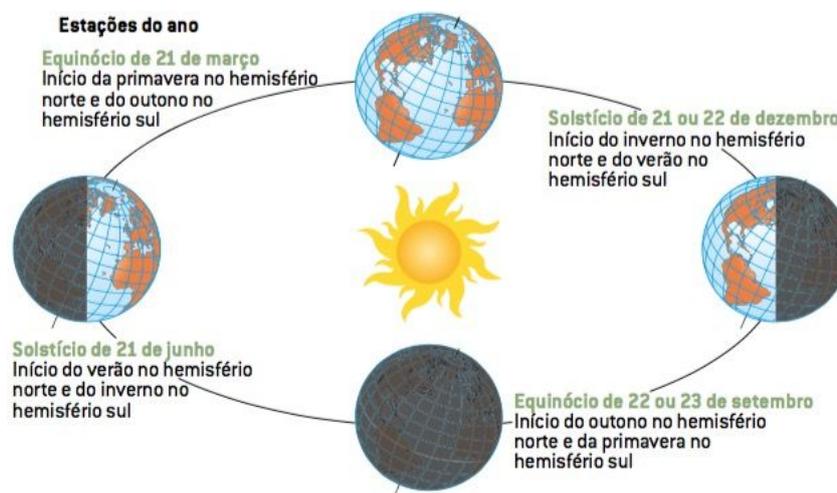


Figura 2.17: Caminho percorrido pela Terra no seu movimento em torno do Sol. (Fonte: <http://www.coladaweb.com/geografia/solsticios-equinocios>)

Tendo em vista que o Brasil é cortado pela linha do Equador e pelo trópico de Capricórnio, as visões das trajetórias do Sol são mais altas e inclinadas em relação ao plano horizonte, do que as da região situada no trópico de Capricórnio. Neste, a parte mais alta das trajetórias do inverno, da primavera e do outono continuam a passar pelo norte, mas a trajetória do dia no início do verão só passa pelo sul. Ademais, ao meio dia a altura do Sol é menor no inverno e maior no verão (Filho & Saraiva, 2004). É possível observar isso na Fig 2.18.

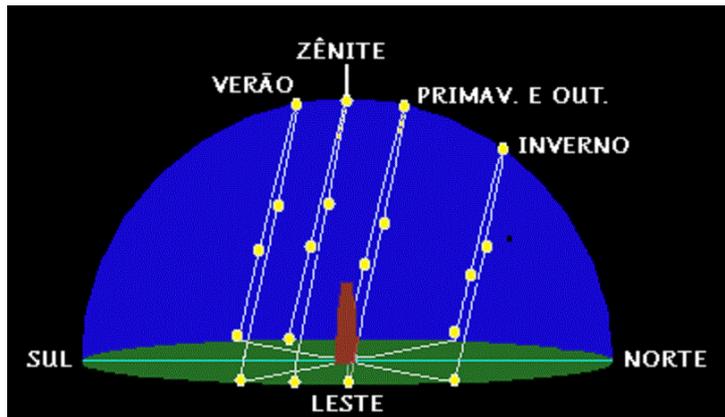


Figura 2.18: *Trajatória aparente do Sol entre o Equador e o Trópico de Capricórnio.* (Fonte: <http://www.casadaciencia.ufrj.br/CienciaParaPoetas/Astronomia/Tuparetama/arqueoastronomia/arquivos/17.html>)

A seguir, nas Fig. 2.19 e 2.20, estão representadas as cartas solares de Brasília para os dias do solstício de inverno e verão respectivamente, onde a carta solar, que é uma projeção estereográfica da abóbada celeste, num plano horizontal, representa todas as posições do Sol ao longo do ano. Além disso, as linhas curvas horizontais e verticais representam os meses e as horas do dia, respectivamente (RIBEIRO, 2003).

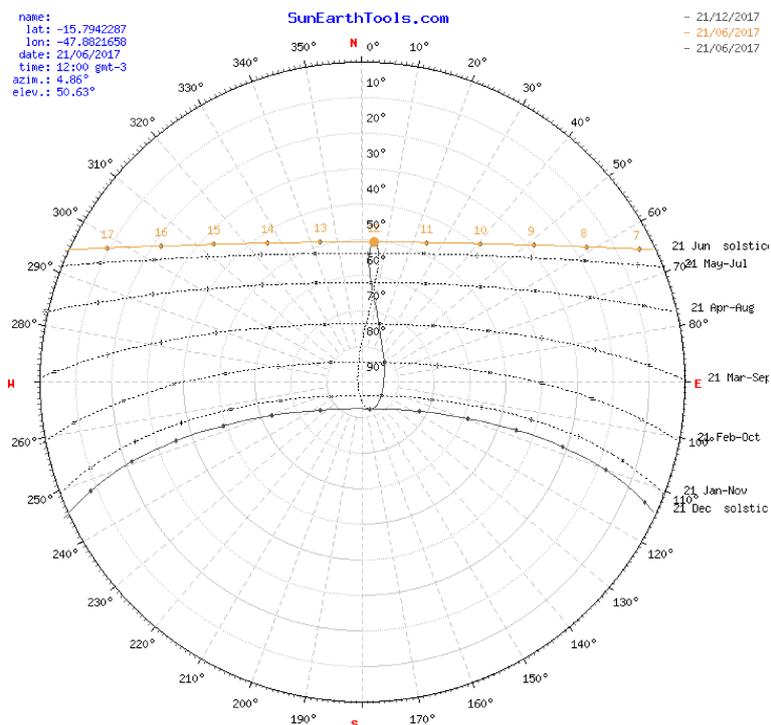


Figura 2.19: *Carta Solar Brasília no dia 21 de junho (solstício de inverno).* (Fonte: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?langpt#top)

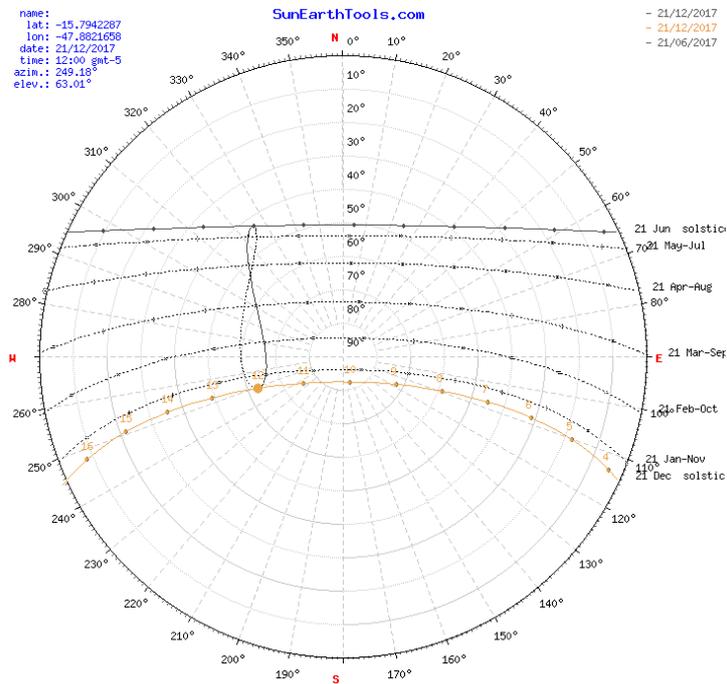


Figura 2.20: Carta Solar Brasília no dia 21 de dezembro (solstício de verão). (Fonte: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?langpt#top)

2.10 ÂNGULOS SOLARES

Como definido anteriormente, o ângulo zenital também pode ser definido como o ângulo de vértice no observador, formado pelas semirretas definidas pela direção do Sol e a vertical (Frontin, et al., 2017). Esse ângulo tem por símbolo θ_z onde sua faixa de variação é $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$, sendo calculado pela Eq. (2.9).

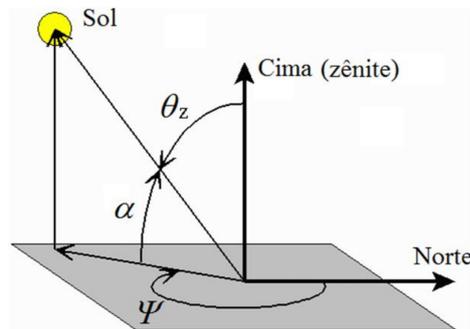


Figura 2.21: Ângulos solares. (Fonte Campos, 2014)

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) \quad (2.9)$$

Onde δ é a declinação, ω é o ângulo horário e ϕ é a latitude, onde a mesma é fixa para determinado local, variando de $-90^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ com valores positivos no hemisfério norte e negativos no hemisfério sul. Da Fig. 2.21 é possível observar o ângulos alfa (α) e o ângulo psi (ψ), onde o primeiro representa a altitude solar e o segundo o azimute.

A altitude solar é definida como o ângulo entre a superfície horizontal e a linha do Sol, isto é, o complemento do ângulo zenital (θ_z), sendo calculada pela Eq. (2.10). Em contrapartida, o azimute é o ângulo no plano da superfície da Terra, entre a direção do polo Norte e a projeção da trajetória de incidência direta solar na superfície terrestre, além disso, ele é positivo se medido no sentido horário a partir do polo Norte (Campos, 2014). A Eq. (2.11) é utilizada para o cálculo do azimute.

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (2.10)$$

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\alpha) \sin(\phi) + \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) \cos(\phi)} \quad (2.11)$$

2.11 FORMAS DE RADIAÇÃO

Radiação solar é o nome dado à energia radiante emitida pelo sol em forma de radiação eletromagnética. Parte dessa energia é emitida na forma de luz visível, enquanto o restante é emitida na forma de infravermelho, ultravioleta e outros comprimentos de onda.

De acordo com Duffie e Beckman (2013), a relação entre a radiação emitida pelo sol e a terra resulta em uma intensidade quase fixa da radiação extraterrestre incidente fora da atmosfera terrestre. Essa relação também permite encontrar a constante solar, que é a energia solar por unidade de tempo recebida em uma área unitária da superfície terrestre perpendicular à direção de propagação da radiação. O valor dessa constante é de $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$. A radiação extraterrestre incidente no plano normal pode ser calculada com base na Equação (2.5) para o n-ésimo dia Juliano.

Para a realização da estimativa da radiação solar incidente numa placa plana, é importante saber diferenciar radiação e irradiação. Radiação é a propagação da energia de um ponto a outro, podendo ser através de uma onda eletromagnética ou partícula. Irradiação é um conjunto de radiações emitidas por um corpo. Também é importante entender algumas definições, apresentadas por Duffie e Beckman (1980) e por Macagnan (2010):

- Radiação Direta: É a radiação solar que não foi dispersa ao atravessar a atmosfera terrestre e atinge a superfície, ou seja, é a radiação direta proveniente do sol e tem valor zero quando o sol está totalmente encoberto.
- Radiação Difusa: É a radiação recebida do sol após sua direção ser alterada devido à dispersão atmosférica e ainda assim consegue atingir a superfície terrestre. Pode ser interpretada como a claridade do céu quando o sol está totalmente encoberto.

- **Radiação Refletida:** É a taxa de radiação que atinge o solo ou outras superfícies e é refletida ao ponto analisado.
- **Radiação Global ou Total:** Radiação total incidente em um ponto da atmosfera, sendo resultado da soma das radiações direta e difusa.
- **Massa de ar (AM):** Proporção de massa atmosférica pela qual a radiação atravessa comparada com a massa atmosférica que a radiação atravessaria caso o sol estivesse no zênite.
- **Tempo solar:** Tempo baseado na movimentação do ângulo solar ao longo do céu no momento em que o sol cruza o meridiano do observador.
- **Irradiância ou Radiação Instantânea:** Taxa de energia radiante incidente sobre uma superfície por unidade de área da superfície. É expressa em $[W/m^2]$ e é simbolizado por G .
- **DNI - Irradiância Direta Normal:** É a radiação recebida diretamente do sol por unidade de área sem sofrer dispersão, sendo medida em uma superfície normal(perpendicular) aos raios solares. É expressa em $[W/m^2]$.
- **DHI - Irradiância Difusa Horizontal:** É a radiação solar que foi dispersa e incidiu sobre a superfície horizontal da placa. É expressa em $[W/m^2]$.
- **Irradiação (I_{TOT}):** É a energia incidente por unidade de área sobre uma superfície, obtida através da integração da Irradiância para um tempo específico, geralmente por 1 hora ou 1 dia.

A Fig. 2.22 representa o fluxo de energia radiante para com os efeitos importantes para o processo térmico solar.



Figura 2.22: Fluxo de energia radiante importante em um processo térmico. (Fonte Duffie e Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes* 1980)

A relação entre a radiação solar e um plano qualquer com uma orientação particular pode ser descrita de forma geométrica através da utilização de relações matemáticas para os ângulos.

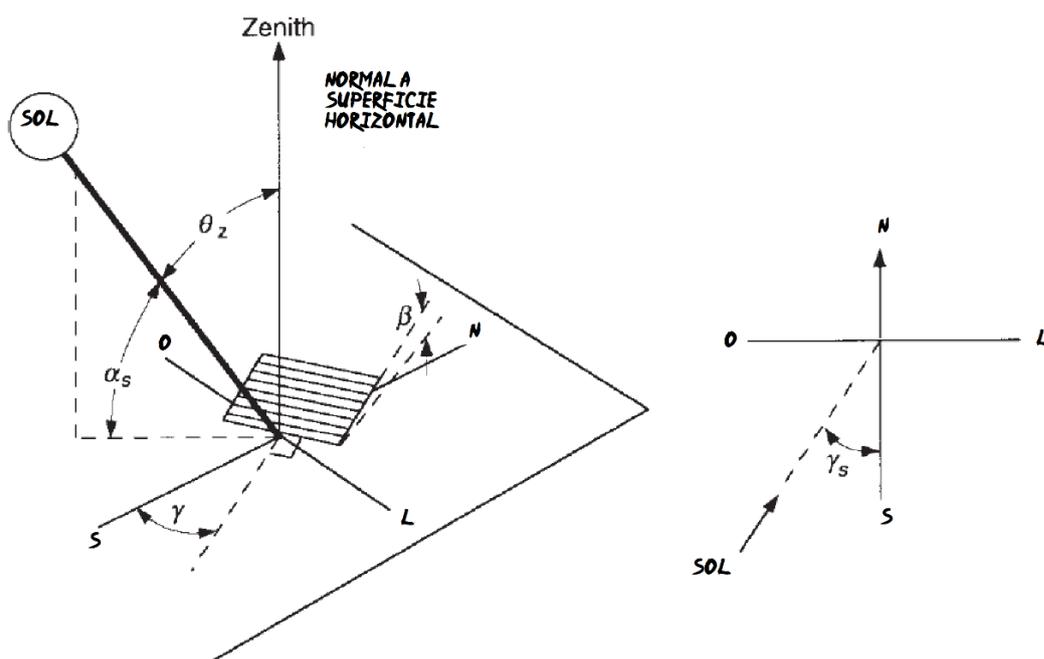


Figura 2.23: Representação dos ângulos para a relação entre a radiação solar e uma placa plana particular. (Fonte Duffie e Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes* 1980)

Alguns dos ângulos utilizados para os cálculos das radiações são apresentados na Fig.2.23 e são definidos com base no local e no posicionamento da placa, como: latitude (ϕ), longitude (φ), ângulo de inclinação da placa (β) e ângulo de azimute da placa (γ). A altitude solar corresponde ao complemento do ângulo de zênite e, assim como o azimute solar, pode ser definida com base na latitude do local, declinação e ângulo horário. Por fim, o ângulo de azimute solar (γ_s) é o deslocamento a partir do sul da projeção da radiação direta no plano horizontal (vista superior).

3 METODOLOGIA

Nessa etapa serão apresentadas as fórmulas e a metodologia de cálculo para estimar os ângulos de inclinação (β) da placa e a orientação de azimute (γ), que possibilitam ao painel uma maior exposição aos raios solares, fazendo com que a irradiância na placa atinja seus maiores valores absolutos. Deve-se salientar que o efeito da temperatura na placa para a conversão de energia não está sendo considerado.

Num primeiro momento fez-se um cálculo teórico baseado no modelo de Liu & Jordan (1960) para a irradiância em uma superfície inclinada em uma condição de céu isotrópico, desconsiderando-se a variação azimutal. Inicialmente deu-se enfoque à cidade de Brasília-DF, onde avaliou-se os efeitos da altitude com relação a irradiação. Posteriormente, realizou-se uma simulação para o ângulo de inclinação ótimo anual. analisou-se também a variação entre a irradiação direta e difusa anuais para Brasília, comparando-as com dados solarimétricos gerados pelo software System Advisor Model (SAM), do Typical Meteorological Year (TMY).

Em seguida gerou-se gráficos simulados e medidos a partir do SAM para o ângulo de inclinação (β) que intercepta a maior irradiância anual. Em seguida, gerou-se curvas de combinações entre os ângulos de inclinação β e o azimute da placa γ , onde observou-se a maior irradiância anual para as seguintes cidades brasileiras: Belém-PA, Manaus-AM, Petrolina-PE, Bom Jesus da Lapa-BA, Cuiabá-MT, Brasília-DF, Belo Horizonte-MG, São Paulo-SP, Curitiba-PR e Santa-Maria-RS. Posteriormente, estudou-se as influências climáticas nestas cidades. Escolheu-se as cidades de forma a contemplar a maior parte possível do território brasileiro.

3.1 ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO PARA CÉU CLARO

Segundo Duffie & Beckman (1980), os efeitos da atmosfera na dispersão e absorção da radiação são variáveis com o tempo, uma vez que a condição climática não é constante. De forma a facilitar os cálculos, foi considerada uma condição padrão de Céu Isotrópico com céu claro, de forma a obter os maiores níveis de radiação, uma vez que não se tem o controle exato das interferências climáticas na radiação global. Essa condição padrão permitirá o cálculo da radiação horária e diária que será recebida em uma superfície horizontal.

O modelo adotado é limitador, uma vez que a simulação é realizada para uma condição ideal de radiação, gerando valores maiores do que os reais. O clima e o relevo têm grande influência na parcela de radiação incidente na placa, porém são dados complexos e inviáveis de serem implementados em uma simulação numérica.

O modelo de Hottel é amplamente utilizado, apresentando resultados coerentes na maioria dos casos. Entretanto, Lewis (1986) fez uma análise do ângulo ótimo para um coletor solar onde concluiu que a proposta de Hottel(1942), a qual serviu de base para Liu & Jordan (1963), apresenta algumas deficiências. Elas são:

- Negligencia distribuição anisotrópica da componente da radiação difusa. Isso quer dizer

que a expressão do fator de correção para radiação direta (R_b) é inexata.

- Negligencia as horas da aurora e do ocaso, encurtando o período efetivo de radiação solar.
- Desconsidera a assimetria ao redor do meio dia solar para as radiações total e difusa.

A metodologia utilizada apresenta uma alta sensibilidade de variação da inclinação da placa para diferentes localidades (Lewis, 1986).

3.1.1 RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE SOBRE UMA SUPERFÍCIE NORMAL

Para o cálculo das radiações direta e difusa precisa-se utilizar a Eq. (2.5), a qual define a radiação extraterrestre medida no plano normal da radiação no n ésimo dia do ano (G_{on}). A nomenclatura dos fatores é um ponto importante a ser ressaltado. A irradiância é representada pela letra G [W/m^2]. A partir da irradiância tem-se a irradiação, que é a energia incidente por unidade de área sobre uma superfície, obtida através da integração da irradiância para um tempo específico de uma hora. Ela é definida pela variável I [MJ/m^2], onde ocorre uma mudança de unidade devido a divisão pelos segundos.

Quando é considerada uma insolação por um dia inteiro, usa-se a variável H [MJ/m^2], que possui a mesma unidade de I , porém, representa um período maior de insolação. Multiplicando o a constante solar por 1 hora representada em segundos ($3600s$), encontra-se a constante solar para insolação horária $I_{sc} = 4,921MJ/m^2$. A radiação extraterrestre medida no plano normal da radiação no n ésimo dia do ano (n) com o termo da constante solar substituído é representada na Eq. (3.1).

$$G_{on} = 1367 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (3.1)$$

3.1.2 RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE SOBRE UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL

O cálculo da radiação extraterrestre sobre uma superfície horizontal pouco difere do cálculo para um plano normal. Considerando a mesma área superficial, deve-se apenas acrescentar à formulação a inclinação entre os planos normal e horizontal. Sabe-se que essa angulação é equivalente ao cosseno do ângulo de zênite θ_z .

$$G_o = G_{on} \cos(\theta_z) \quad (3.2)$$

Substituindo a Eq.3.1 na Eq.3.2, tem-se a equação para a radiação extraterrestre sobre uma

superfície horizontal, representada na Eq.3.3.

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \cos(\theta_z) \quad (3.3)$$

Onde G_o representa a Radiação Extraterrestre sobre uma Superfície Horizontal e o $\cos(\theta_z)$ é apresentado na Eq. (2.9). Dessa forma, obtém-se a seguinte formulação

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) (\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta)) \quad (3.4)$$

Esse G_o pode ser usado para uma superfície horizontal a qualquer hora entre o nascer e o pôr-do-sol.

3.1.3 FATOR DE ATENUAÇÃO DA ATMOSFERA

Nos calculos de radiação, a massa de ar é significativa e interfere nos valores. Ela é representada através de um Fator de Atenuação da Atmosfera. Existem diversas maneiras de estimar a quantidade de massa de ar, como a apresentada a seguir por Hottel, (1976), onde foram considerados a transmissão de radiação direta em condição de céu claro (sem nuvens), no qual leva em consideração o ângulo zenital, a elevação com relação ao nível do mar e 4 diferentes climas. A Eq. (3.5) demonstra como se calcula esse Fator de Atenuação.

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\cos(\theta_z)}} \quad (3.5)$$

Onde τ_b é o fator de atenuação da atmosfera, e as constantes a_0 , a_1 e k são obtidas dos parâmetros a_0^* , a_1^* e k^* , que são definidos a partir de uma atmosfera padrão com uma visibilidade de $23Km$ e uma elevação inferior a $2,5Km$.

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2 \quad (3.6)$$

$$a_1^* = 0,5055 - 0,00995(6,5 - A)^2 \quad (3.7)$$

$$k^* = 0,2711 - 0,01858(2,5 - A)^2 \quad (3.8)$$

Onde A é a elevação em quilômetros. Os parâmetros a_0^* , a_1^* e k^* , que contabilizam a variação climática, são obtidos das Eq. (3.9), (3.10), (3.11), as quais representam os fatores de correção climática r_0 , r_1 e r_k .

$$r_0 = \frac{a_0}{a_0^*} \quad (3.9)$$

$$r_1 = \frac{a_1}{a_1^*} \quad (3.10)$$

$$r_k = \frac{k_0}{k^*} \quad (3.11)$$

Os fatores de correção climática estão descritos na Tab. 3.1.

Tabela 3.1: Fatores de correção para diferentes climas. Fonte: (Hottel, 1976)

Clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0,95	0,98	1,02
Temperado Verão	0,97	0,99	1,02
Subártico Verão	0,99	0,99	1,01
Temperado Inverno	1,01	1,01	1,00

Considerando uma elevação local de aproximadamente de 1061m, obtém-se os valores de a_0^* , a_1^* e k^* . Para o clima que mais se aproxima das características de Brasília, escolheu-se o clima Tropical, utilizando dessa forma, os valores tabelados para r_0 , r_1 e r_k . Em posse desses valores, é possível calcular as constantes a_0 , a_1 e k e dessa forma, encontrou-se o Fator de Atenuação da Atmosfera em questão. Vale ressaltar que para cálculos em outras latitudes, devem-se refazer todos os passos para encontrar o Fator de Atenuação da Atmosfera, uma vez que nenhuma fórmula relaciona a latitude e longitude com esse Fator.

3.1.4 RADIAÇÃO DIRETA

A transmitância da atmosfera padrão para radiação direta pode ser determinada para qualquer ângulo de zênite e para qualquer altitude A até 2,5km (Duffie & Beckman, 2013). Então, a radiação direta normal para uma condição de céu claro é definida na Eq. (3.12).

$$G_{cnb} = G_{on}\tau_b \quad (3.12)$$

A radiação direta utiliza um subíndice ‘b’, referente ao termo beam (feixe), simbolizando a radiação direta, uma vez que o subíndice utilizado para a radiação difusa é ‘d’. Dessa forma, evita-se confundir os termos associados à radiação direta e difusa.

Utilizando o mesmo princípio do cálculo da radiação extraterrestre sobre uma superfície horizontal, multiplica-se a radiação direta normal por $\cos(\theta_z)$ a fim de se obter a radiação direta horizontal. Logo, obtém-se a Eq. (3.13).

$$G_{cb} = G_{on}\tau_b\cos(\theta_z) \quad (3.13)$$

Dessa forma, tem-se a equação utilizada para o cálculo da radiação direta horizontal ($G_c b$) em uma condição de céu claro. Considerando que essa é a radiação instantânea que chega na superfície terrestre, pode-se considerar então que a Radiação Direta sobre uma placa plana é igual a Radiação Direta Horizontal, ou seja, $G_c b = G_b$. A partir dessa relação, obtém-se a Equação (3.14)

$$G_b = G_{on} \tau_b \cos(\theta_z) \quad (3.14)$$

Dessa forma, a irradiação direta para um período de 1 hora é (I_b):

$$I_b = I_{on} \tau_b \cos(\theta_z) \quad (3.15)$$

3.1.5 RADIAÇÃO DIFUSA

O cálculo da radiação total sobre uma placa plana depende também da estimativa de radiação difusa para céu claro numa superfície horizontal. Liu & Jordan (1960) desenvolveram uma relação empírica entre os coeficientes de transmissão de radiação direta e difusa para dias claros, obtendo um Fator de Correção para radiação difusa. Essa relação é demonstrada na Equação (3.16).

$$\tau_d = \frac{G_d}{G_o} = (0,271 - 0,294\tau_b) \quad (3.16)$$

O G_o pode ser obtido através da Equação (3.4)

Isolando o G_d e substituindo o valor de G_o , obtém-se a formulação final para o cálculo da radiação difusa, onde

$$G_d = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \\ (\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta)) (0,271 - 0,294\tau_b) \quad (3.17)$$

Por analogia com a Eq.3.15, foi obtida a Eq.3.18 .

$$I_d = I_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \\ (\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta)) (0,271 - 0,294\tau_b) \quad (3.18)$$

3.2 FATOR GEOMÉTRICO R_b

O fator geométrico R_b é a relação entre a radiação horária em uma superfície inclinada em relação àquela numa superfície horizontal, na ausência da atmosfera terrestre (Macagnan, 2010), ou seja, para uma condição de céu claro. O cálculo do R_b , a princípio, é simples e pode ser observado na Equação (3.19).

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (3.19)$$

A equação geral do ângulo de incidência da radiação direta em uma superfície (θ) relaciona alguns ângulos que foram apresentados anteriormente e é representada pela Equação (3.20).

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta)\sin(\phi)\cos(\beta) - \sin(\delta)\cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega) \\ & + \cos(\delta)\sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Segundo Duffie & Beckman (2013), as relações úteis para o ângulo de incidência das superfícies inclinadas para o norte ou para o sul podem ser derivadas do fato de que as superfícies com inclinação β para os dois hemisférios têm a mesma relação angular com a radiação direta como uma superfície horizontal em uma latitude artificial de $\theta - \beta$. Para o hemisfério norte, essa relação pode ser observada na Fig. 3.1.

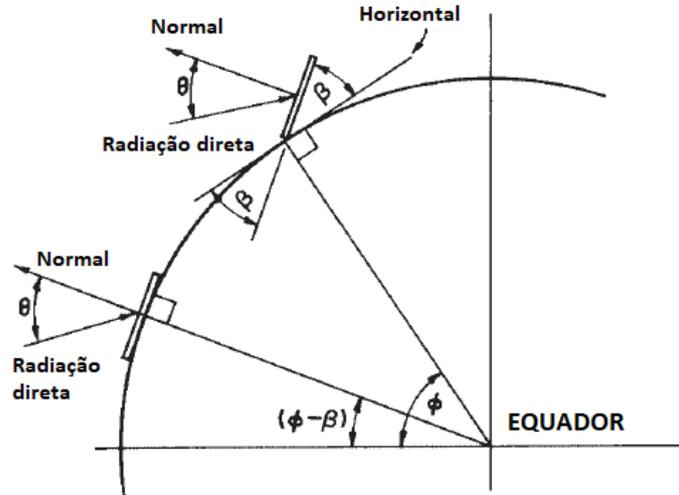


Figura 3.1: Seção da terra mostrando β , ϕ e θ . Tem-se $\phi - \beta$ para uma superfície voltada para o sul. (Fonte: Duffie & Beckman, 2013)

Dessa forma, o θ pode ser relacionado com os outros ângulos através da Eq. 3.21.

$$\cos(\theta) = \cos(\phi - \beta)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\phi - \beta)\sin(\beta) \quad (3.21)$$

Para o hemisfério sul a relação é semelhante, ocorrendo uma mudança apenas na relação

entre os ângulos, mudando de $\phi - \beta$ para $\phi + \beta$. Dessa, obtém-se a Equação (3.22) para o cálculo de θ .

$$\cos(\theta) = \cos(\phi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi + \beta) \sin(\beta) \quad (3.22)$$

Entretanto, o ângulo de azimute ótimo para um coletor de placa plana é geralmente 0° para o hemisfério norte e 180° para o hemisfério sul. Considerando que o estudo é realizado para uma latitude correspondente à cidade de Brasília, ou seja, para o hemisfério sul, e sabendo que o θ_z é demonstrado na Eq. (2.9), pode-se obter a formulação final para o cálculo do R_b .

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi + \beta) \sin(\beta)}{\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\beta)} \quad (3.23)$$

A Eq. (3.23) representa a formulação final para o cálculo do fator de correção para radiação direta R_b .

3.2.1 RADIAÇÃO EM UMA SUPERFÍCIE INCLINADA: CÉU ISOTRÓPICO

Isotropia é definida como algo que possui propriedades físicas constantes, independentemente da direção. Dito isso, pode-se assumir que a combinação entre a radiação difusa e a refletida no solo é isotrópica (Hottel & Woertz, 1942). Definindo uma condição de céu isotrópico e considerando a suposição feita por Hottel & Woertz (1942), tem-se que a soma da radiação difusa e refletida é sempre a mesma, independente da orientação da placa. Isso pode ser garantido ao considerar que ambas as radiações multiplicarão fatores relacionados à inclinação da placa (Duffie & Beckman, 2013).

Os fatores são definidos como Fator de forma para o céu (F_{c-s}), associado à radiação difusa, onde $F_{c-s} = (1 + \cos\beta)/2$ e Fator de forma para o chão, associado à radiação refletida, onde $F_{c-g} = (1 - \cos\beta)/2$. Caso a vizinhança tenha uma refletância difusa de ρ_g para a radiação solar total, a radiação refletida na superfície inclinada será $I\rho_g(1 - \cos\beta)/2$, onde I é a soma das radiações direta e difusa. O ρ_g é o albedo, que é a parte da radiação solar que chega a superfície da Terra e é refletida pelo ambiente do entorno. Considerou-se para o albedo um valor de uma superfície mista de concreto novo e concreto velho, dando um valor de 0,28.

Sabendo que a radiação direta sofre uma correção através do fator R_b , obtém-se a Equação (3.24).

$$I_t = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I\rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (3.24)$$

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIAÇÃO GLOBAL NO BRASIL

A irradiação incidente sobre uma placa varia com diversos fatores, como latitude, horário, clima e elevação. A fim de observar a influência da altitude nos valores da irradiação foi gerado o gráfico apresentado na Figura 4.1 para a latitude de Brasília ($\phi = -15,87^\circ$), considerando uma condição de céu claro e isotrópico.

Na Figura 4.1 é possível observar a grande variação de irradiação incidente na placa para diferentes altitudes. Ao considerar uma altitude média brasileira é introduzida uma tendência nos resultados, pois o relevo brasileiro influencia diretamente nas condições climáticas de cada região, que por sua vez influenciam na quantidade de irradiação que atinge o solo (Pereira, et al., 2017).

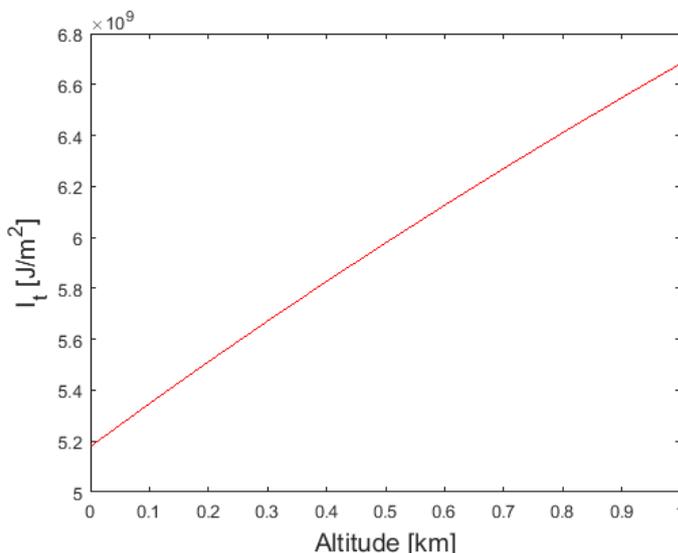


Figura 4.1: *Variação de Irradiação (I_t) anual com a altitude.*

Com o intuito de verificar a irradiação horizontal anual no Brasil, fez-se uma simulação no MATLAB com o ângulo de inclinação da placa travado em zero graus ($\beta = 0^\circ$) e variando a latitude de ($+05^\circ 16' 19\text{j}$), que corresponde à nascente do rio Ailã no extremo norte brasileiro até ($-033^\circ 45' 07\text{j}$), que corresponde ao extremo sul brasileiro, localizado no Arroio Chuí.

Definiu-se o clima tropical em todo território nacional para o fator de atenuação da atmosfera ($\rho = 0,28$), uma altitude média brasileira $A = 0,4\text{km}$ e os dados foram replicados ao longo das longitudes que abrangem o Brasil. Para a longitude, foi considerada a coordenada ($-034^\circ 47' 34\text{j}$) a leste e ($-073^\circ 59' 26\text{j}$) a oeste. Optou-se por uma altitude média devido as diferentes elevações das cidades brasileiras, o que ocasionaria em um trabalho complexo de obtenção de dados.

Nas Figuras 4.2 e 4.3, é possível observar a distribuição de irradiação horizontal no Brasil.

Elas apresentam, respectivamente, uma distribuição simulada em software MATLAB e dados medidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A obtenção da Fig. 4.2 deu-se com base na Eq. (3.24) com o ângulo de inclinação $\beta = 0$, ou seja, com o painel paralelo ao solo. A Figura 4.3 foi retirada do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

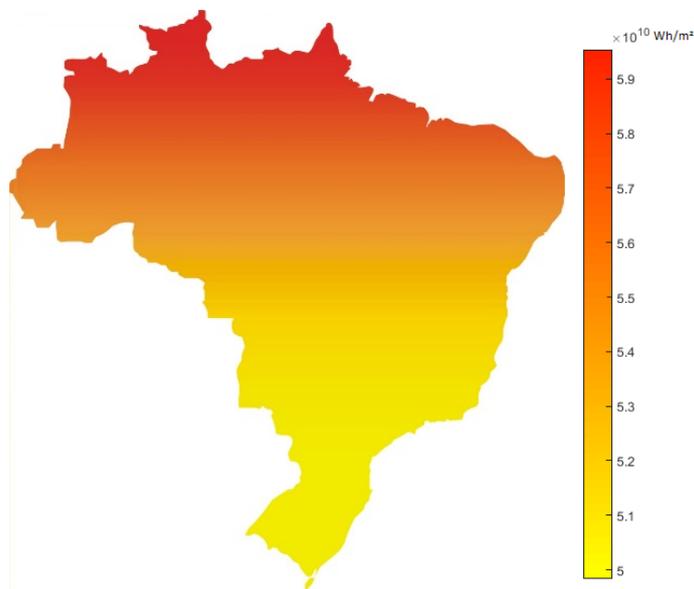


Figura 4.2: *Irradiação global horizontal anual simulada.*

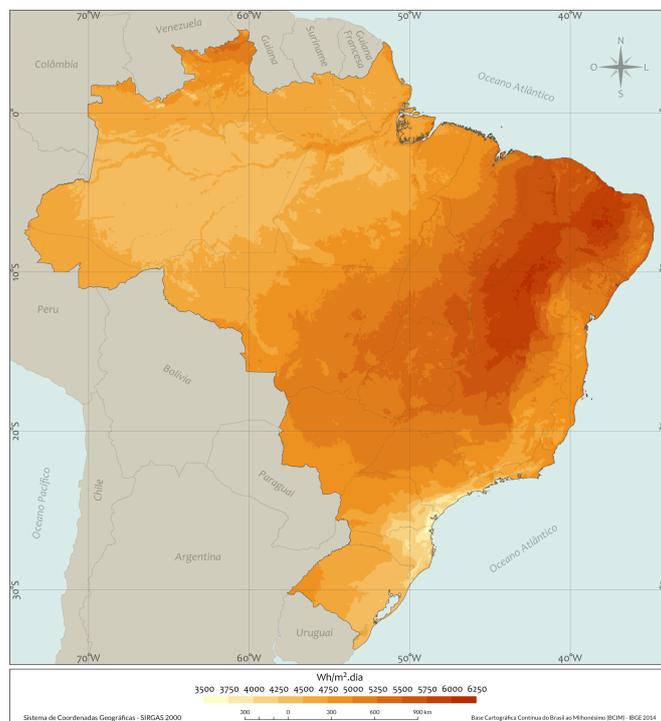


Figura 4.3: *Total diário da irradiação global horizontal. Fonte: (ATLAS)*

Comparando as Figuras 4.2 e 4.3 é possível identificar variações na irradiação devido, prin-

principalmente, às diferenças climáticas e de altitude. Outra condição relevante é a curvatura da Terra, ocasionando uma radiação maior no equador e decrescendo na direção de ambas as calotas polares (Frontin, et al., 2017). Por fim, devido à essas diferenças ao converter os valores de irradiação diária da Figura 4.3 para valores anuais, observou-se que a diferença absoluta dos valores de irradiação entre o mapa simulado e o medido é da ordem de 10^4 .

4.2 INFLUÊNCIA DO ALBEDO

O albedo é a refletividade difusa ou a reflexão da radiação em uma superfície com base nas suas propriedades. Ele também pode ser definido como a razão entre a quantidade de luz que é refletida por uma superfície e a quantidade de luz incidente sobre a mesma.

Diversos fatores alteram o albedo de um local, como: solo, vegetação, terrenos rochosos, asfalto, etc. Cada um desses fatores tem um valor tabelado. Entretanto, é difícil definir um valor para locais que possuem, por exemplo, um combinado de superfícies, como uma cidade, onde se encontra asfalto, mas também há árvores. Os valores simulados pelo System Advisor Model (SAM) são equivalentes a uma obtenção de dados em aeroportos. Dessa forma, assume-se um valor aproximado de $\rho = 0,28$, sendo este uma média entre o albedo para o concreto de uma construção recente ($\rho = 0,34$) e uma construção antiga ($\rho = 0,22$). Os valores do albedo são exibidos na Figura 4.4.

TIPOS DE SUPERFÍCIE	P_s	REF.
Água (Superfície Plana com Grande Ângulo de Incidência)	0,07	15
Asfalto	0,1	14
Brita ou Cascalho	0,2	15
Concreto (Construção Recente)	0,34	14
Concreto (Construção Antiga)	0,22	15
Estradas de Terra ou Barro	0,04	15
Florestas no Inverno (Coníferas)	0,07	15
Florestas no Outono (Zona Temperada), Campos Plantados Maduros, Plantas de Folhagem Clara	0,25	15
Folhas Secas caídas	0,3	15
Gramma Verde	0,26	15
Gramma Seca	0,2	15
Neve Recém Caída ou Com Camada de gelo	0,75	15
Solo de Terra ou Barro	0,14	15
Telhados ou Paredes Envelhecidas (Tijolos de barro), Tintas Escuras	0,27	15

Figura 4.4: Albedo para diferentes superfícies. Fonte: Silvestre (2016)

A fim de comparar a influência do albedo na radiação incidente numa superfície, gerou-se três gráficos para . Estes foram obtidos para a cidade de Brasília, variando apenas o valor do albedo. Os valores escolhidos para o albedo foram 0, 0,5 e 1. Para um ($\rho = 0$) têm-se que não existe nenhuma reflexão no painel e para ($\rho = 1$), toda irradiância refletida é incidida no painel.

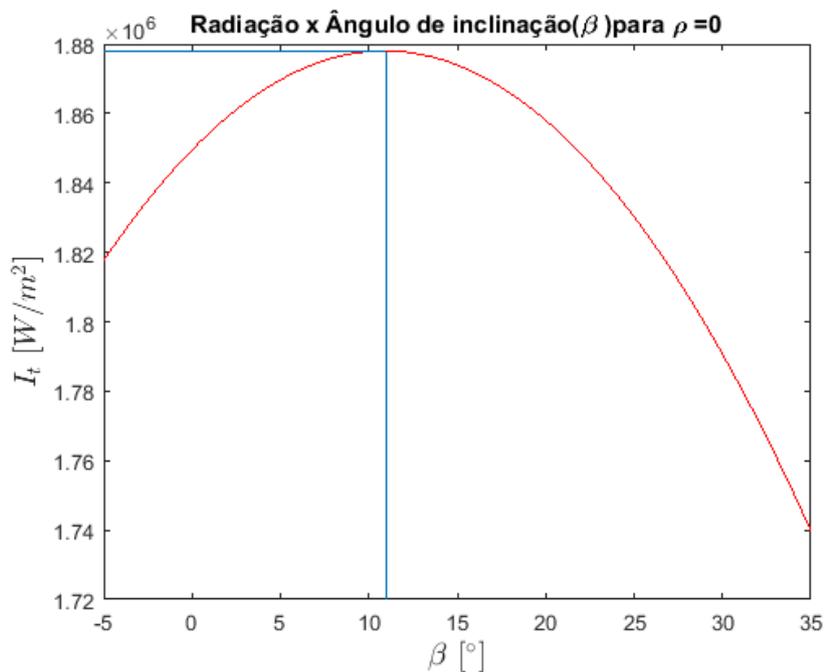


Figura 4.5: Albedo para $\rho = 0$.

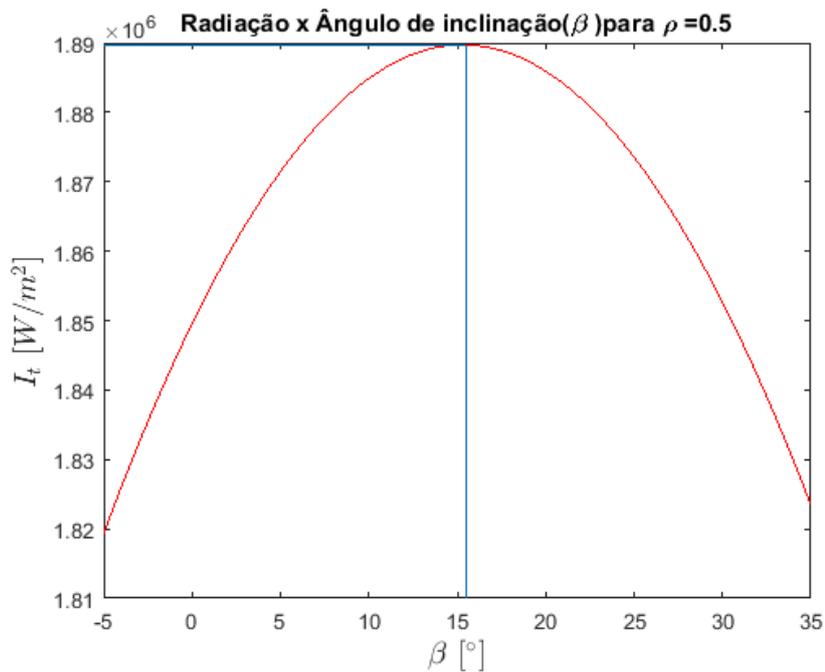


Figura 4.6: Albedo para $\rho = 0,5$.

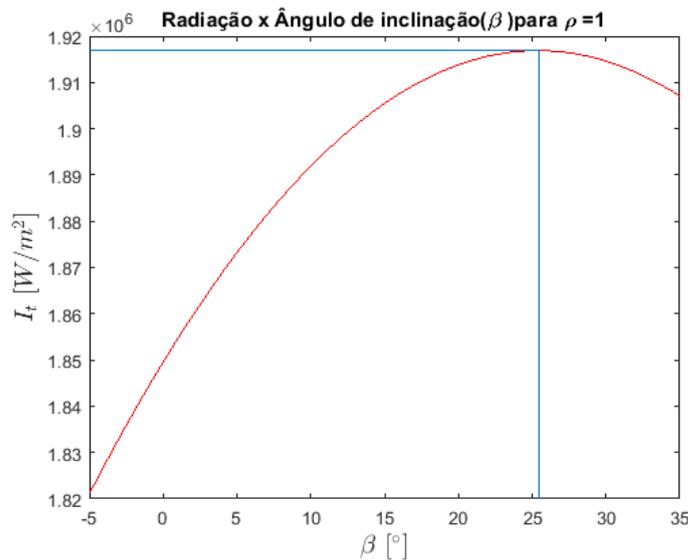


Figura 4.7: Albedo para $\rho = 1$.

Após a obtenção dos gráficos, foi observado a grande variação da irradiância total e da angulação ótima. Os maiores valores de irradiância foram observados para o caso do albedo igual a 1. Esse resultado pode ser explicado devido à alta reflexibilidade dos objetos próximos à placa, gerando uma maior quantidade de radiação refletida incidente na placa. Na Equação 3.24, obtida pelo modelo de Liu & Jordan (1963), também é possível observar a influência do albedo, uma vez que ele apresenta uma relação diretamente proporcional com a irradiância total.

Os gráficos também apresentaram um aumento na inclinação da placa a medida que o albedo aumentava. Isso ocorreu, pois, quanto mais inclinada em direção ao sol, maior é a quantidade de radiação refletida sobre a mesma. O fato da radiação tocar o solo e refletir em uma angulação próxima à de incidência, faz com que a placa obtenha uma maior quantidade de radiação quando posicionada de forma a captar a máxima radiação refletida, ou seja, quanto mais na vertical estiver, maior será essa captação.

4.3 VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SAZONAL E DIÁRIA

Diversos autores apresentam modelos matemáticos capazes de obter valores próximos dos reais para irradiância sobre uma placa plana. Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltáicos, como avaliação anual da disponibilidade de radiação solar é mais válido observar a irradiância média sobre um plano com inclinação igual à latitude e voltado para o Equador. Essa recomendação visa converter a maior quantidade de irradiância solar para o arranjo em uma posição fixa, pois, ao meio-dia solar, momento de menor massa de ar, os raios incidentes mais intensos estão perpendiculares ao plano óptico do painel, gerando maior aproveitamento (Frontin, et al., 2017).

A radiação solar é uma variável meteorológica afetada pela presença de nuvens sobre o céu, pois elas são atenuadoras de radiação solar ao absorver quase toda a radiação de comprimento

de onda do infravermelho, e de atenuar a radiação direta. Com isso, diferentes configurações climáticas resultam em diferentes padrões de radiação solar que atinge a placa (Campos, 2014).

As Figuras 4.8 à 4.19 apresentam as parcelas normalizadas entre a radiação direta normal (DNI) e a difusa (DHI) para todos os meses do ano da cidade de Brasília. Os dados foram gerados pelo software System Advisor Model (SAM), desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), que possui uma série completa e detalhada de simulações radiométricas baseadas em dados medidos, com uma precisão superior a 94% (Blair & Dobos, 2012). Os dados gerados têm por terminologia o nome Typical Meteorological Year (TMY).

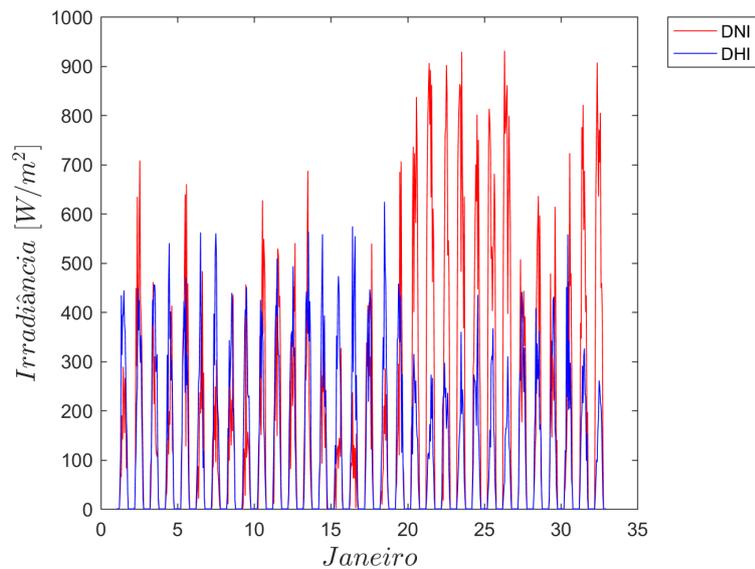


Figura 4.8: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Brasília.

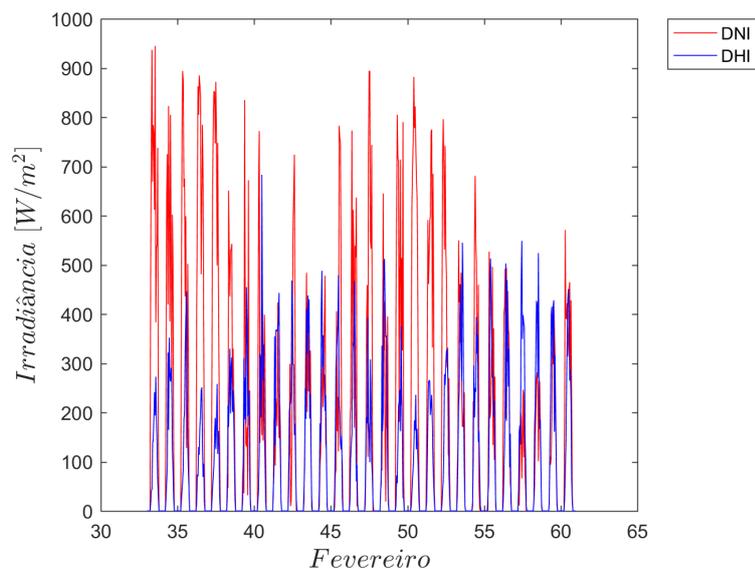


Figura 4.9: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Brasília.

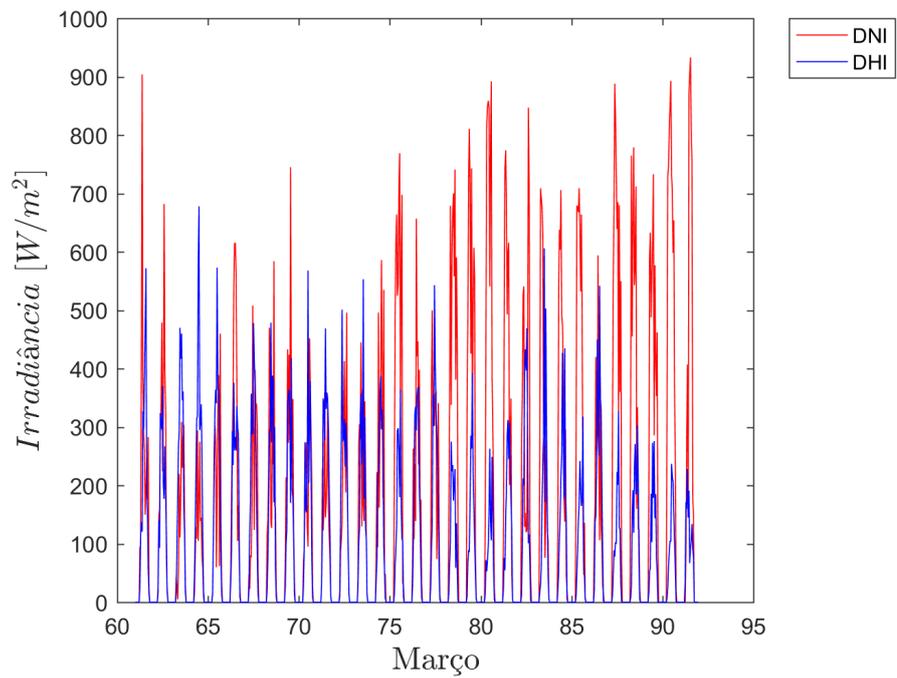


Figura 4.10: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Brasília-DF.

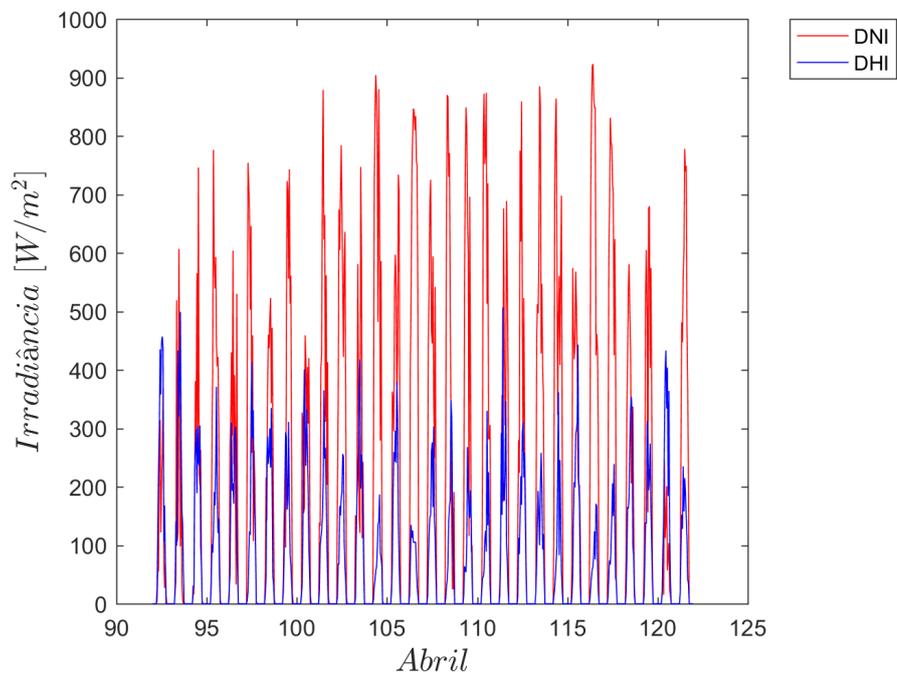


Figura 4.11: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Brasília-DF.

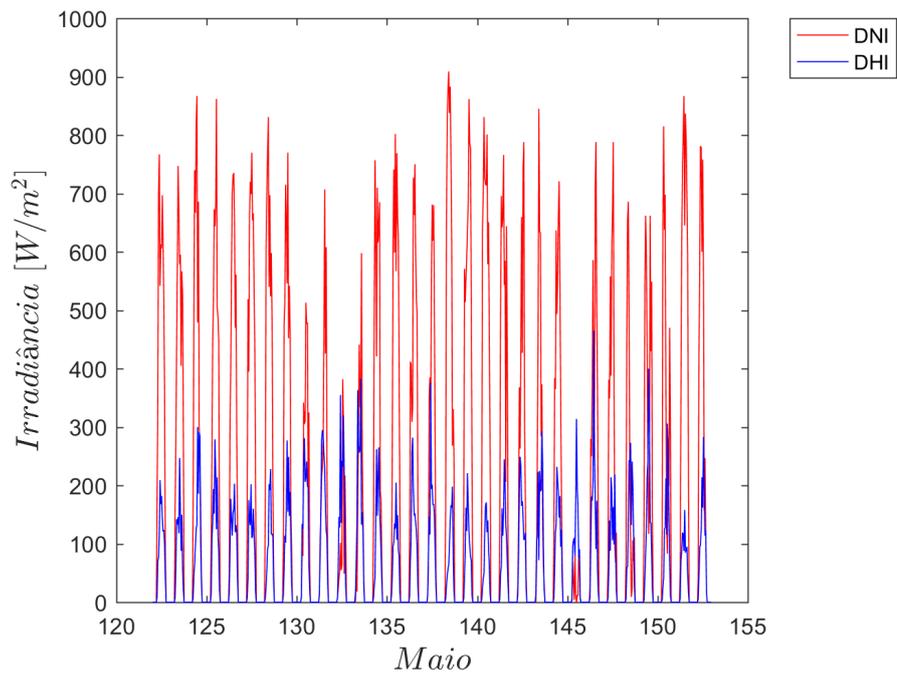


Figura 4.12: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Brasília-DF.

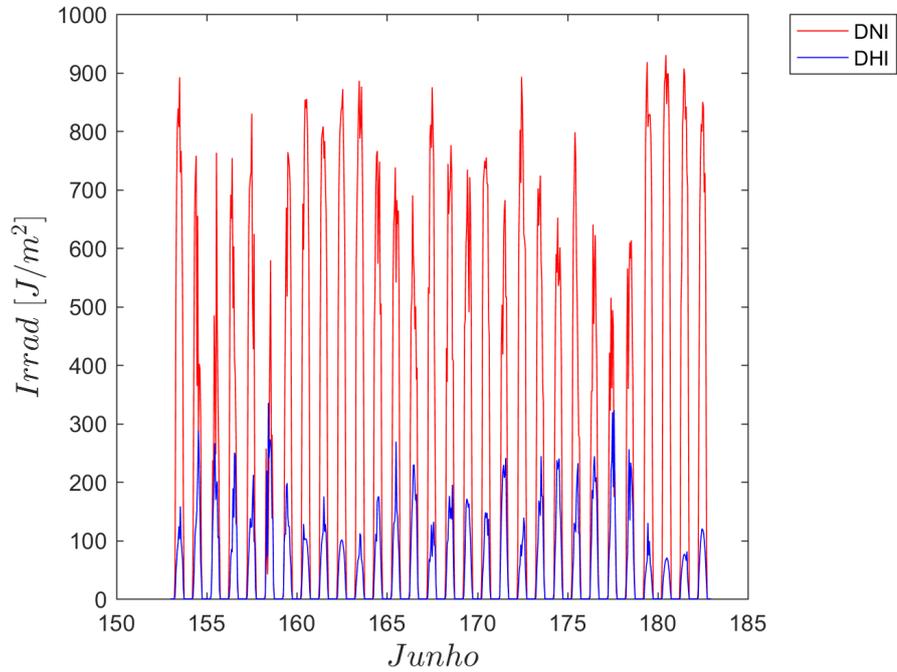


Figura 4.13: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Brasília-DF.

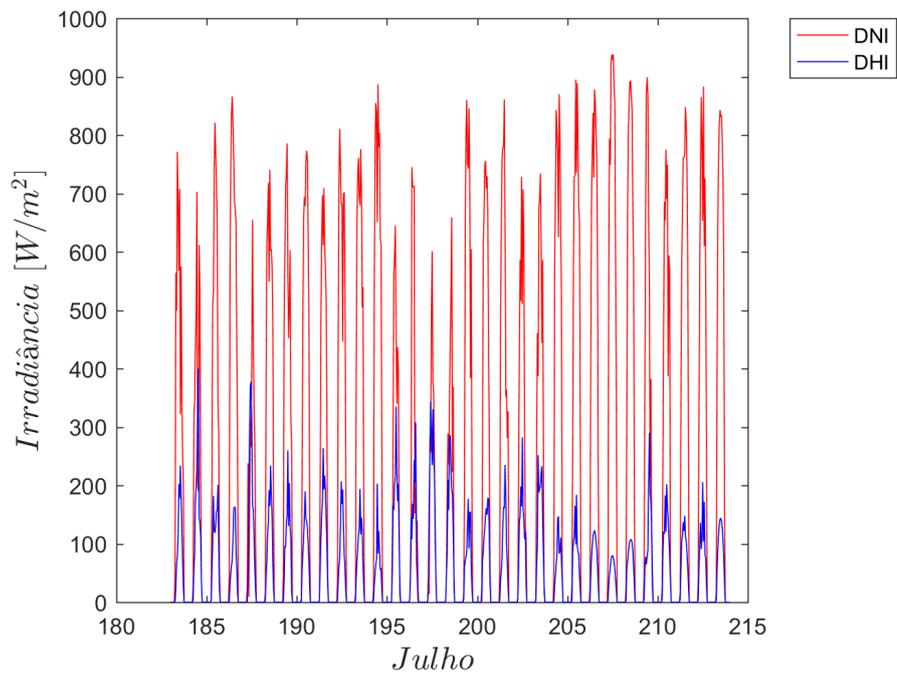


Figura 4.14: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Brasília-DF.

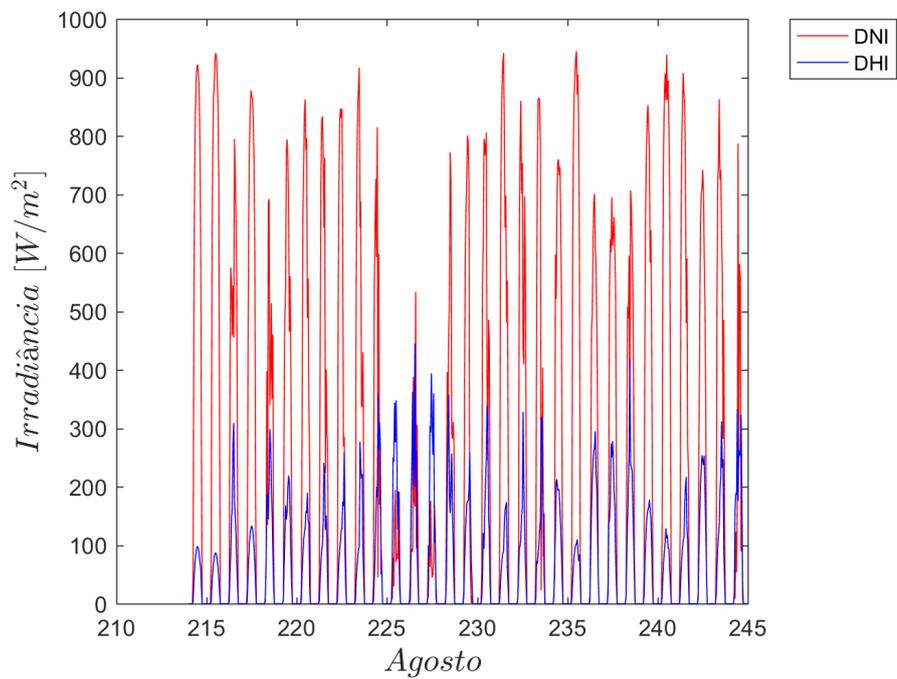


Figura 4.15: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Brasília-DF.

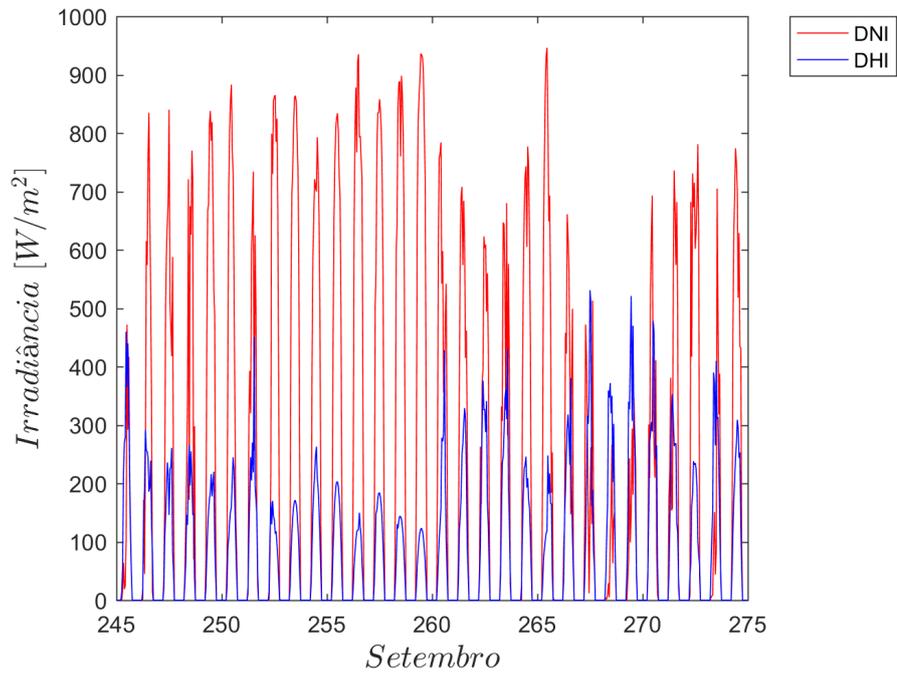


Figura 4.16: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Brasília-DF.

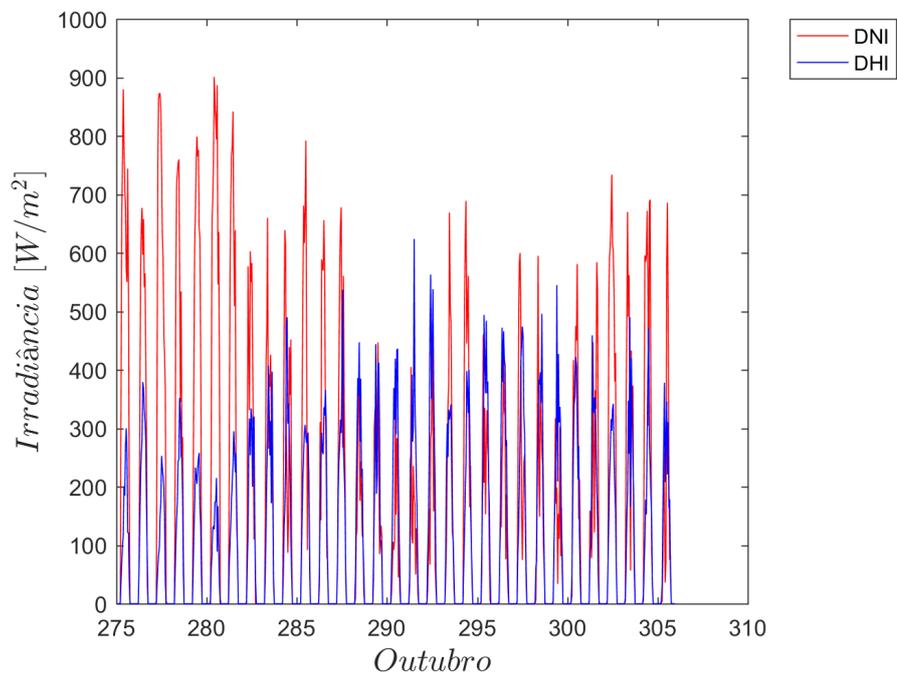


Figura 4.17: Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Brasília-DF.

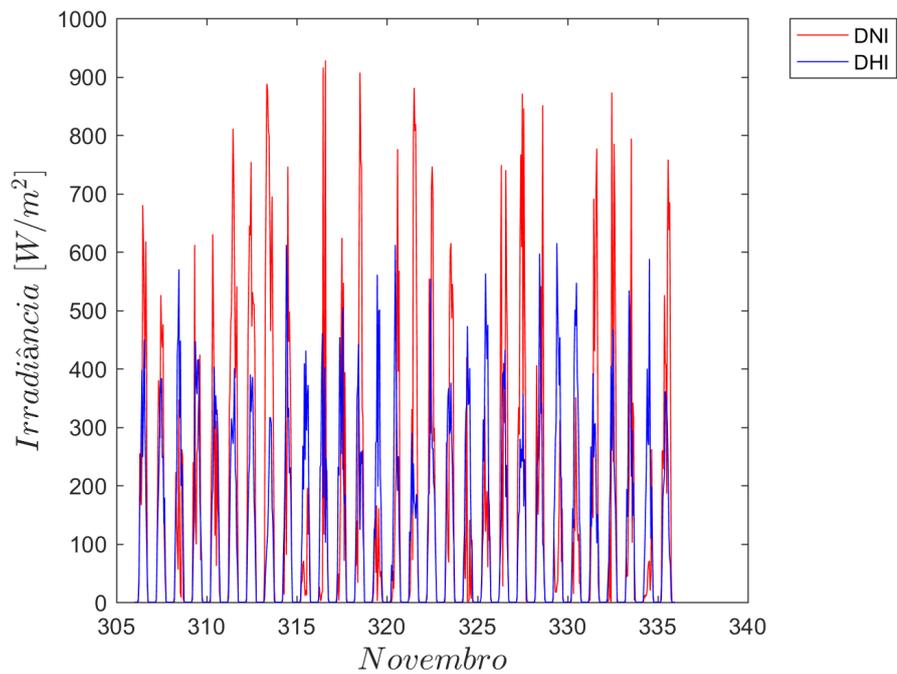


Figura 4.18: *Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Brasília-DF.*

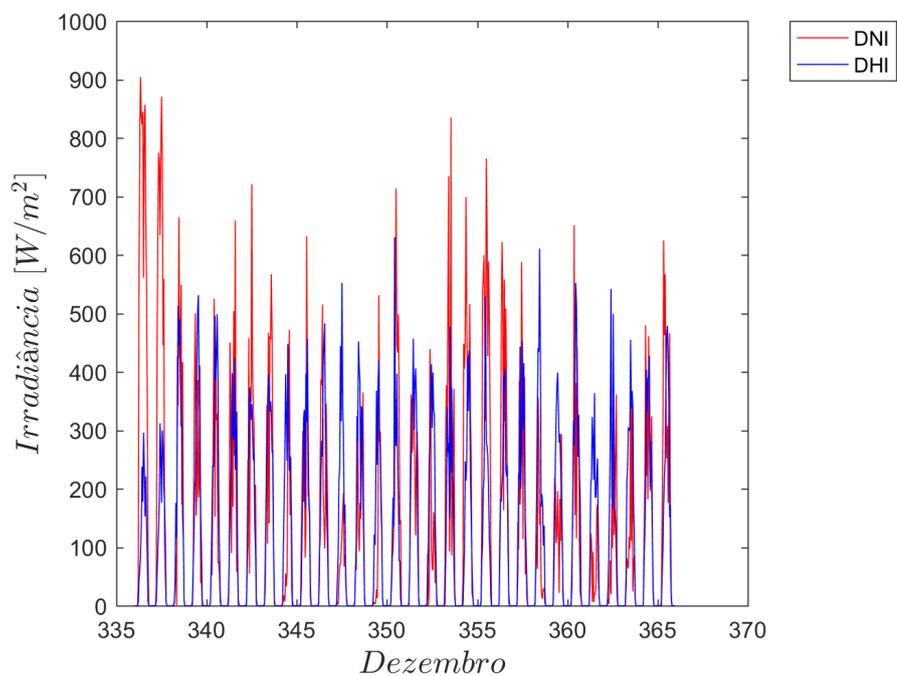


Figura 4.19: *Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Brasília-DF.*

Nas figuras é possível observar que nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março os valores de DHI foram próximos aos de DNI, o que corrobora com a situação climática de verão

desses meses, onde existe um alto índice de nebulosidade. Nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, têm-se um predomínio da DNI, principalmente nos meses de inverno, que corresponde a um forte período de seca em Brasília e pouca presença de nebulosidade. Com relação aos demais meses há uma predominância amena de DNI, que são os meses de primavera e outono, onde a presença de nuvens é transitória.

Foi também realizado um estudo comparativo de como a DNI e a DHI variam sazonalmente e como elas variam entre os valores simulados por meio do modelo de Hottel e pelos dados do TMY. Na Figura 4.21, tem-se as medidas da radiação direta e na Figura 4.20 as da radiação difusa.

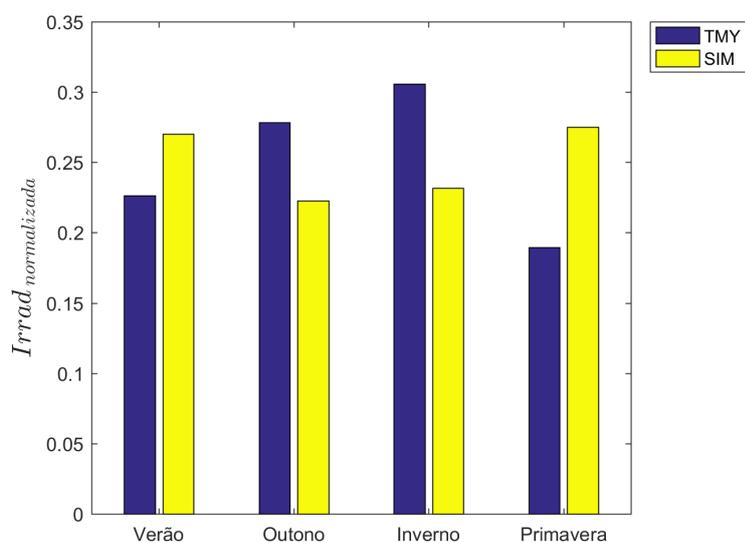


Figura 4.20: Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas para Brasília.

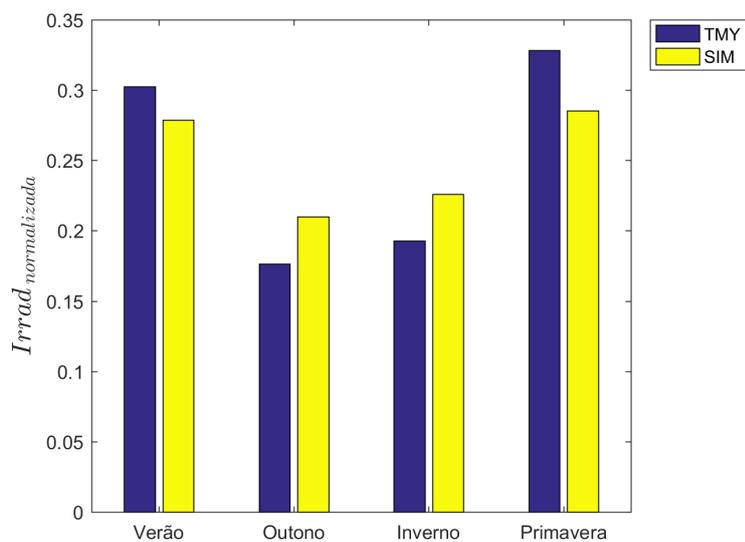


Figura 4.21: Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas para Brasília.

Das Figuras 4.20 e 4.21 é possível observar que o modelo simulado segue o esperado com relação a posição do Sol, onde as radiações diretas e difusas são maiores no período de verão e primavera e diminuem no inverno. Por outro lado, os valores do TMY não seguem o padrão, devido principalmente à nebulosidade, onde no verão os dados de DNI são menores e os de DHI são maiores e vice-versa para o inverno, que apresenta pouca presença de nuvens. Essas análises mostram que tanto para o modelo simulado quanto para o medido, o ângulo de inclinação β do painel que interceptará a maior quantidade de radiação normal a placa será variado ao longo do ano (Lave & Kleissl, 2011). Da seção 2.8, infere-se que não somente a nuvens influenciam a radiação solar. Na Tabela 4.1 tem-se uma relação dependência da irradiância com a altitude solar (α).

Tabela 4.1: Dependência da irradiância com a altura solar (α). Fonte: (GREENPRO, 2004)

α	AM	Absorção ($\theta_3, H_2O, O_2, CO_2$)	Dispersão de Rayleigh (Dispersão molecular)	Difusão de Mie (poluição ar)	Redução Total
90°	1,00	8,7%	9,4%	0-25,6%	17,3-38,4%
60°	1,15	9,2%	10,5%	0,7-29,5%	19,4-42,8%
30°	2	11,2%	16,3%	4,1-44,9%	28,8-59,1%
10°	5,76	16,2%	31,9%	15,4-74%	51,8-85,4%
50°	11,5	19,5%	42,5%	24,6-86%	65,1-93,8%

4.4 ORIENTAÇÃO ÓTIMA PARA DIFERENTES CIDADES

Recomenda-se que o painel fotovoltaico seja posicionado em direção ao norte verdadeiro, para o caso de estar localizado no hemisfério sul, e voltado para o sul verdadeiro, caso esteja localizado no hemisfério norte, ou seja, sempre voltando para a direção da Linha do Equador. Essa recomendação visa interceptar a maior quantidade de irradiância solar para o painel em uma posição fixa, visto que, ao meio dia solar, instante em que a massa de ar é menor, os raios incidentes mais acentuados estão normais ao painel. O parâmetro que influencia essa orientação é o azimute (γ). Por outro lado, devido a declinação terrestre, os raios solares que incidem perpendicularmente ao painel não são necessariamente ao meio dia solar, pois, com o movimento de declinação solar, o ângulo de incidência varia entre $-23,45^\circ$ e $+23,45^\circ$. O parâmetro que visa compensar essa variação é a inclinação da superfície (β) (Frontin, et al., 2017).

A influência da orientação do arranjo fotovoltaico para interceptação da maior quantidade de radiação normal a placa foi realizada para 10 cidades selecionadas que possuem arquivos climáticos do tipo TMY no programa SAM. Os dados utilizados do arquivo TMY incluem dados horários da irradiância direta normal (DNI) e irradiância difusa horizontal (DHI).

Foram gerados gráficos de inclinação ótima anual para cada cidade a partir do modelo isotrópico desenvolvido por (Liu & Jordan, 1960), utilizando a Equação 3.24. O modelo isotrópico de céu claro é importante porque apresenta o padrão de referência da evolução diária da radiação

solar, principalmente a global e a direta normal, quando o dia está sem nuvens. O modelo de céu claro tem por principal característica a estimação do valor esperado da radiação solar em momento, dia e lugar específicos, sem a atenuação produzida por nuvens, o que é fundamental para determinar os desvios dos valores medidos com relação aos esperados (Galdino, et al., 2015). Em seguida foram gerados os mesmos gráficos a partir dos dados do arquivo TMY, onde os valores de irradiância direta e difusa foram os parâmetros de entrada para os coeficientes I_b e I_d na Equação 3.24.

Para o albedo foi utilizado um valor padrão de $\rho = 0,28$, visto que o software SAM usou como referência a latitude e longitude dos aeroportos nas cidades analisadas. Esse valor do albedo foi adaptado com base na Tabela 4.4, ao realizar uma média entre os valores de para concreto recente e concreto antigo.

Primeiro foi considerado um valor de azimute $\gamma = 180$, onde se variou apenas o ângulo de inclinação. Em um segundo momento, foi realizada um procedimento semelhante ao primeiro, mas com variação azimutal, onde foram gerados gráficos de combinação de ângulos de inclinação ótimo e orientação azimutal.

4.4.1 Belém-PA

As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Belém-PA ($\phi = -1,38^\circ$), com uma altitude $A=16$ m.

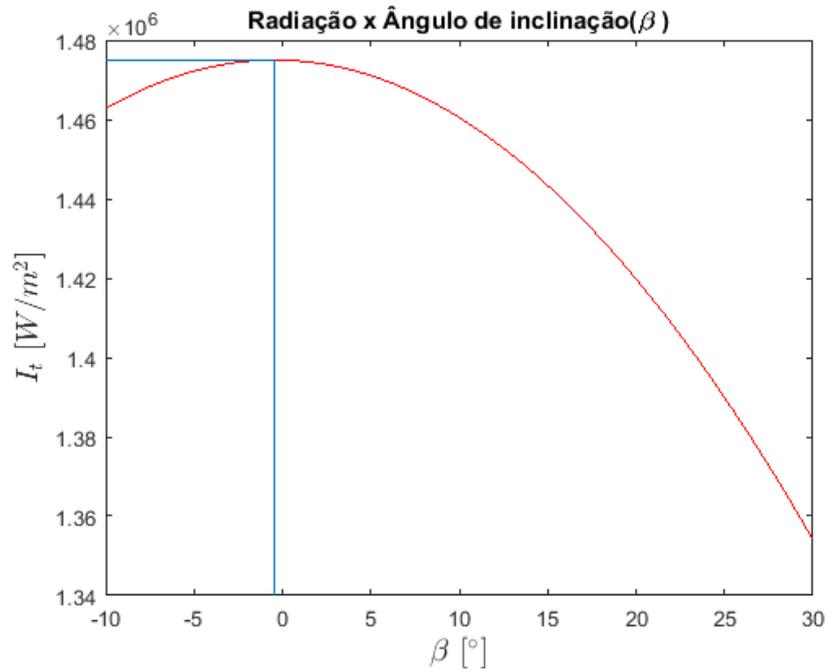


Figura 4.22: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Belem-PA - $\phi = -1,38^\circ$

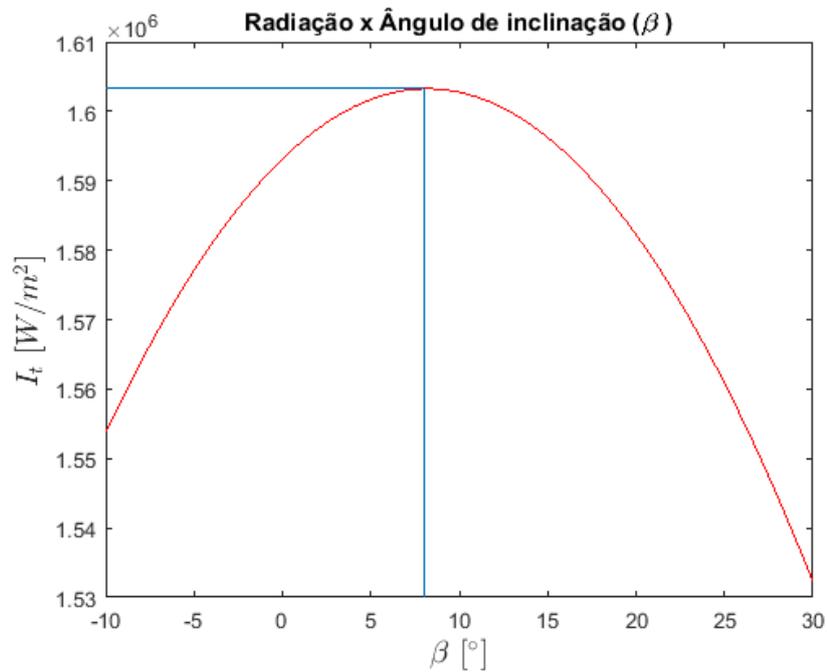


Figura 4.23: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Belem-PA - $\phi = -1,38^\circ$

A partir da análise da primeira figura, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi

de $\beta = -0,5$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 8^\circ$.

Nas Figuras 4.24 e 4.25 tem-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

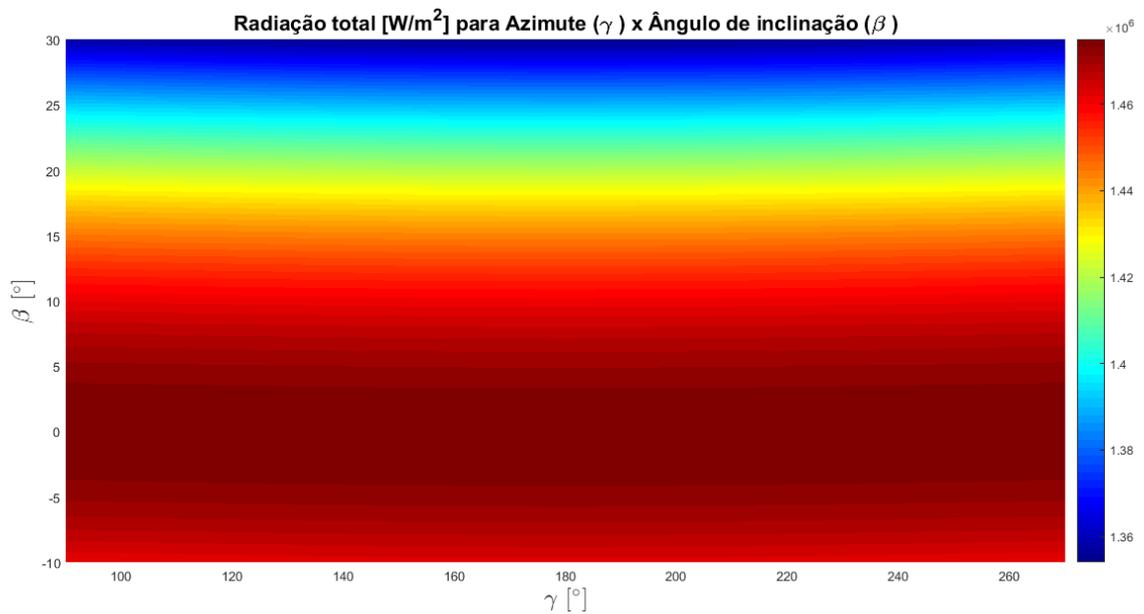


Figura 4.24: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belém-PA - $\phi = -1,38^\circ$

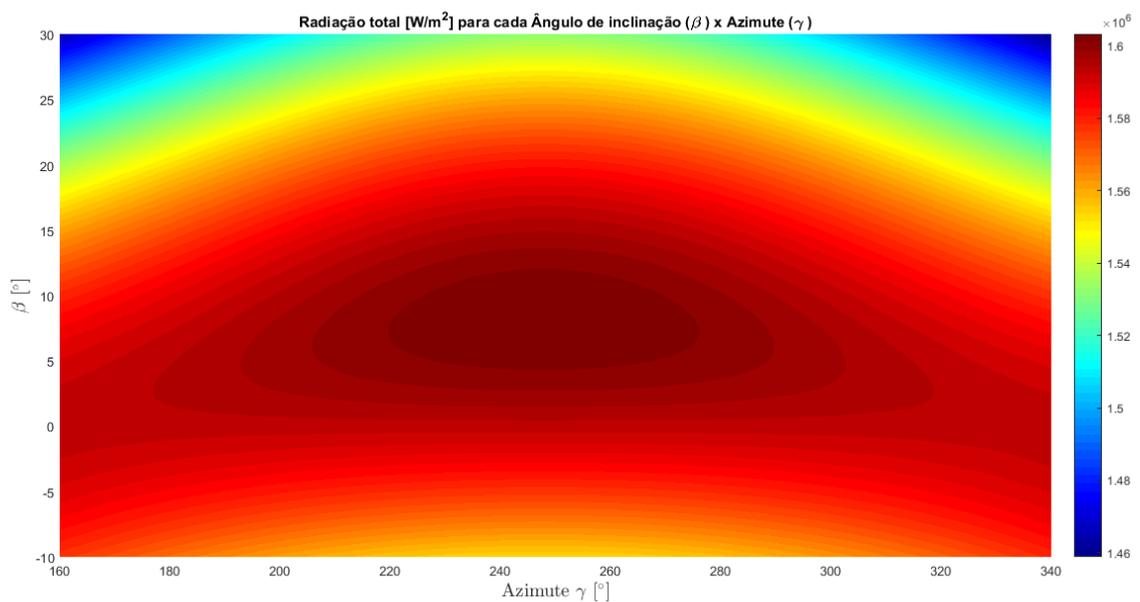


Figura 4.25: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belém-PA - $\phi = -1,38^\circ$

A radiação solar é sempre maior numa área que se estende perpendicularmente em relação aos raios solares do que numa área horizontal das mesmas dimensões. Uma vez que o azimute e a altura solar mudam ao longo do dia e do ano, o ângulo de incidência da radiação solar varia constantemente em relação às áreas potenciais ao aproveitamento da energia solar, como as residências e usinas.

A análise da radiação anual ajuda a equacionar a conveniência das áreas existentes, tendo em conta o seu aproveitamento solar (GREENPRO, 2004). Para ilustrar isso gerou-se as Figuras 4.24 e 4.25, as quais apresentam uma faixa de combinação da inclinação e do azimute do painel que interceptam uma maior irradiância na placa anualmente.

O ângulo de inclinação da placa ficou próximo da latitude local e a orientação no modelo simulado abrangeu um grande intervalo de azimute devido a sua proximidade à Linha do Equador. A simetria é justificada devido a posição do Sol durante o ano, que varia de forma espelhada em torno da Linha do Equador.

Com relação ao gráfico com dados do TMY, houve um encurtamento da faixa de azimute e ocorreu um favorecimento para a direção oeste, a uma angulação de aproximadamente 250° . Isso ocorreu porque a radiação durante o período da tarde é mais intensa que o período da manhã. As Figuras 4.26 e 4.27 mostram como a DNI e a DHI variam ao longo do dia para a cidade Belém-PA. Comparou-se também as diferenças entre o modelo de (Liu & Jordan, 1960) e do TMY, onde os valores de irradiância direta e difusa foram normalizados pelos valores de irradiância total anual.

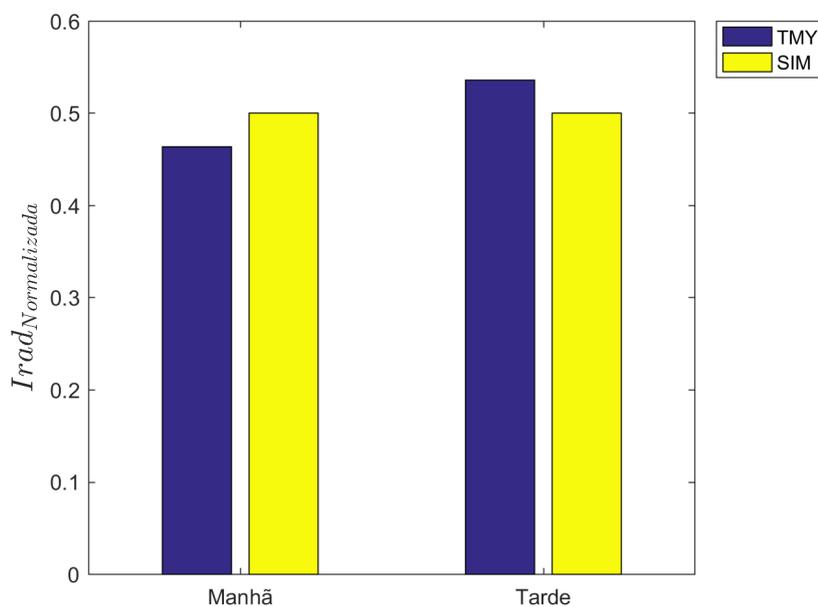


Figura 4.26: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Belém-PA - $\phi = -1,38^\circ$.*

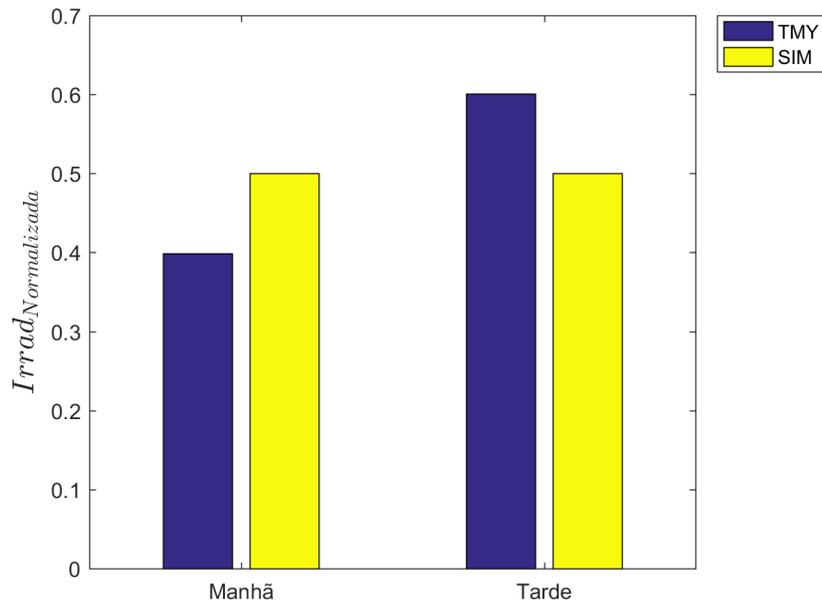


Figura 4.27: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Belem-PA - $\phi = -1,38^\circ$.*

Da Figura 4.26 é observada a simetria do modelo simulado e como o modelo do SAM tem um favorecimento para o período da tarde, apesar de na região haver chuvas periódicas nesse mesmo período. Na Figura 4.27, enquanto a simetria do modelo simulado é mantida, houve um aumento da DHI, o que condiz com a condição climática local.

4.4.2 Manaus-AM

As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Manaus-AM ($\phi = -3,13^\circ$), com uma altitude $A=72$ m.

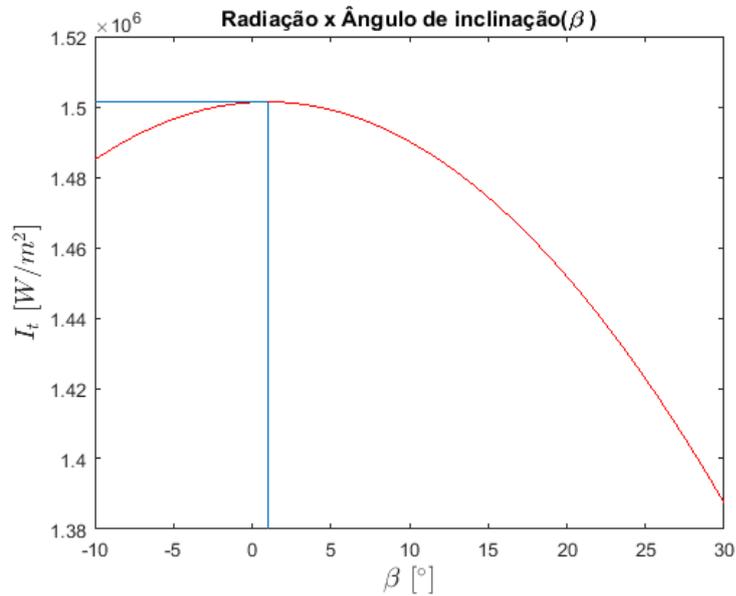


Figura 4.28: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Manaus-AM $\phi = -3,13^\circ$.

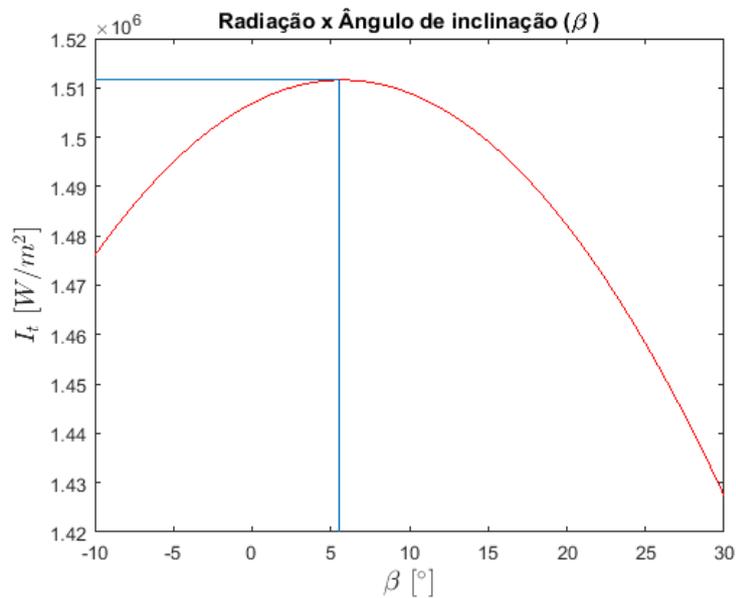


Figura 4.29: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Manaus-AM $\phi = -3,13^\circ$.

A partir da análise da primeira figura, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 1,5^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 5,5^\circ$.

Nas Figuras 4.30 e 4.31, têm-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

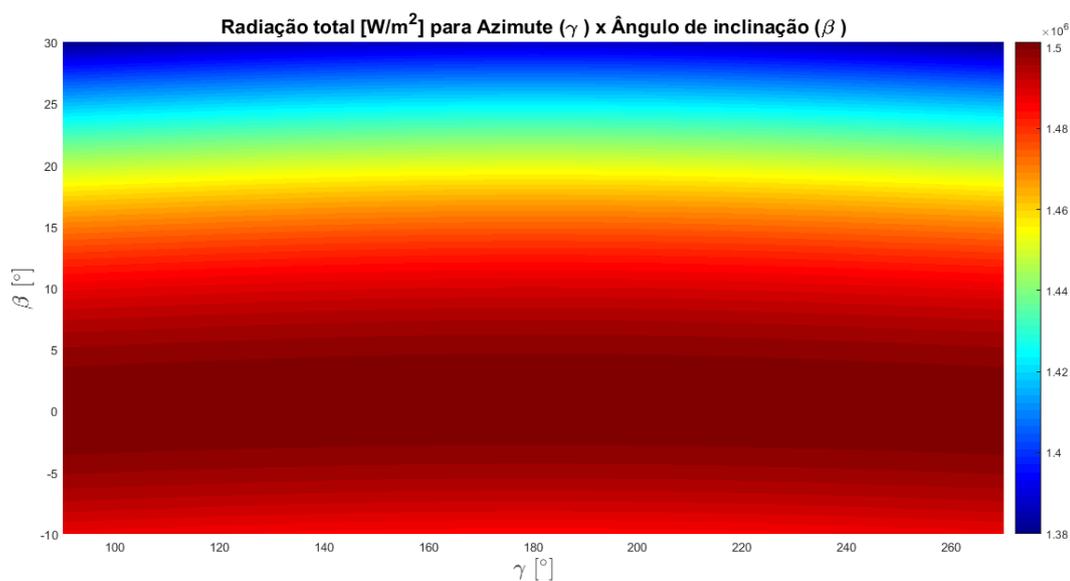


Figura 4.30: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Manaus-AM $\phi = -3, 13^\circ$.

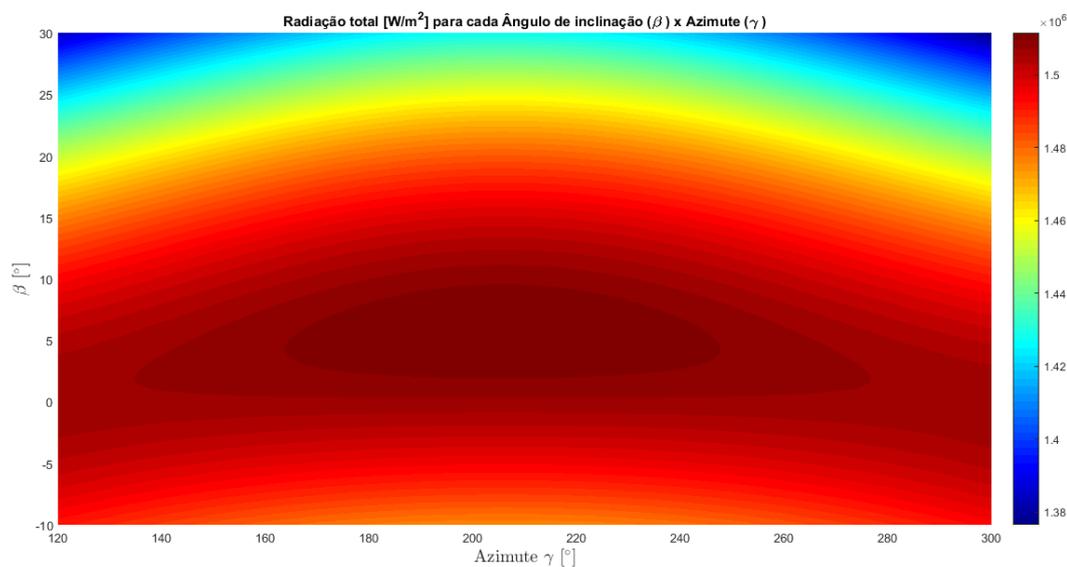


Figura 4.31: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Manaus-AM $\phi = -3, 13^\circ$.

A Figura 4.30 seguiu um padrão parecido com a cidade de Belém-PA, pois ambas são próximas ao equador, enquanto que na Figura 4.31, que são os dados do TMY, houve um alongamento da faixa de orientação azimutal, com um favorecimento do período da tarde. Devido a uma maior precipitação regional durante a tarde gerou uma normalização dos valores do azimute. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

4.4.3 Petrolina-PE

As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Petrolina-PE ($\phi = -9,35^\circ$), com uma altitude $A=375\text{m}$.

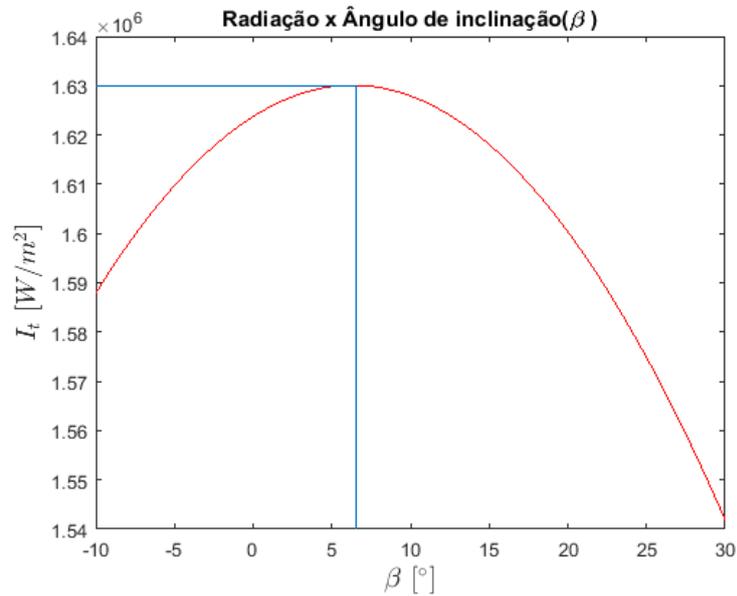


Figura 4.32: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Petrolina-PE $\phi = -9,35^\circ$.

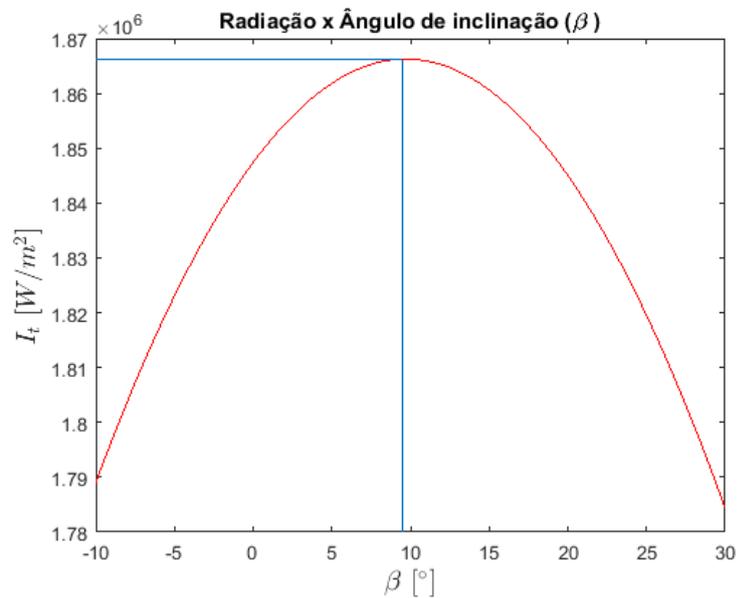


Figura 4.33: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Petrolina-PE $\phi = -9,35^\circ$.

A partir da análise das Figuras 4.32 e 4.33, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 6,5^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 9,5^\circ$.

Nas Figuras 4.34 e 4.35, têm-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

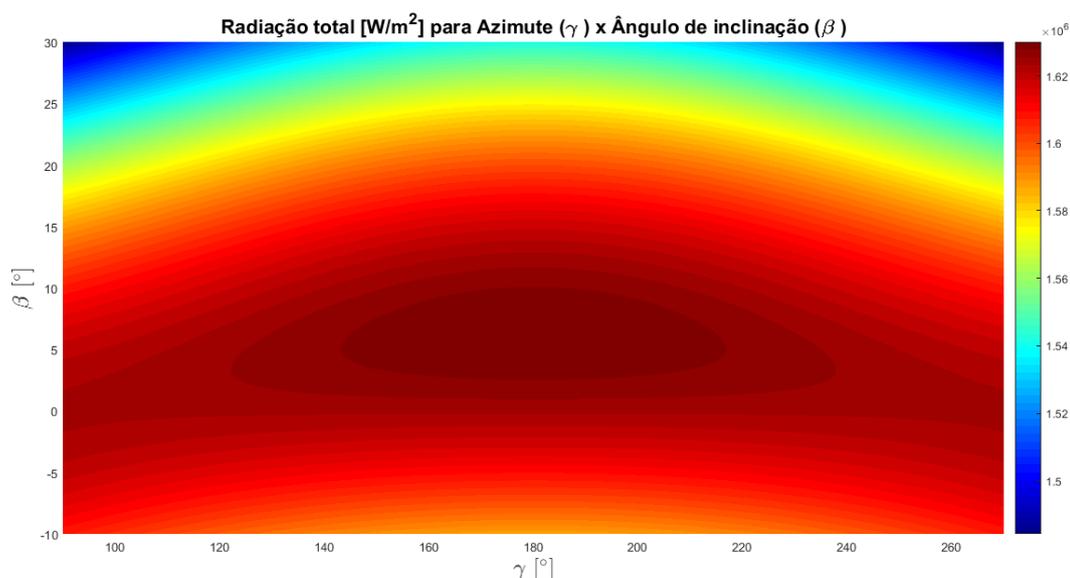


Figura 4.34: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Petrolina-PE $\phi = -9, 35^\circ$.

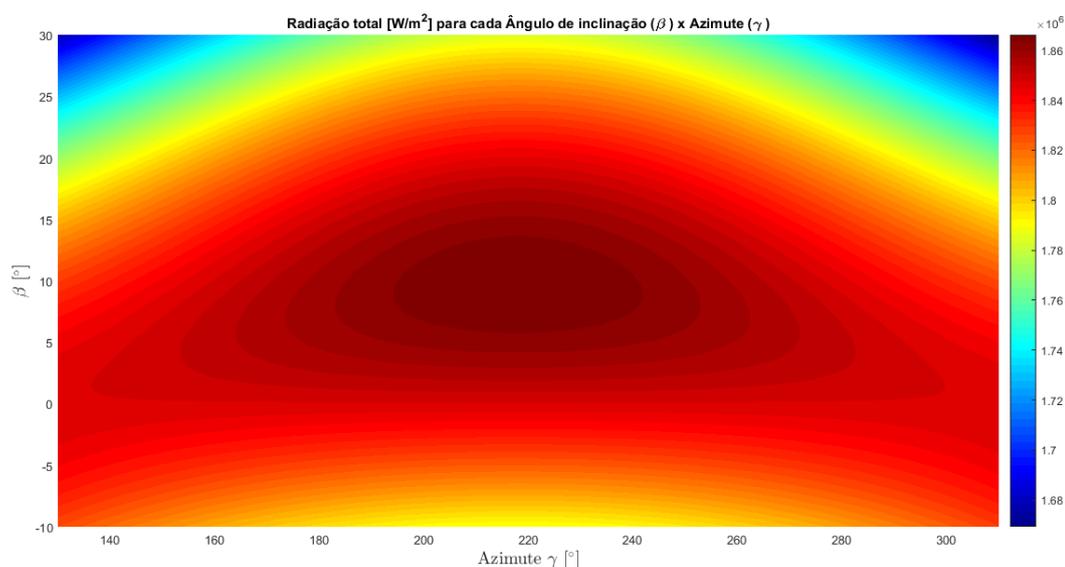


Figura 4.35: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Petrolina-PE $\phi = -9, 35^\circ$.

A Figura 4.34 seguiu a tendência de manter uma maior faixa de orientação azimutal, devido ao valor de inclinação do painel possuir um valor baixo. Por outro lado, o valor de TMY encurtou a faixa de orientação azimutal devido ao seu maior ângulo de inclinação e pela região de Petrolina está localizada no sertão brasileiro, que é caracterizado por escassez e irregularidade de chuva. Ocorreu também um favorecimento da orientação para o período da tarde. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

4.4.4 Bom Jesus da Lapa-BA

As Figuras 4.36 e 4.37 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Bom Jesus da Lapa-BA ($\phi = -13, 27^\circ$), com uma altitude $A=458\text{m}$.

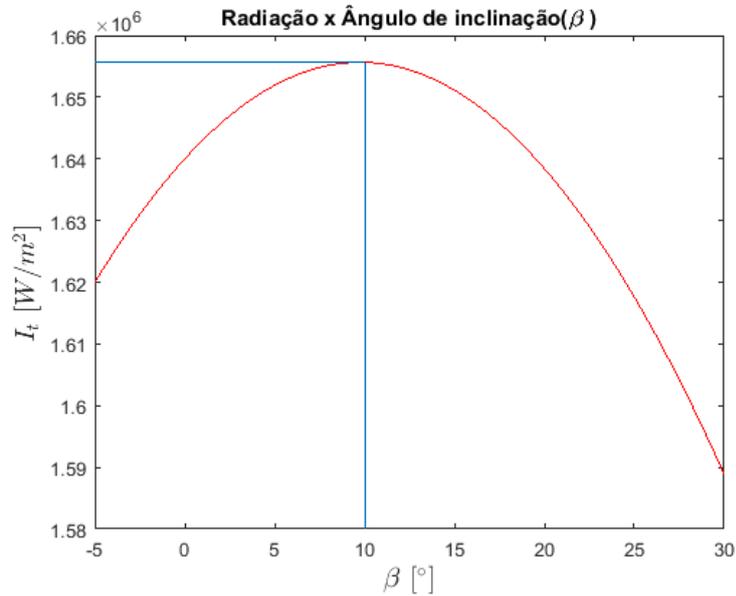


Figura 4.36: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13, 27^\circ$.

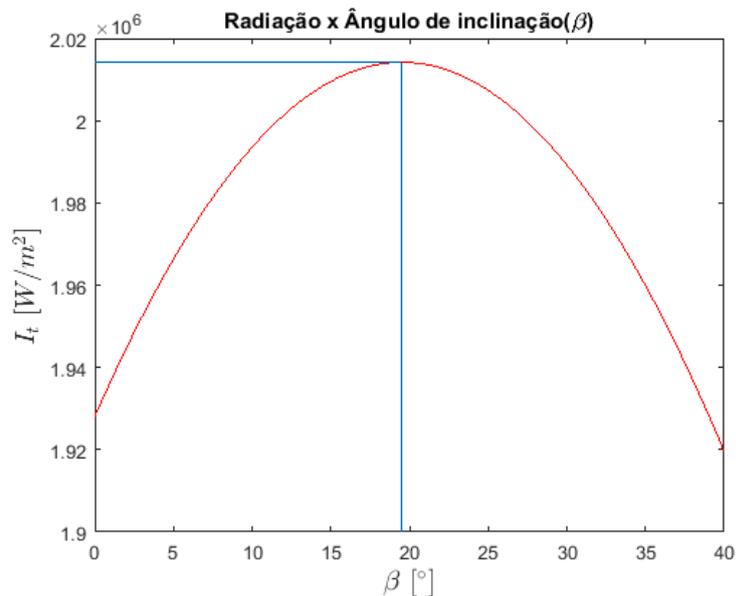


Figura 4.37: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13, 27^\circ$.

A partir da análise da Figura 4.36, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 10^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 19,5^\circ$. Nas Figuras 4.38 e 4.39, têm-se os gráficos

das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

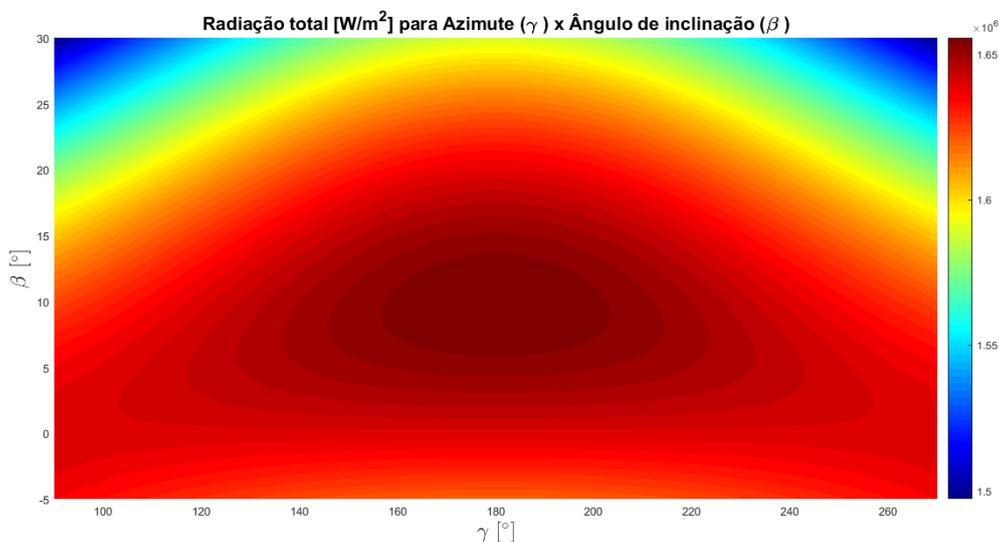


Figura 4.38: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13,27^\circ$.

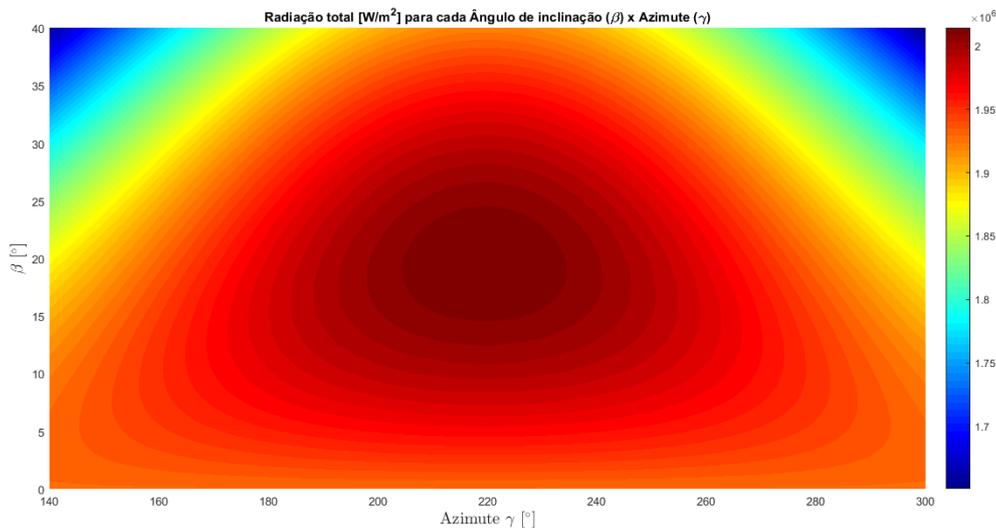


Figura 4.39: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Bom Jesus da Lapa-BA $\phi = -13,27^\circ$.

Na Figura 4.38 observou-se uma faixa simétrica do ângulo de azimute com orientação norte, como esperado do modelo simulado. Enquanto que no TMY da Figura 4.39 seguiu um padrão semelhante, porém com um maior ângulo de inclinação do painel e com uma orientação mais voltada para o período da tarde. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

4.4.5 Cuiabá-MT

As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Cuiabá-MT ($\phi = -15,65^\circ$), com uma altitude $A=182\text{m}$.

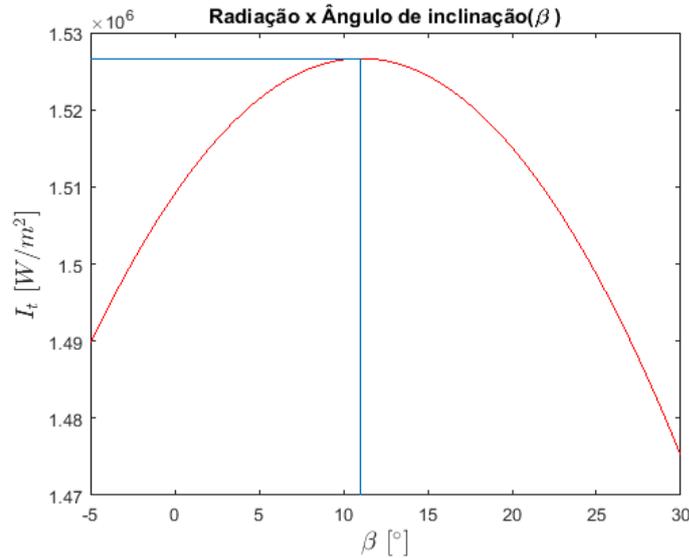


Figura 4.40: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Cuiabá-MT $\phi = -15,65^\circ$.

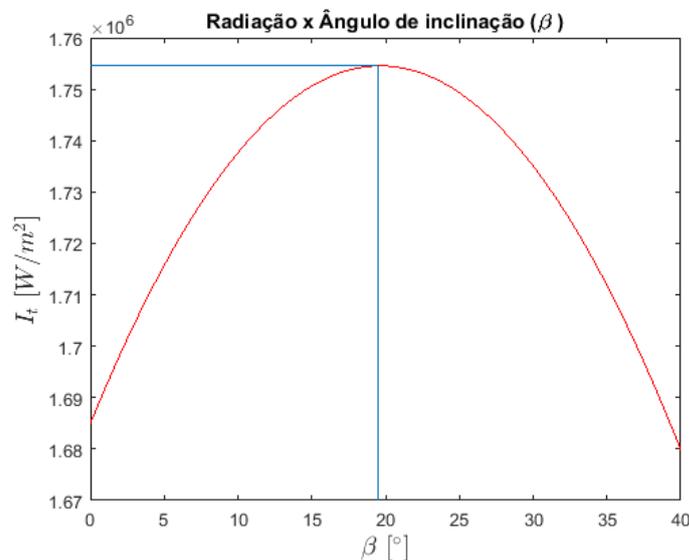


Figura 4.41: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Cuiabá-MT $\phi = -15,65^\circ$.

A partir da análise da Figura 4.40, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 11^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 19,5^\circ$. Nas Figuras 4.42 e 4.43, têm-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

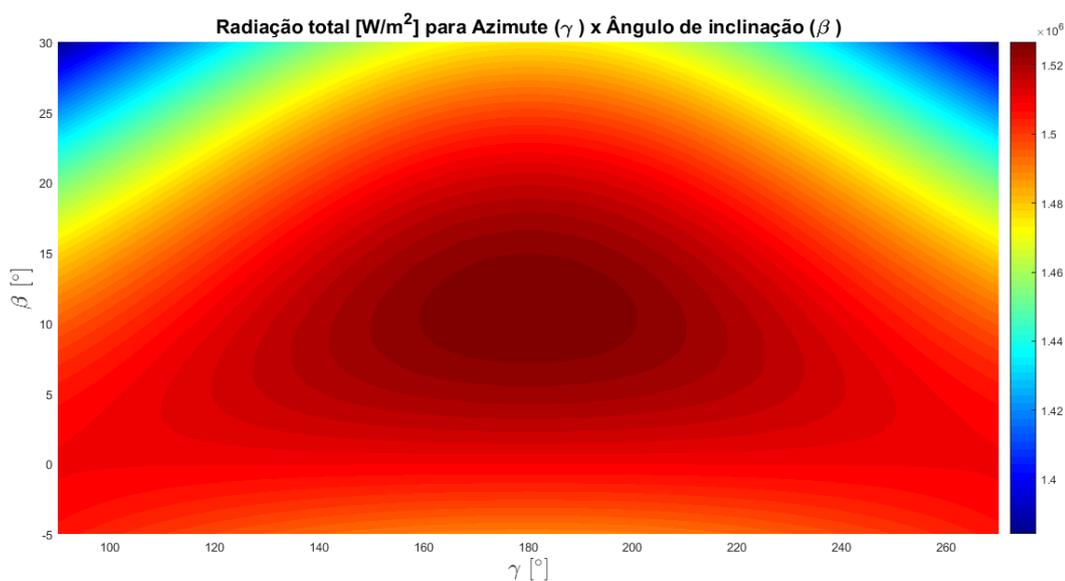


Figura 4.42: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Cuiabá-MT $\phi = -15,65^\circ$.

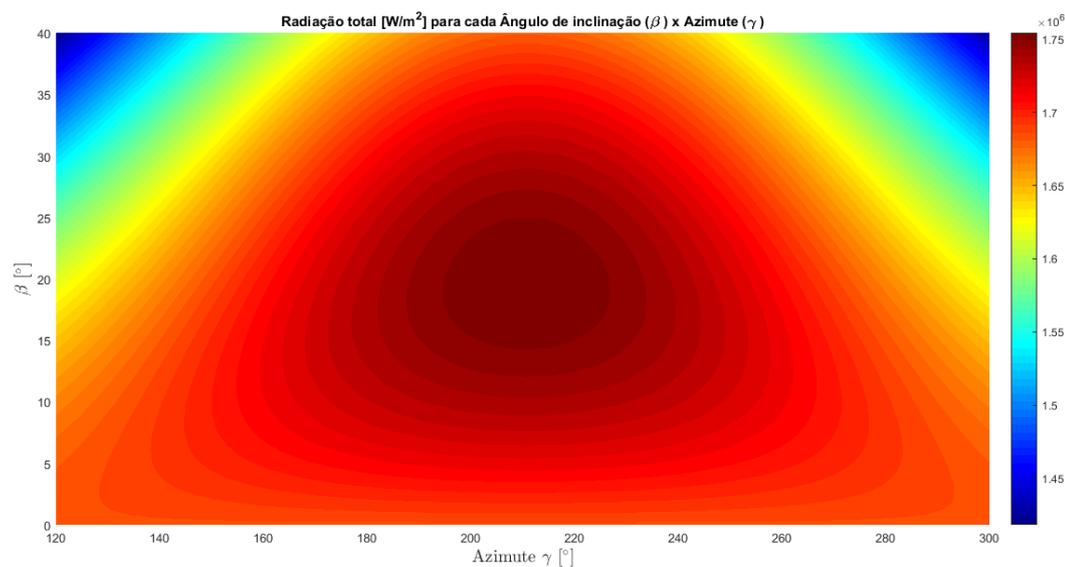


Figura 4.43: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Cuiabá-MT $\phi = -15,65^\circ$.

Na Figuras 4.42 observou-se uma faixa simétrica do ângulo de azimuth com orientação norte, como esperado do modelo simulado. Enquanto que no TMY da Figura 4.43 seguiu um padrão semelhante, porém com um maior ângulo de inclinação do painel e com uma orientação mais voltada para o período da tarde. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

4.4.6 Brasília-DF

As Figuras 4.44 e 4.45 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Brasília-DF ($\phi = -15,87^\circ$), com uma altitude $A=1061\text{m}$.

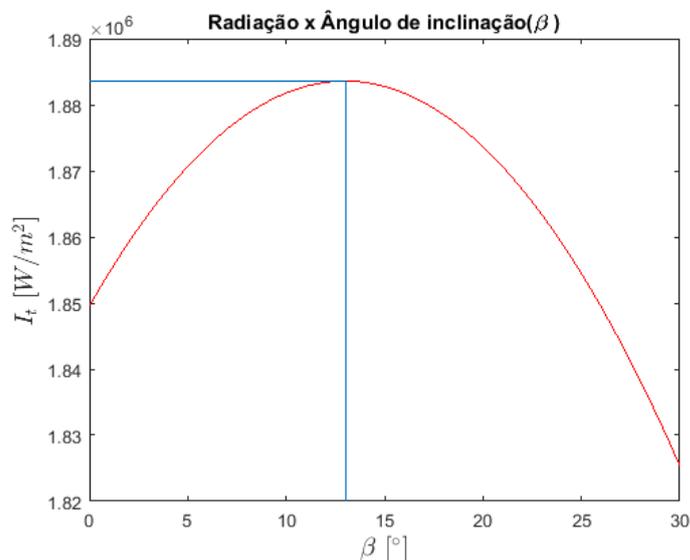


Figura 4.44: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Brasília-DF $\phi = -15,87^\circ$.

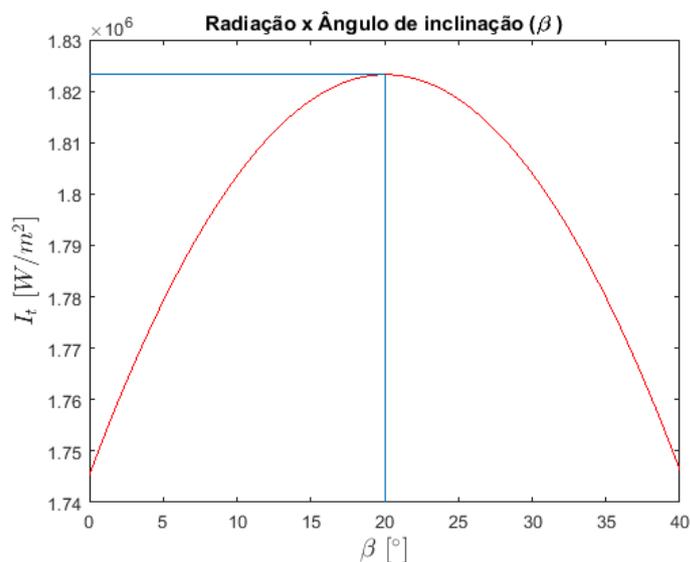


Figura 4.45: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Brasília-DF $\phi = -15,87^\circ$.

A partir da análise da Figura 4.44, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 13,0^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 20,0^\circ$. Nas Figuras 4.46 e 4.47, têm-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

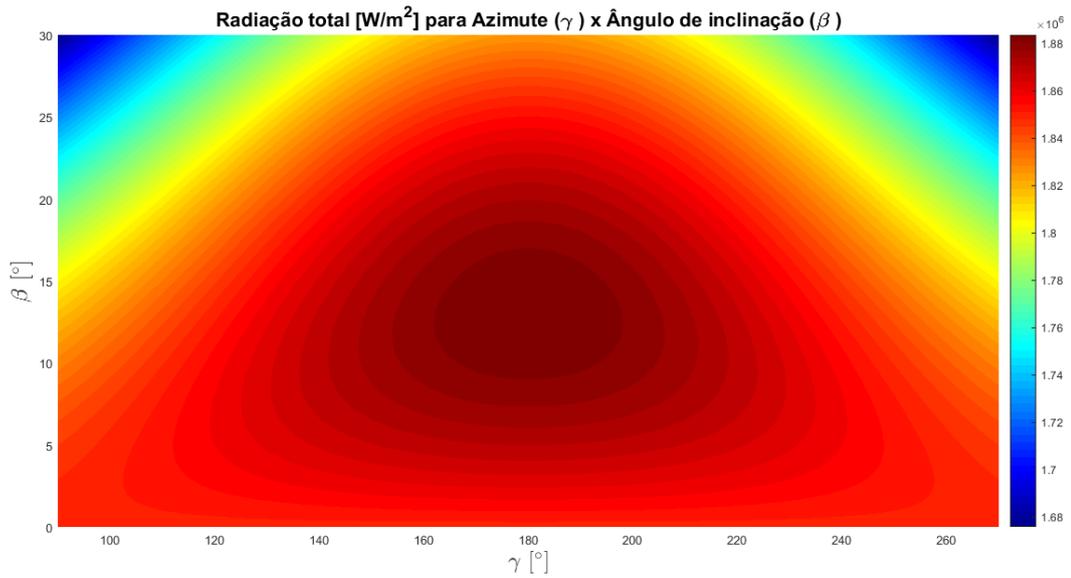


Figura 4.46: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Brasília-DF $\phi = -15,87^\circ$.

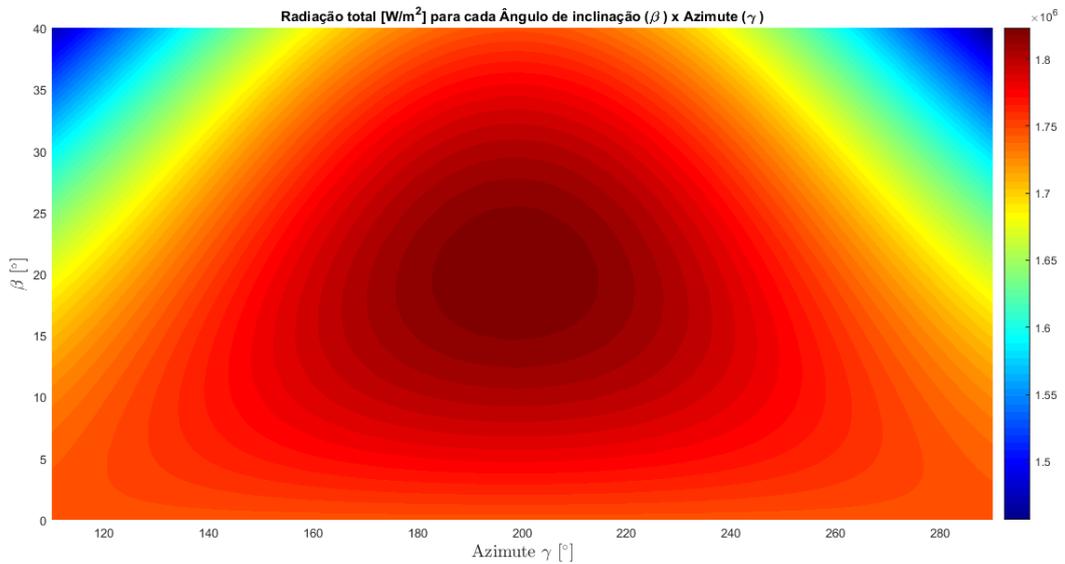


Figura 4.47: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Brasília-DF $\phi = -15,87^\circ$.

Na Figura 4.46 observou-se uma faixa simétrica do ângulo de azimute com orientação norte, como esperado do modelo simulado. Enquanto que no TMY da Figura 4.47 seguiu um padrão semelhante, porém com um maior ângulo de inclinação do painel e com uma orientação mais voltada para o período da tarde, deslocado de aproximadamente 20° para noroeste. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

4.4.7 Belo Horizonte-MG

As Figuras 4.48 e 4.49 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Belo Horizonte-MG ($\phi = -19,85^\circ$), com uma altitude $A=785\text{m}$.

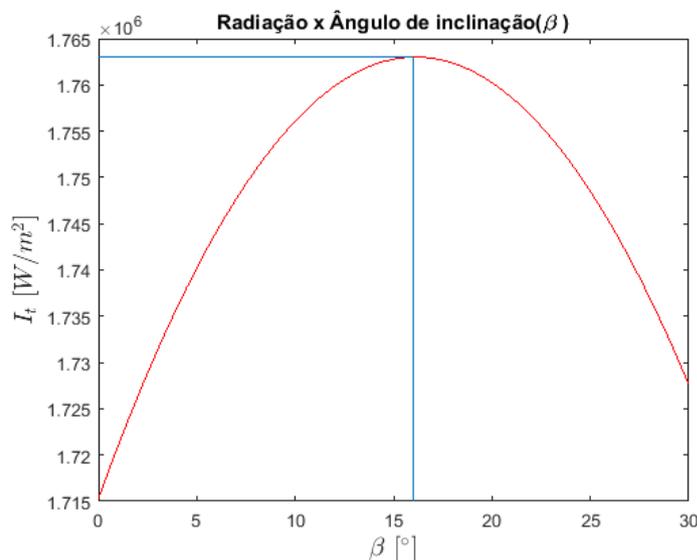


Figura 4.48: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Belo Horizonte-MG $\phi = -19,85^\circ$.

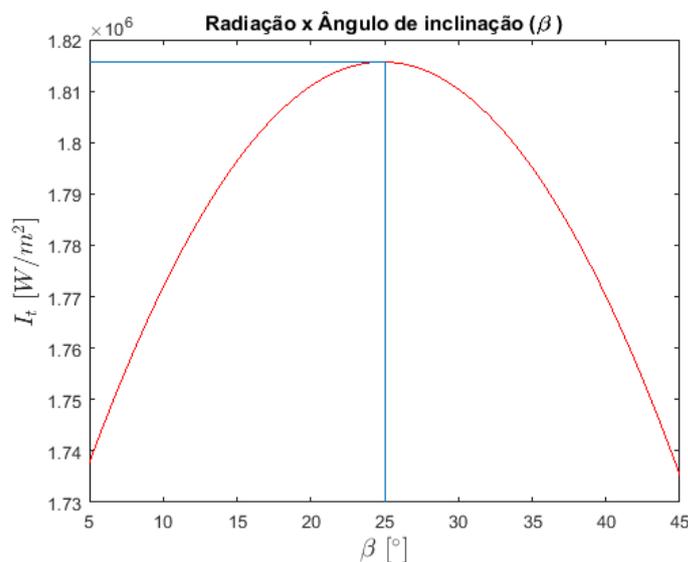


Figura 4.49: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Belo Horizonte-MG $\phi = -19,85^\circ$.

A partir da análise da Figura 4.48, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 16,0^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 25,0^\circ$. Nas Figuras 4.50 e 4.51 tem-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

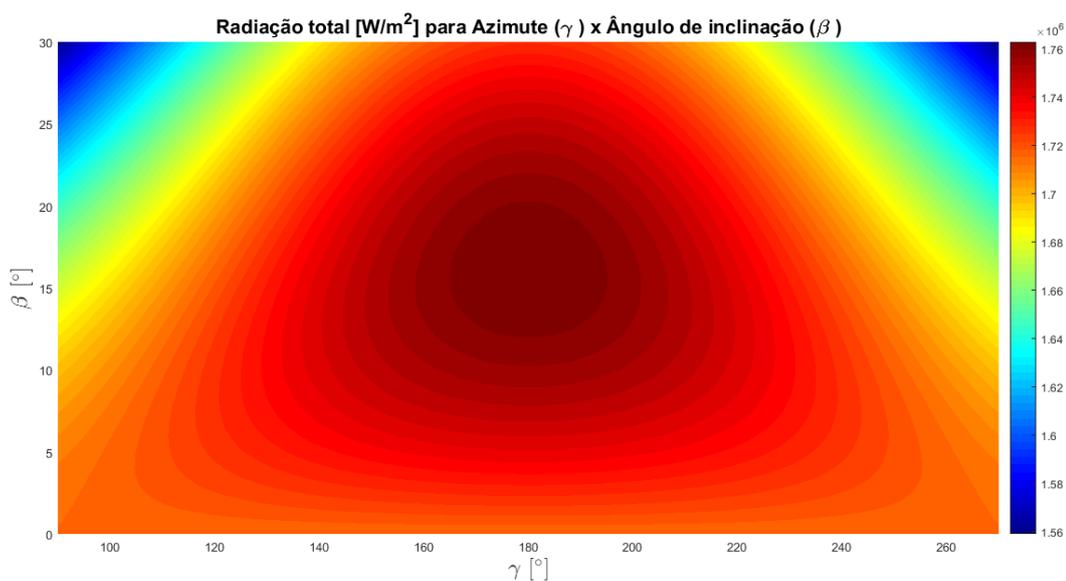


Figura 4.50: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belo Horizonte-MG $\phi = -19,85^\circ$.

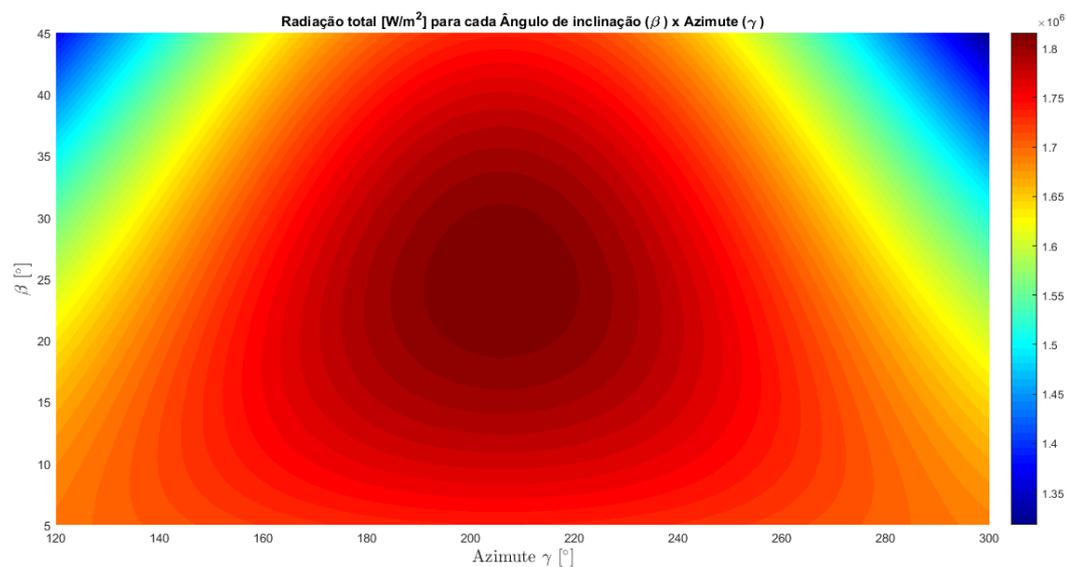


Figura 4.51: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Belo Horizonte-MG $\phi = -19,85^\circ$.

Na Figura 4.50 observou-se uma faixa simétrica do ângulo de azimute com orientação norte, como esperado do modelo simulado. Enquanto que no TMY da Figura 4.51 seguiu um padrão semelhante, porém com um maior ângulo de inclinação do painel e com uma orientação mais voltada para o período da tarde, deslocado de aproximadamente 20° na direção noroeste, houve também uma diminuição da faixa de orientação do ângulo de azimute comparando-se as outras cidades. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

4.4.8 São Paulo-SP

As Figuras 4.52 e 4.53 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de São Paulo - SP ($\phi = -23,62^\circ$), com uma altitude A=803m.

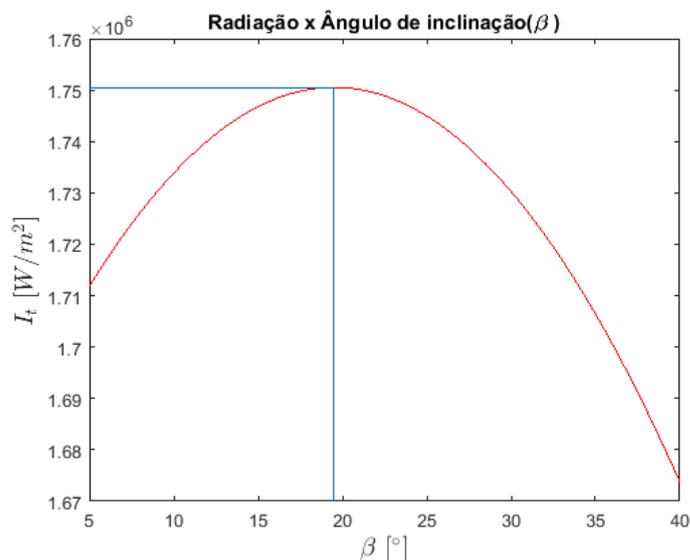


Figura 4.52: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em São Paulo-SP $\phi = -23,62^\circ$.

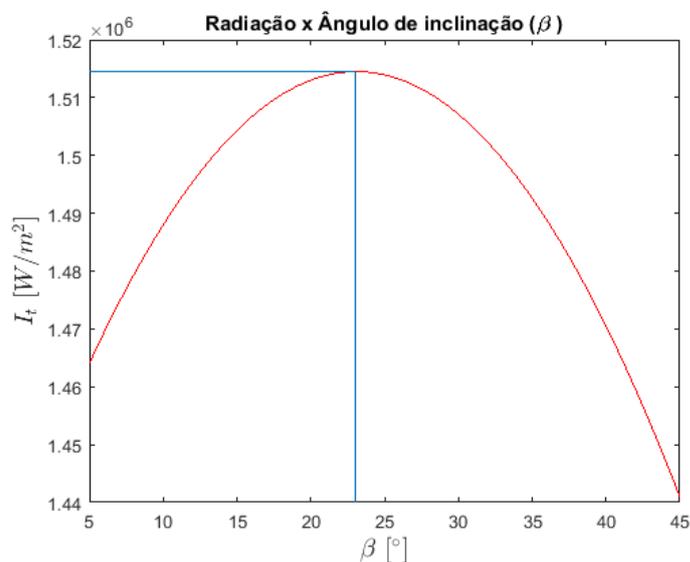


Figura 4.53: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em São Paulo-SP $\phi = -23,62^\circ$.

A partir da análise da Figura 4.52, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 19,5^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 23,0^\circ$. Nas Figuras 4.54 e 4.55, têm-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

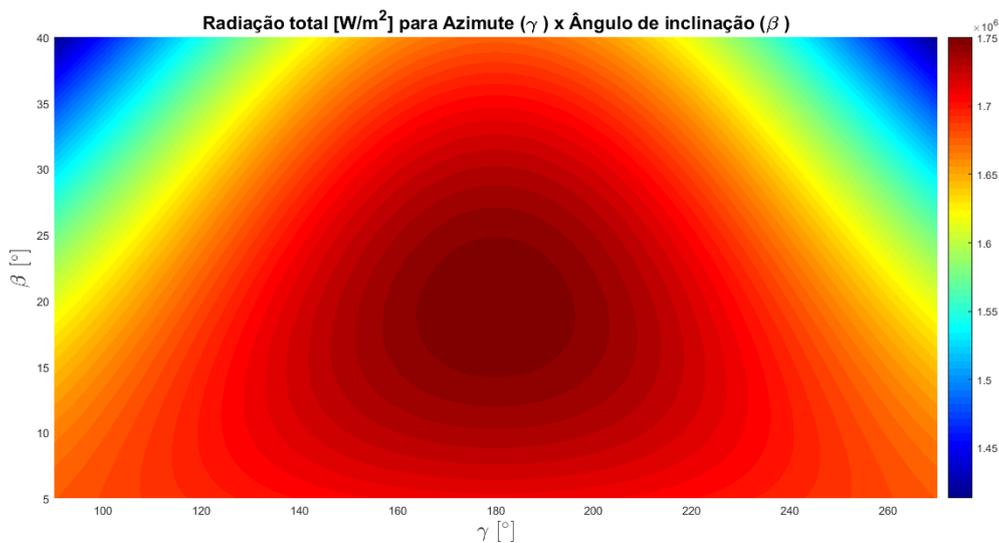


Figura 4.54: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em São Paulo-SP $\phi = -23,62^\circ$.

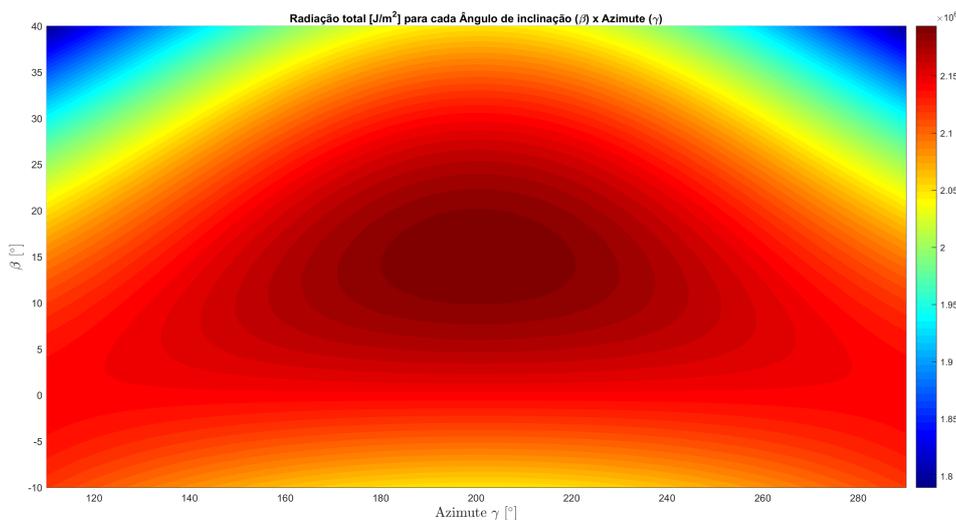


Figura 4.55: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em São Paulo-SP $\phi = -23,62^\circ$.

Na Figura 4.54 observou-se uma faixa simétrica do ângulo de azimute com orientação norte, como esperado do modelo simulado, entretanto o ângulo de do painel sofreu pouca variação. Enquanto que no TMY da Figura 4.55 seguiu um padrão semelhante com uma orientação mais voltada para o período da tarde, deslocado de aproximadamente 20° para o oeste. A irradiância total na placa apresentou também uma diminuição em seu valor absoluto, devido principalmente ao afastamento da linha do Equador e a uma forte atenuação atmosférica causada pela poluição do ar na cidade. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

4.4.9 Curitiba-PR

As Figuras 4.56 e 4.57 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Curitiba-PR ($\phi = -25,52^\circ$), com uma altitude $A=908\text{m}$.

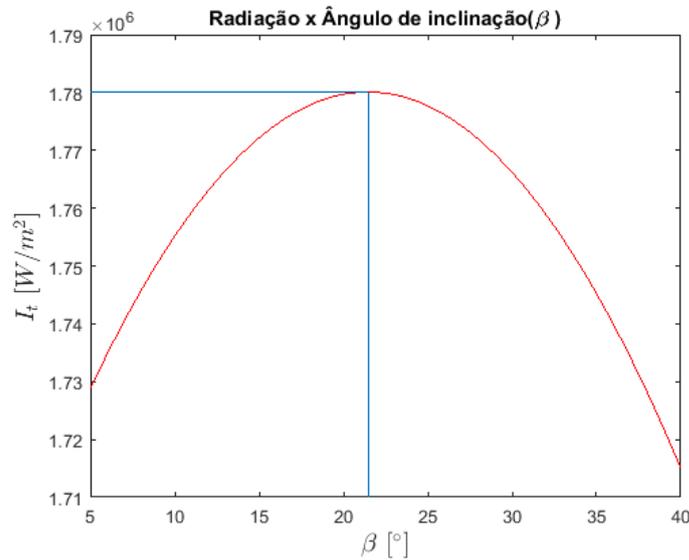


Figura 4.56: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Curitiba-PR $\phi = -25,52^\circ$.

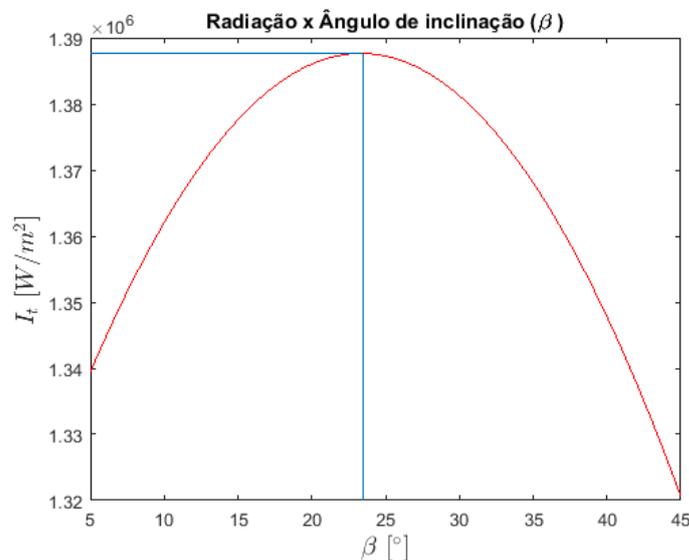


Figura 4.57: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Curitiba-PR $\phi = -25,52^\circ$.

A partir da análise da Figura 4.56, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 21,5^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 23,5^\circ$. Nas Figuras 4.58 e 4.59, têm-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

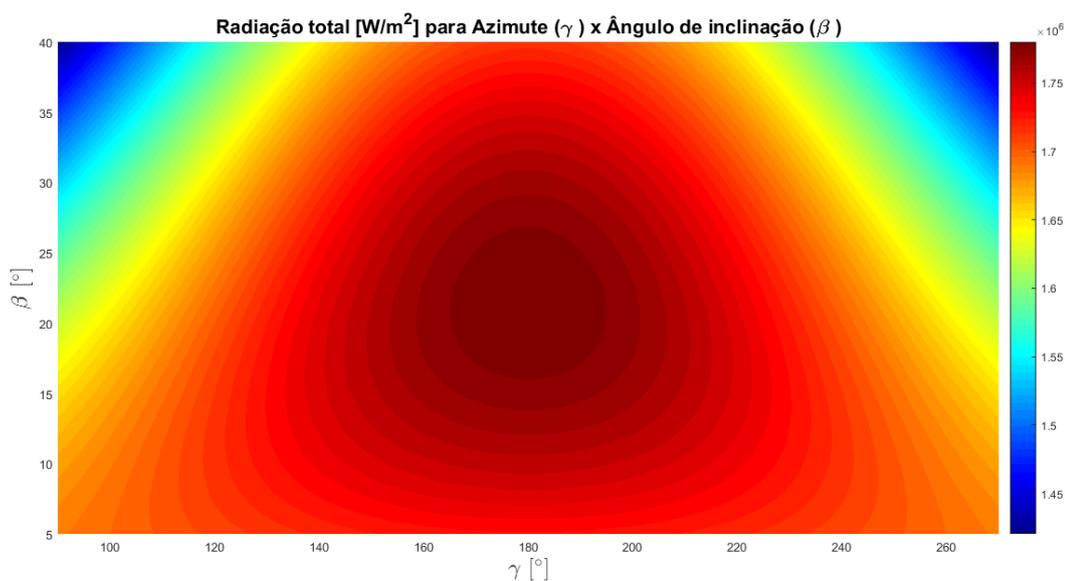


Figura 4.58: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Curitiba-PR $\phi = -25, 52^\circ$.

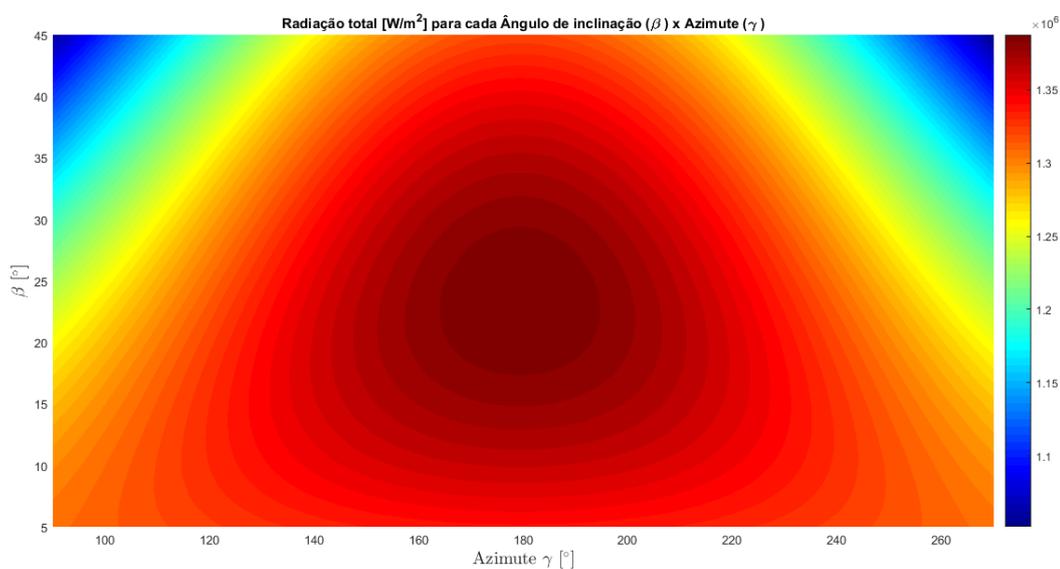


Figura 4.59: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Curitiba-PR $\phi = -25, 52^\circ$.

Na Figura 4.57 observou-se uma faixa simétrica do ângulo de azimute com orientação norte, como esperado do modelo simulado. Por outro lado, o ângulo de inclinação do painel sofreu pouca variação. A Figura 4.59 do TMY seguiu um padrão semelhante, com um ângulo de inclinação do painel próximo e com uma orientação mais voltada para o norte. Os valores de irradiância total na placa apresentaram também uma diminuição em seu valor absoluto, devido principalmente ao afastamento da linha do Equador. Os gráficos da variação do DNI e o DHI estão no apêndice.

4.4.10 Santa Maria-RS

As Figuras 4.60 e 4.61 apresentam resultados comparativos do ângulo de inclinação (β) ótimo anual para a cidade de Santa Maria-RS ($\phi = -29,7^\circ$), com uma altitude A=114m.

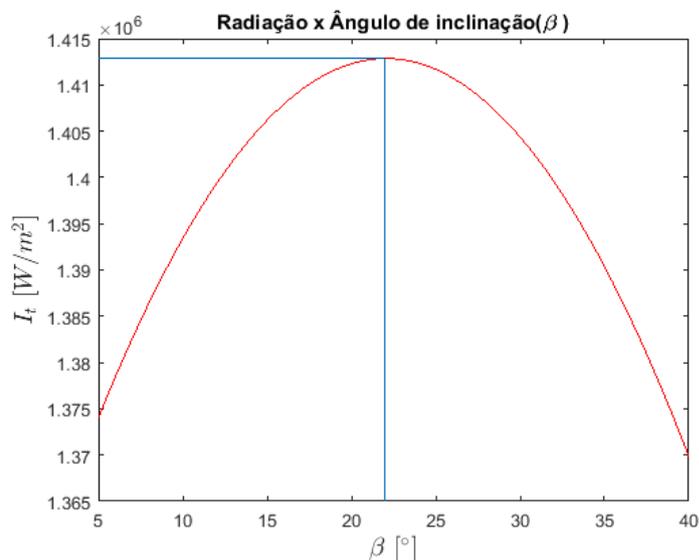


Figura 4.60: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual simulado em Santa Maria-RS $\phi = -29,7^\circ$.

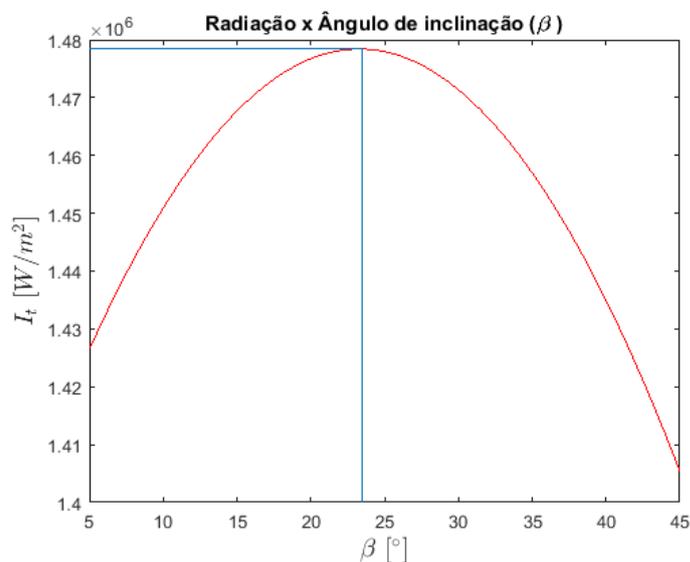


Figura 4.61: Ângulo de inclinação (β) ótimo anual TMY em Santa Maria-RS $\phi = -29,7^\circ$.

A partir da análise da Figura 4.60, depreende-se que o ângulo de inclinação ótimo foi de $\beta = 22,0^\circ$ e para os dados do TMY foi de $\beta = 23,5^\circ$. Nas Figuras 4.62 e 4.63 tem-se os gráficos das combinações ótimas de ângulo de inclinação e azimute que fornecem os maiores valores de irradiância.

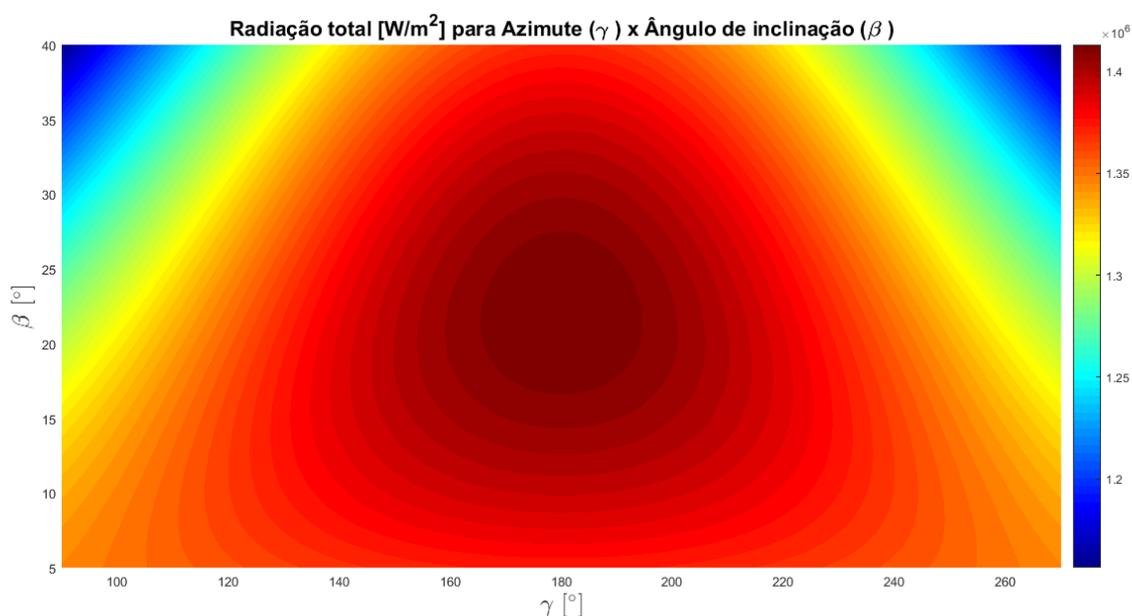


Figura 4.62: Valores simulados de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Santa Maria-PR $\phi = -29,7^\circ$.

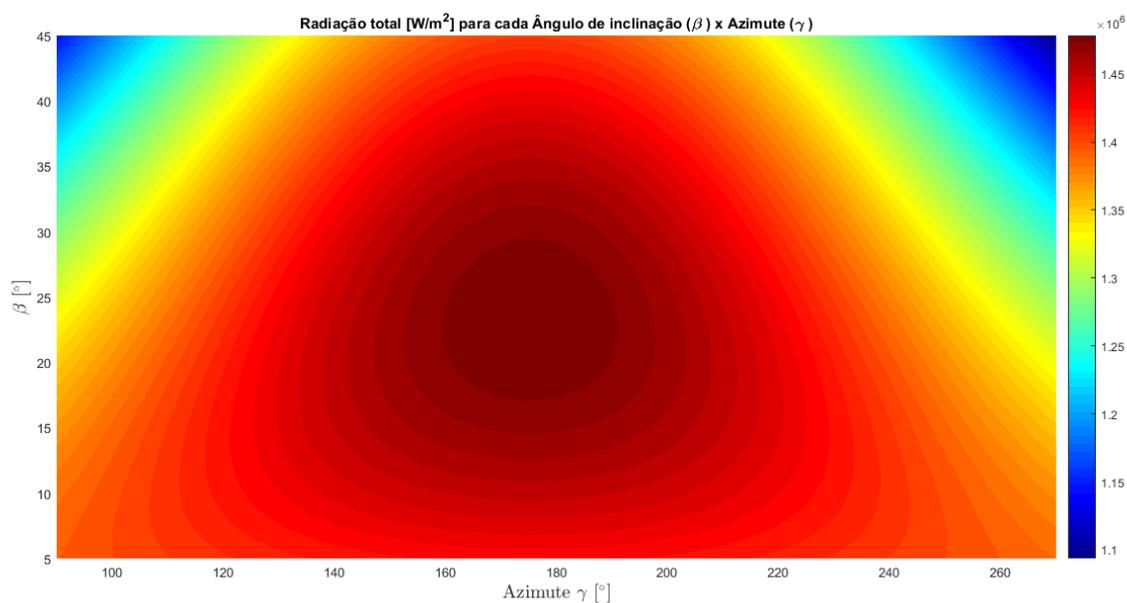


Figura 4.63: Valores do TMY de irradiância na placa para diversos ângulos de orientação em Santa Maria-PR $\phi = -29,7^\circ$.

Na Figura 4.62 observou-se uma faixa simétrica do ângulo de azimute com orientação norte, como esperado do modelo simulado, entretanto o ângulo de inclinação sofreu pouca variação no ângulo de inclinação do painel. Enquanto que no TMY da Figura 4.63 seguiu um padrão semelhante, onde ângulo de inclinação do painel e a orientação foram semelhantes. Os valores de

irradiância total na placa apresentaram também uma diminuição em seu valor absoluto, devido principalmente ao afastamento da linha do Equador. Os gráficos de como o DNI e o DHI variam diariamente estão no apêndice.

Na Tabela 4.2, têm-se um resumo do ângulos de inclinação (β) ótimo anual para todas as cidades.

Tabela 4.2: Ângulos de inclinação (β) ótimo anual para todas as cidades

Cidade	Latitude (ϕ)	Inclinação (β) simulada [°]	Inclinação (β) dados SAM [°]
Belém-PA	-1,38°	-0,5	8,0
Manaus-AM	-3,13°	1,0	5,5
Petrolina-PE	-9,35°	6,5	9,5
Bom Jesus da Lapa-BA	-13,27°	10,0	19,5
Cuiabá-MT	-15,65°	11,0	19,5
Brasília-DF	-15,87°	13,0	20,0
Belo Horizonte-MG	-19,85°	16,0	25,0
São Paulo-SP	-23,62°	19,5	23,0
Curitiba-PR	-25,52°	21,5	23,5
Santa Maria-RS	-29,7°	22,0	23,5

É importante salientar que não existe uma regra geral que se aplica a todas as cidades, primeiramente por questões relacionadas à extensão territorial brasileira (Gasparin & Krenzinger, 2016). A exceção de Manaus, verificou-se que o melhor ângulo, para o ano, é muito próximo ao valor da latitude local, conforme resultados obtidos por outros pesquisadores, como (Nijegodorov, 1994), (Ibrahim, 1995) e (Yakup & Malik, 2001).

Existe um consenso geral de que a inclinação da placa deve ser igual a latitude local, diversos autores, como: (Frontin, et al., 2017), (Gasparin & Krenzinger, 2016); (Moreira, et al., 2016), (Calabrò, 2012), entre outros que obtiveram resultados de que o ângulo de inclinação da placa foi próximo ou igual a latitude local. Entretanto, nem sempre essa regra é observada.

Diversos autores chegaram à conclusão que o ângulo de inclinação ótimo varia mensalmente e sazonalmente, entretanto a maioria deles concluiu que o ângulo de inclinação ótimo do painel anual é aproximado da latitude local, dentre eles destaca-se: (Calabrò, 2012), (Kacira, et al., 2003), (GREENPRO, 2004), (Bohmer & Assis, 2007).

De um ponto de vista puramente geométrico, a melhor orientação para um painel fotovoltaico para interceptar a maior quantidade de irradiância normal a ele, é aquela com inclinação igual ao da latitude local e orientado para o norte geográfico. Destaca-se que o clima local é um grande influenciador, e que há casos em que nem sempre a melhor orientação possível é obtida na orientação considerada ideal ou referência. (Gasparin & Krenzinger, 2016).

De acordo com (Lave & Kleissi, 2011), os valores ótimos de inclinação do painel variaram dentro de uma faixa de $\phi = \pm 10^\circ$ e pelos estudo de (Lewis, 1986), onde os resultados variaram $\phi = \pm 20^\circ$ e que o valor de beta ótimo é extremamente sensível ao local. Dentre todas fontes, é

um consenso que o clima é um grande influenciador dos resultados.

Por fim, salienta-se que foram desconsiderados os efeitos de temperatura na placa, e que para se chegar em valores mais precisos seriam necessários arquivos climáticos representativos dos locais de interesse e, portanto, a criação de uma rede de medidas de dados solarimétricos contendo os dados de radiação, além de variáveis ambientais, que são determinantes para a produção de arquivos climáticos confiáveis.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta uma metodologia de como calcular a irradiância total sobre uma superfície inclinada contabilizando as parcelas de radiação direta, difusa e refletida. Foi realizado o mesmo processo para dados obtidos através do software SAM, por arquivos climáticos do tipo TMY (Typical Meteorological Year). Para o cálculo é considerado um fator de atenuação de atmosfera, fator geométrico e fator de forma.

A simulação analisa a teoria da radiação incidente em uma placa plana inclinada apresentada por (Liu & Jordan, 1960) para um céu isotrópico e busca estabelecer a orientação ótima para um painel fotovoltaico. Foram realizadas interações com a intenção de obter os valores otimizados, analisando cada cenário possível. Primeiramente analisou-se a cidade de Brasília, por conseguinte, expandiu a simulação para outras localidades.

Em seguida, contabilizou-se a irradiação incidente sobre terras brasileiras em um período de um ano para uma altitude média, variando a latitude e obtendo um gráfico da irradiação horizontal global no Brasil. Para validação dos dados, o gráfico foi comparado com um mapa de irradiação global horizontal medido por um órgão (ATLAS) capaz de garantir uma boa precisão dos dados. Foram observadas algumas variações, sendo boa parte relacionadas às condições climáticas e pela altitude local. Devido às diferenças numéricas, analisou-se como a altitude interfere no valor da irradiação total incidente em um painel. Realizou-se também uma análise da influência do albedo na irradiância total.

Apesar dos dados do TMY gerados pelo software SAM possuírem uma alta precisão ocorrem pequenos desvios, que podem influenciar em até 6% os resultados finais (Blair & Dobos, 2012). Lembra-se que os dados do TMY, forneceram os dados de irradiância direta normal e difusa no modelo de (Liu & Jordan, 1960) e que de acordo com (Lewis, 1986) o modelo possui 3 deficiências, ele negligencia a distribuição anisotrópica da irradiância difusa, a assimetria em torno do meio dia solar para a componente de irradiância total e ele encurta o comprimento diário ao desconsiderar a irradiância da aurora e do ocaso.

Por fim, conclui-se que a metodologia foi bem realizada e os valores estavam coerentes com as referências, apesar de ter-se desconsiderado a influência da temperatura e pequenas falhas no modelo de (Liu & Jordan, 1960), o qual foi predominantemente utilizado nas referências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Calabrò, E., 2012. An Algorithm to Determine the Optimum Tilt Angle of a Solar Panel from Global Horizontal Solar Radiation. Hindawi Publishing Corporation.
- Campos, M. S., 2014. ELABORAÇÃO DE SOFTWARE E MEDIDAS DE RADIAÇÃO SOLAR PARA USO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Belém(Pará): s.n.
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A., 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. Wisconsin: Wiley Interscience
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken(New Jersey): Incorporation John Wiley & Sons.
- Filho, K. d. S. O. & Saraiva, M. d. F. O., 2004. Astronomia e Astrofísica. São Paulo: Livraria da Física.
- Frontin, S. d. O., Jr., A. C. P. B., Carneiro, M. T. D. & Godoy, N. R. D. d., 2017. Usina Fotovoltaica Jaíba Solar: Planejamento e Engenharia. Brasília: Universidade de Brasília.
- GREENPRO, 2004. Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projectos e instalações. Lisboa: s.n.
- Hottel, H., 1976. A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres. Solar Energy, pp. 129-134
- Jucá, S. & Carvalho, P., 2013. Métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos: Aplicações em dessalinização. Duque de Caixias: Creative Commons.
- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y. & Dermikol, S., 2003. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. Elsevier, pp. 1265-1275.
- Li, D. H. W. & Lam, T. N. T., 2007. Determining the Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Energy Collection Based on Measured Solar Radiance Data. Hindawi Publishing Corporation.
- Liu, B. Y. H. & Jordan, R. C., 1960. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. Em: Solar Energy. s.l.:s.n., pp. 1-19.
- Macagnan, M. H., 2010. Introdução à Radiação Solar.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L. d. & Ruther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos(São Paulo): s.n.
- RIBEIRO, C. A. M., 2003. Aplicação de técnicas de geoprocessamento para análises das relações entre o fator de visão do céu e as diferentes orientações da malha urbana, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica da Paraíba.
- Safdarian, F. & Nazari, M. E., 2015. Optimal tilt angle and orientation for solar. Guarda, Portugal, s.n., p. 8.
- CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio Brito. Disponível

em <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=301>. Acessado em 10 de Novembro de 2017.

Fernando Ramos Martins, R. A. G. R. C. C. S. L. M. N. E. B. P. E. A. C. T., 2007. PROJETO SONDA – REDE NACIONAL DE ESTAÇÕES PARA COLETA DE DADOS METEOROLÓGICOS APLICADOS AO SETOR DE ENERGIA.. ABENS, 8 abril.

Gasparin, F. P. & Krenzinger, A., 2016. DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM DEZ CIDADES BRASILEIRAS COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES DO PAINEL. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 4-7 Abril.

6 APÊNDICE I - GRÁFICOS DNI E DHI MENSAIS, SAZONAIS E DIÁRIOS

6.1 Belém-PA

6.1.1 GRÁFICOS DNI E DHI MENSAIS

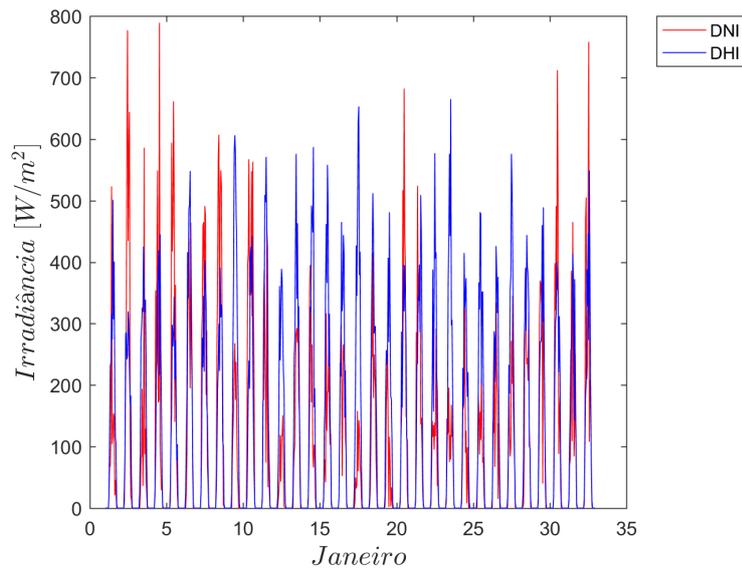


Figura 6.1: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Belém-PA.

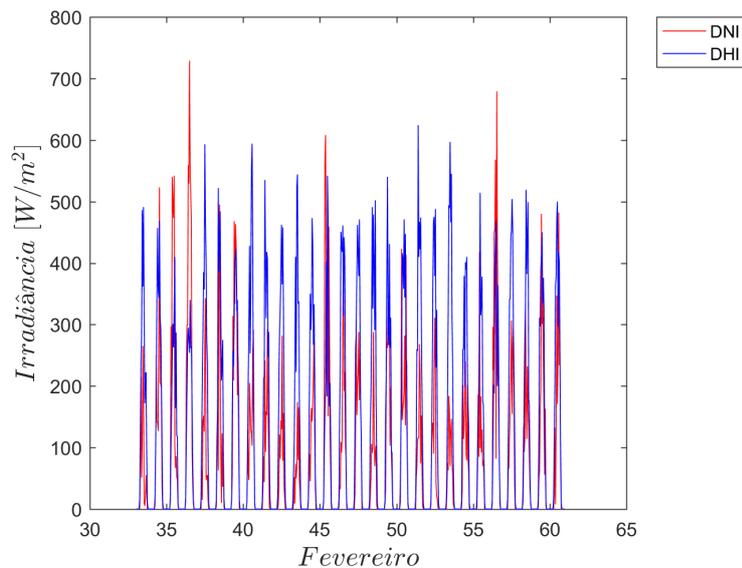


Figura 6.2: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Belém-PA.

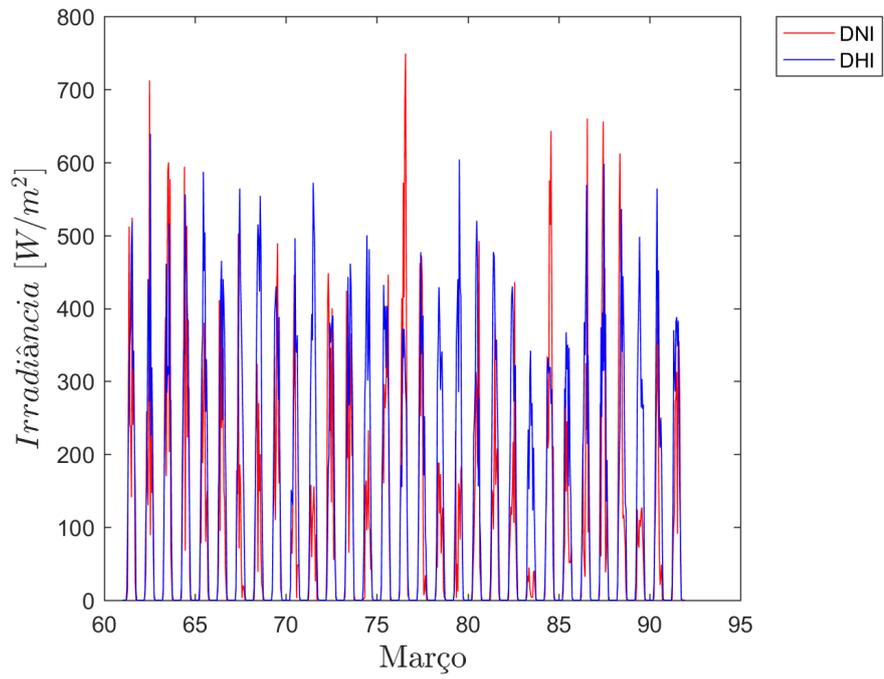


Figura 6.3: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Belém-PA.

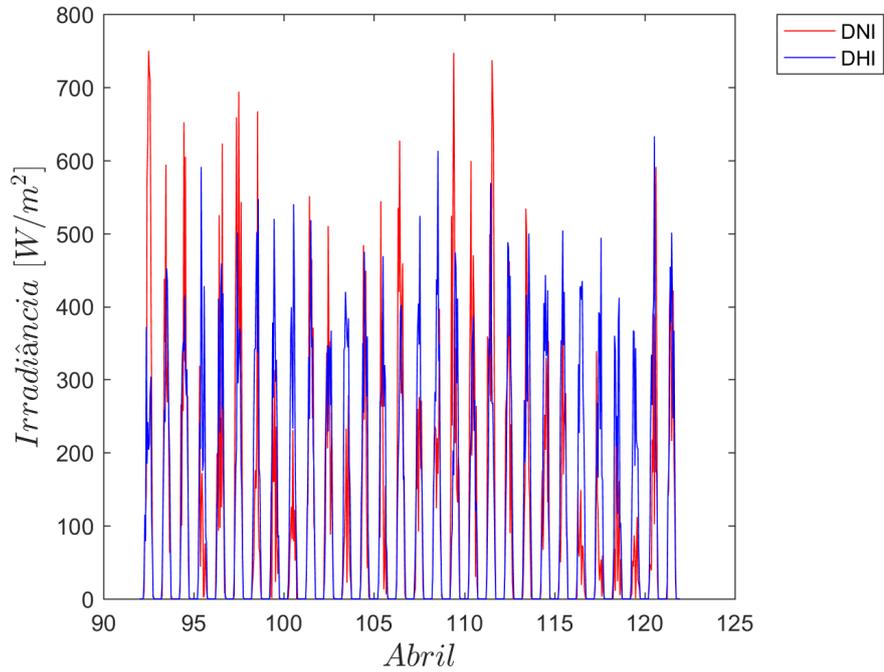


Figura 6.4: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Belém-PA.

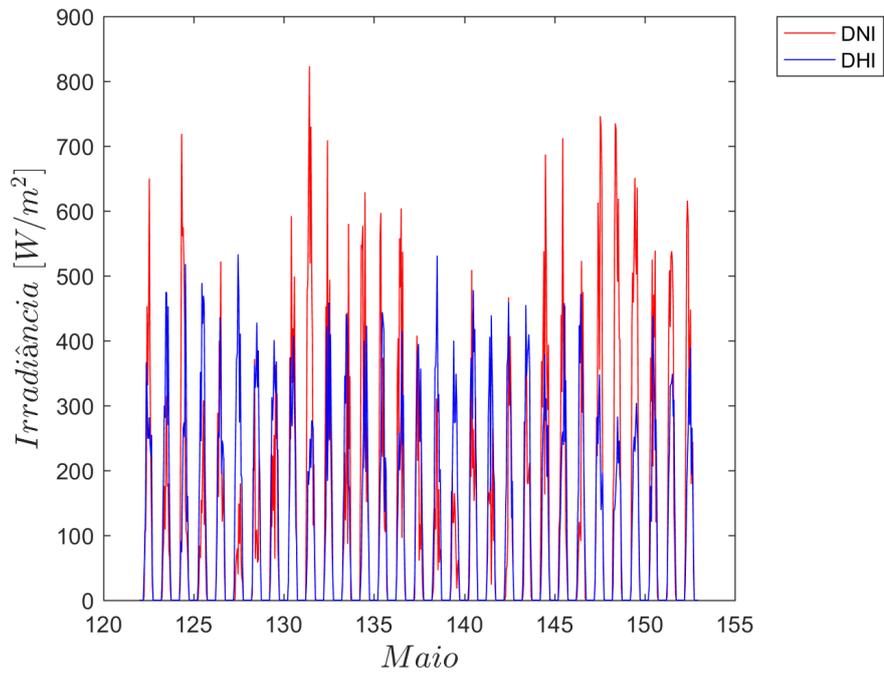


Figura 6.5: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Belém-PA.

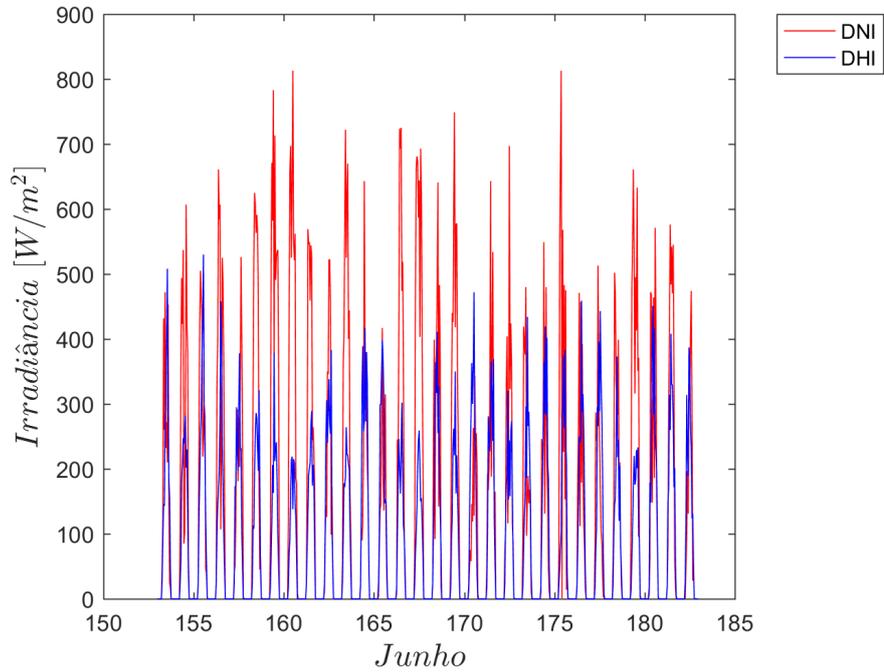


Figura 6.6: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Belém-PA.

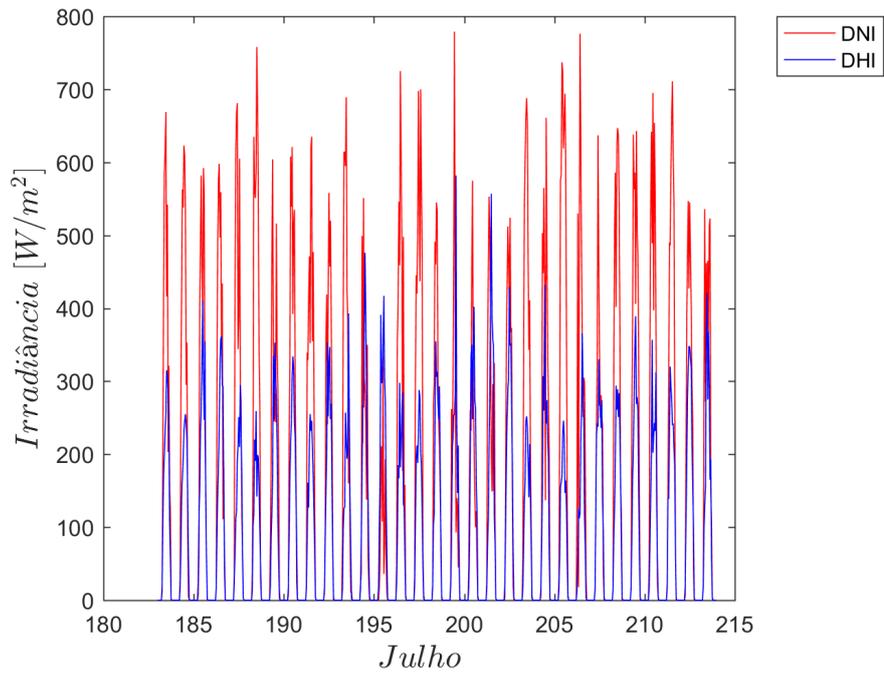


Figura 6.7: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Belém-PA.

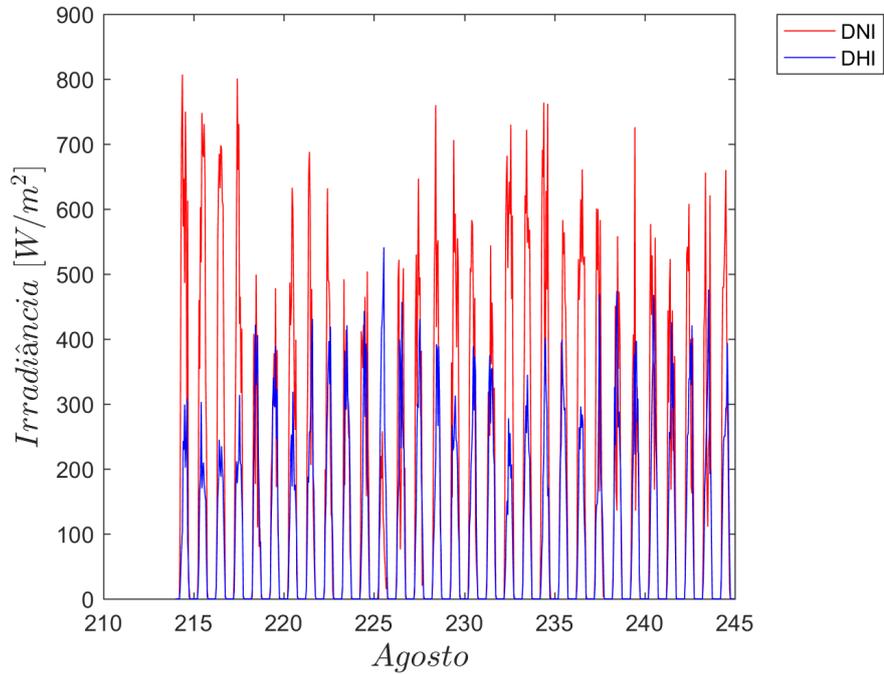


Figura 6.8: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Belém-PA.

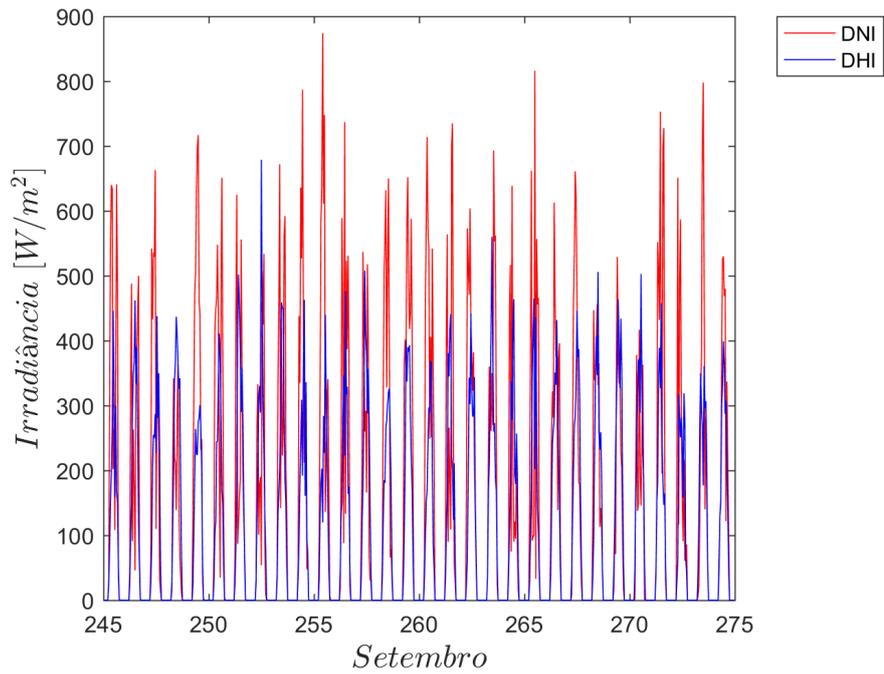


Figura 6.9: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Belém-PA.

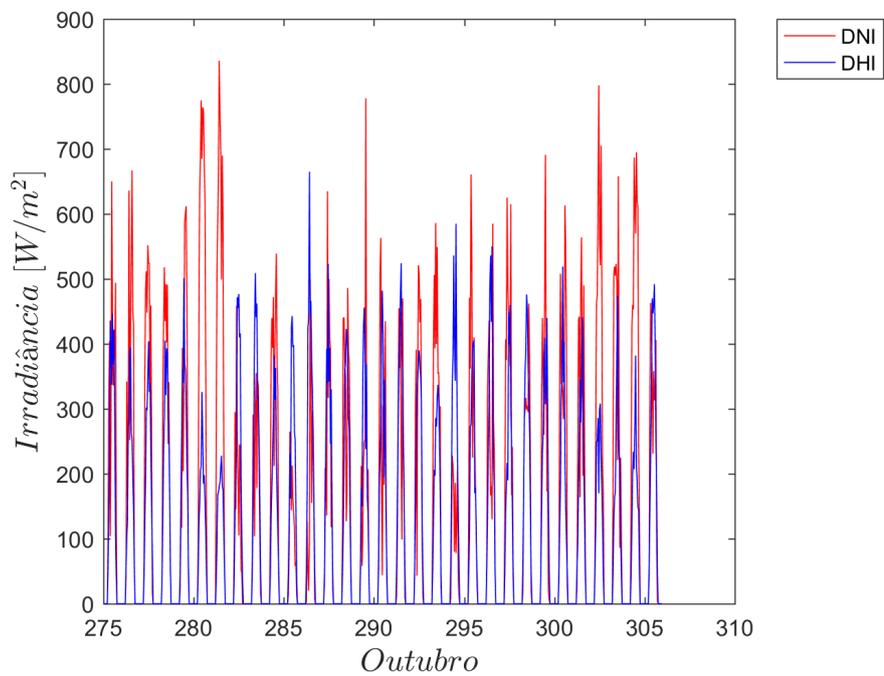


Figura 6.10: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Belém-PA.

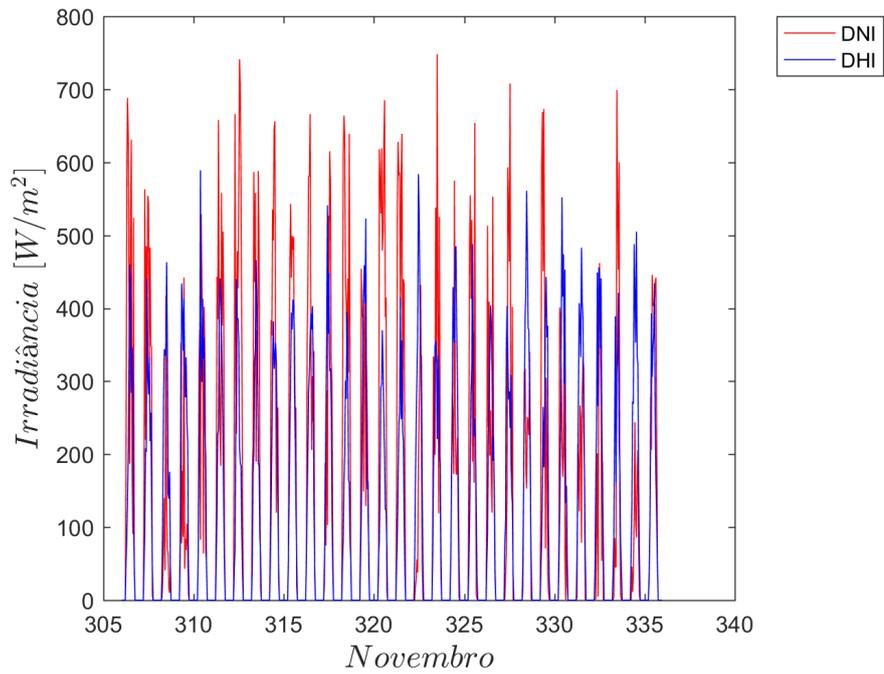


Figura 6.11: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Belém-PA.

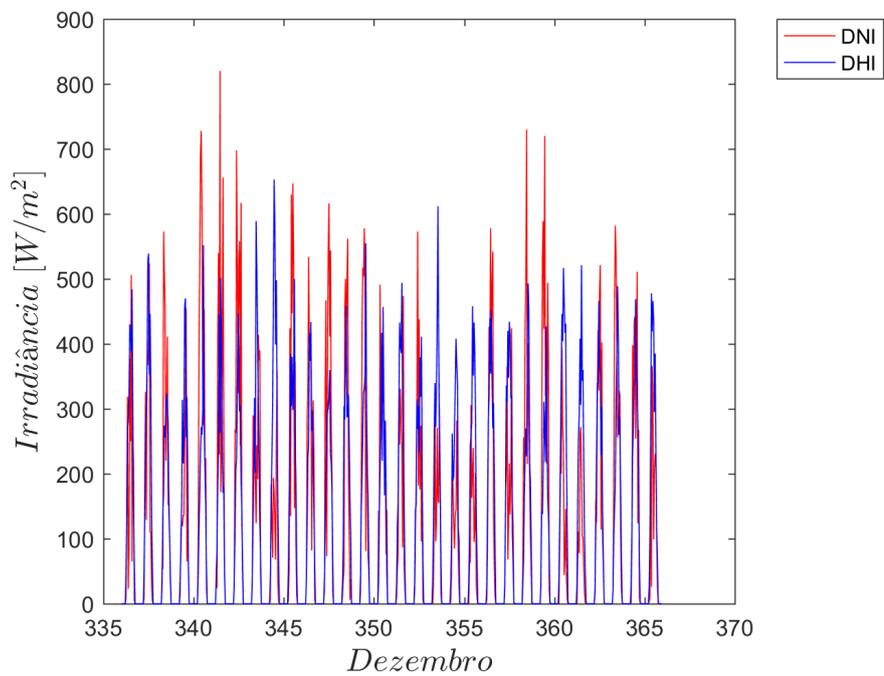


Figura 6.12: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Belém-PA.

6.1.2 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

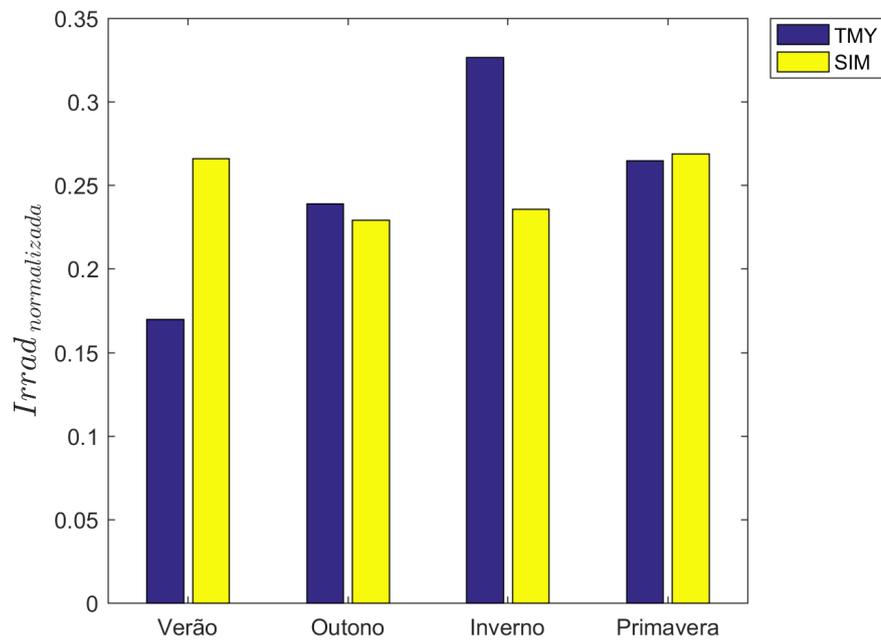


Figura 6.13: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Belém-PA.

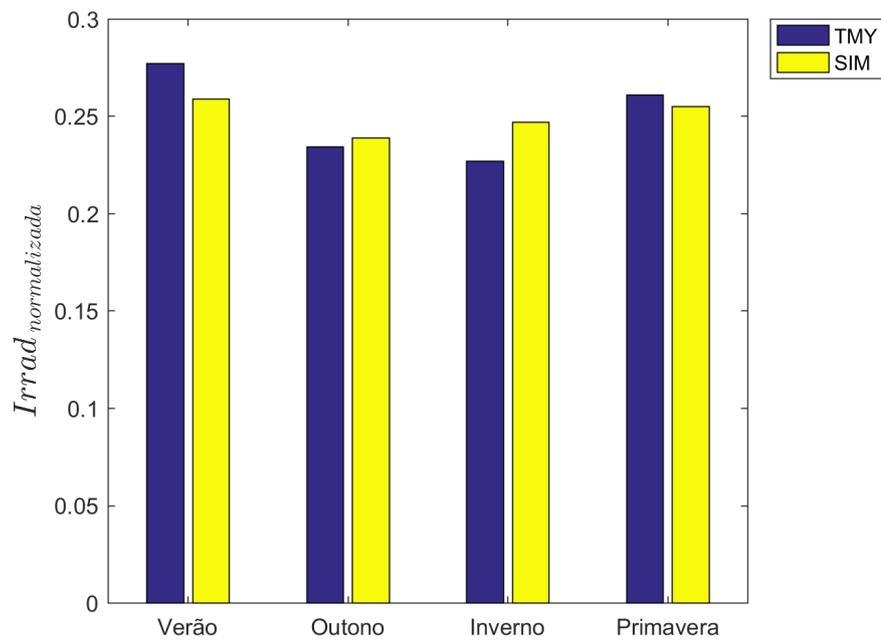


Figura 6.14: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Belém-PA.

6.1.3 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

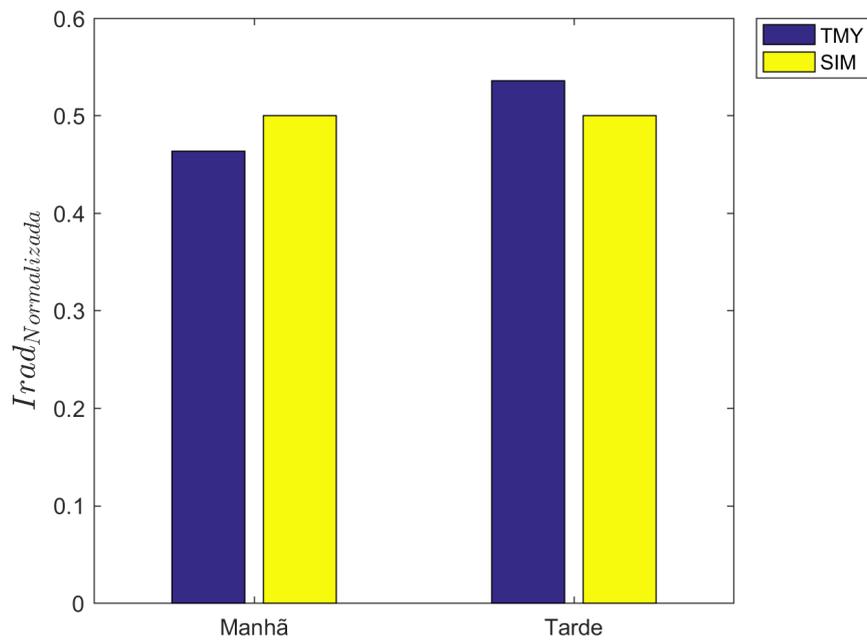


Figura 6.15: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Belém-PA.*

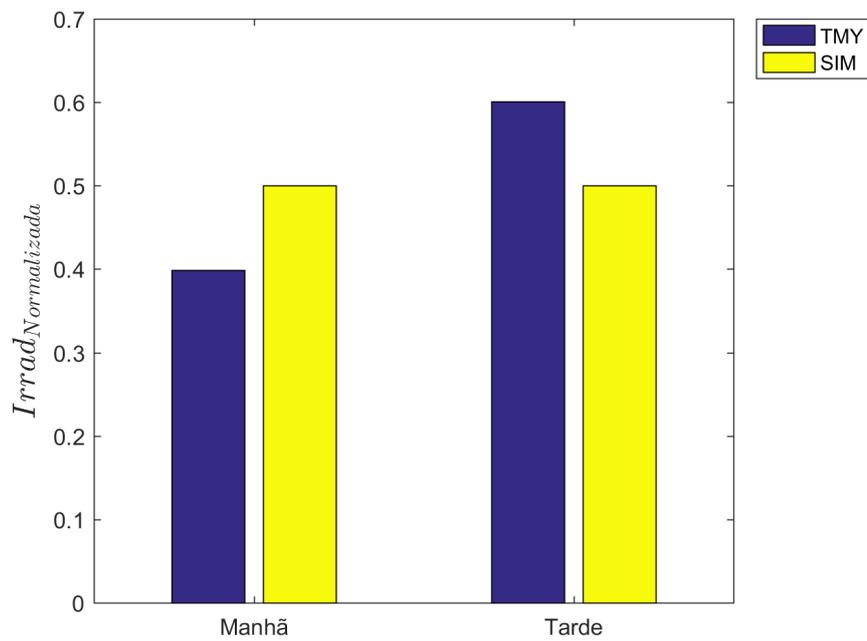


Figura 6.16: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Belém-PA.*

6.2 Manaus-AM

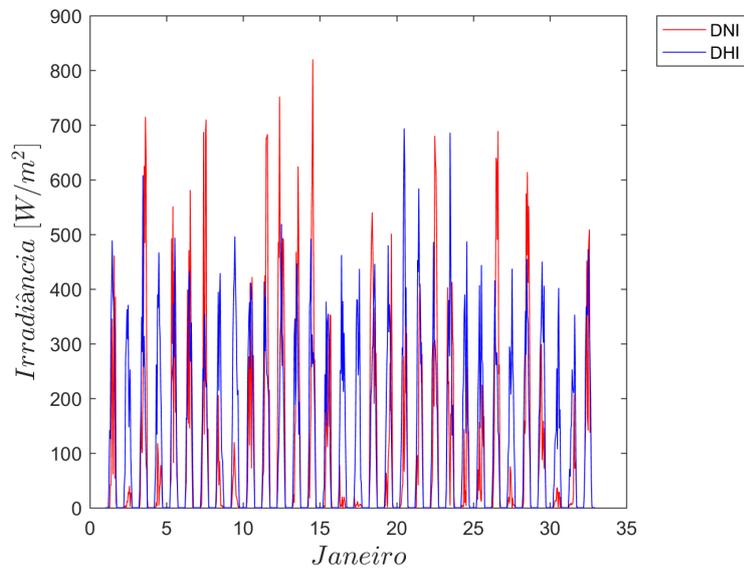


Figura 6.17: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Manaus-AM.

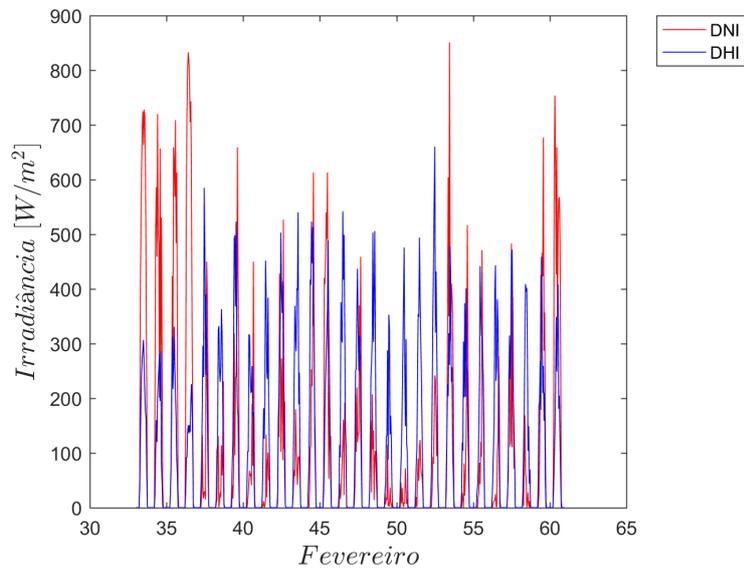


Figura 6.18: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Manaus-AM.

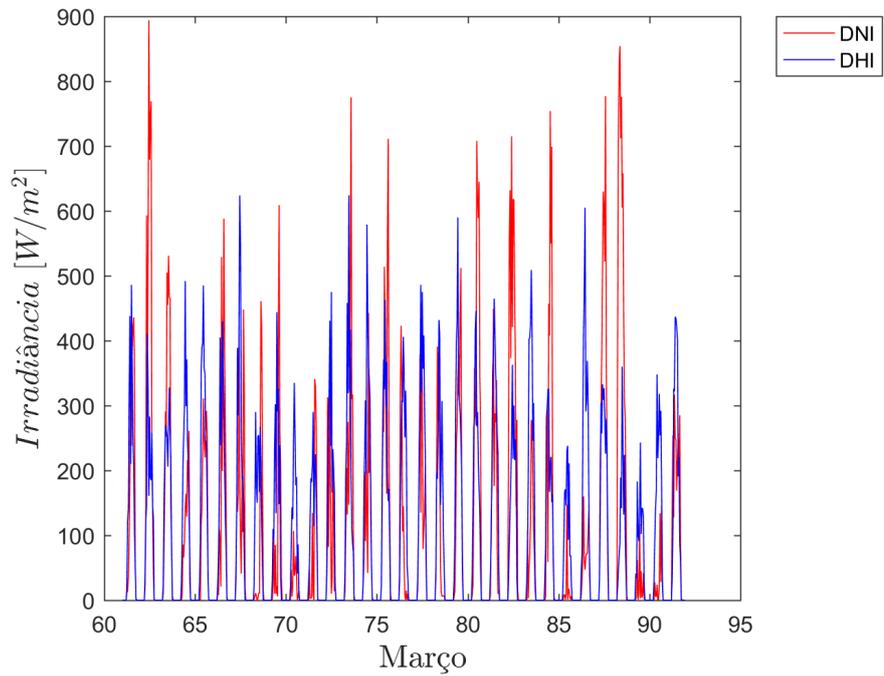


Figura 6.19: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Manaus-AM.

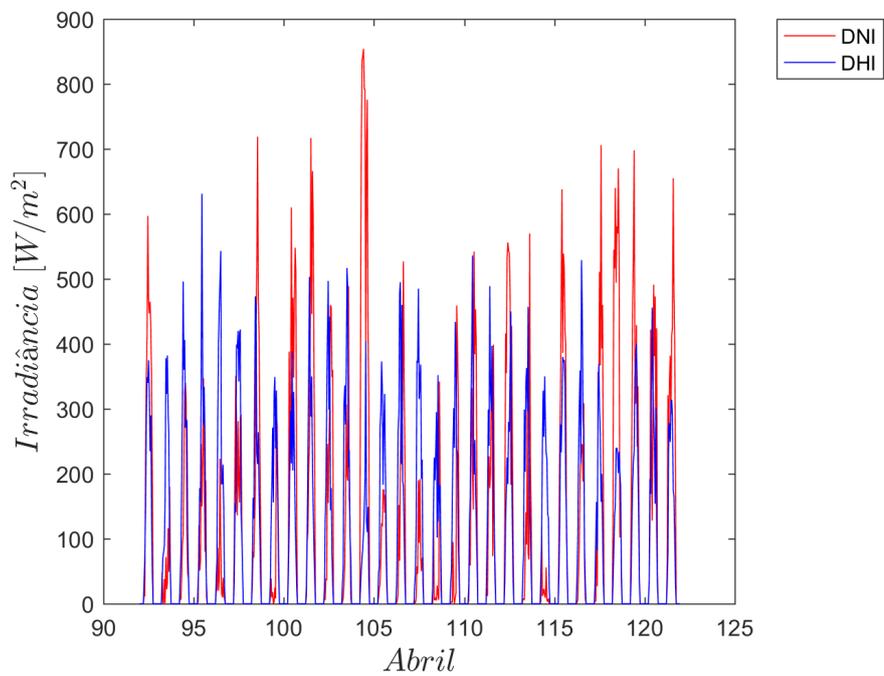


Figura 6.20: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Manaus-AM.

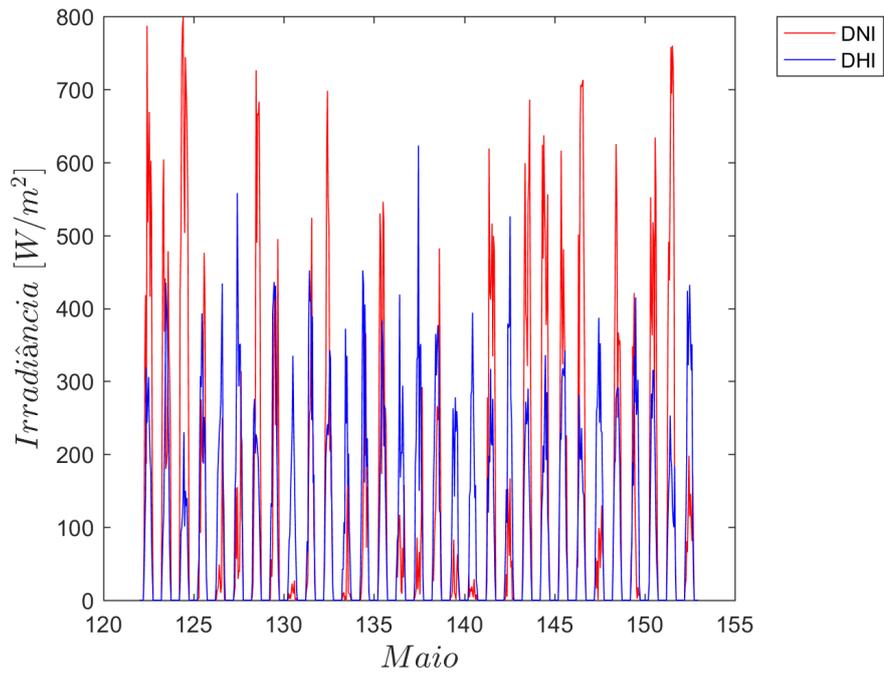


Figura 6.21: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Manaus-AM.

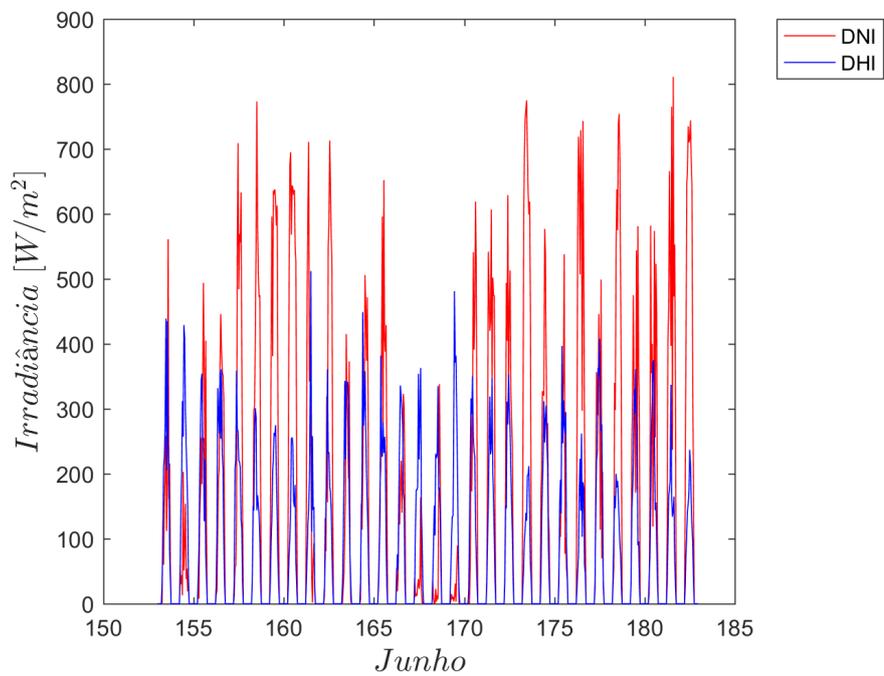


Figura 6.22: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Manaus-AM.

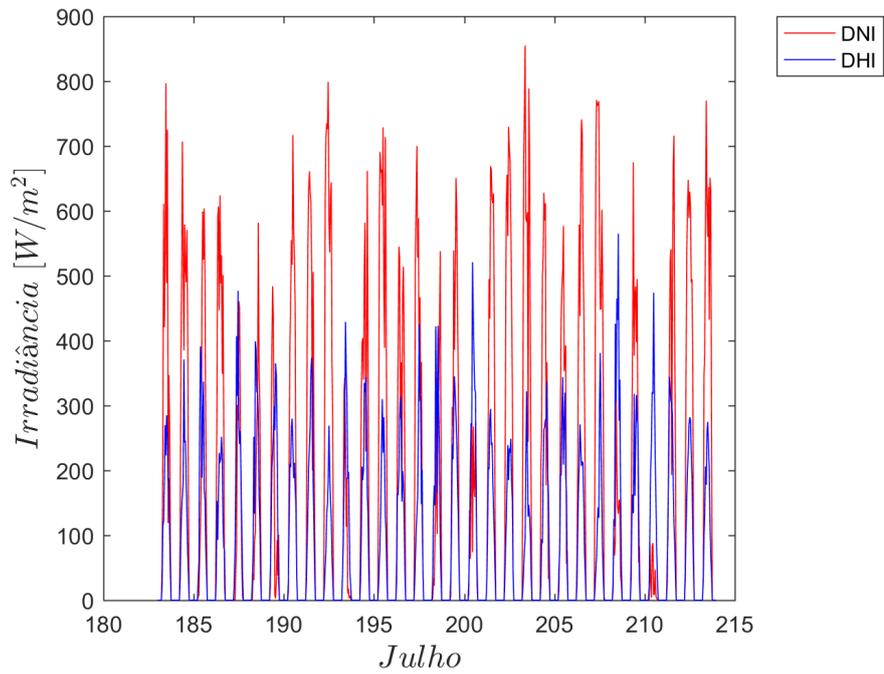


Figura 6.23: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Manaus-AM.

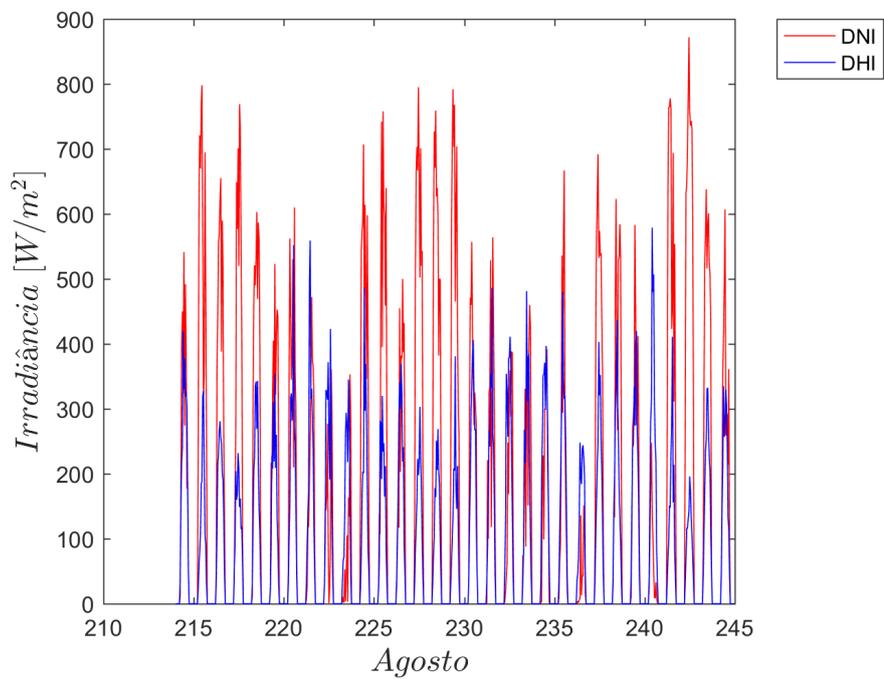


Figura 6.24: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Manaus-AM.

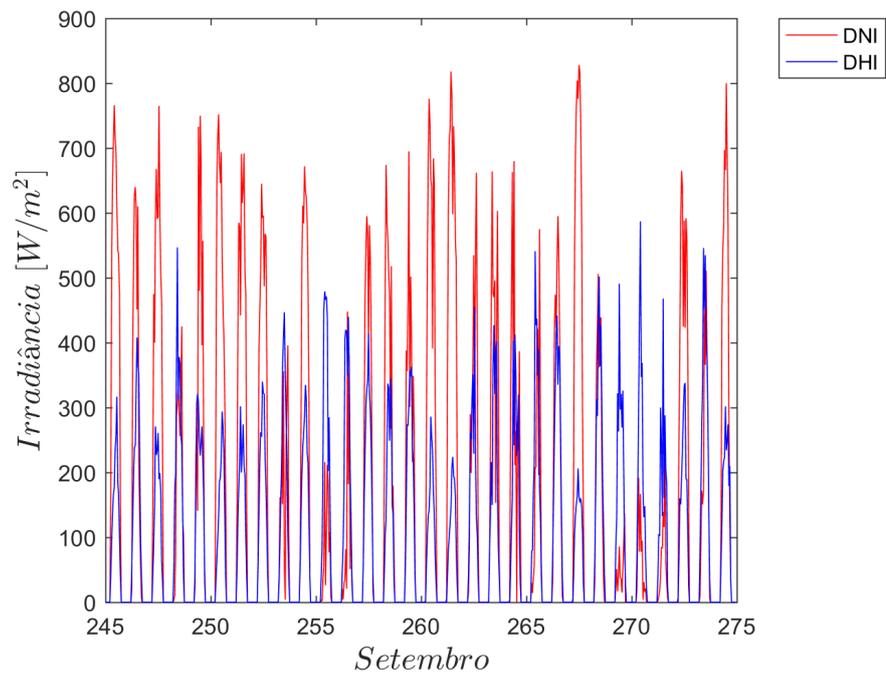


Figura 6.25: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Manaus-AM.

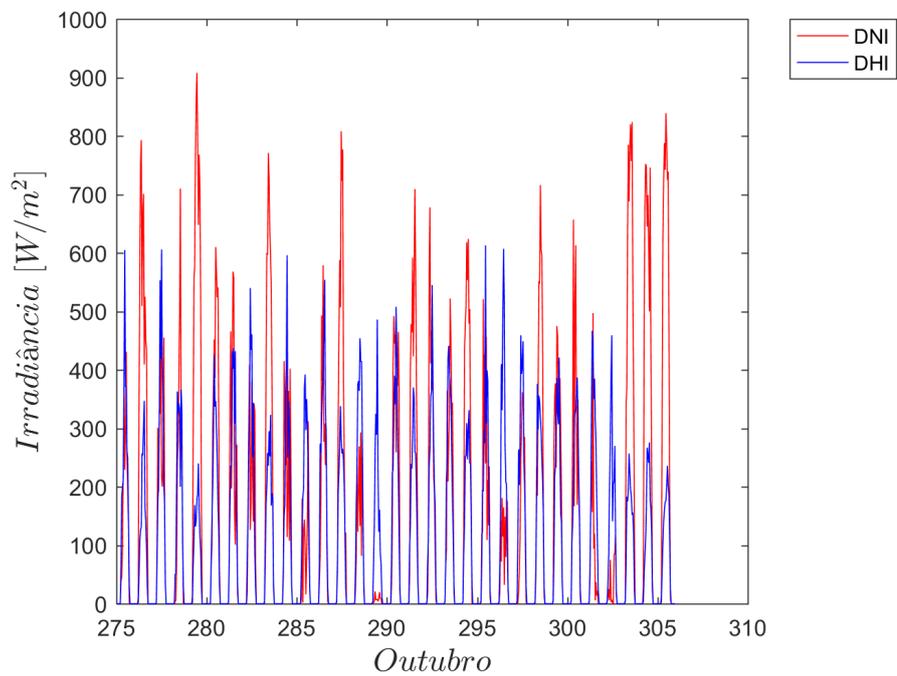


Figura 6.26: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Manaus-AM.

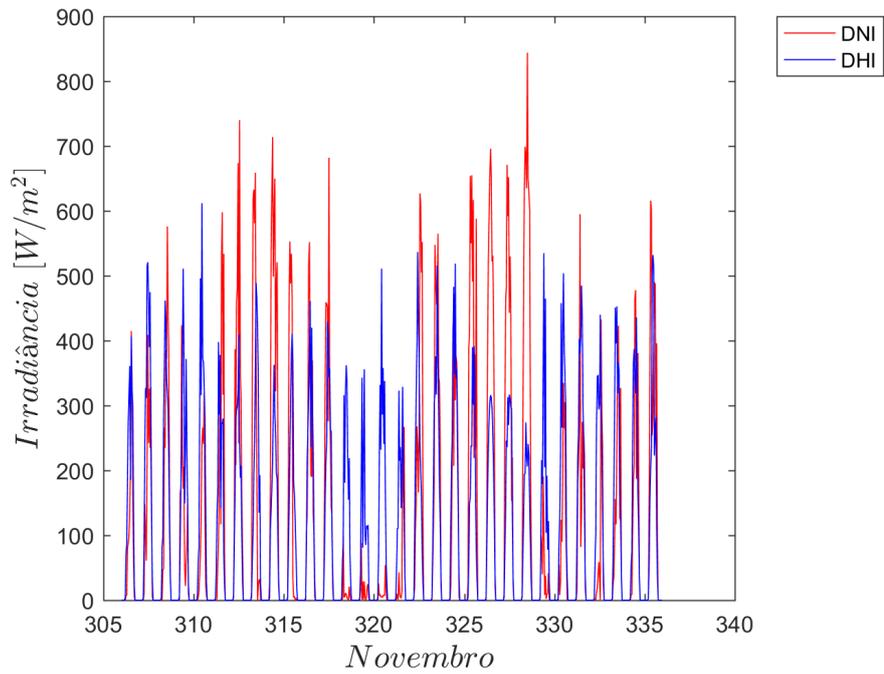


Figura 6.27: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Manaus-AM.

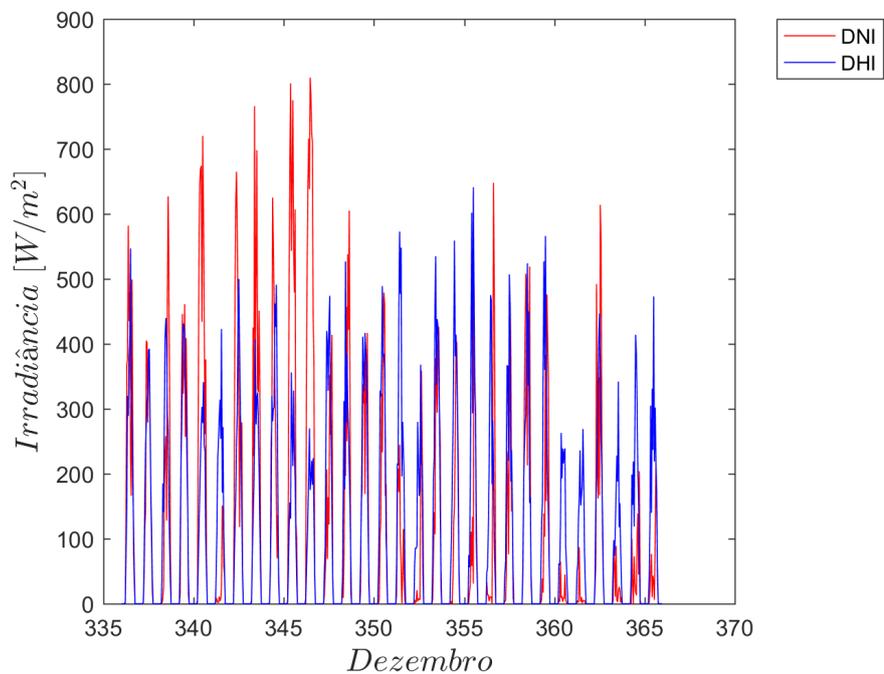


Figura 6.28: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Manaus-AM.

6.2.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

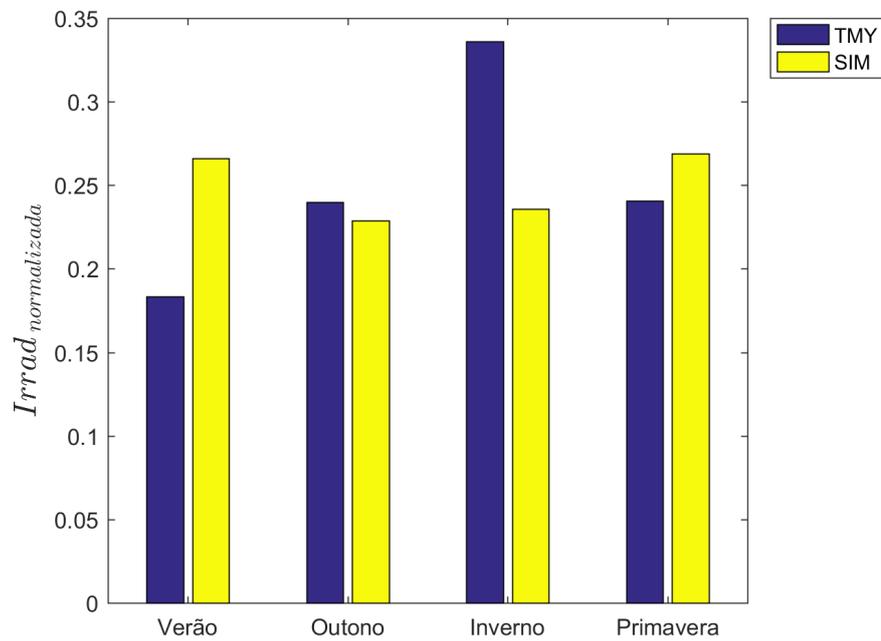


Figura 6.29: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Manaus-AM.

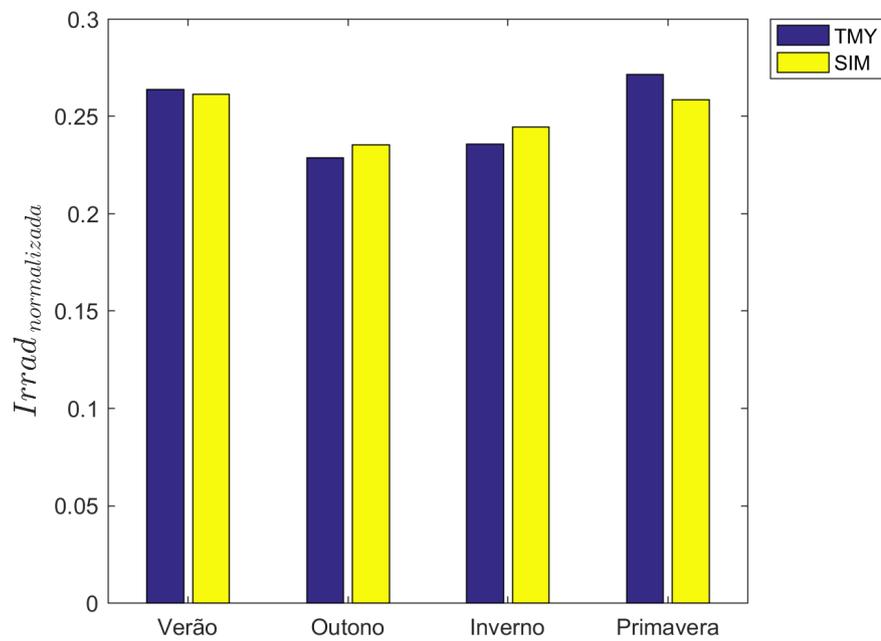


Figura 6.30: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Manaus-AM.

6.2.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

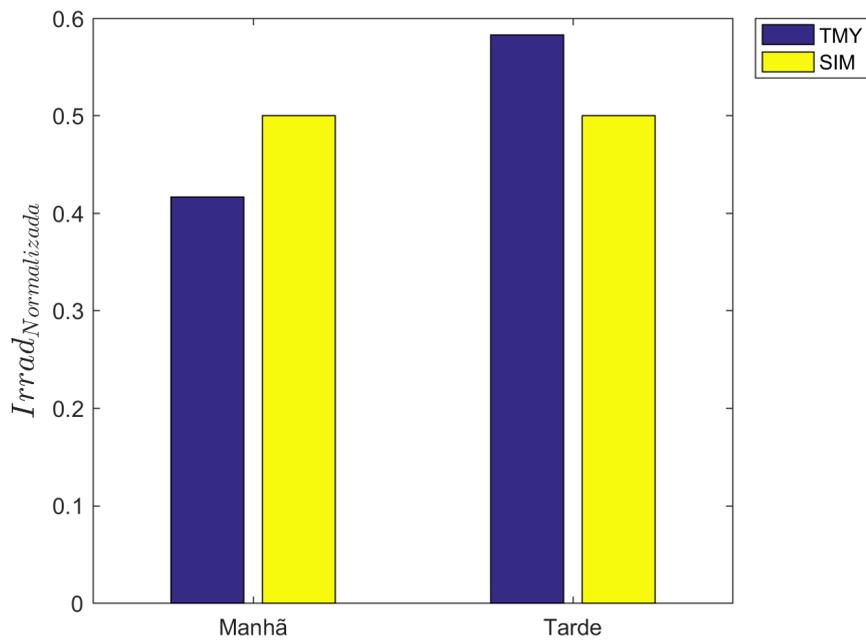


Figura 6.31: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Manaus-AM.*

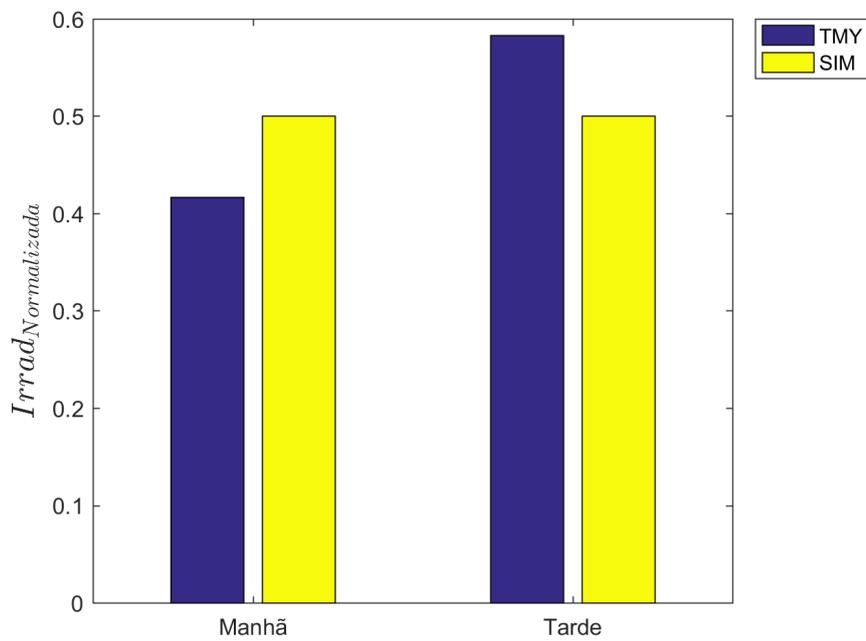


Figura 6.32: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Manaus-AM.*

6.3 Petrolina-PE

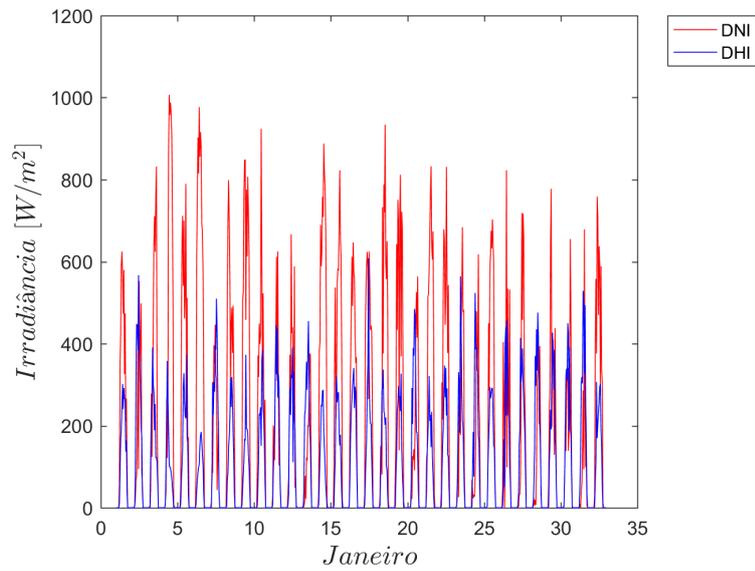


Figura 6.33: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Petrolina-PE.

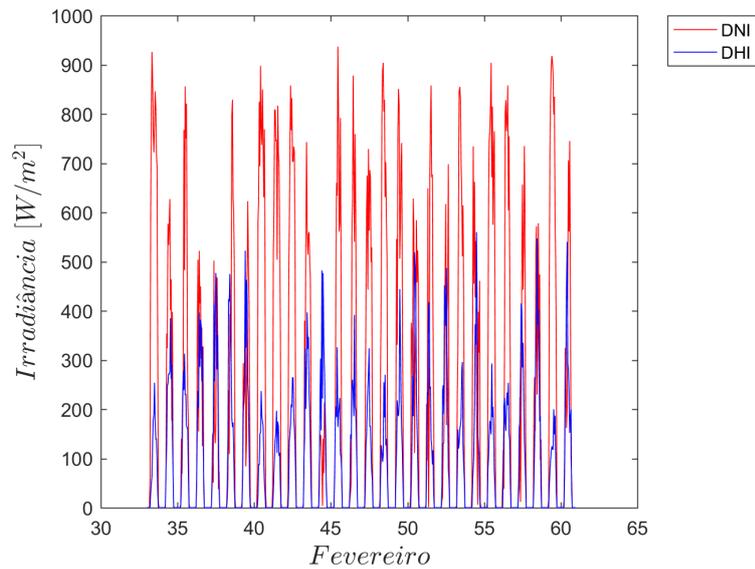


Figura 6.34: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Petrolina-PE.

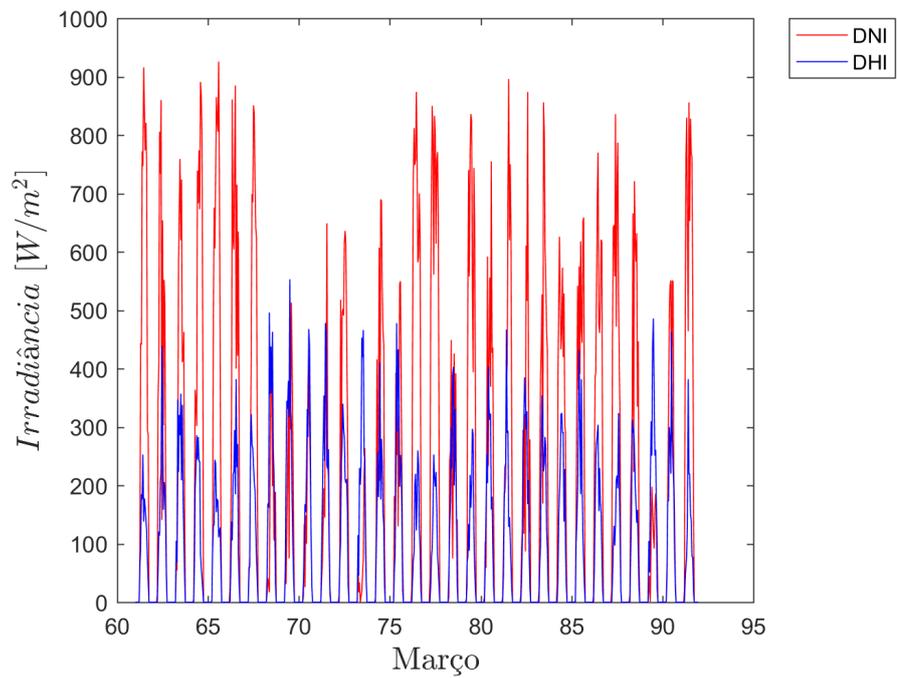


Figura 6.35: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Petrolina-PE.

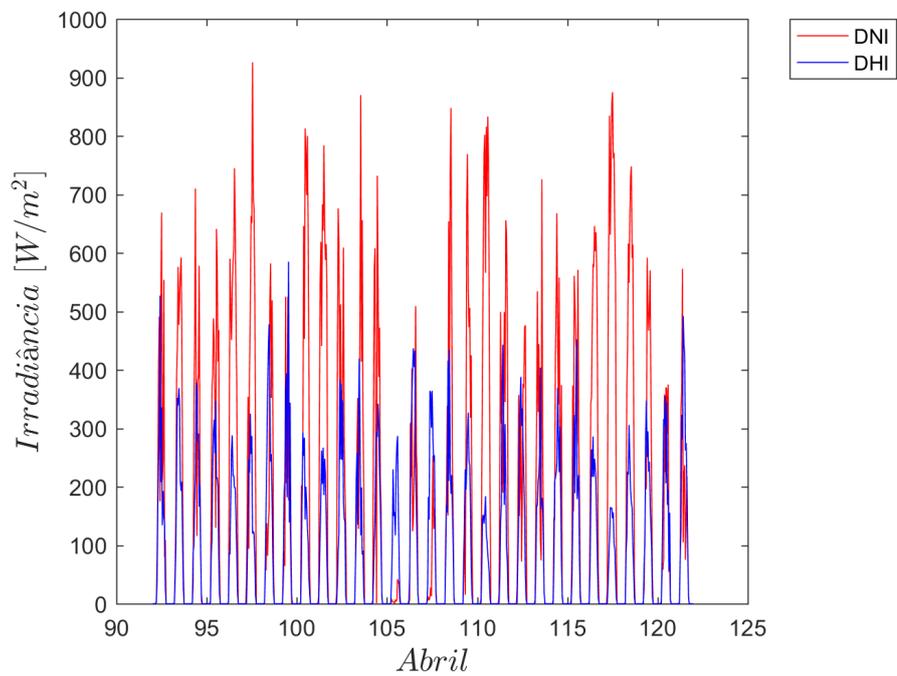


Figura 6.36: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Petrolina-PE.

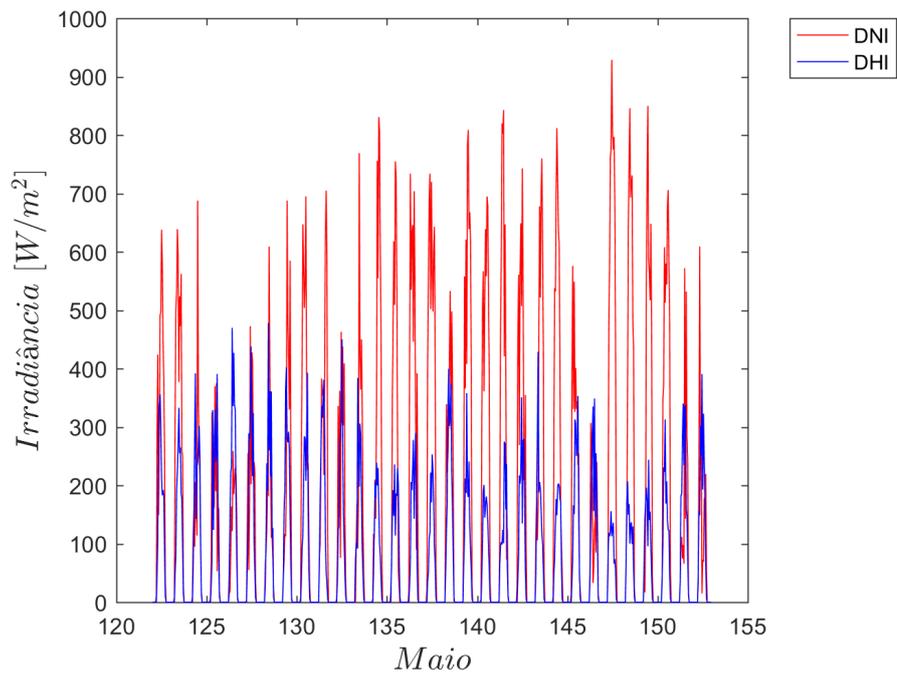


Figura 6.37: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Petrolina-PE.

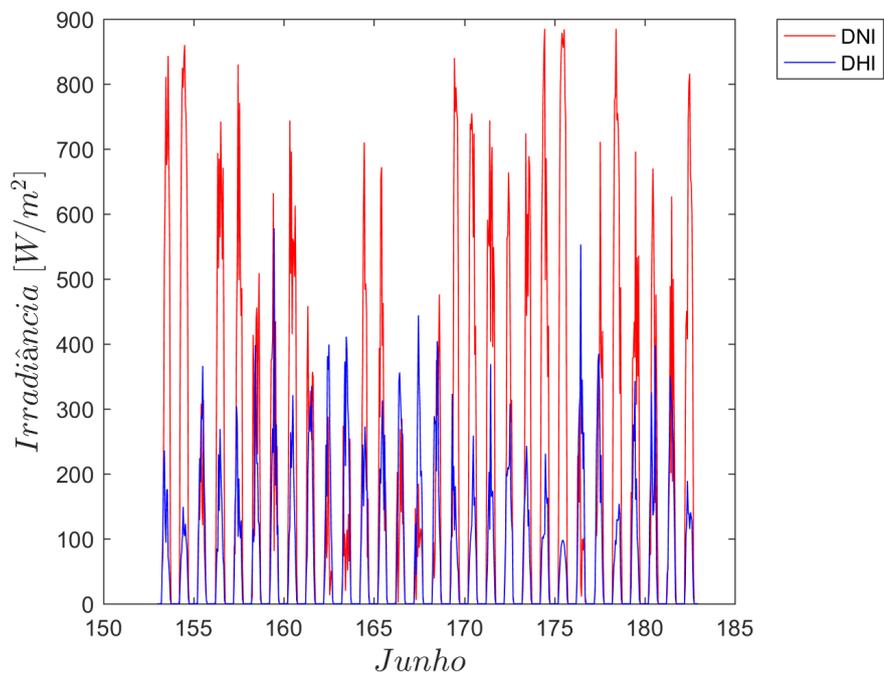


Figura 6.38: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Petrolina-PE.

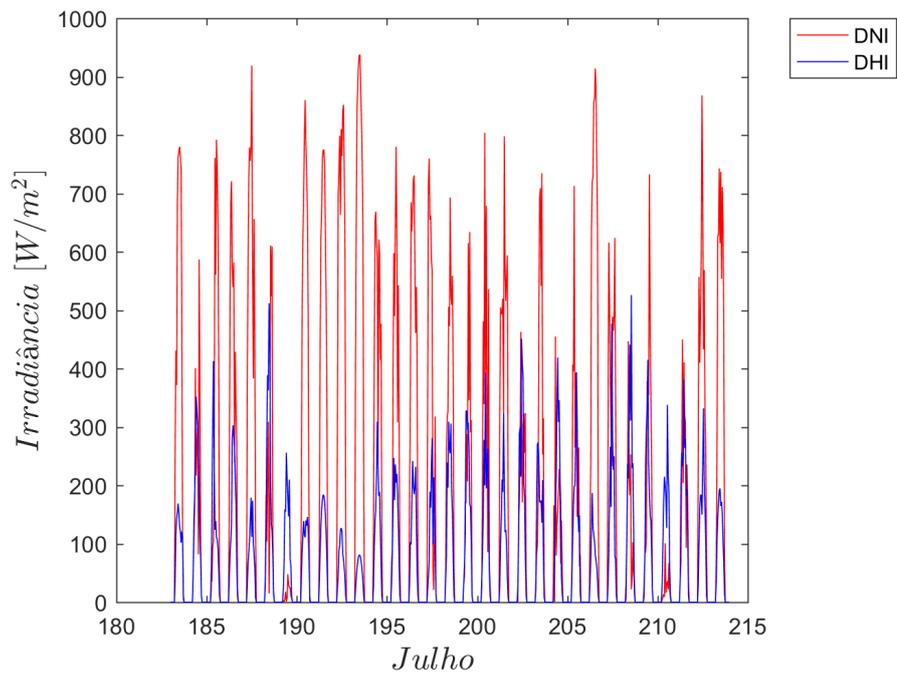


Figura 6.39: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Petrolina-PE.

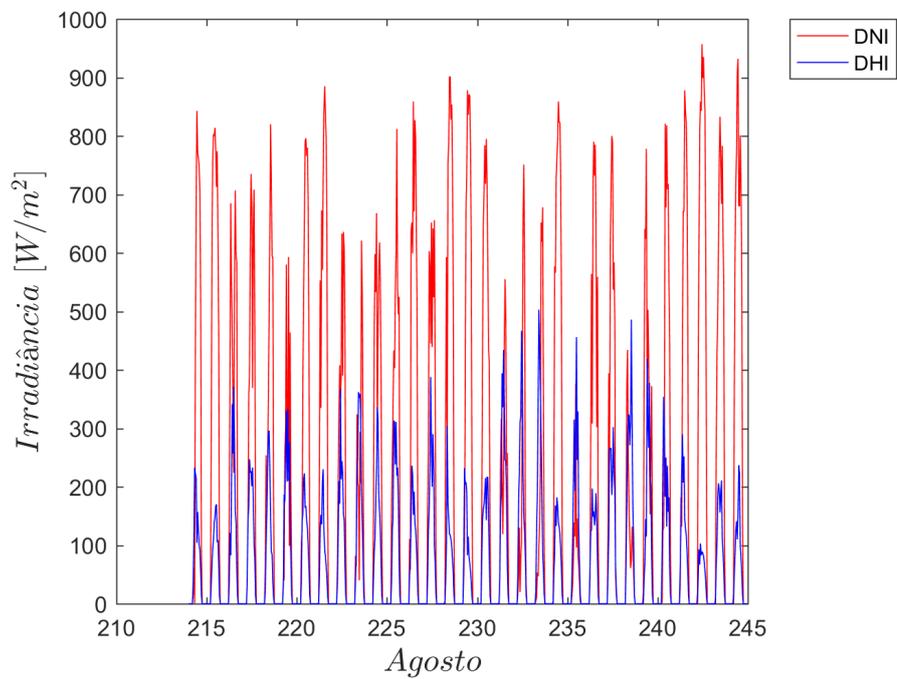


Figura 6.40: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Petrolina-PE.

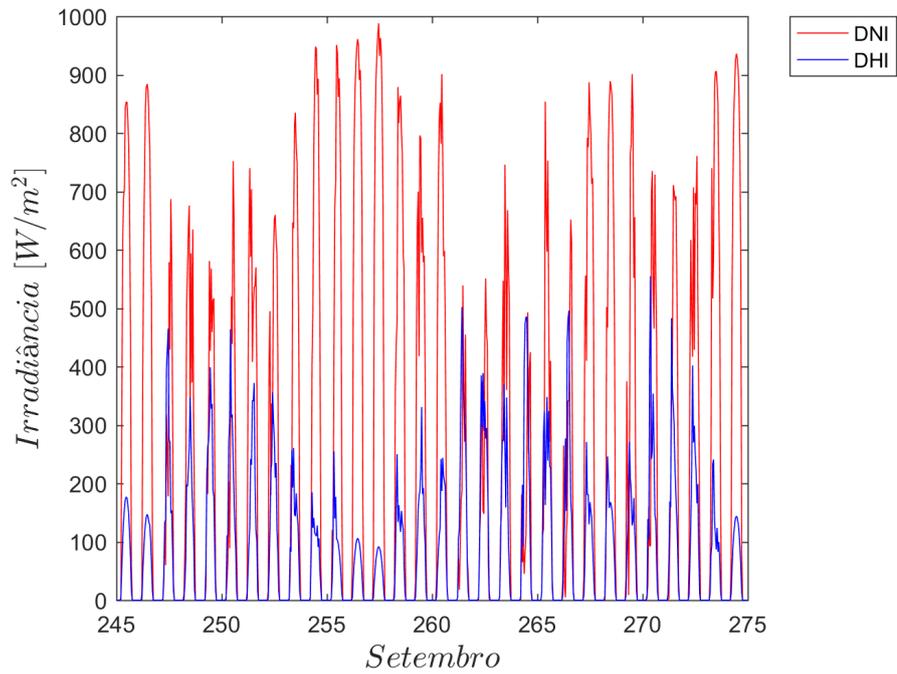


Figura 6.41: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Petrolina-PE.

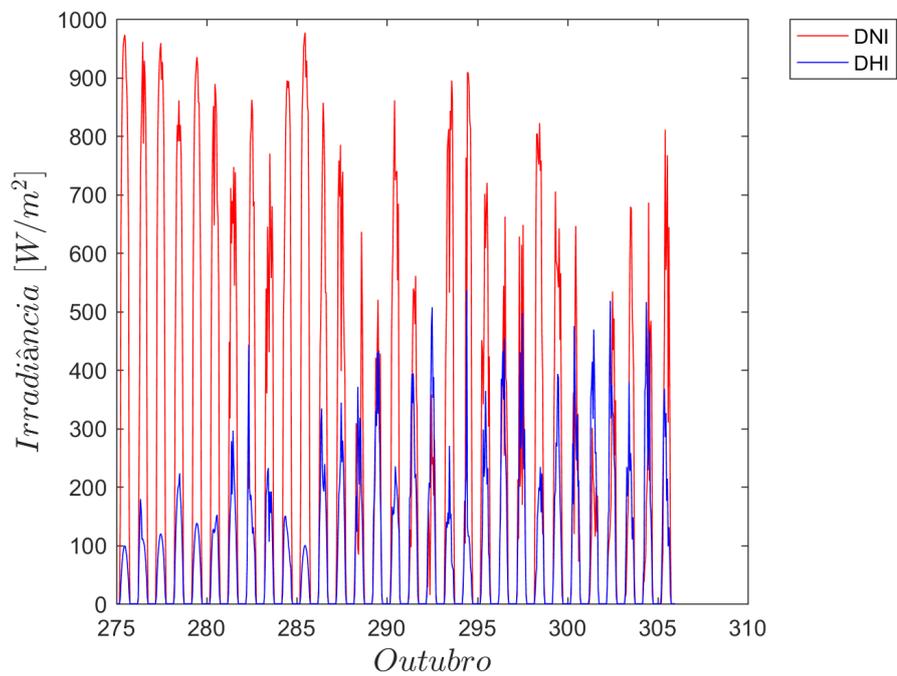


Figura 6.42: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Petrolina-PE.

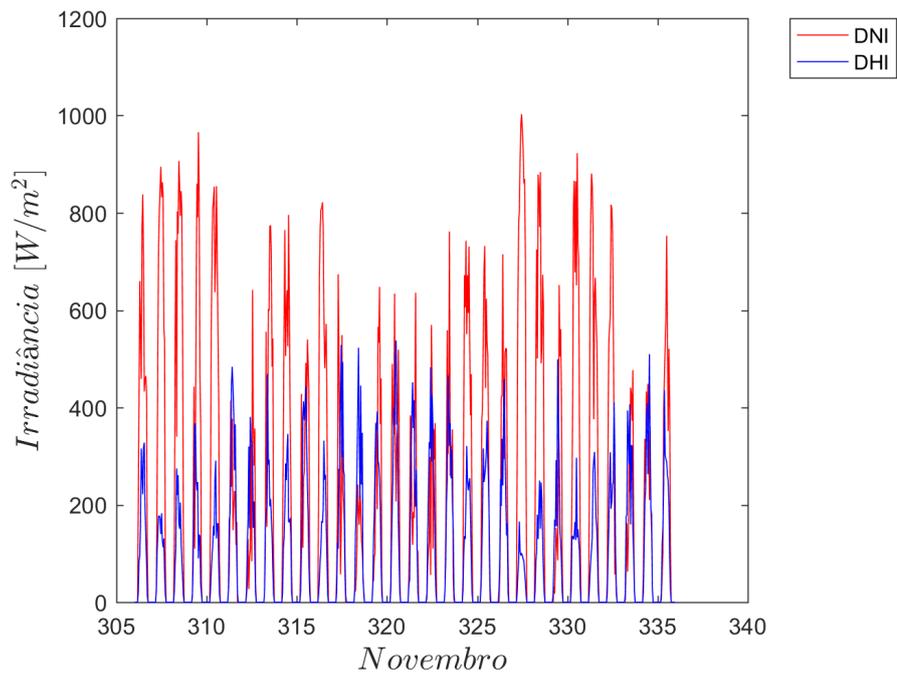


Figura 6.43: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Petrolina-PE.

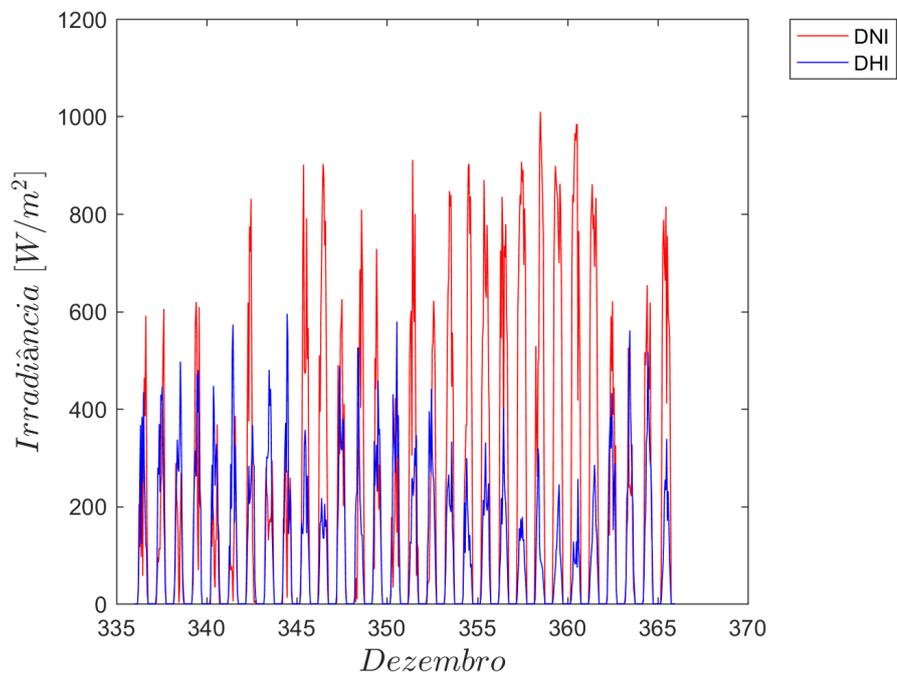


Figura 6.44: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Petrolina-PE.

6.3.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

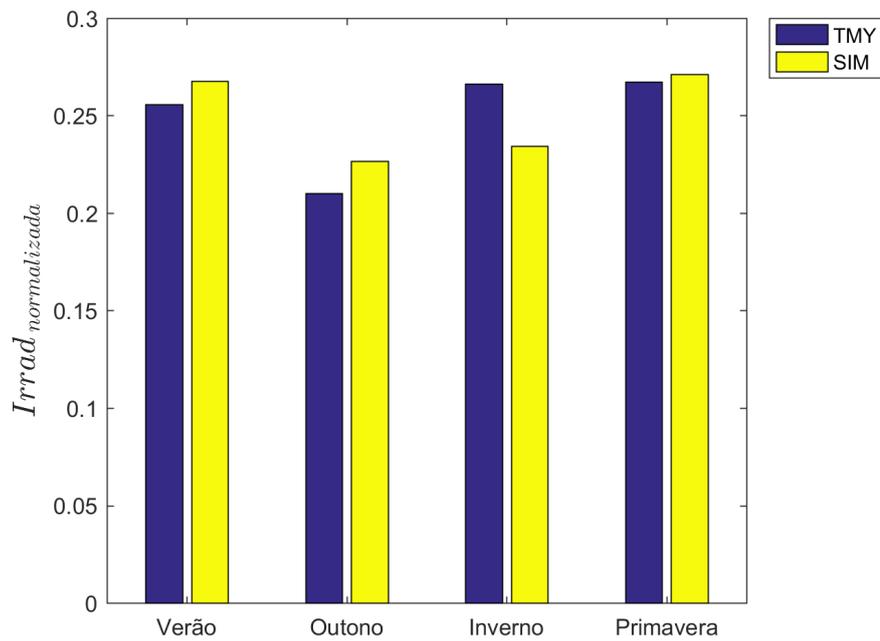


Figura 6.45: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Petrolina-PE.

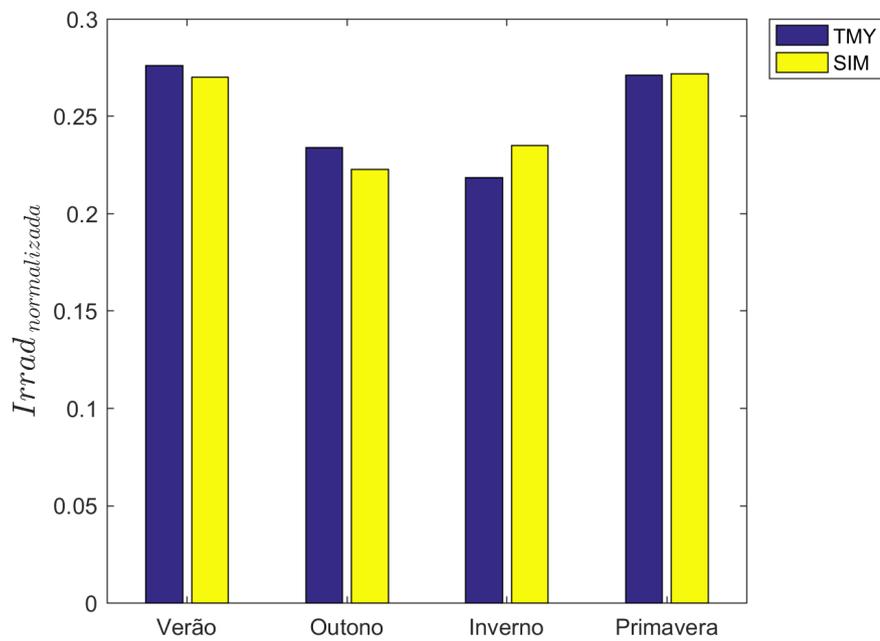


Figura 6.46: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Petrolina-PE.

6.3.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

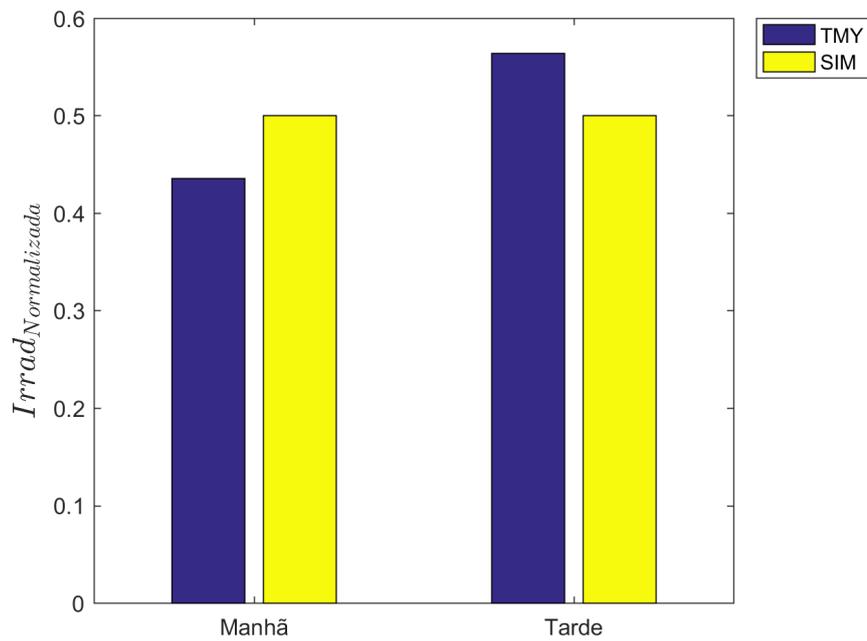


Figura 6.47: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Petrolina-PE.*

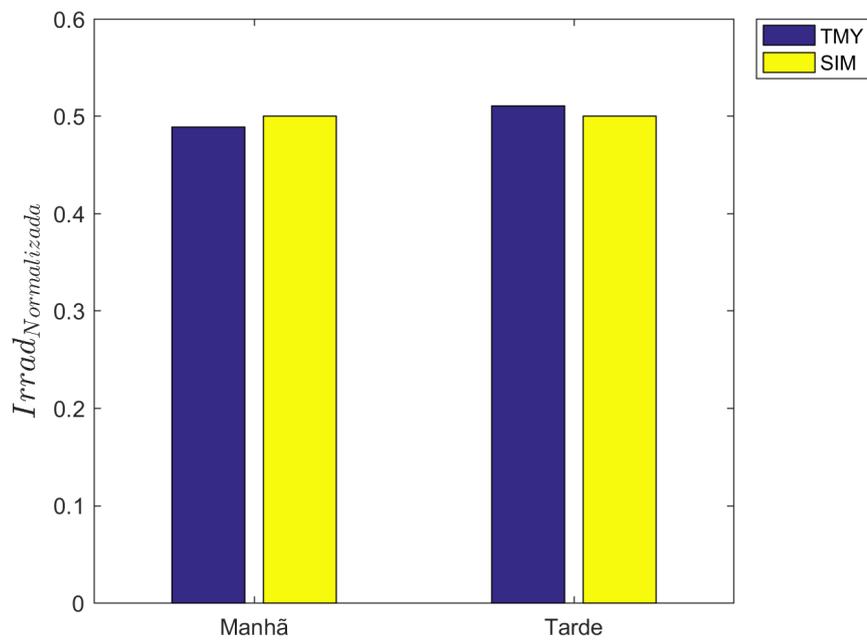


Figura 6.48: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Petrolina-PE.*

6.4 Bom Jesus da Lapa-BA

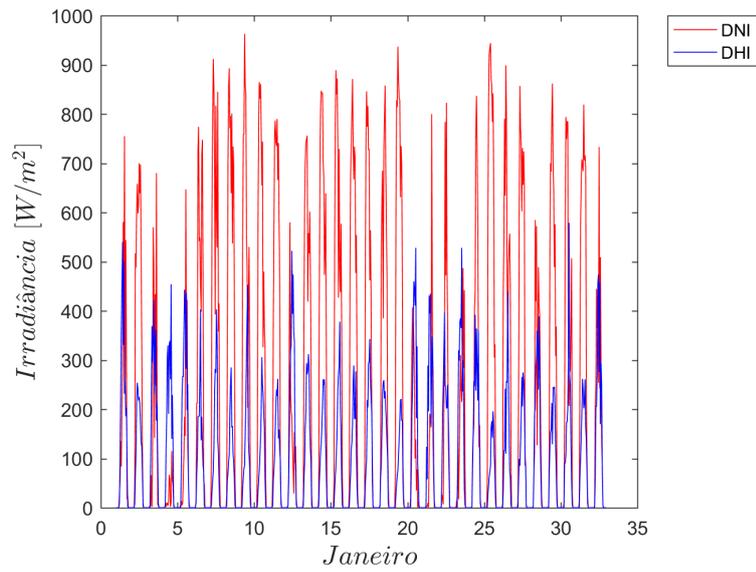


Figura 6.49: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Bom Jesus da Lapa-BA.

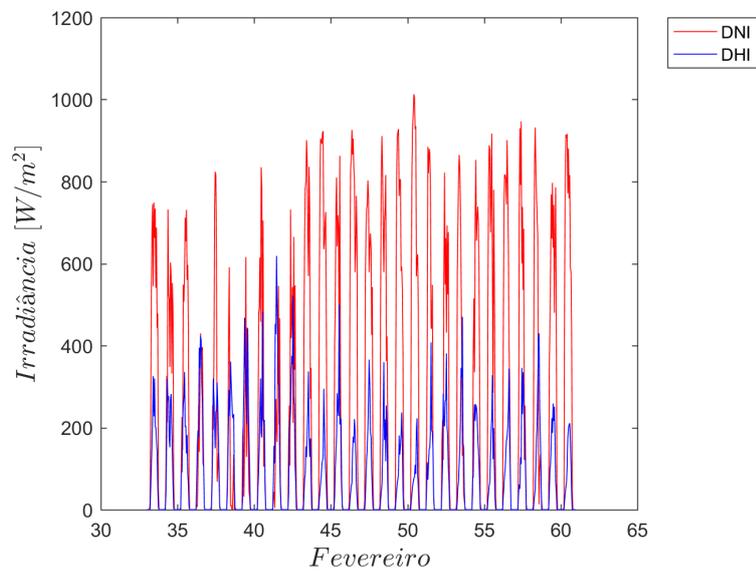


Figura 6.50: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Bom Jesus da Lapa-BA.

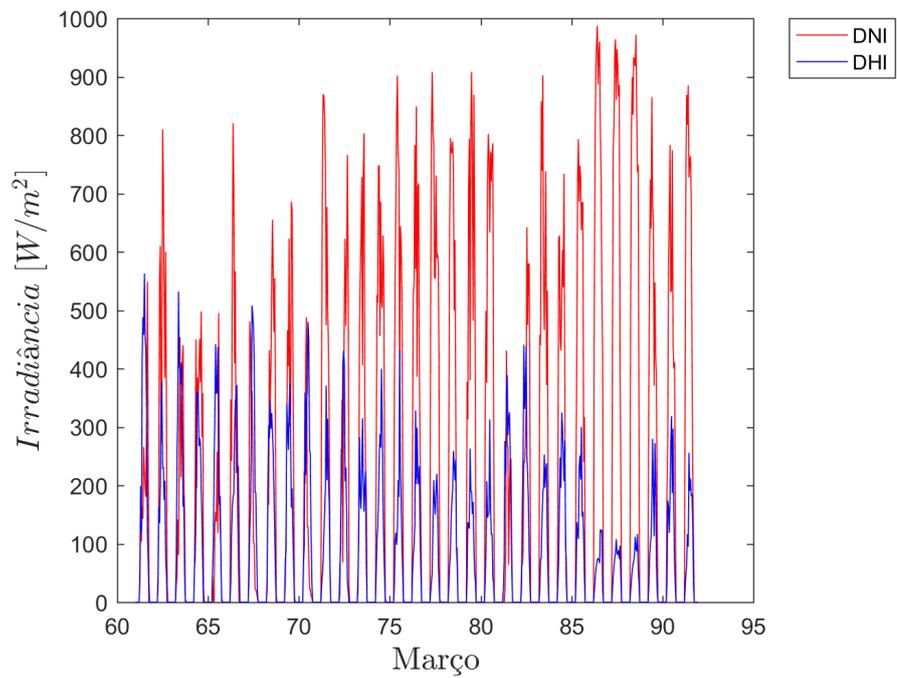


Figura 6.51: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Bom Jesus da Lapa-BA.

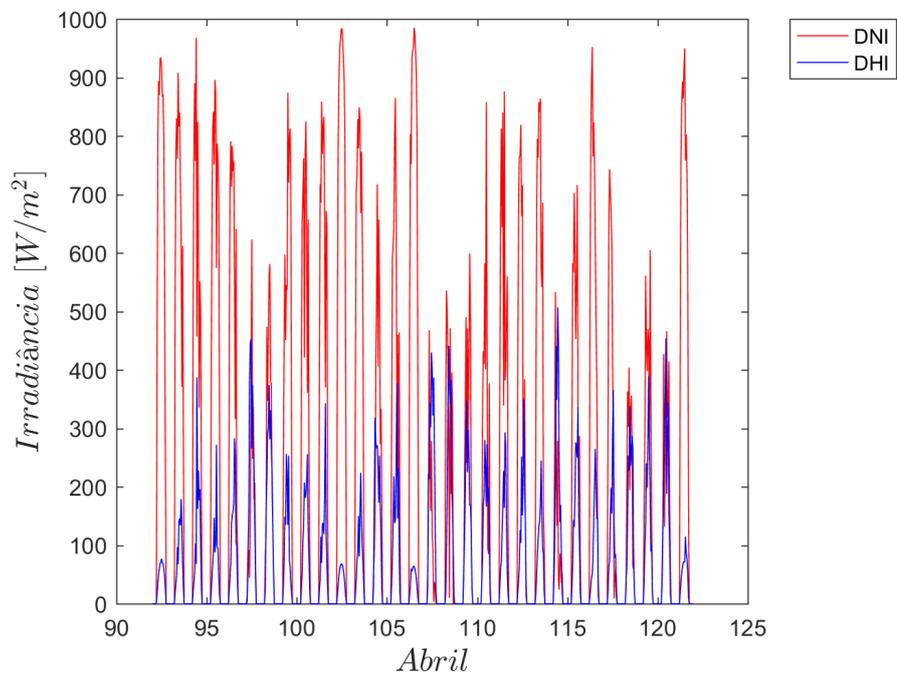


Figura 6.52: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Bom Jesus da Lapa-BA.

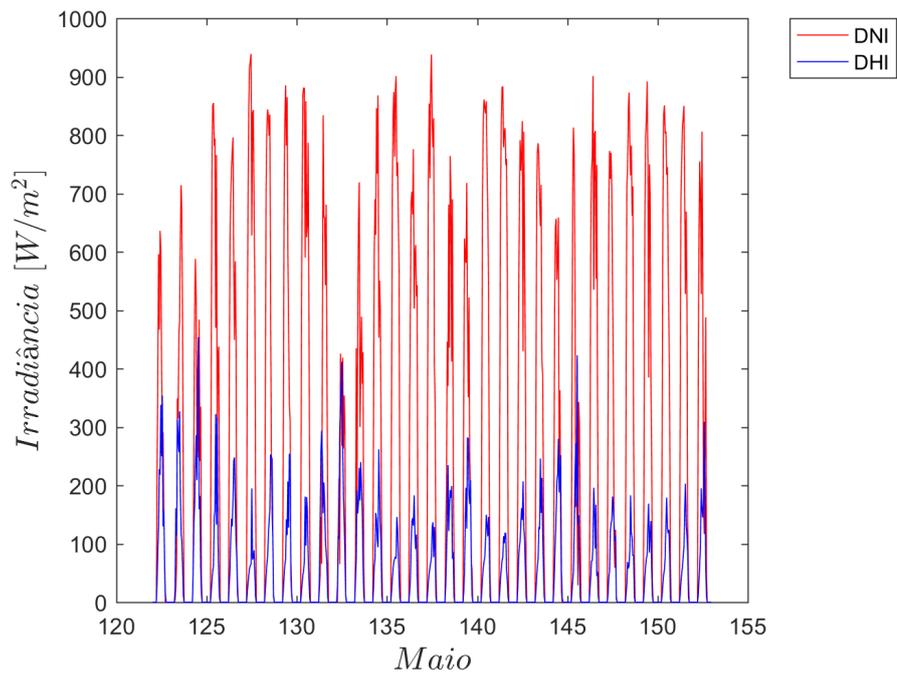


Figura 6.53: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Bom Jesus da Lapa-BA.

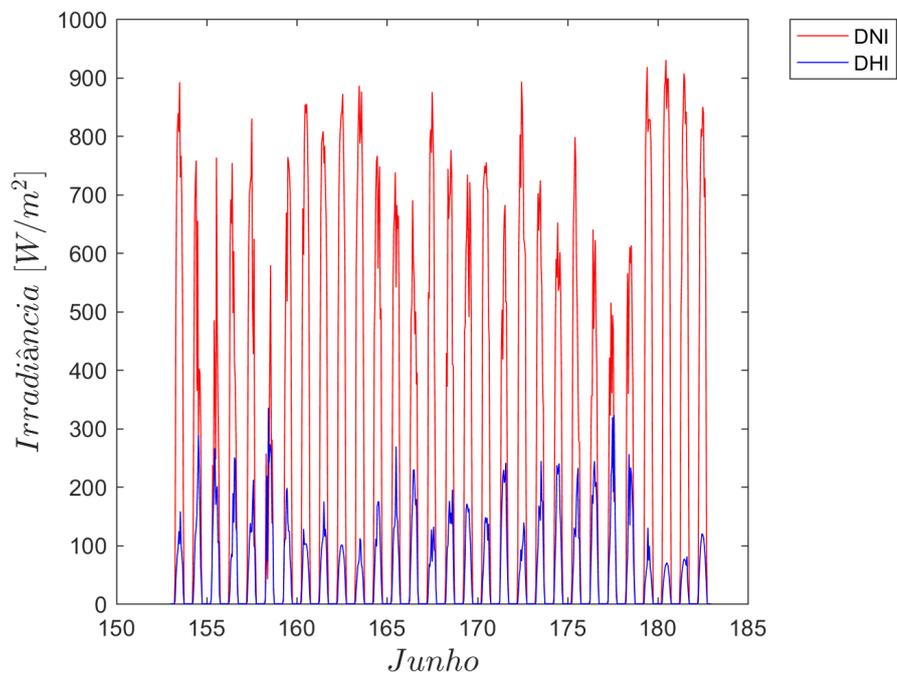


Figura 6.54: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Bom Jesus da Lapa-BA.

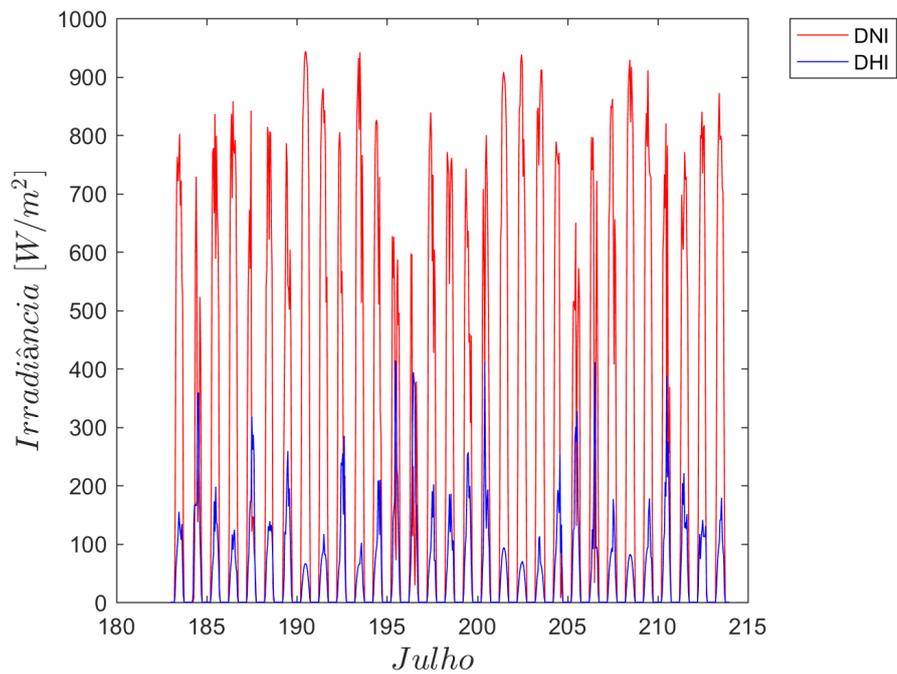


Figura 6.55: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Bom Jesus da Lapa-BR.

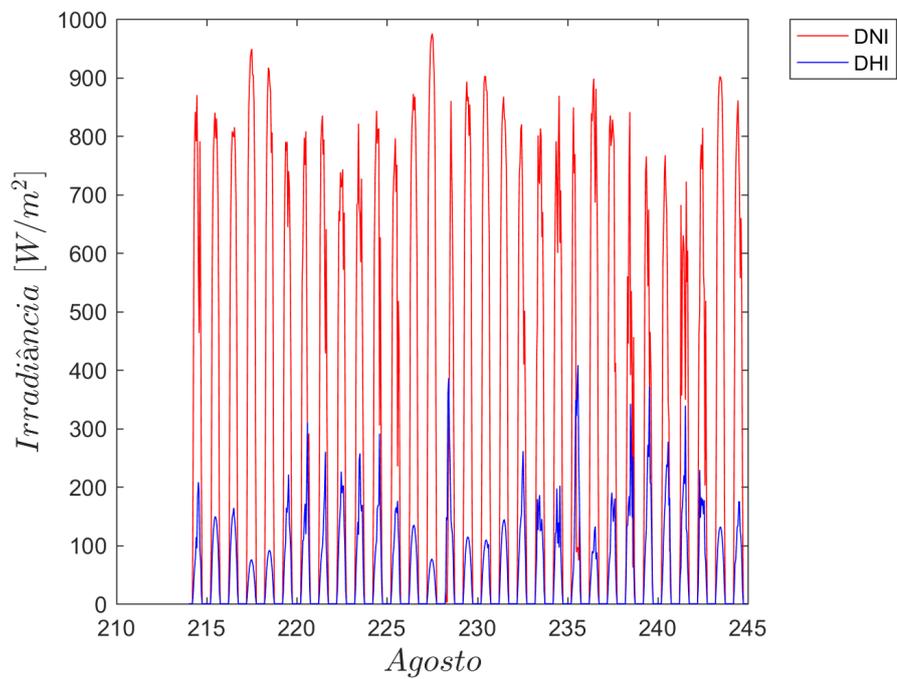


Figura 6.56: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Bom Jesus da Lapa-BR.

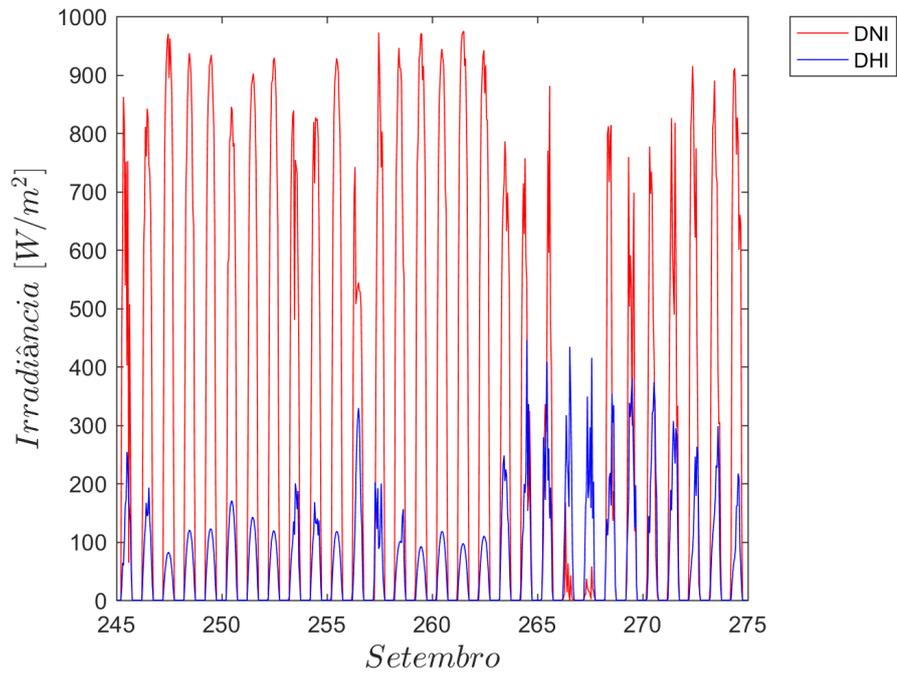


Figura 6.57: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Bom Jesus da Lapa-BA.

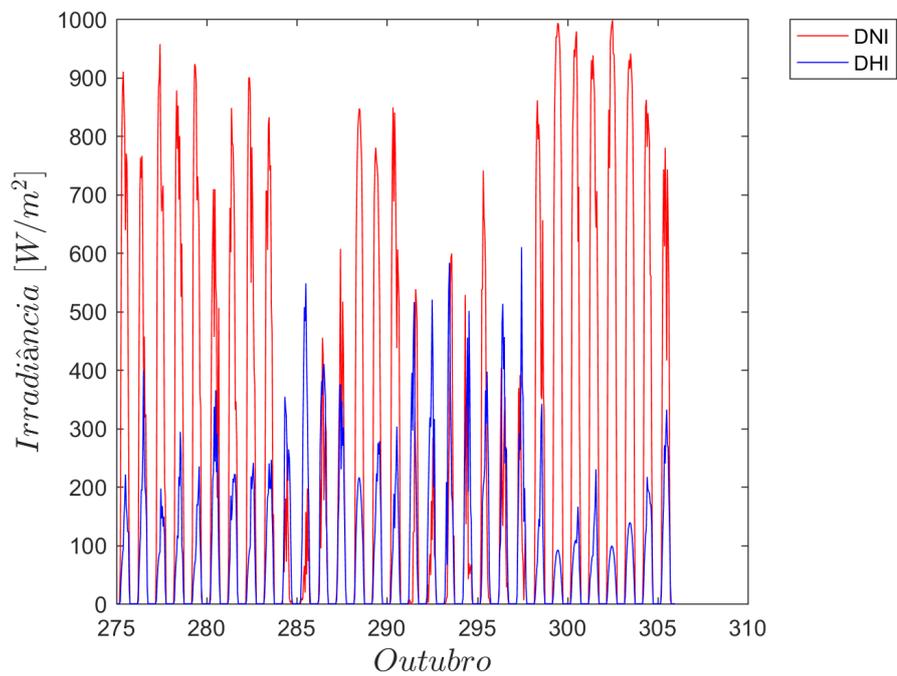


Figura 6.58: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Bom Jesus da Lapa-BA.

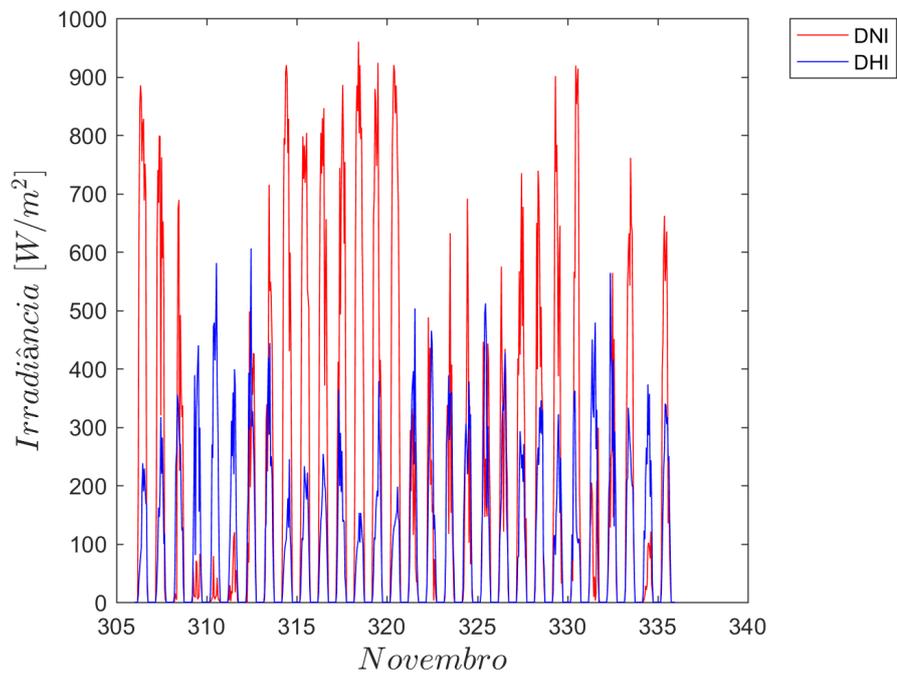


Figura 6.59: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Bom Jesus da Lapa-BR.

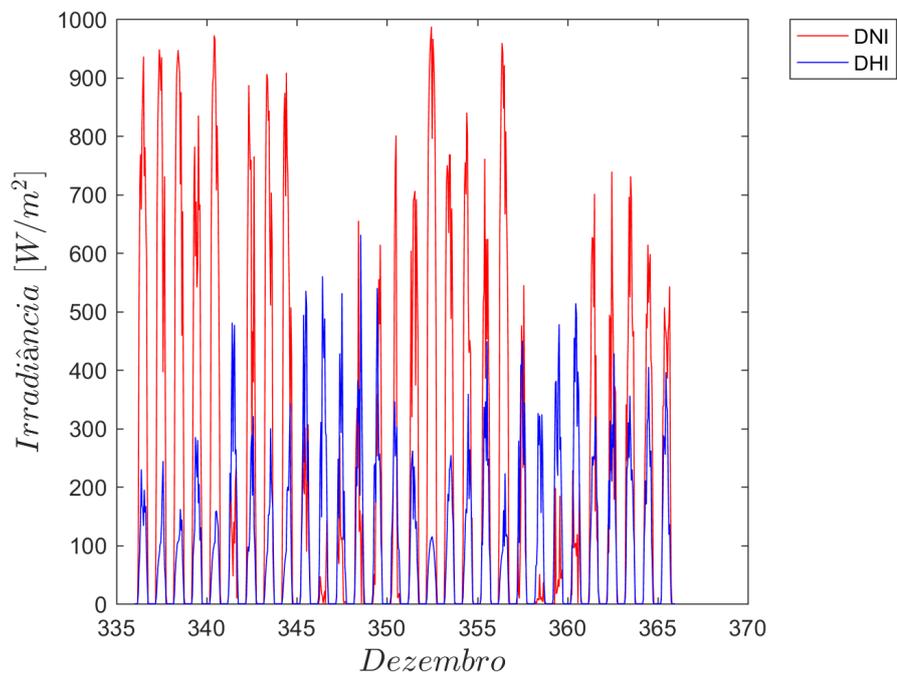


Figura 6.60: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Bom Jesus da Lapa-BR.

6.4.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

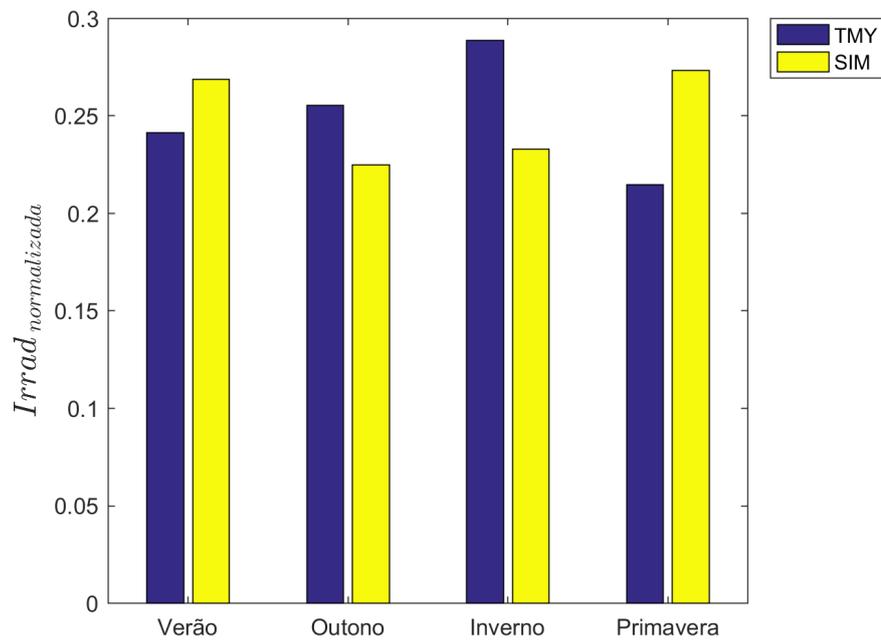


Figura 6.61: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Bom Jesus da Lapa-BA.

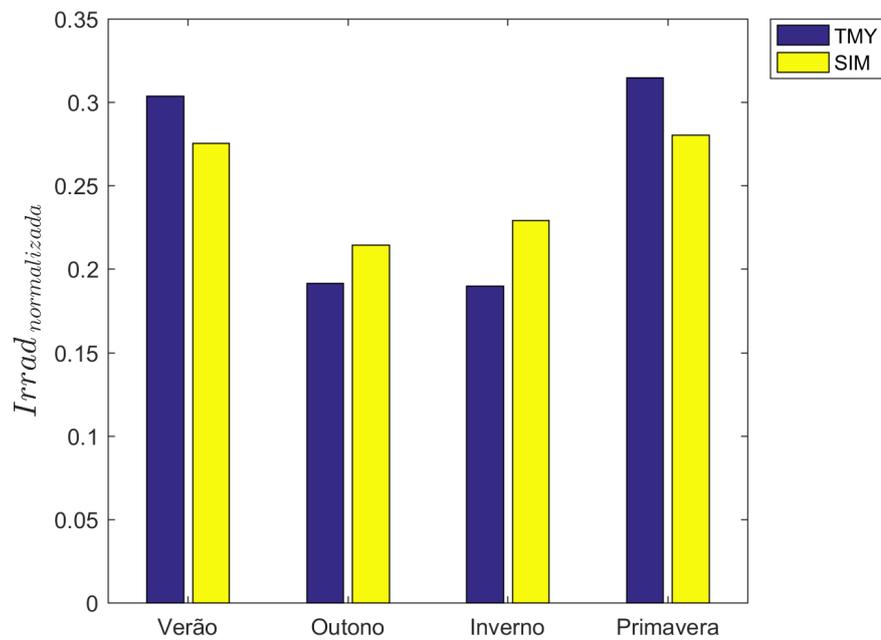


Figura 6.62: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Bom Jesus da Lapa-BA.

6.4.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

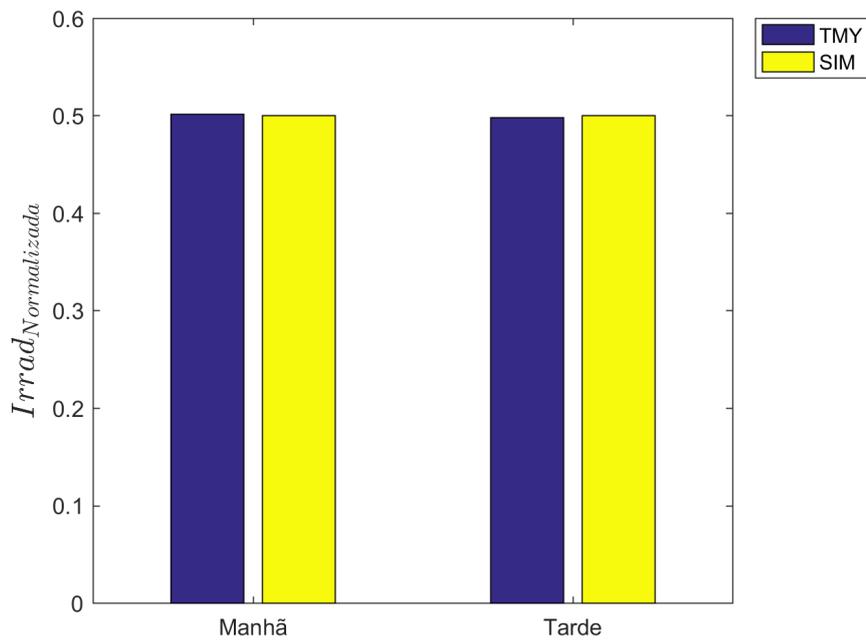


Figura 6.63: Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Bom Jesus da Lapa-BA.

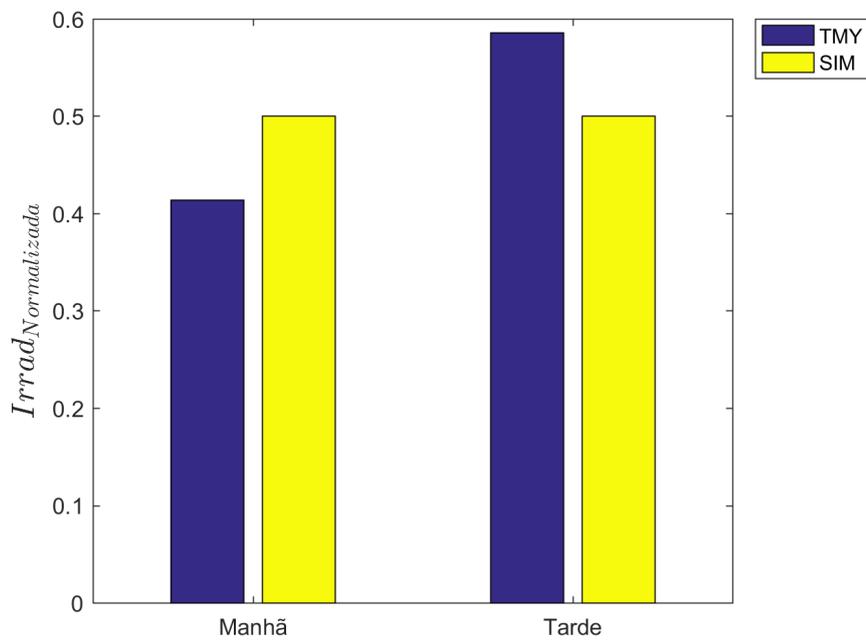


Figura 6.64: Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Bom Jesus da Lapa-BA.

6.5 Cuiabá-MT

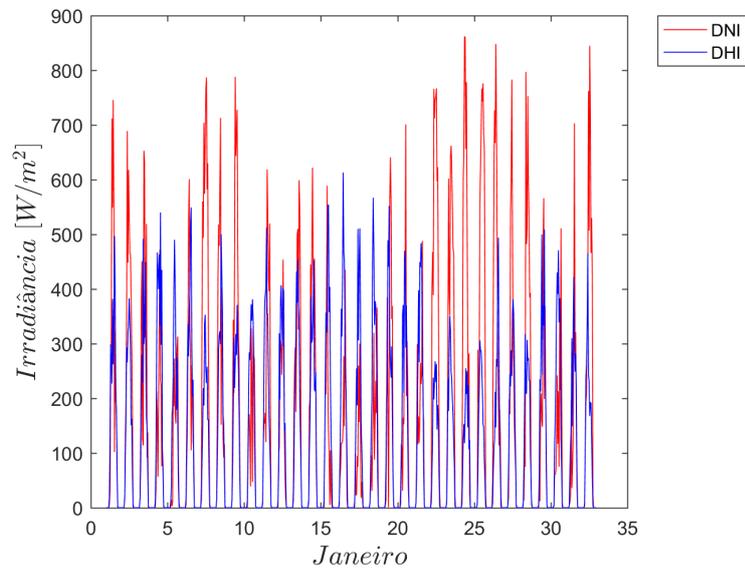


Figura 6.65: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Brasília-DF.

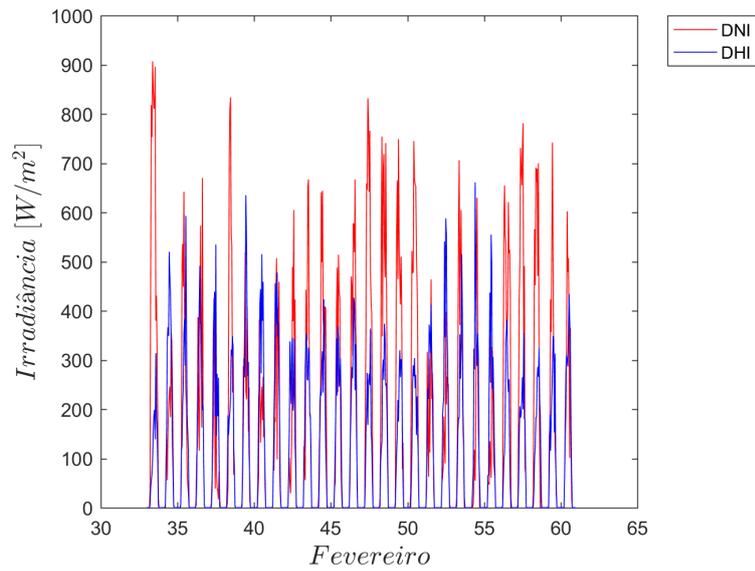


Figura 6.66: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Brasília-DF.

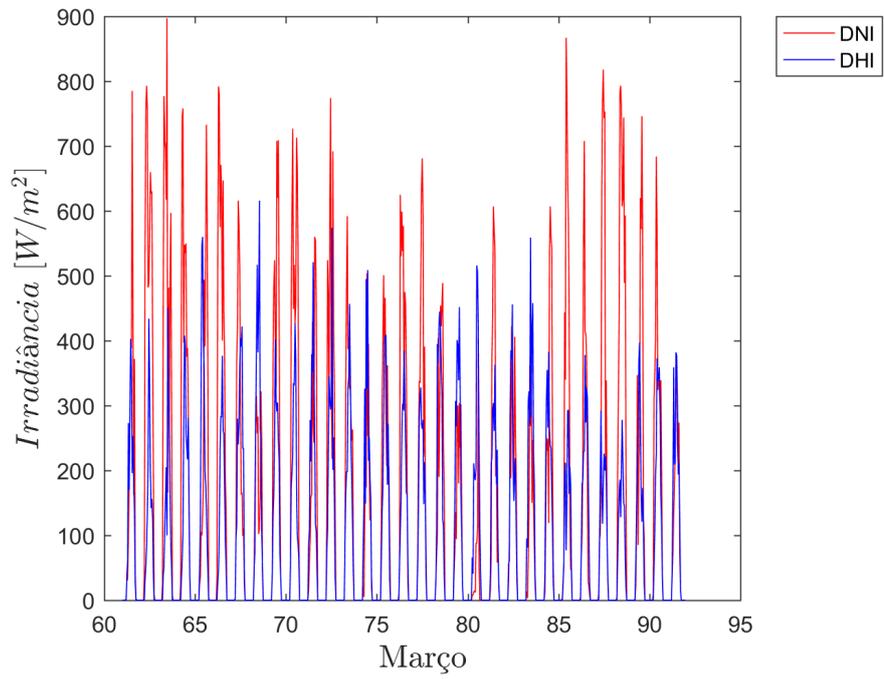


Figura 6.67: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Brasília-DF.

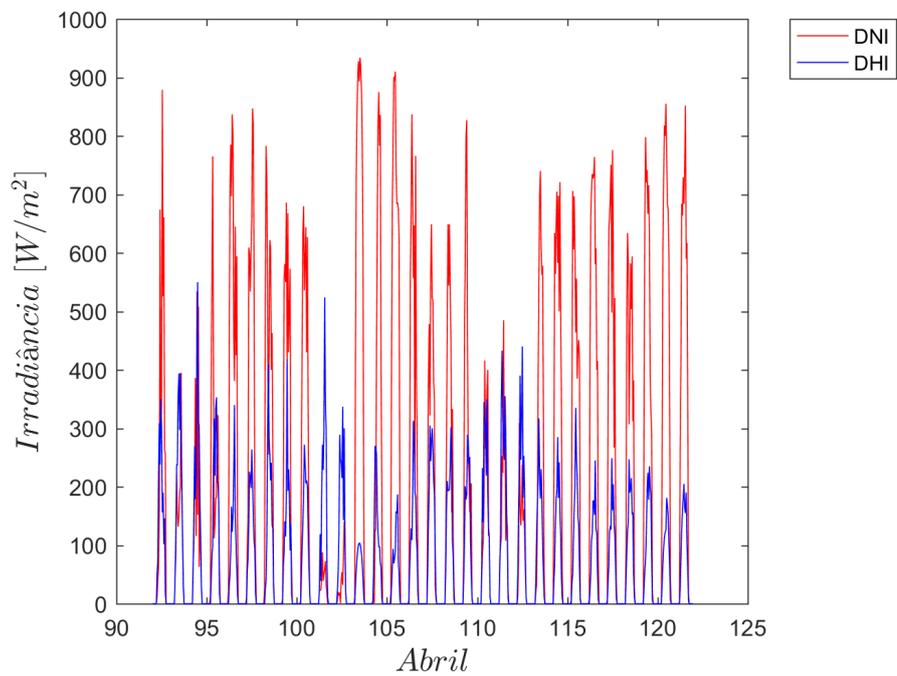


Figura 6.68: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Brasília-DF.

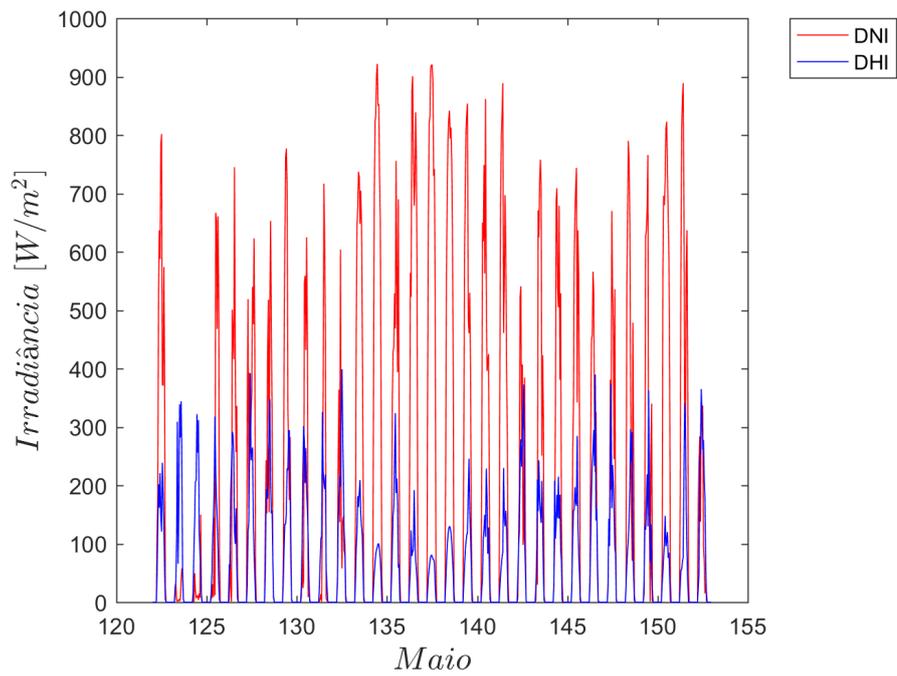


Figura 6.69: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Brasília-DF.

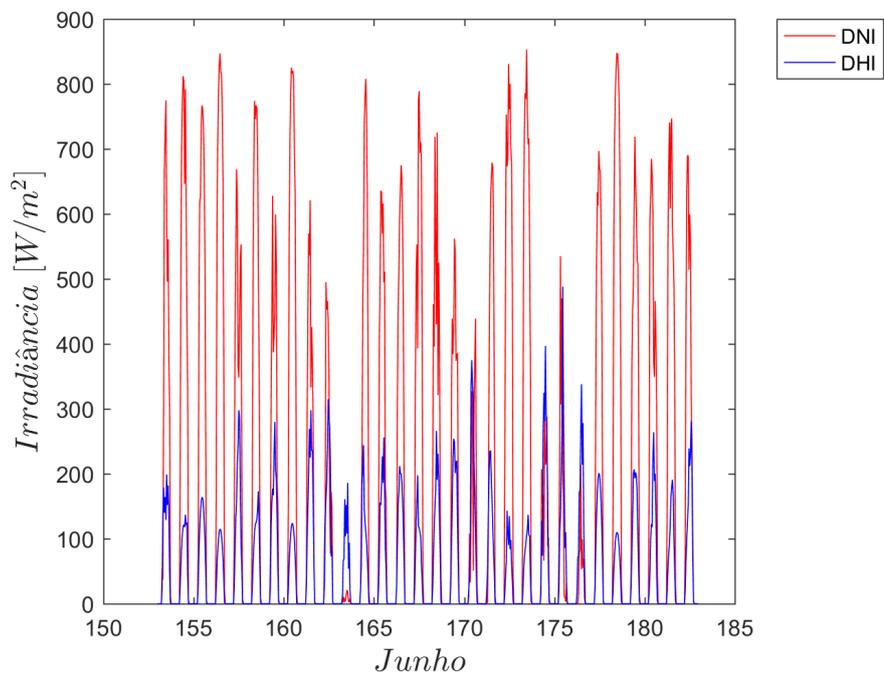


Figura 6.70: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Brasília-DF.

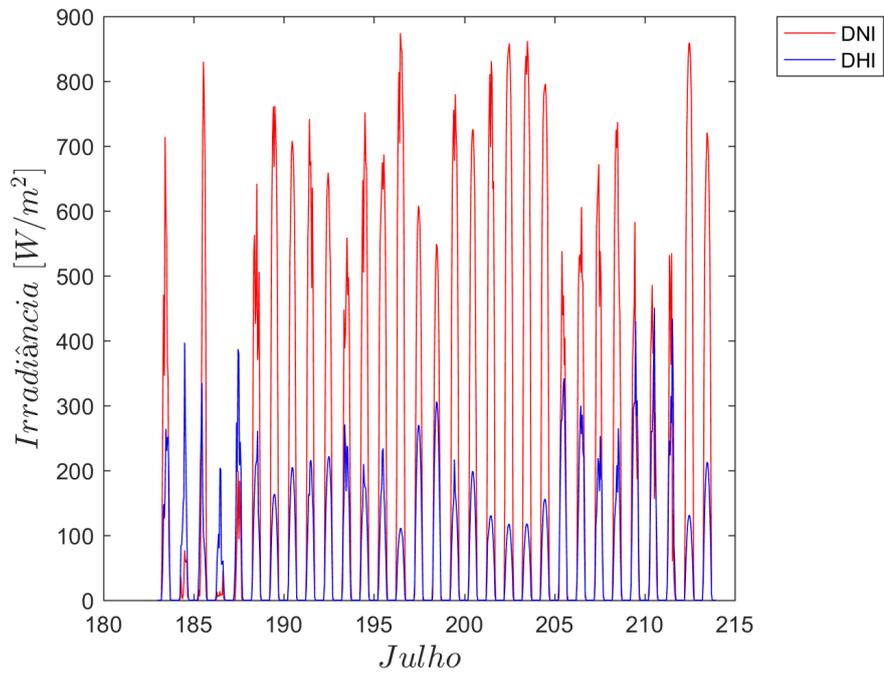


Figura 6.71: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Brasília-DF.

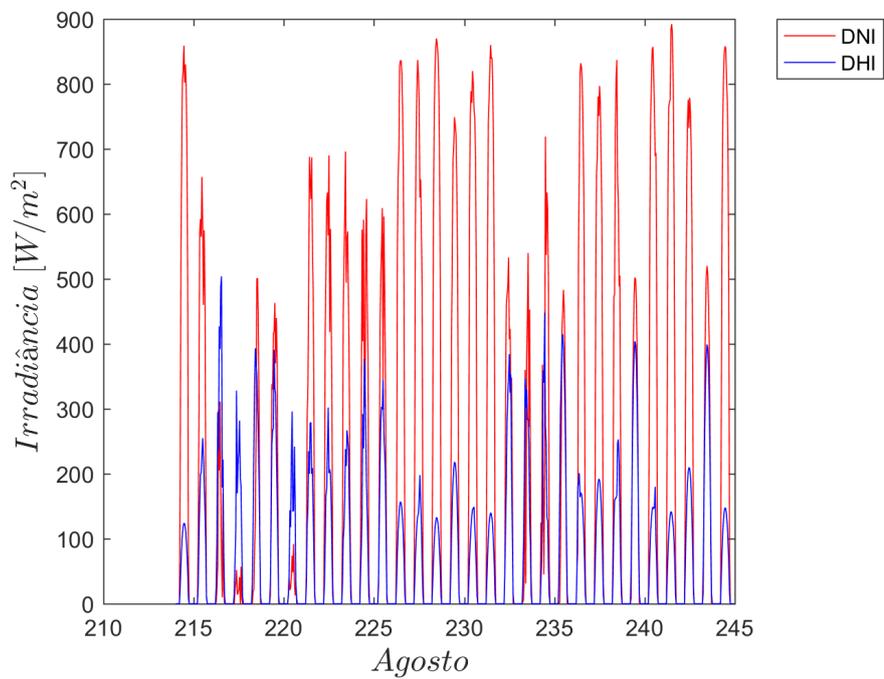


Figura 6.72: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Brasília-DF.

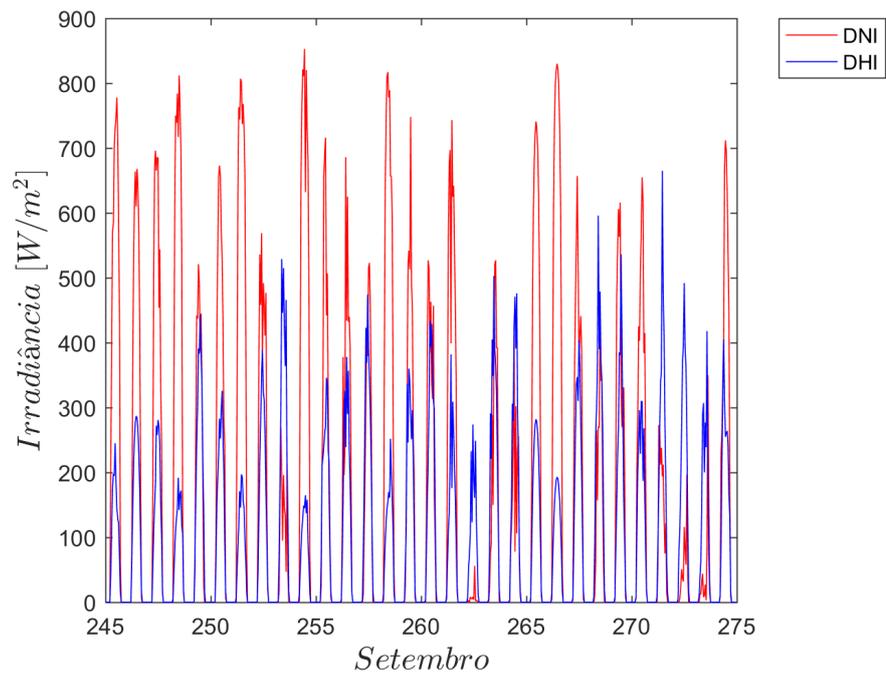


Figura 6.73: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Brasília-DF.

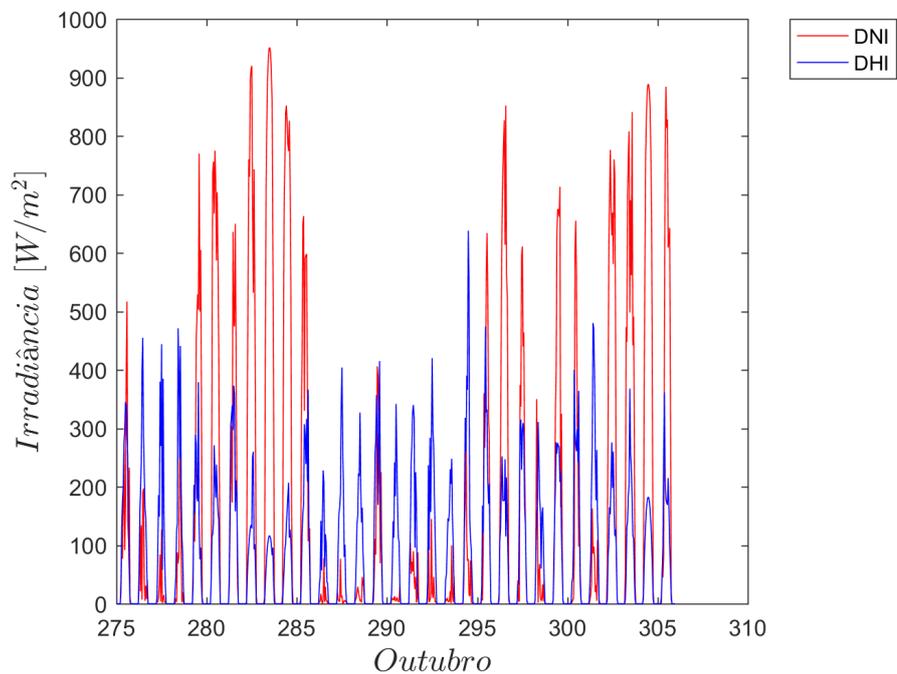


Figura 6.74: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Brasília-DF.

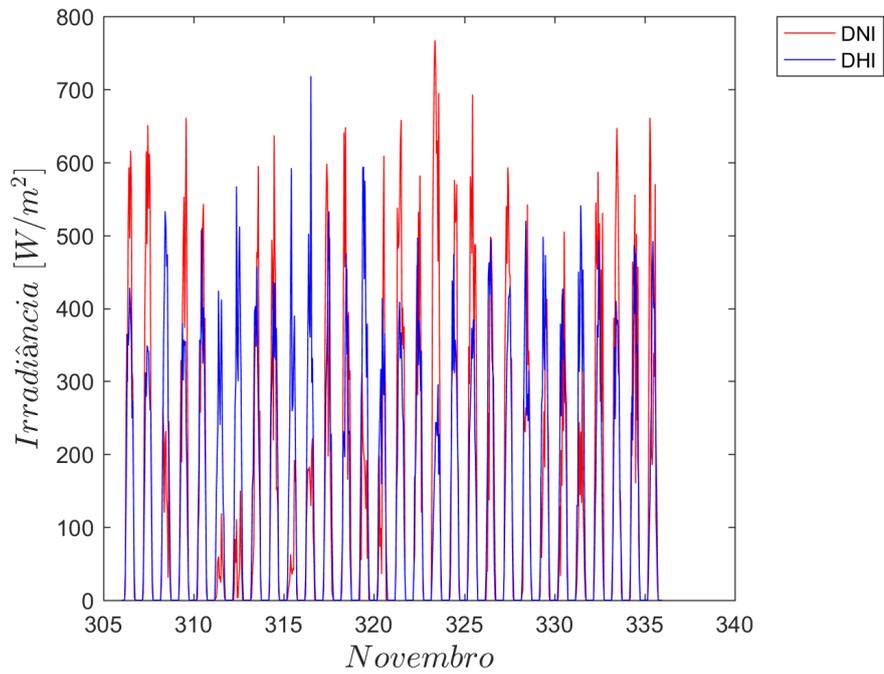


Figura 6.75: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Brasília-DF.

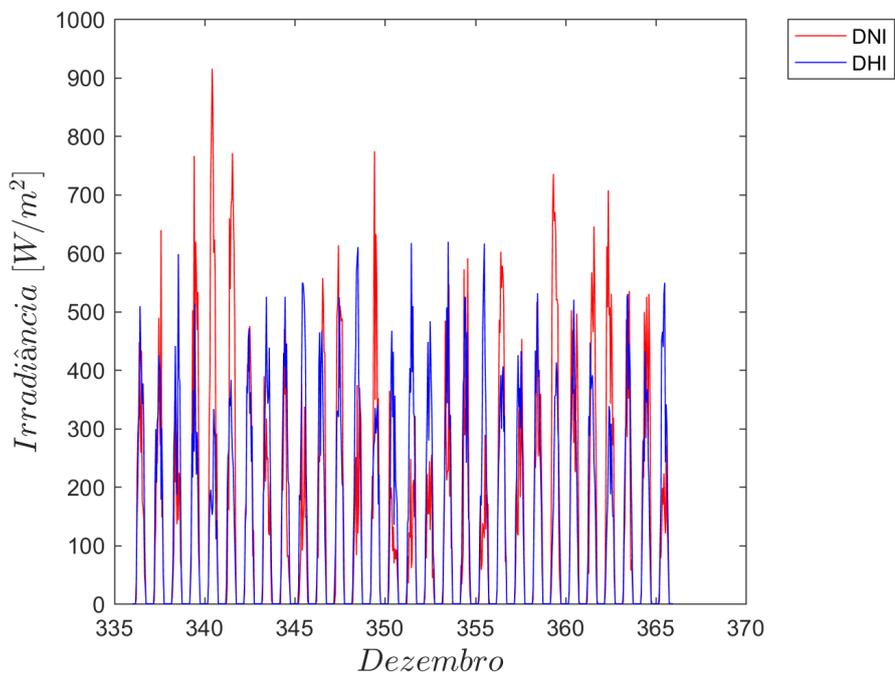


Figura 6.76: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Brasília-DF.

6.5.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

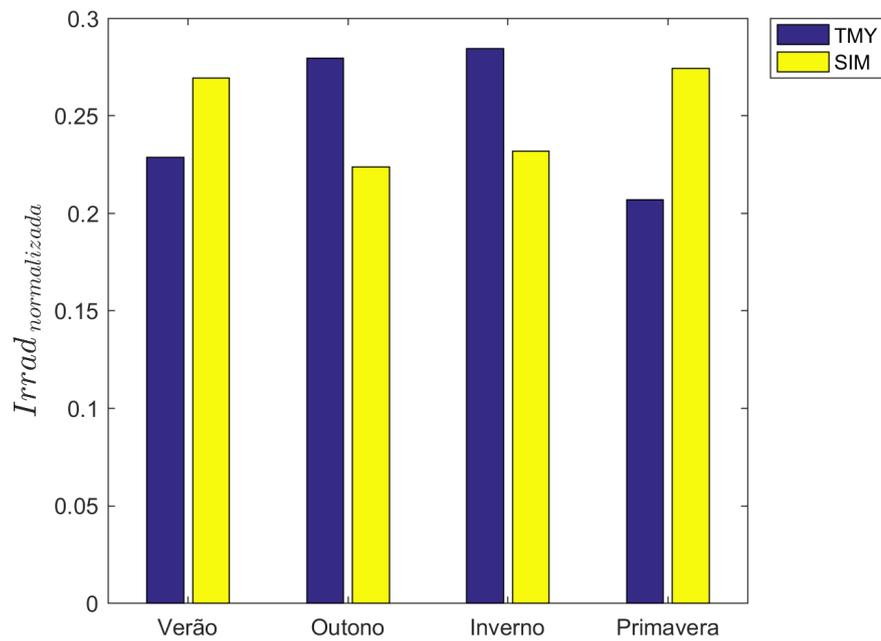


Figura 6.77: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF.

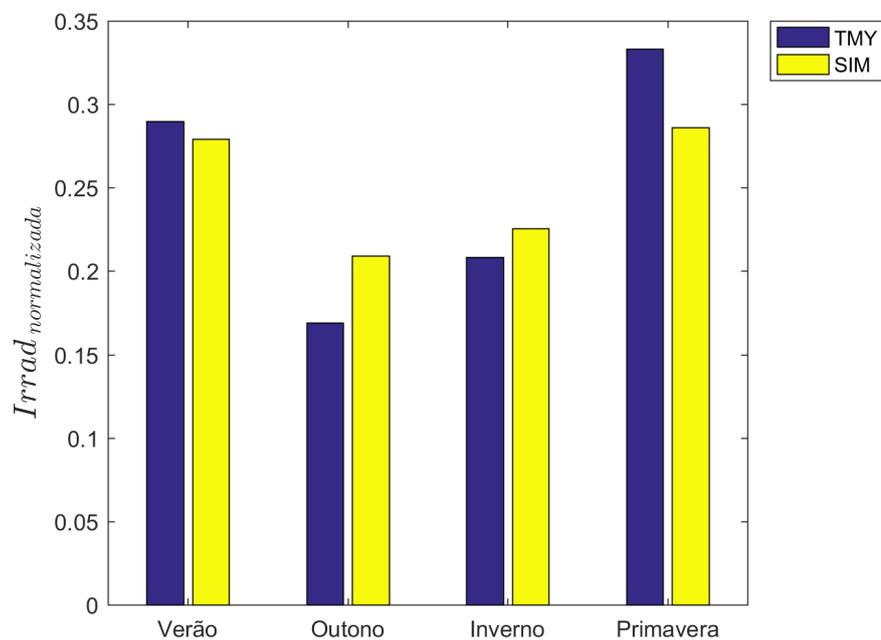


Figura 6.78: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF.

6.5.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

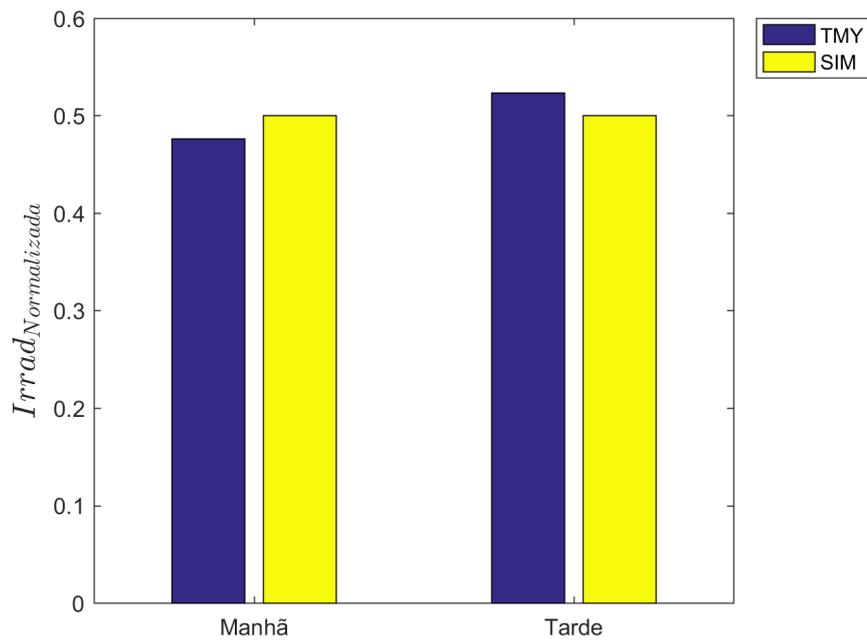


Figura 6.79: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Brasília-DF.*

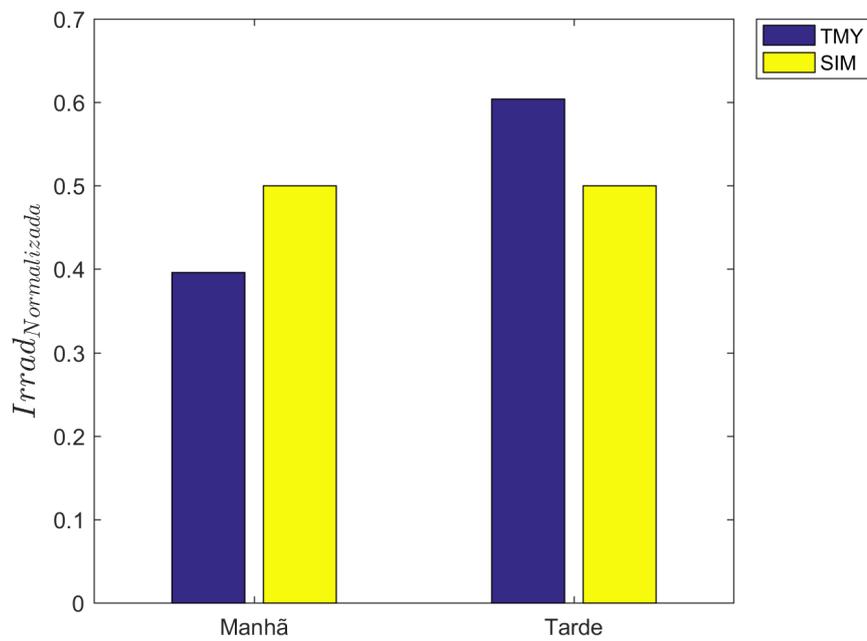


Figura 6.80: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Cuiabá-MT.*

6.6 Brasília-DF

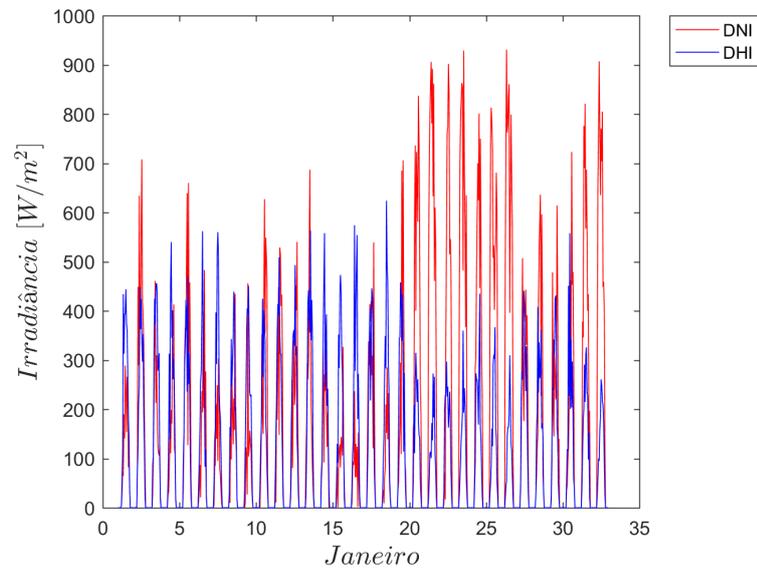


Figura 6.81: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Brasília-DF.

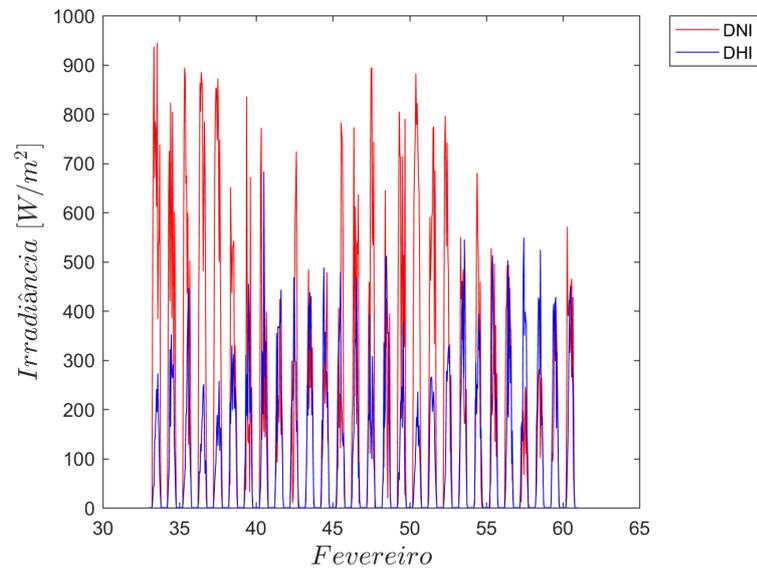


Figura 6.82: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Brasília-DF.

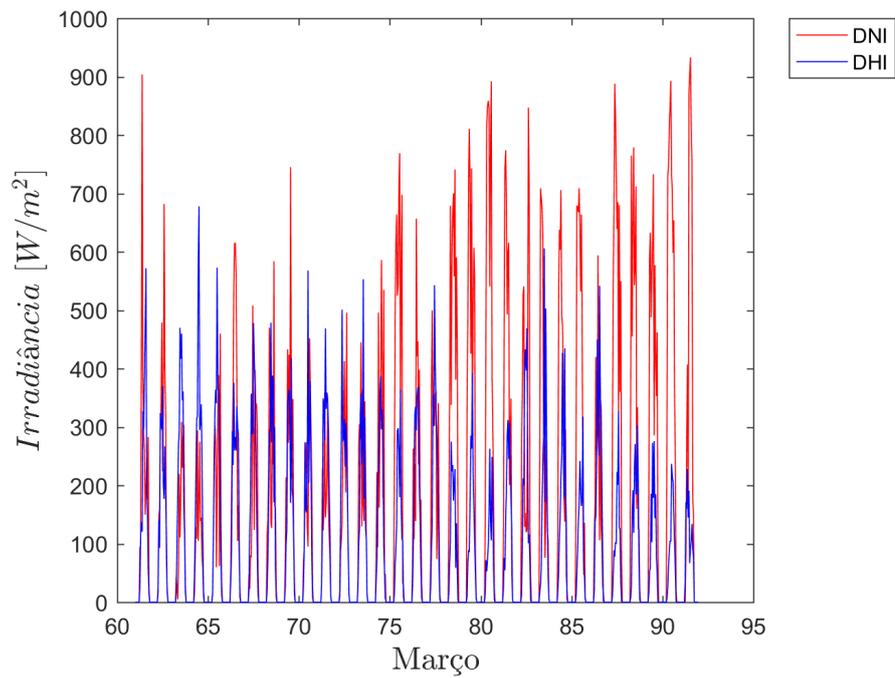


Figura 6.83: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Brasília-DF.

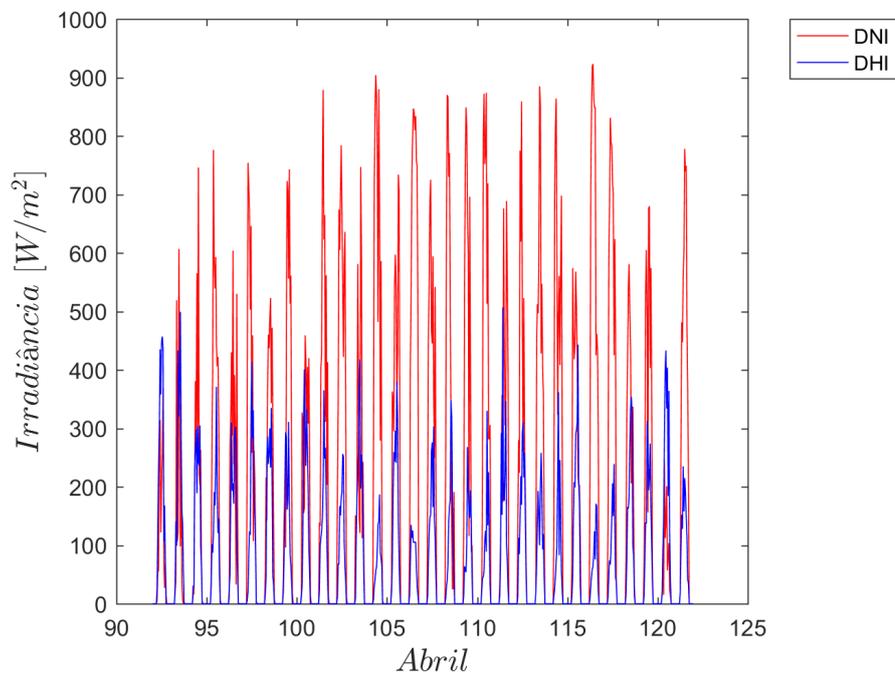


Figura 6.84: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Brasília-DF.

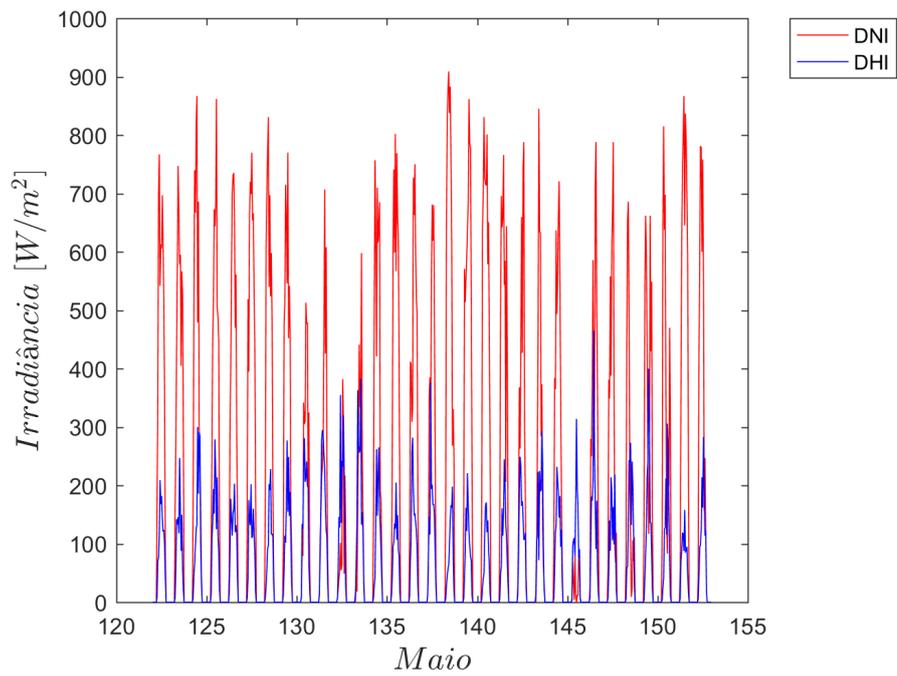


Figura 6.85: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Brasília-DF.

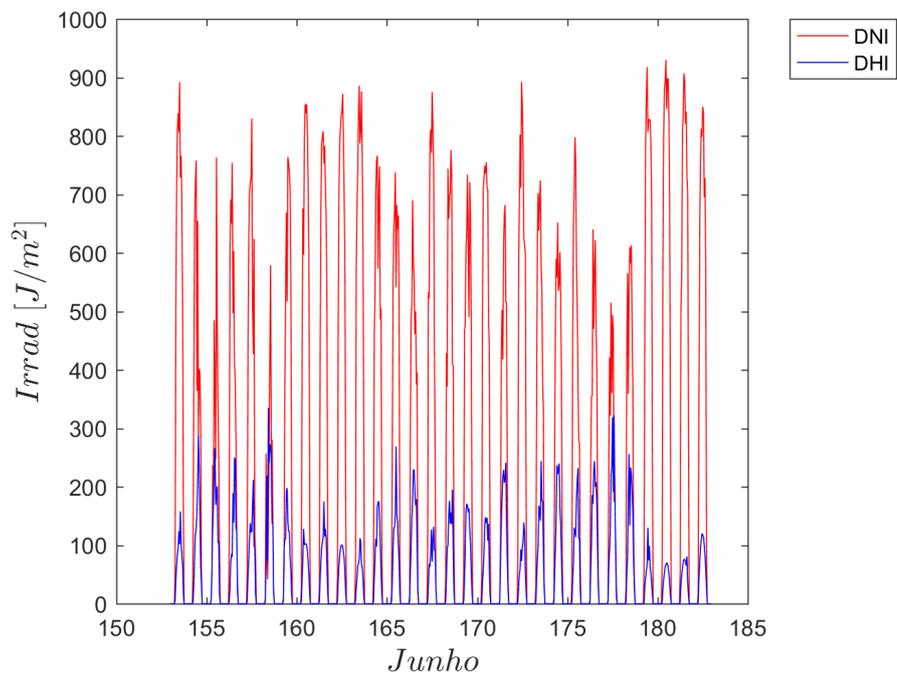


Figura 6.86: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Brasília-DF.

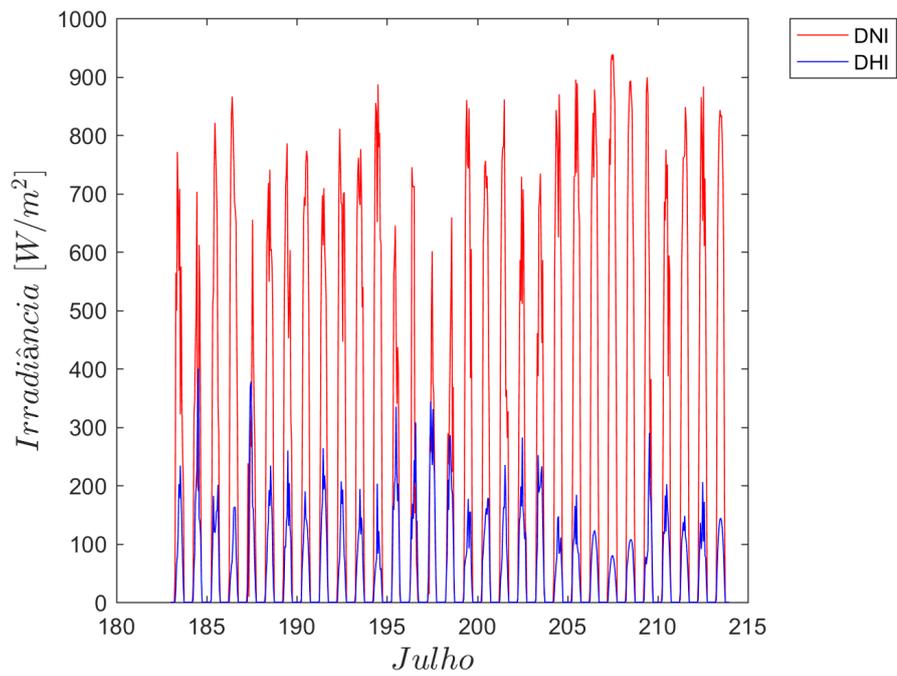


Figura 6.87: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Brasília-DF.

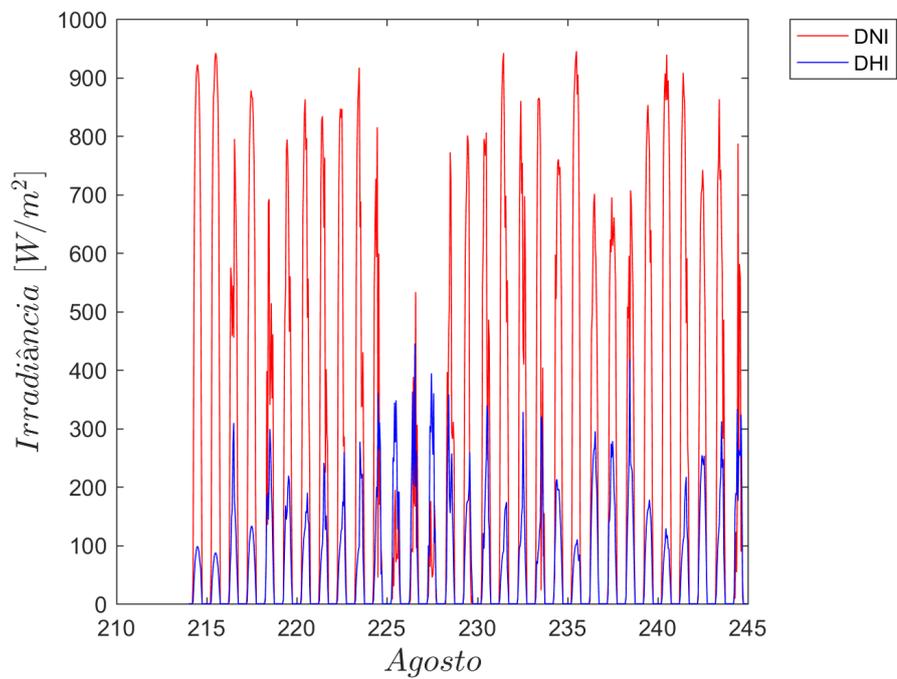


Figura 6.88: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Brasília-DF.

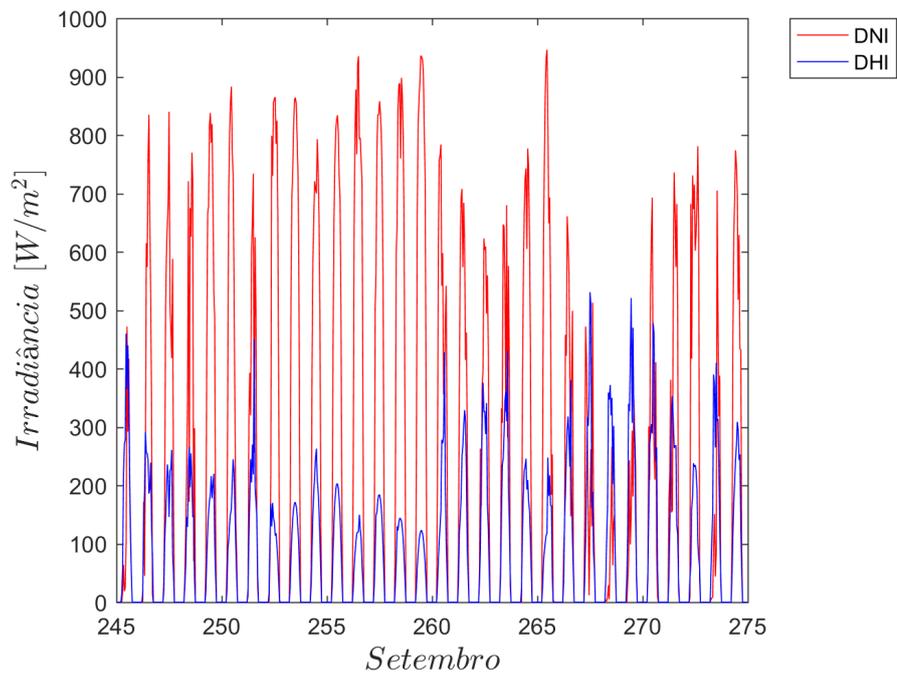


Figura 6.89: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Brasília-DF.

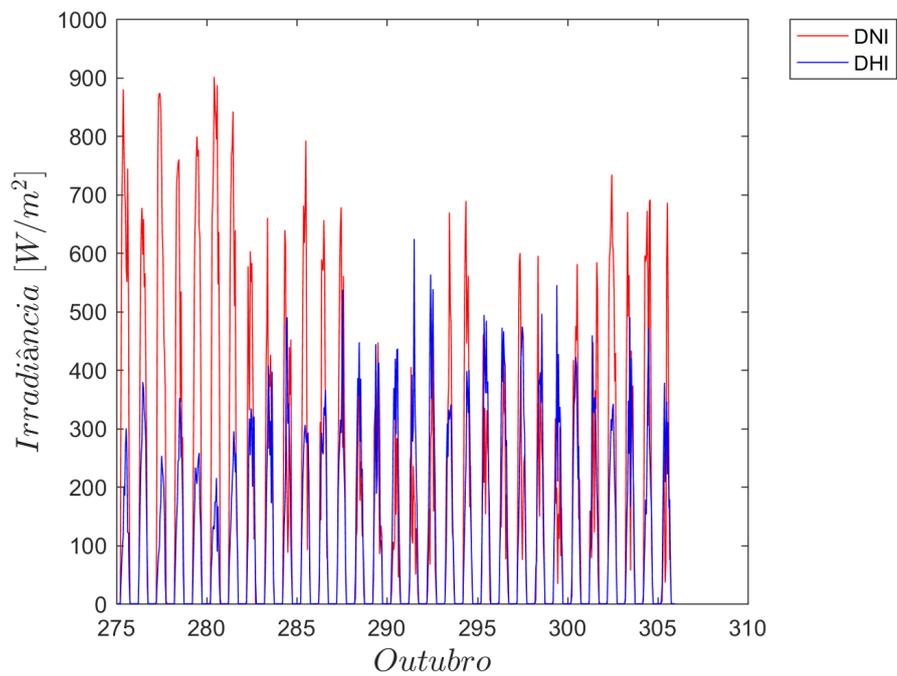


Figura 6.90: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Brasília-DF.

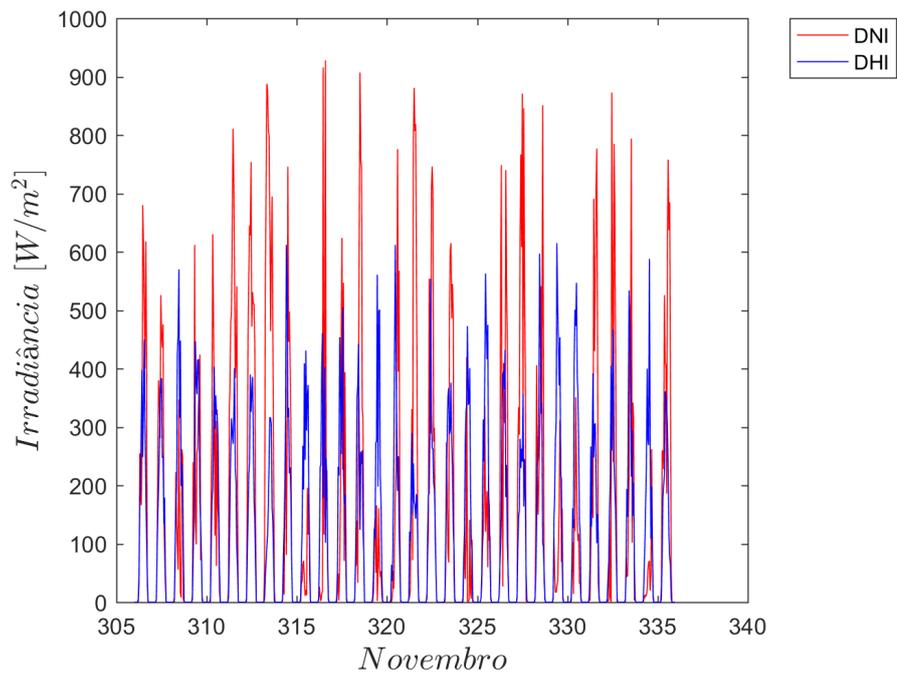


Figura 6.91: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Brasília-DF.

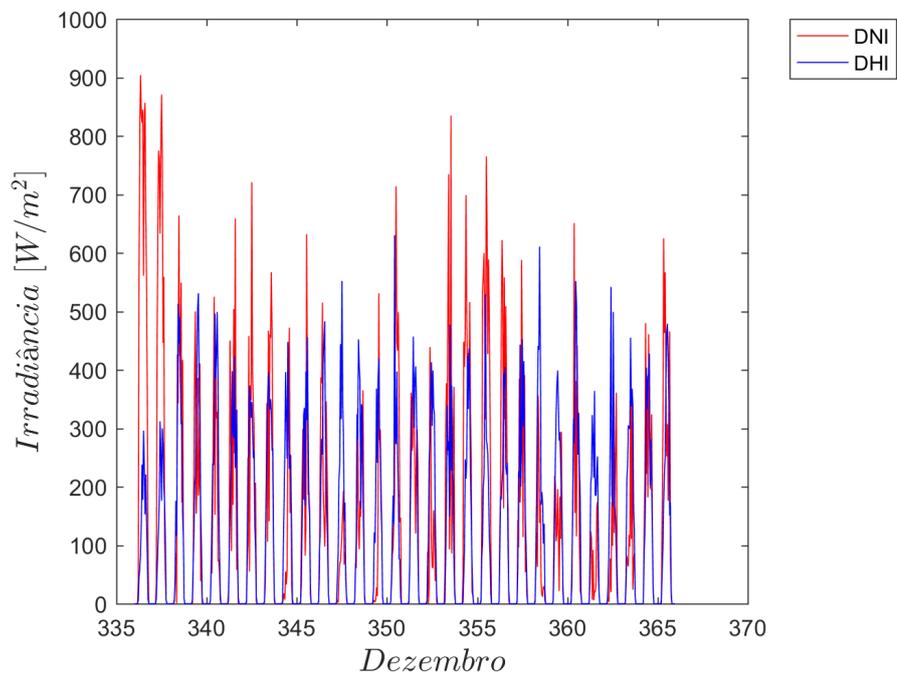


Figura 6.92: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Brasília-DF.

6.6.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

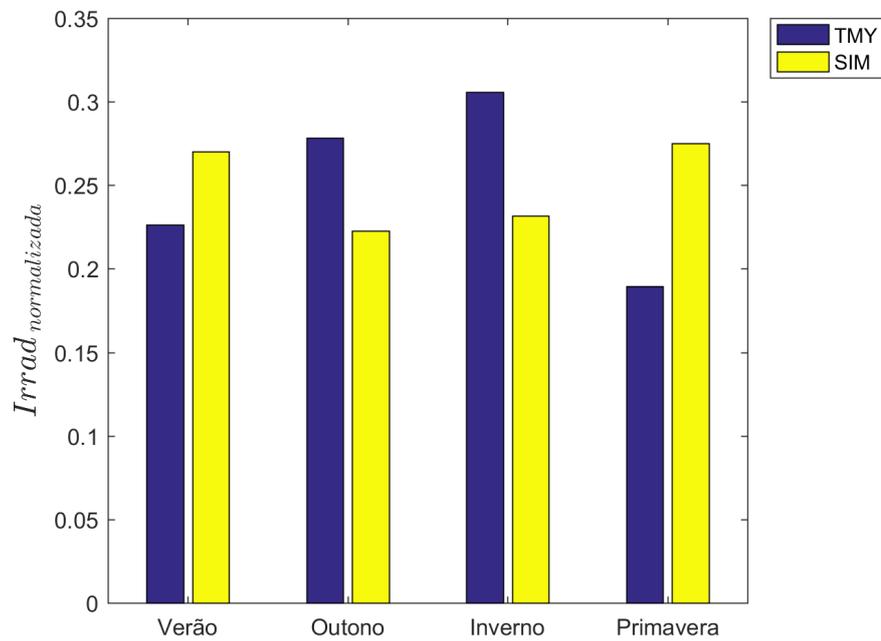


Figura 6.93: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF.

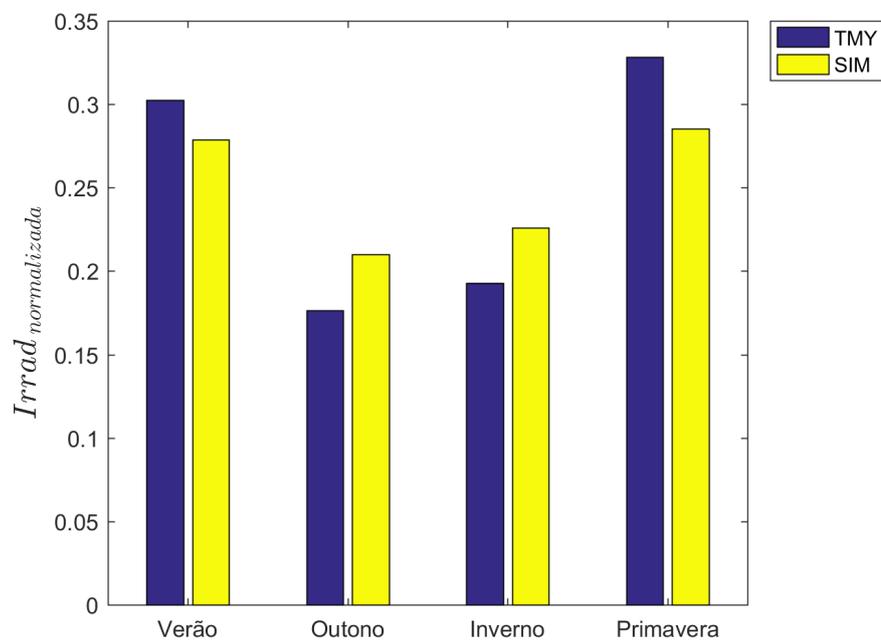


Figura 6.94: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Brasília-DF.

6.6.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

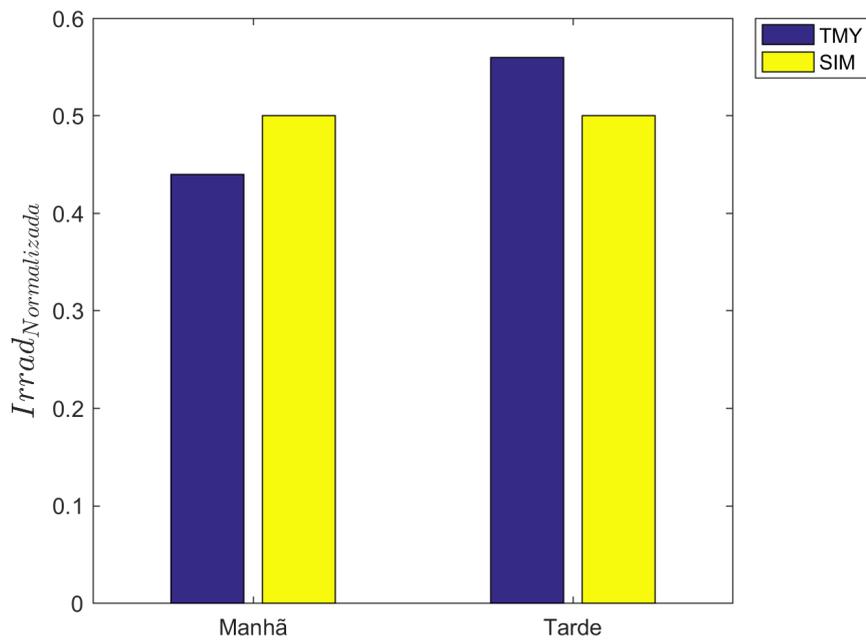


Figura 6.95: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Brasília-DF.*

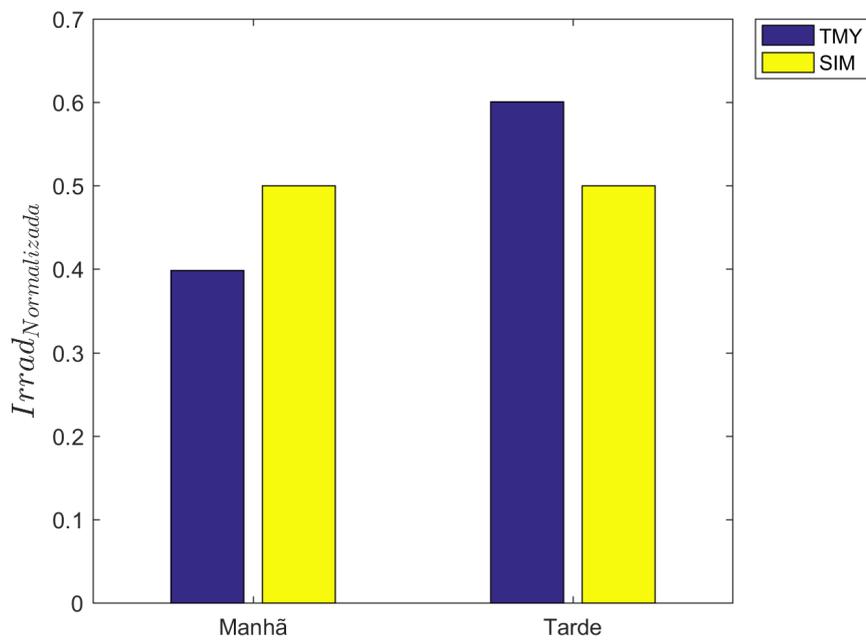


Figura 6.96: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Brasília-DF.*

6.7 Belo Horizonte-MG

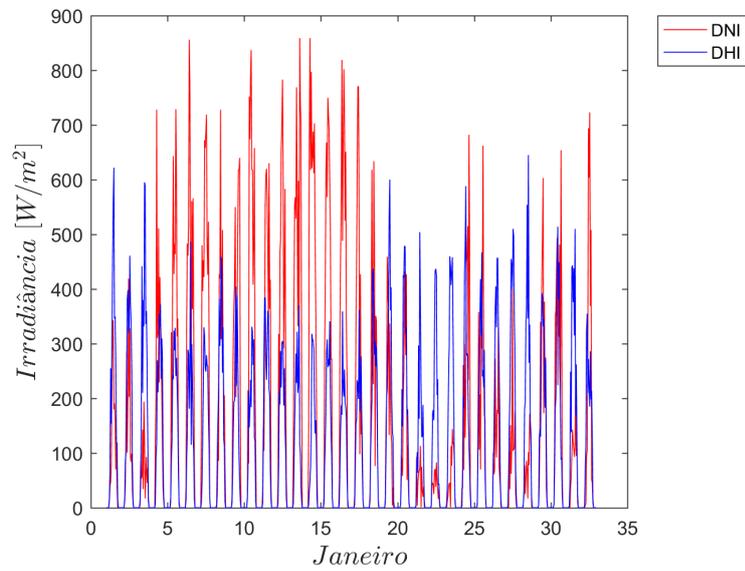


Figura 6.97: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Belo Horizonte-MG.

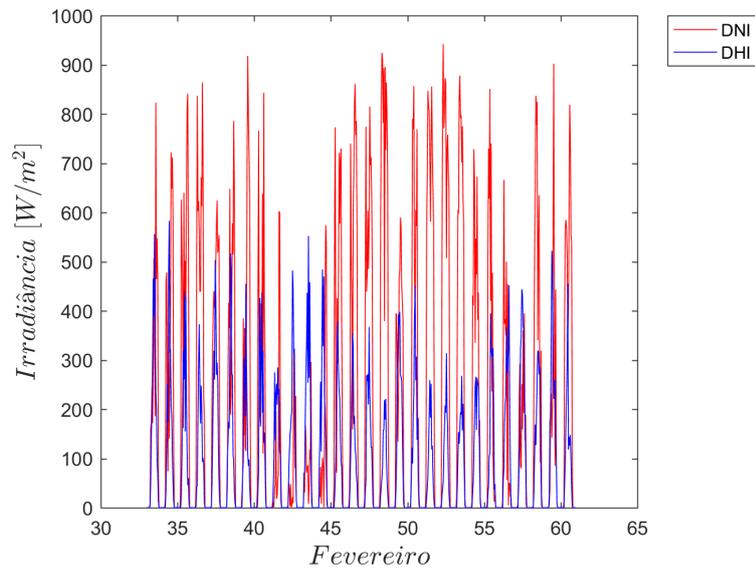


Figura 6.98: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Belo Horizonte-MG.

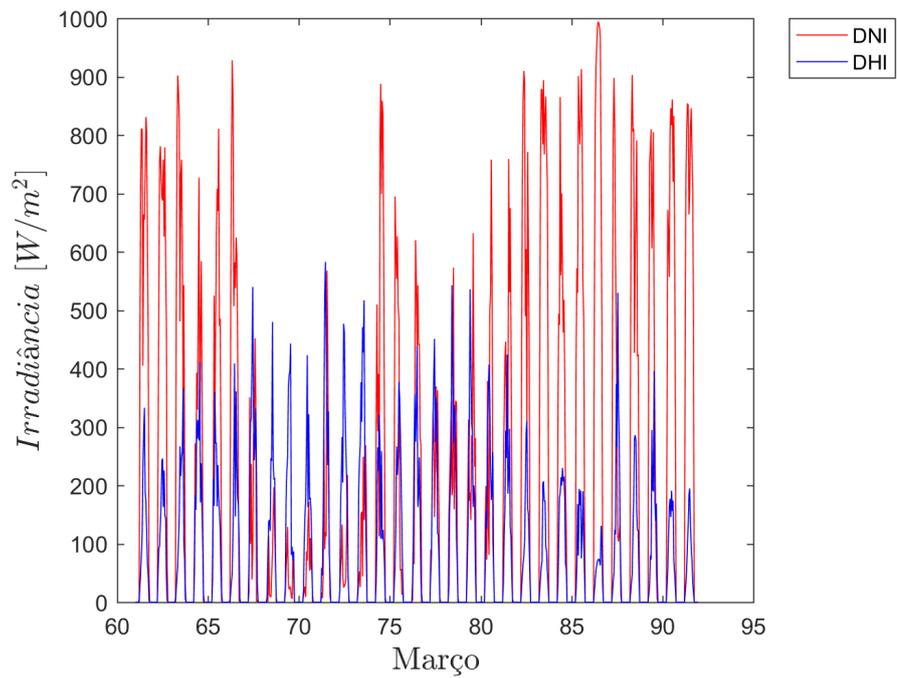


Figura 6.99: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Belo Horizonte-MG.

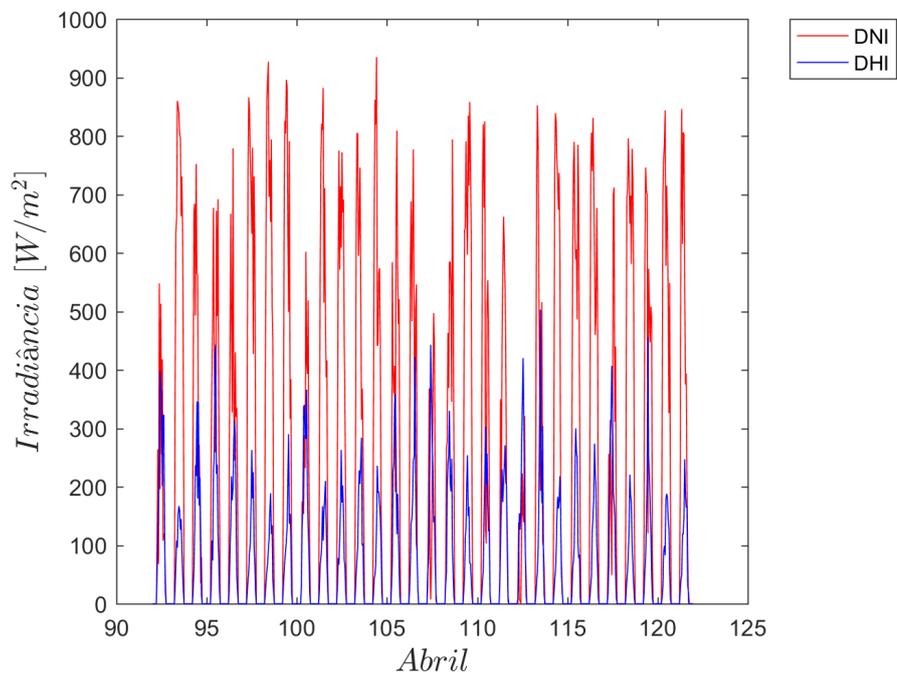


Figura 6.100: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Belo Horizonte-MG.

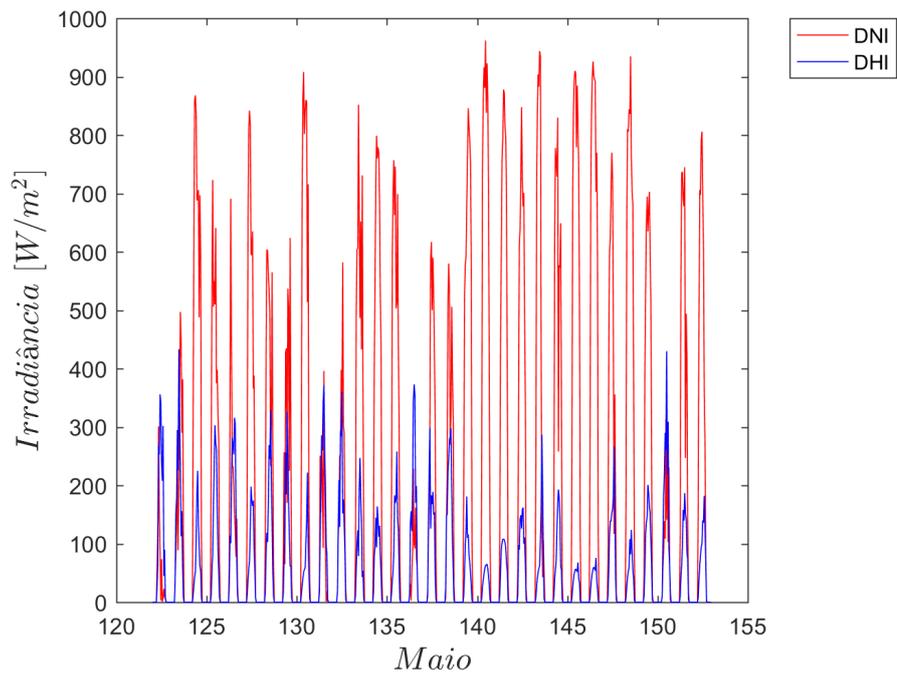


Figura 6.101: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Belo Horizonte-MG.

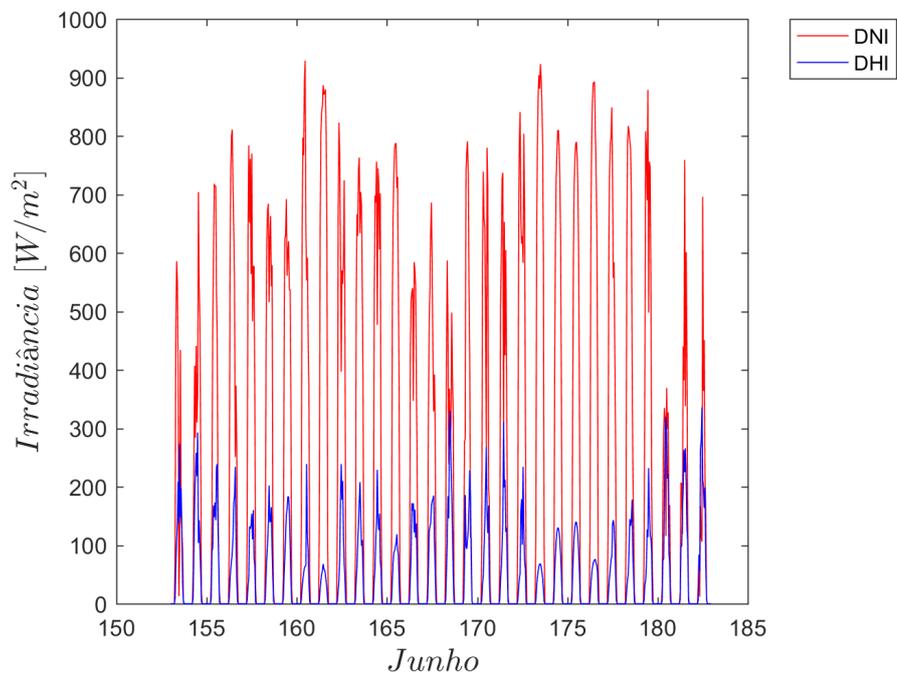


Figura 6.102: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Belo Horizonte-MG.

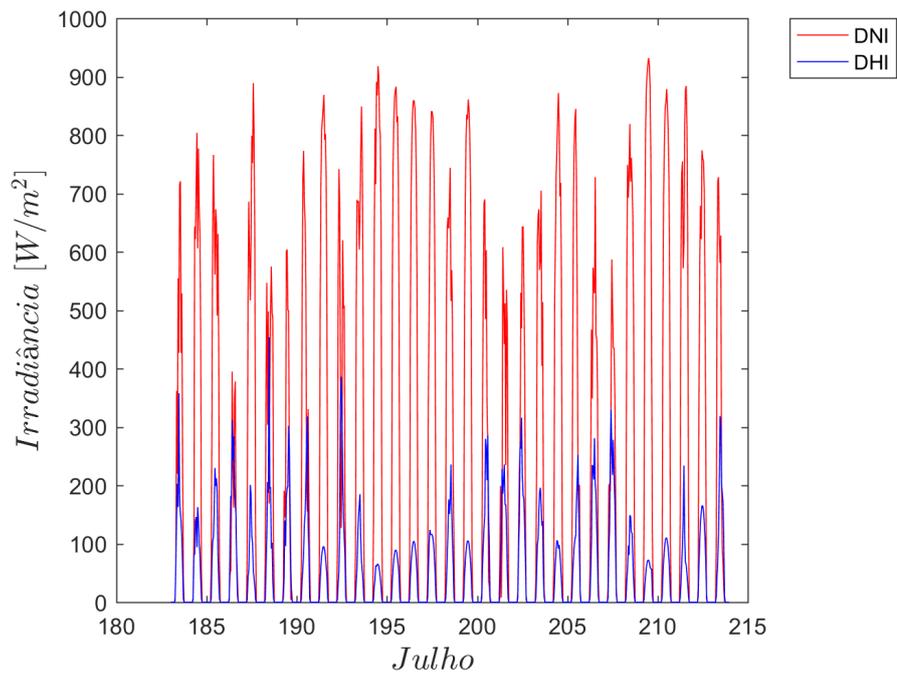


Figura 6.103: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Belo Horizonte-MG.

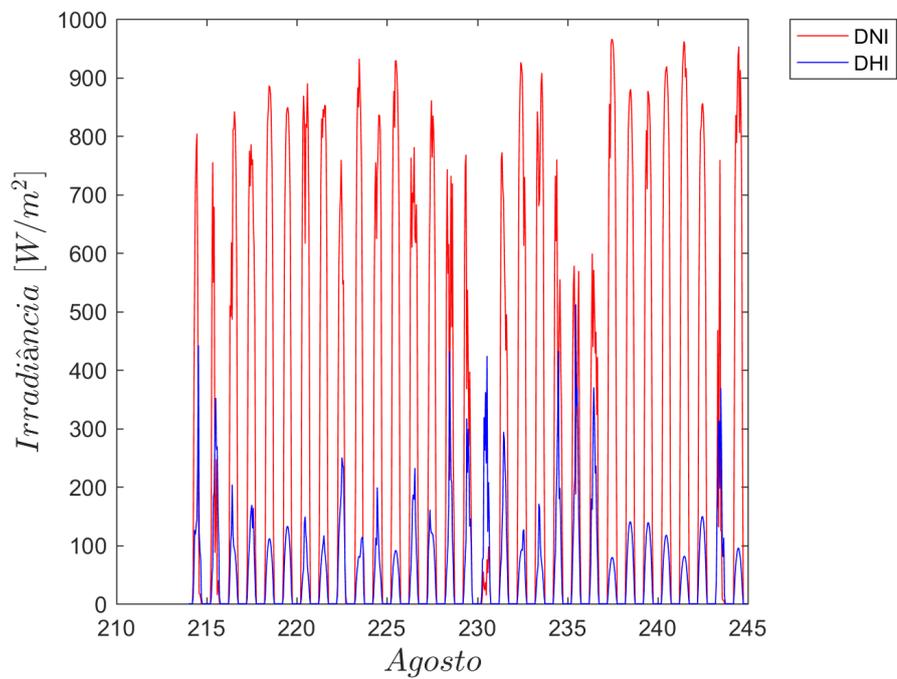


Figura 6.104: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Belo Horizonte-MG.

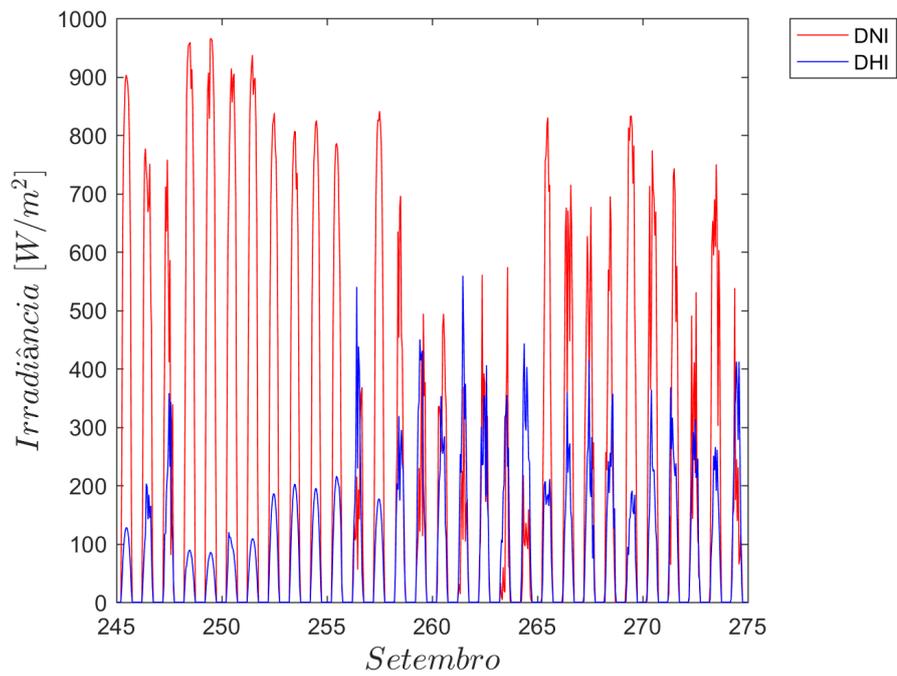


Figura 6.105: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Belo Horizonte-MG.

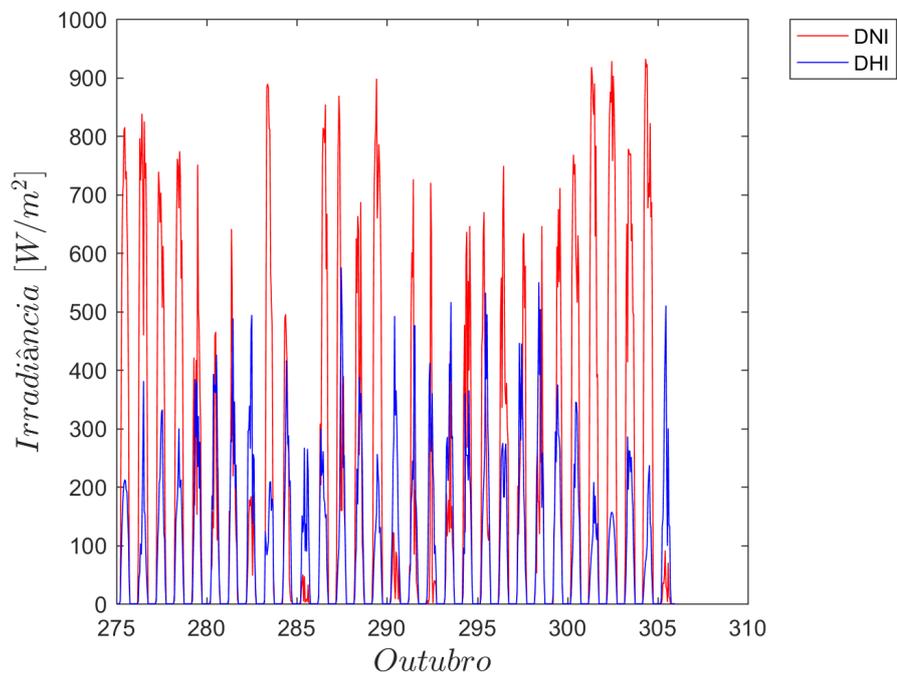


Figura 6.106: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Belo Horizonte-MG.

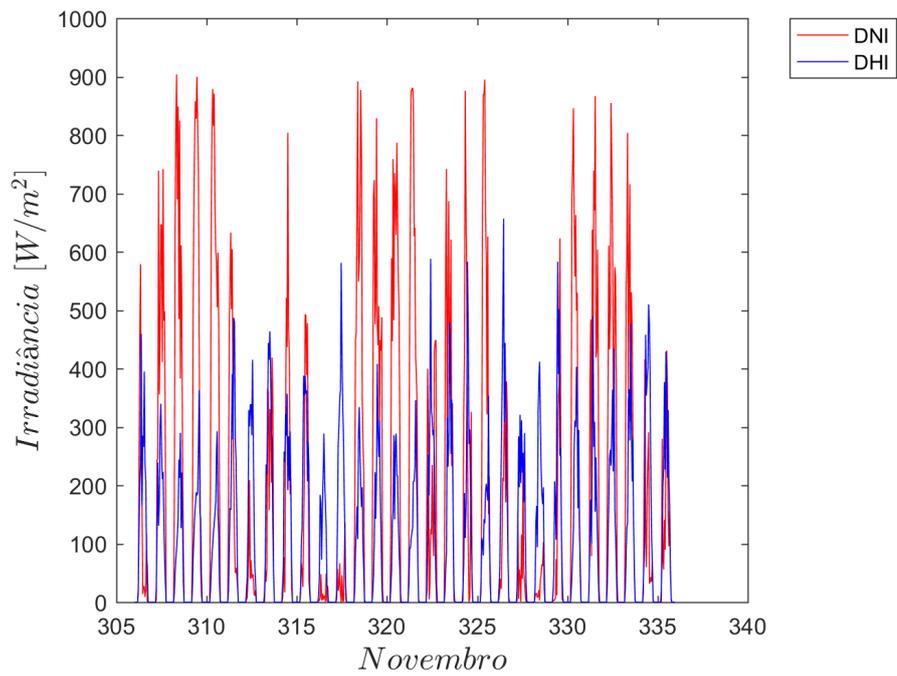


Figura 6.107: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Belo Horizonte-MG.

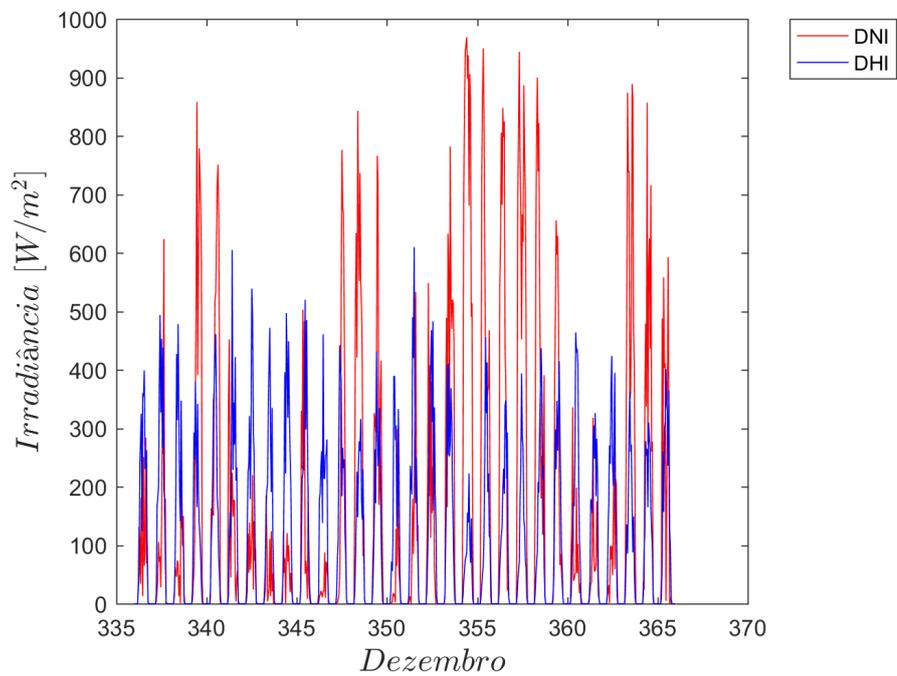


Figura 6.108: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Belo Horizonte-MG.

6.7.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

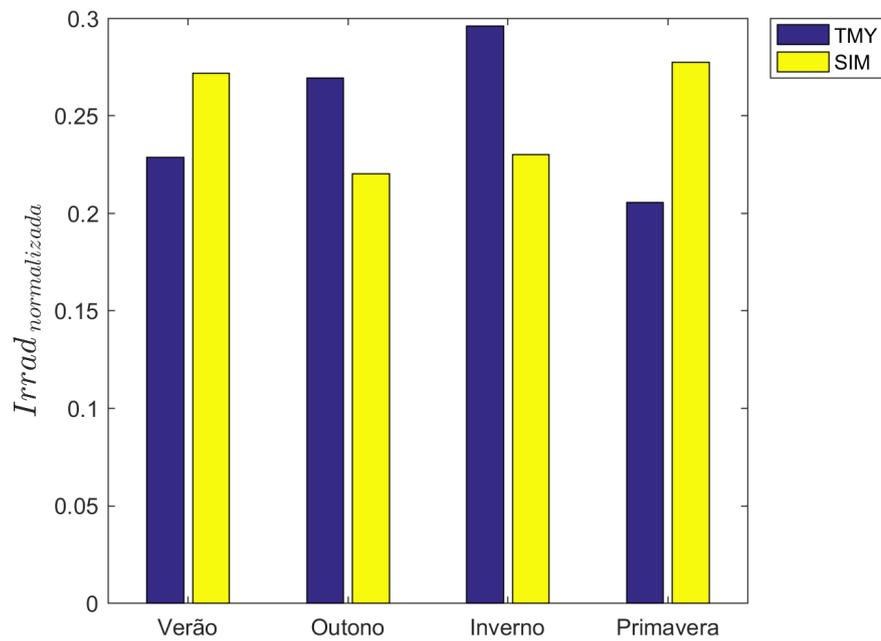


Figura 6.109: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Belo Horizonte-MG.

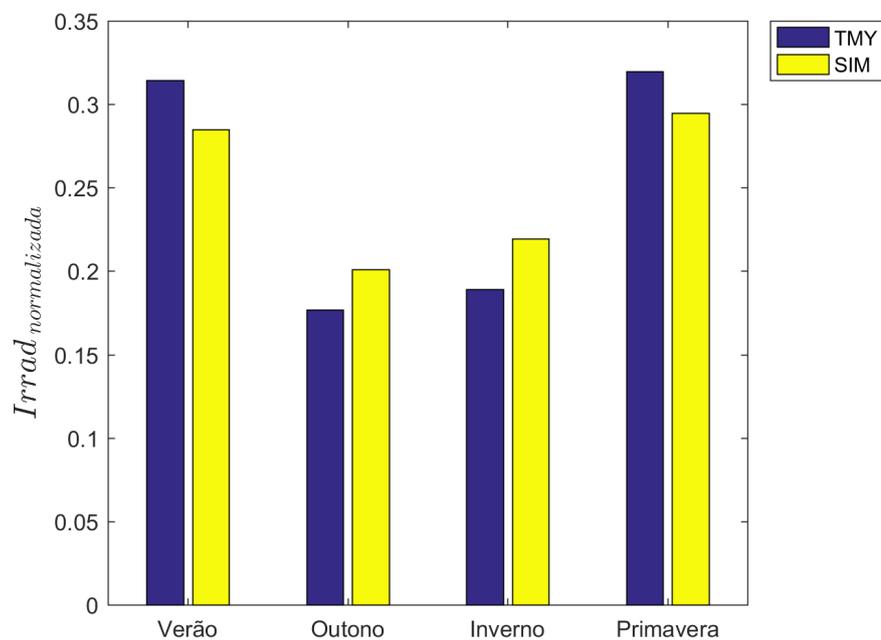


Figura 6.110: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Belo Horizonte-MG.

6.7.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

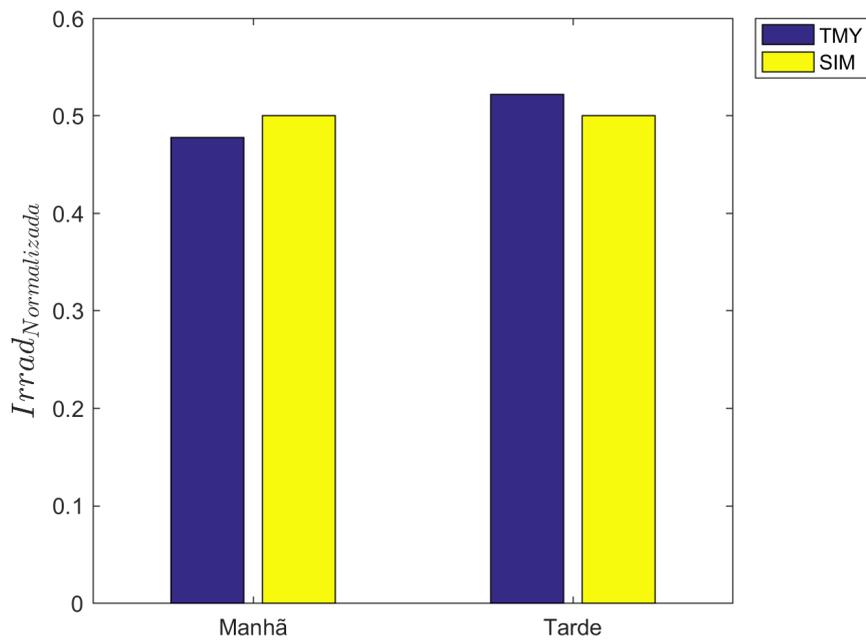


Figura 6.111: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Belo Horizonte-MG.*

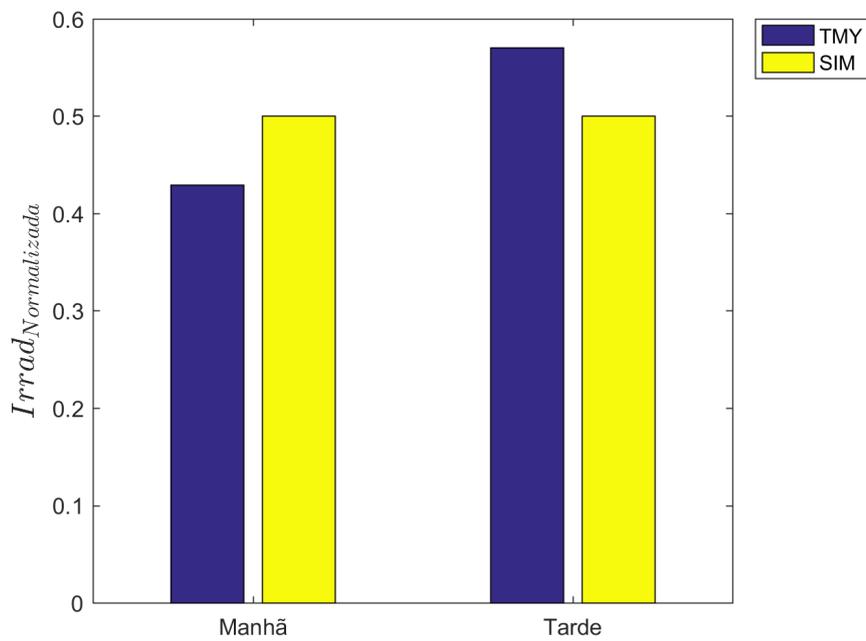


Figura 6.112: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Belo Horizonte-MG.*

6.8 São Paulo-SP

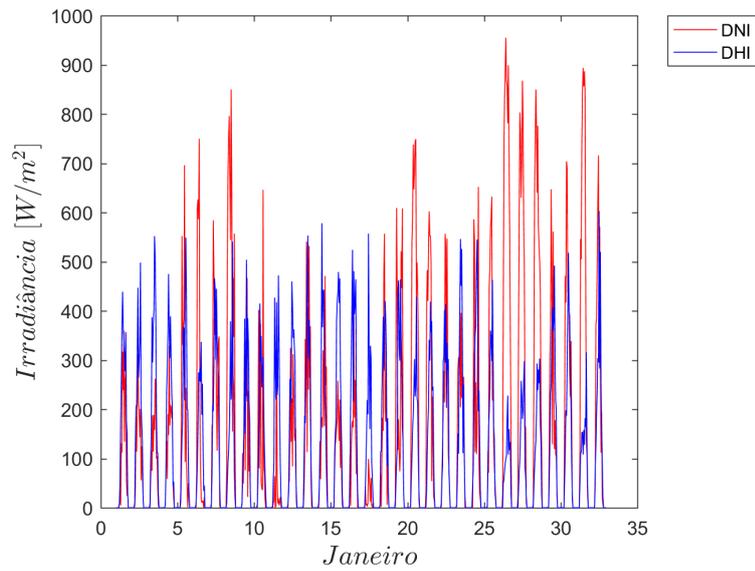


Figura 6.113: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em São Paulo-SP.

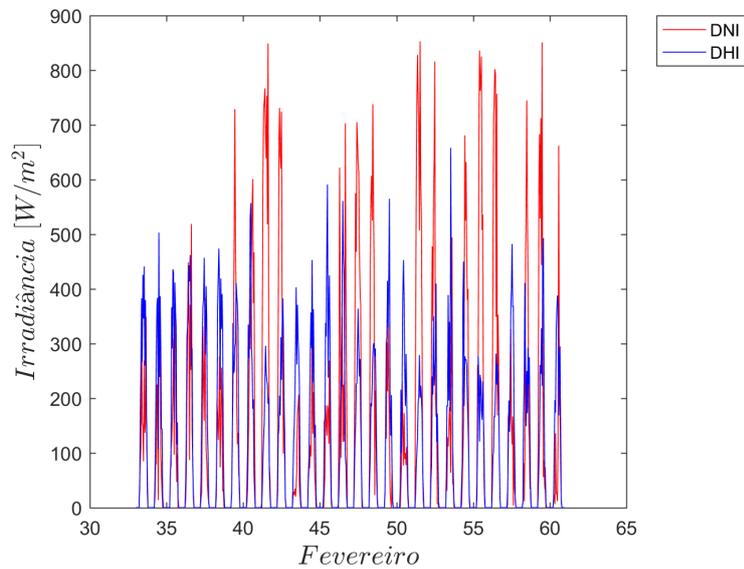


Figura 6.114: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em São Paulo-SP.

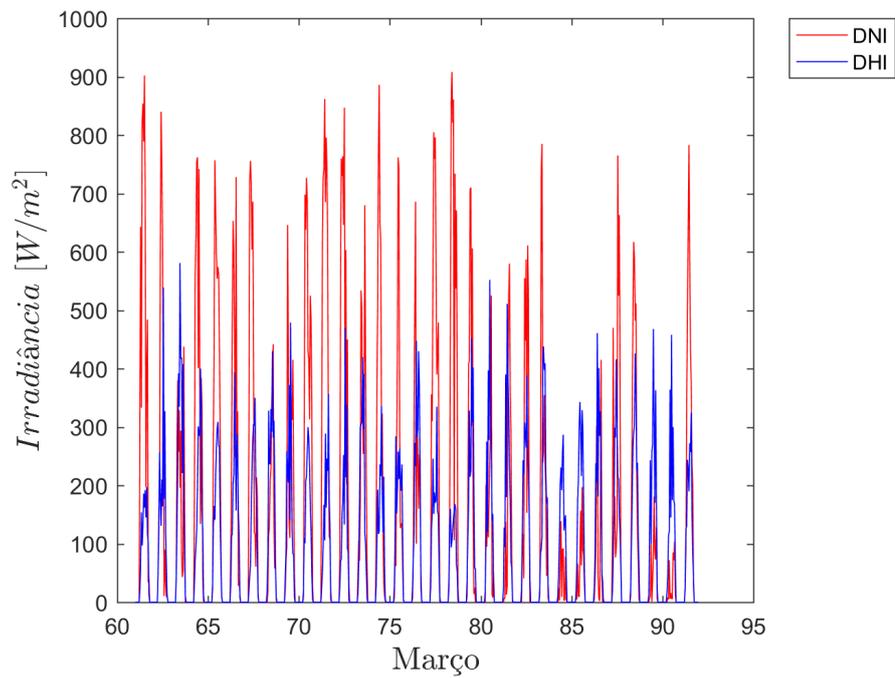


Figura 6.115: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em São Paulo-SP.

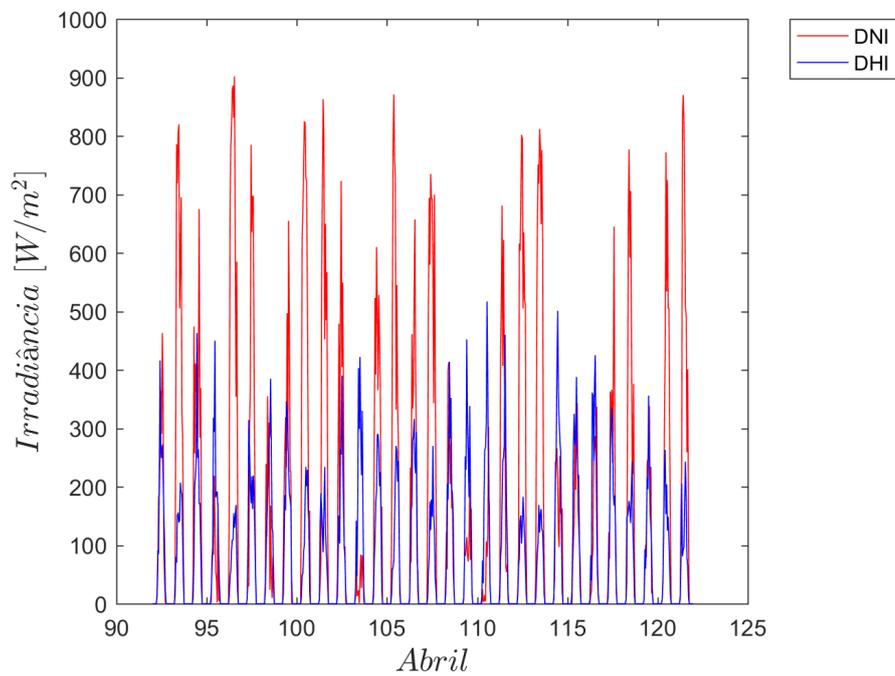


Figura 6.116: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em São Paulo-SP.

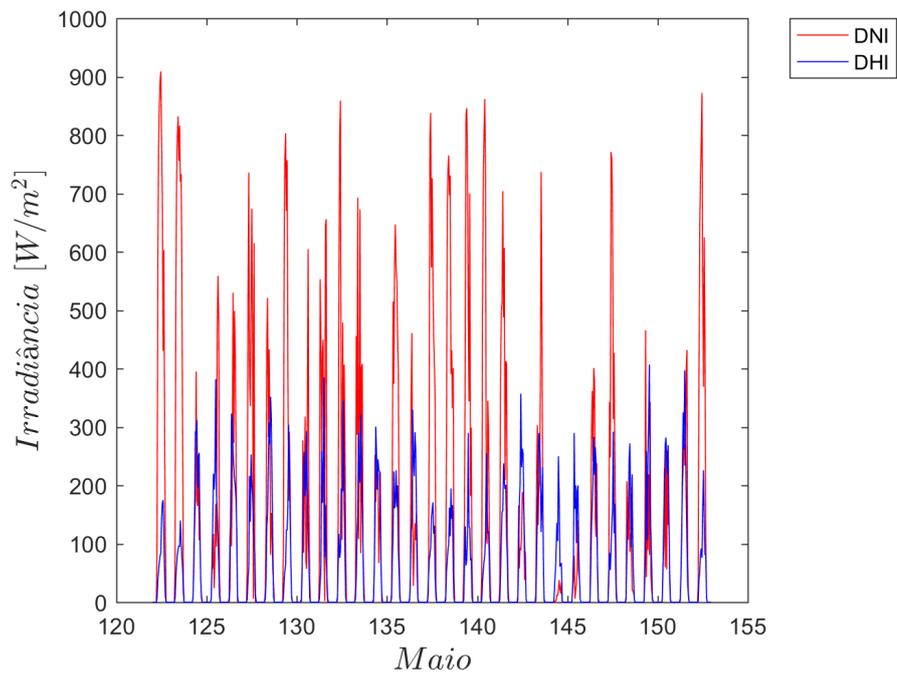


Figura 6.117: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em São Paulo-SP.

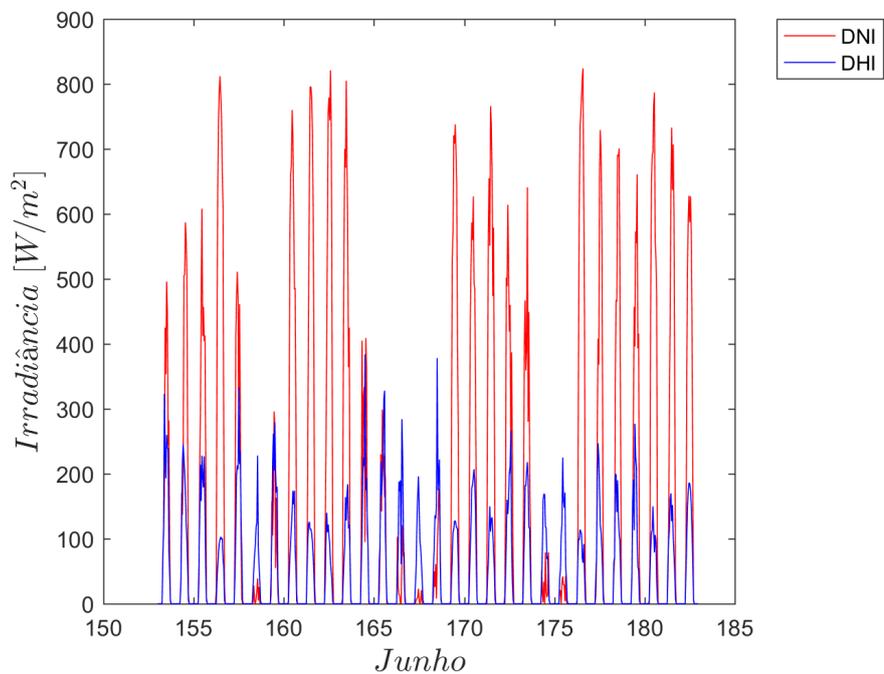


Figura 6.118: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em São Paulo-SP.

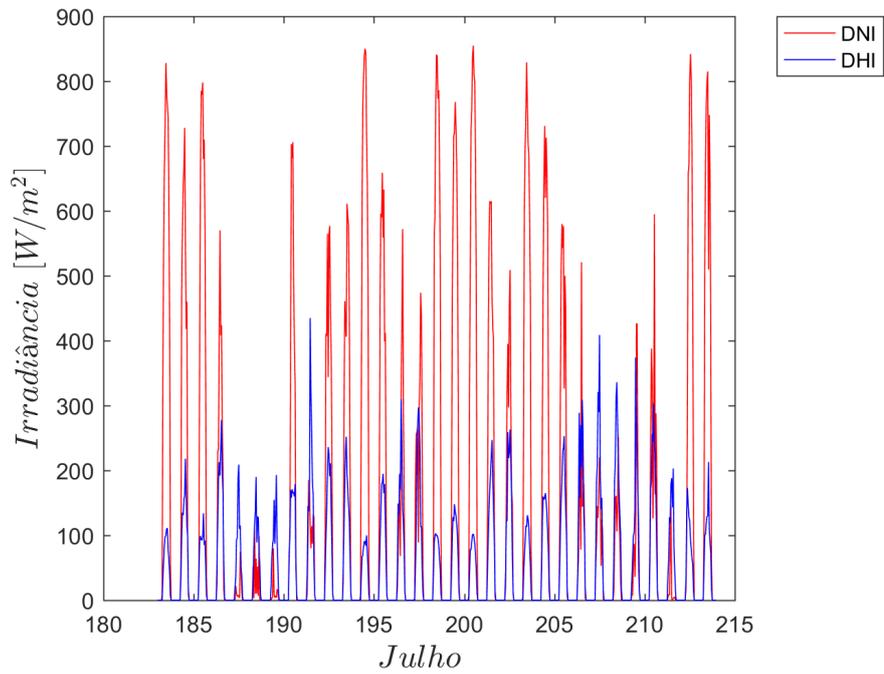


Figura 6.119: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em São Paulo-SP.

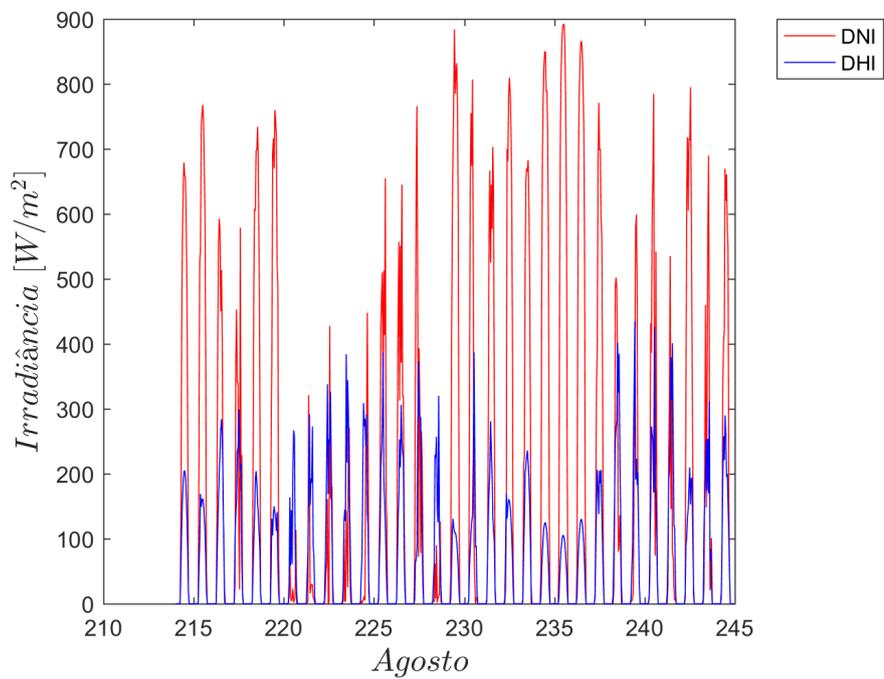


Figura 6.120: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em São Paulo-SP.

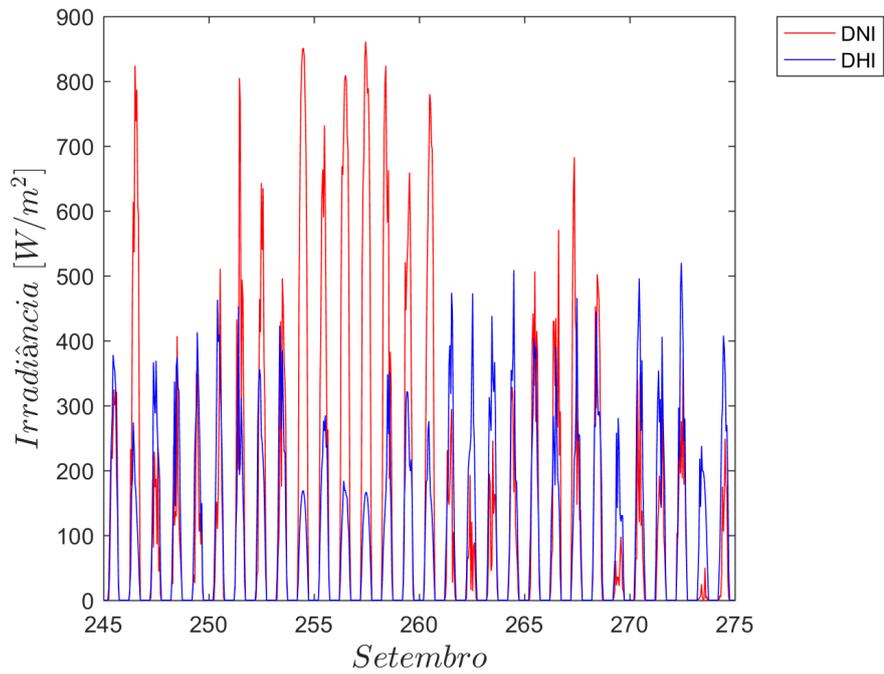


Figura 6.121: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em São Paulo-SP.

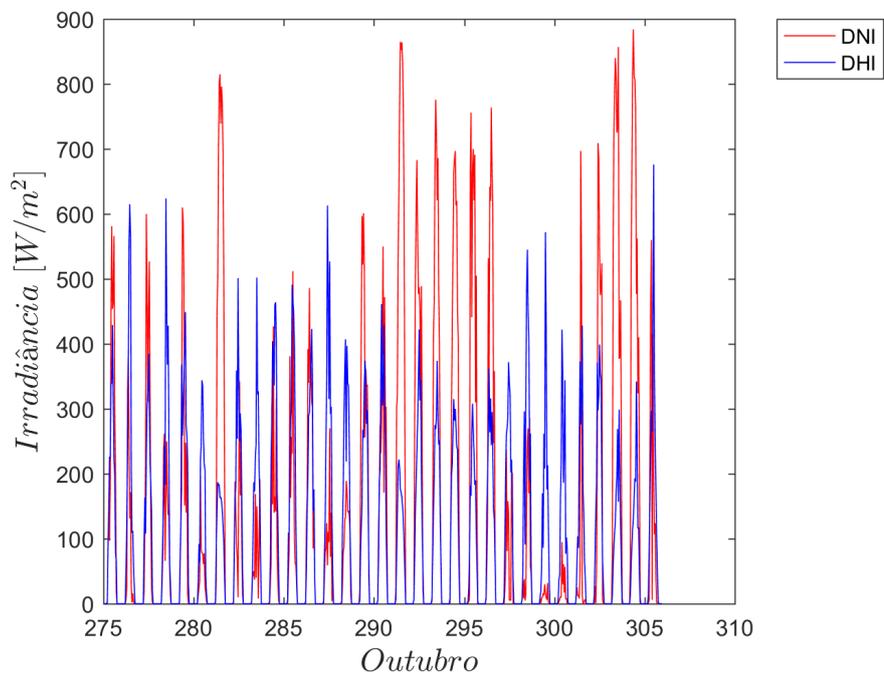


Figura 6.122: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em São Paulo-SP.

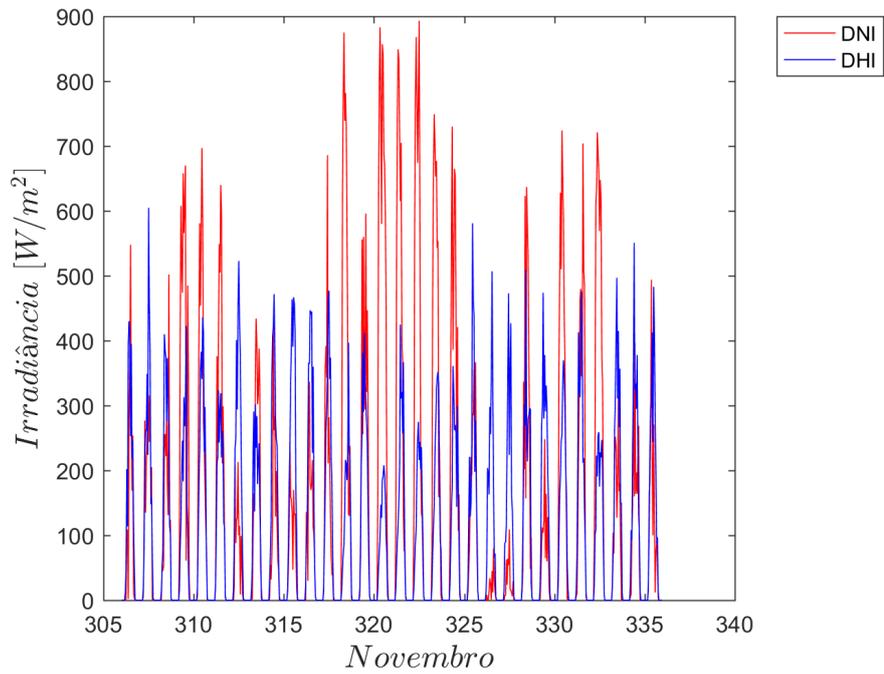


Figura 6.123: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em São Paulo-SP.

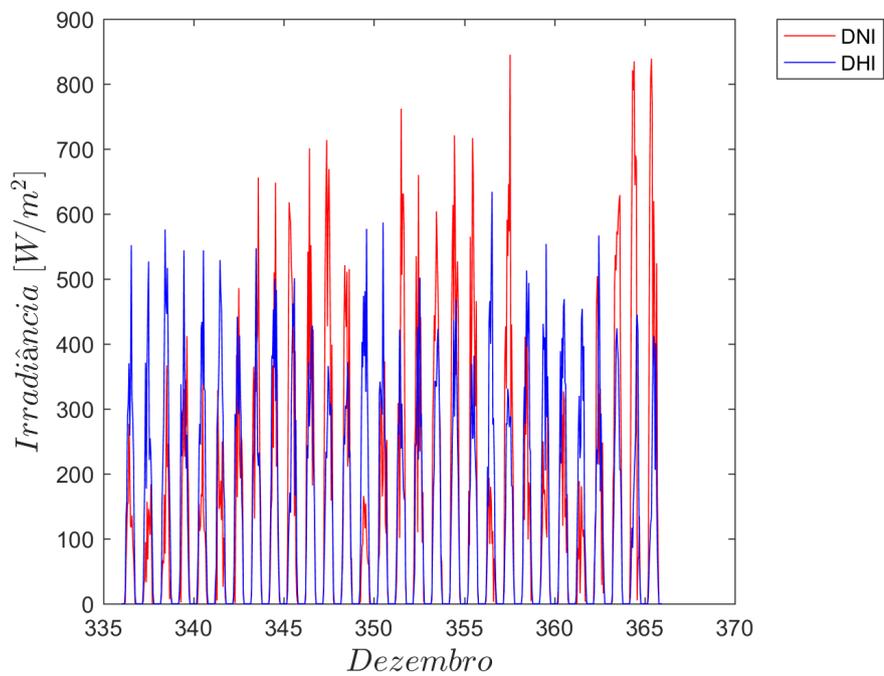


Figura 6.124: : Comparação entre a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em São Paulo-SP.

6.8.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

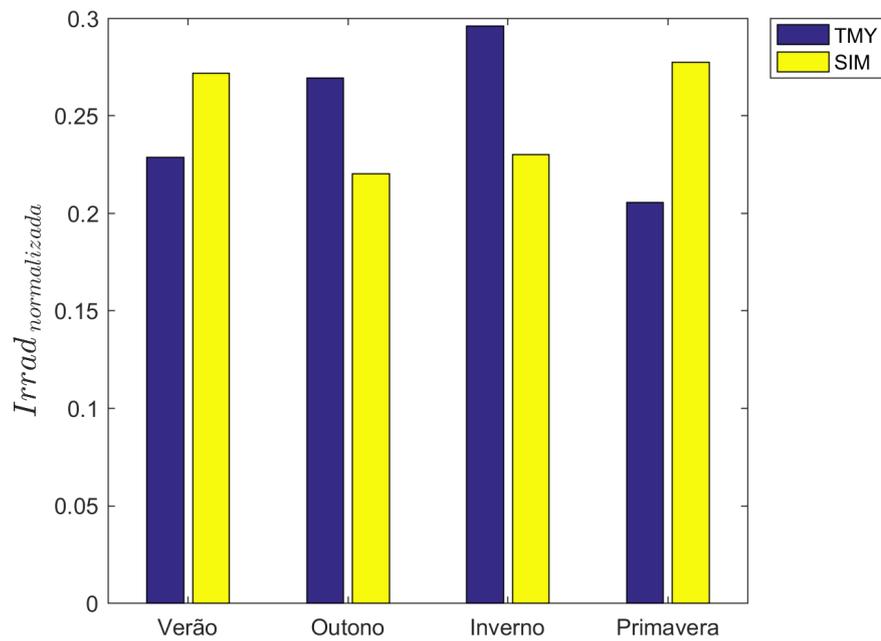


Figura 6.125: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em São Paulo-SP.

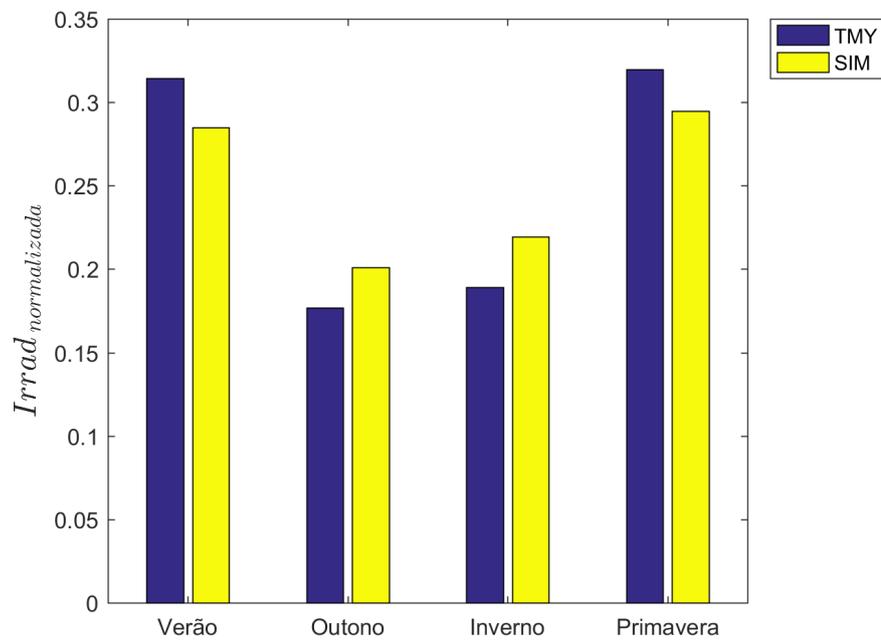


Figura 6.126: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em São Paulo-SP.

6.8.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

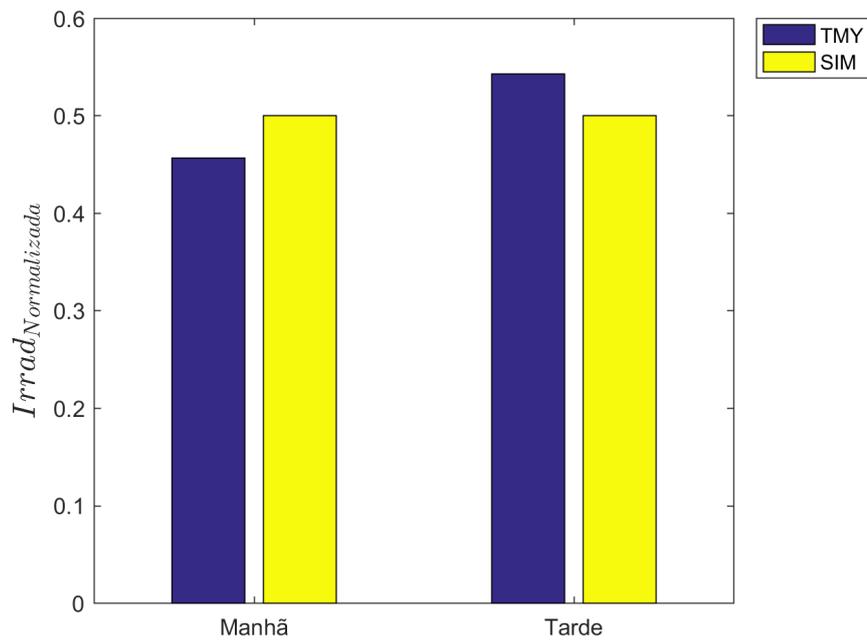


Figura 6.127: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em São Paulo-SP.*

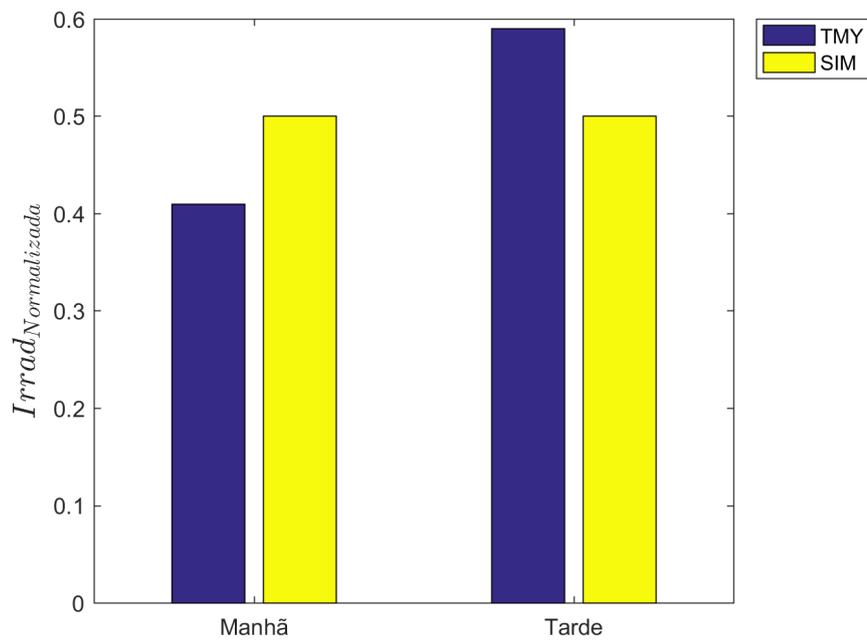


Figura 6.128: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em São Paulo-SP.*

6.9 Curitiba-PR

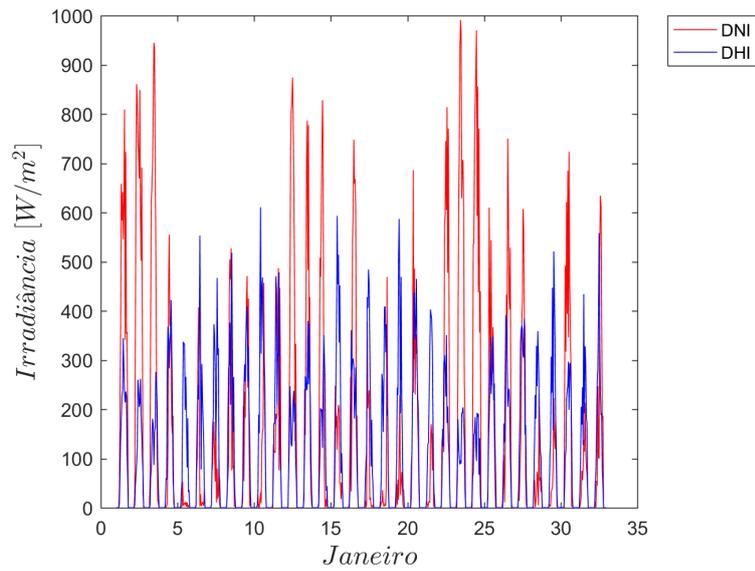


Figura 6.129: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Curitiba-PR.

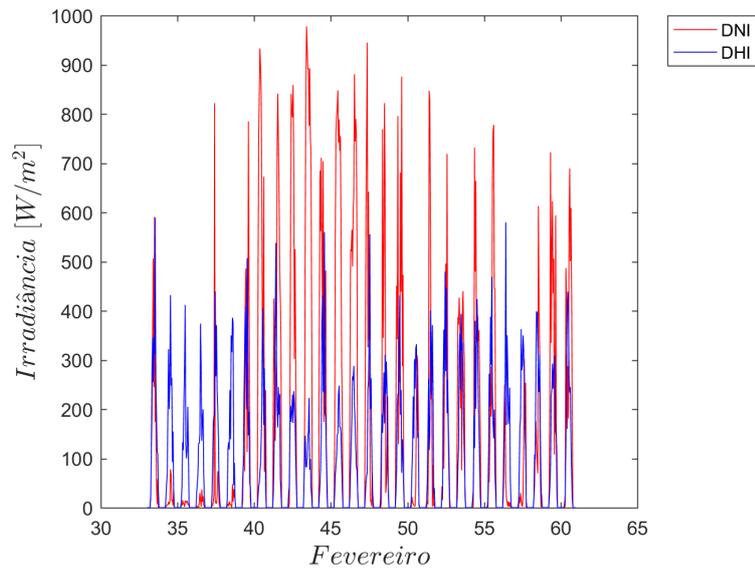


Figura 6.130: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Curitiba-PR.

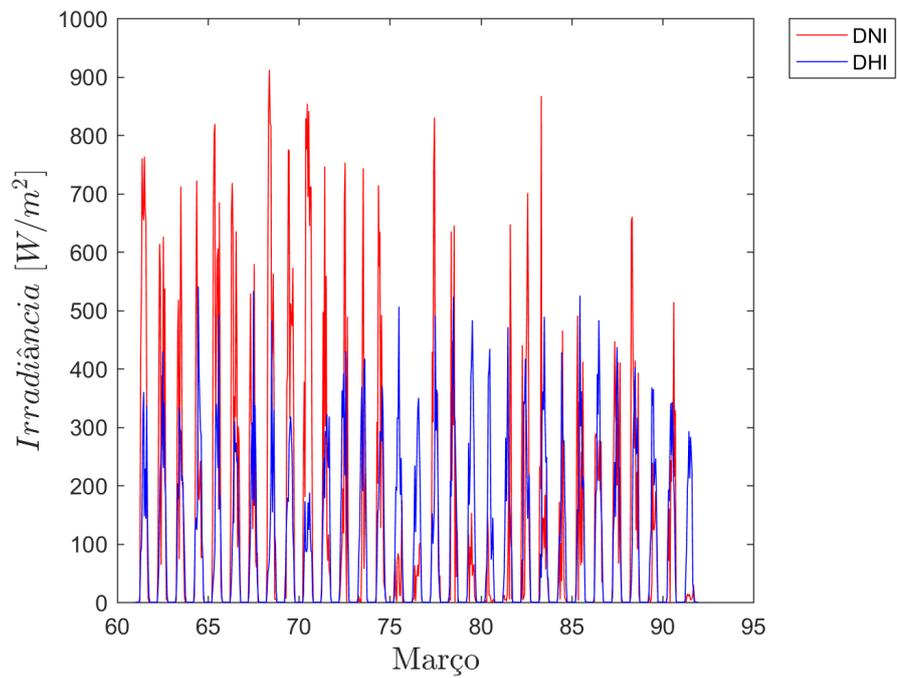


Figura 6.131: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Curitiba-PR.

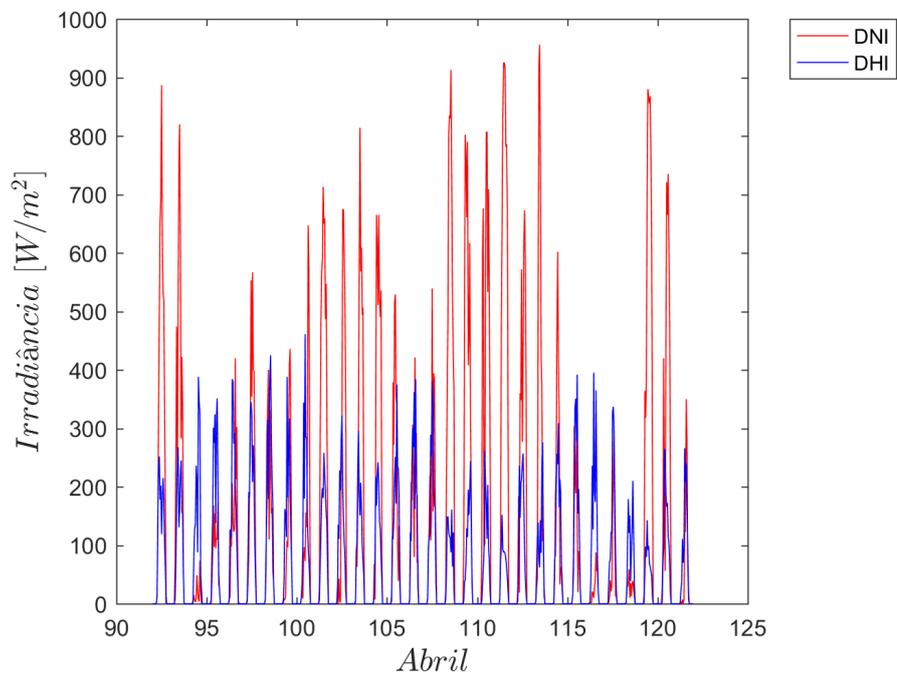


Figura 6.132: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Curitiba-PR.

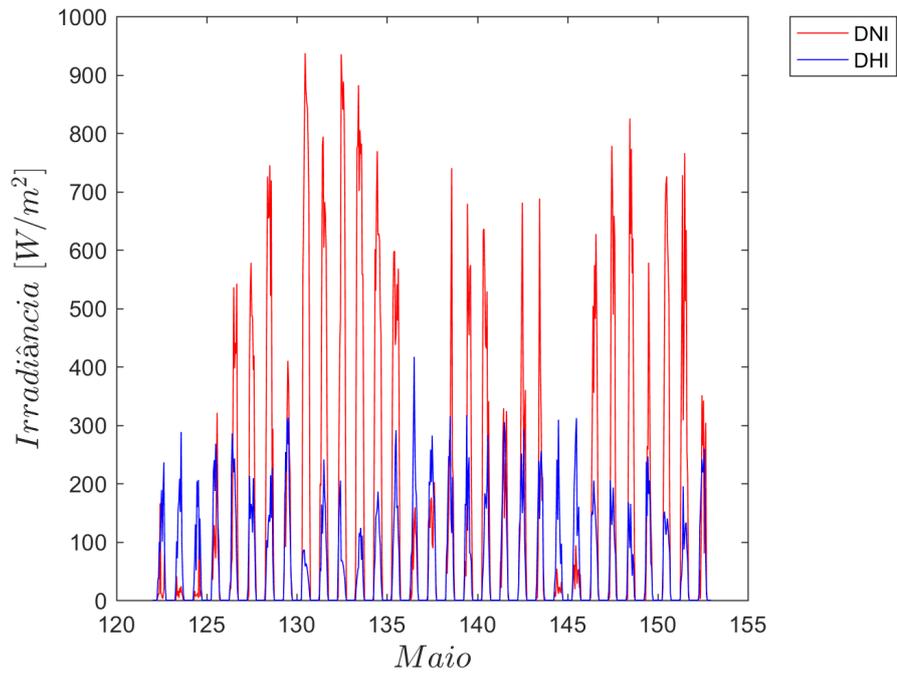


Figura 6.133: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Curitiba-PR.

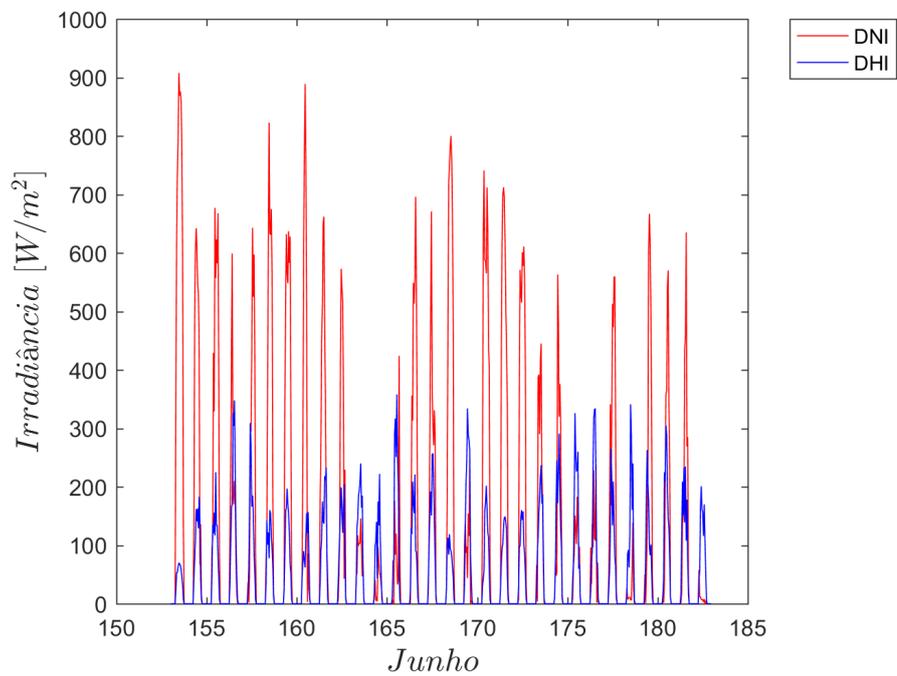


Figura 6.134: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Curitiba-PR.

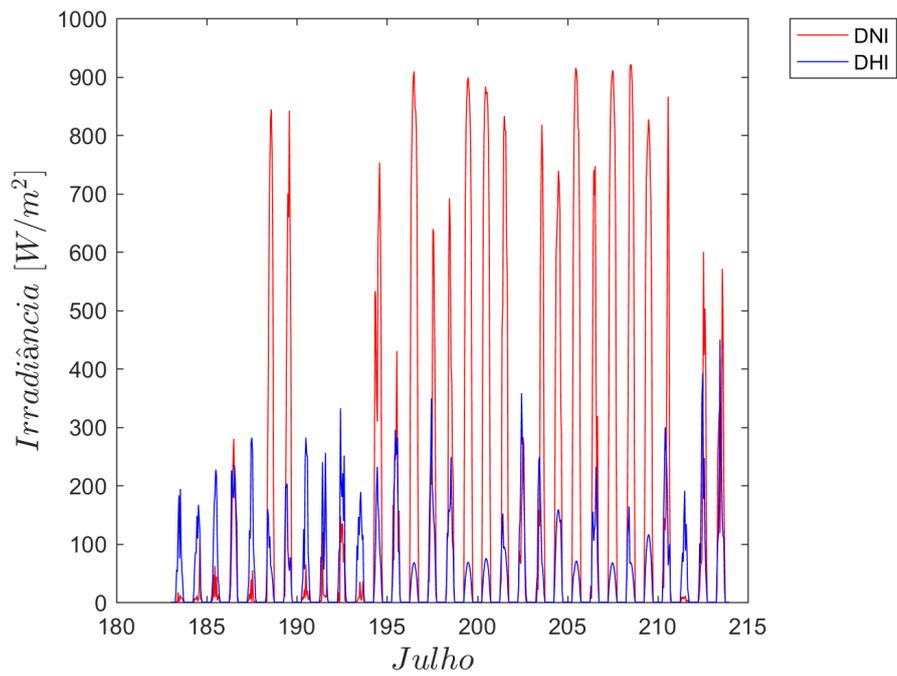


Figura 6.135: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Curitiba-PR.

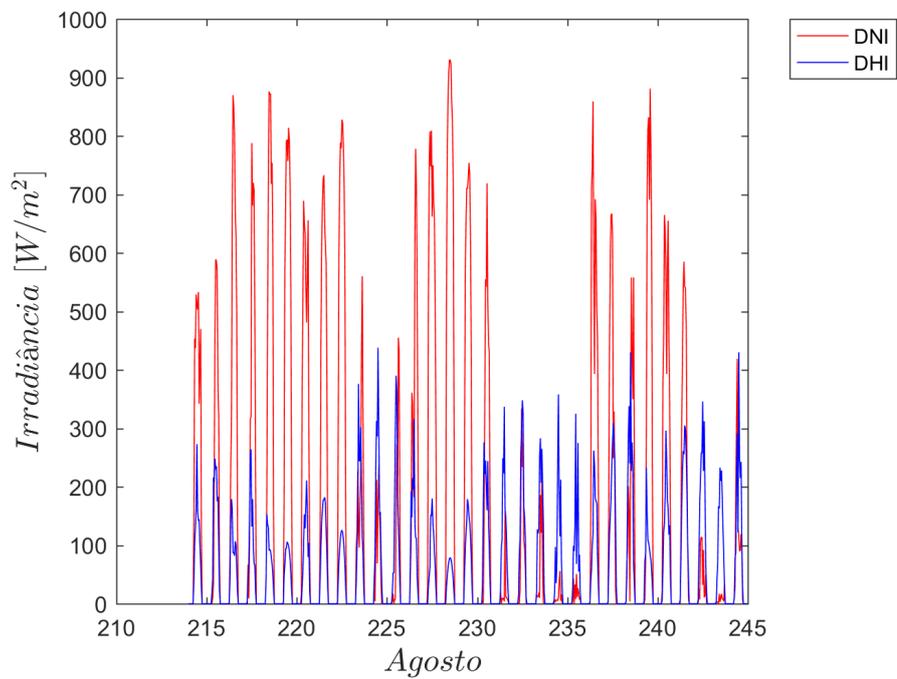


Figura 6.136: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Curitiba-PR.

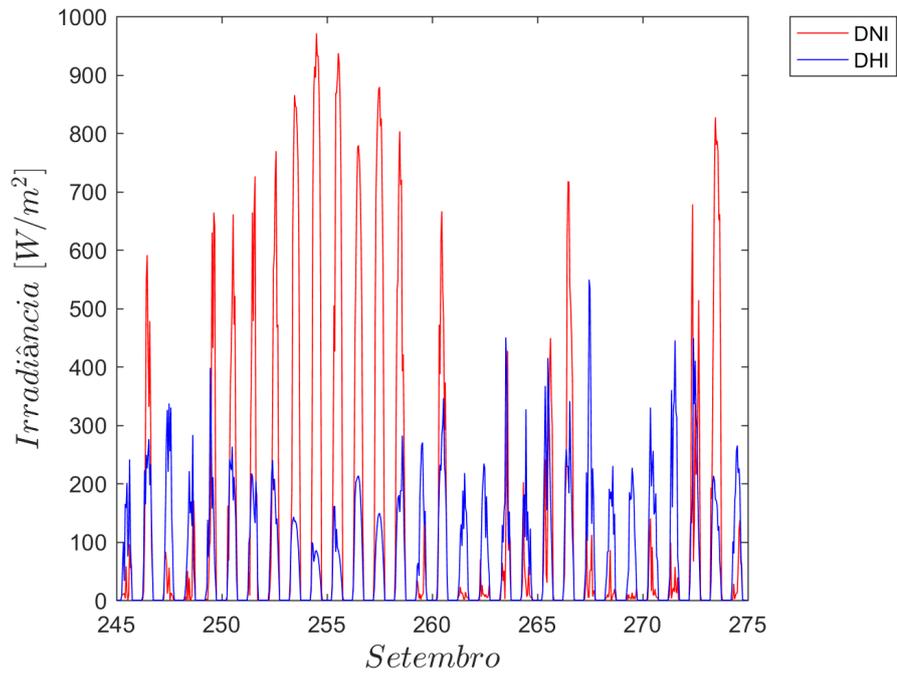


Figura 6.137: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Curitiba-PR.

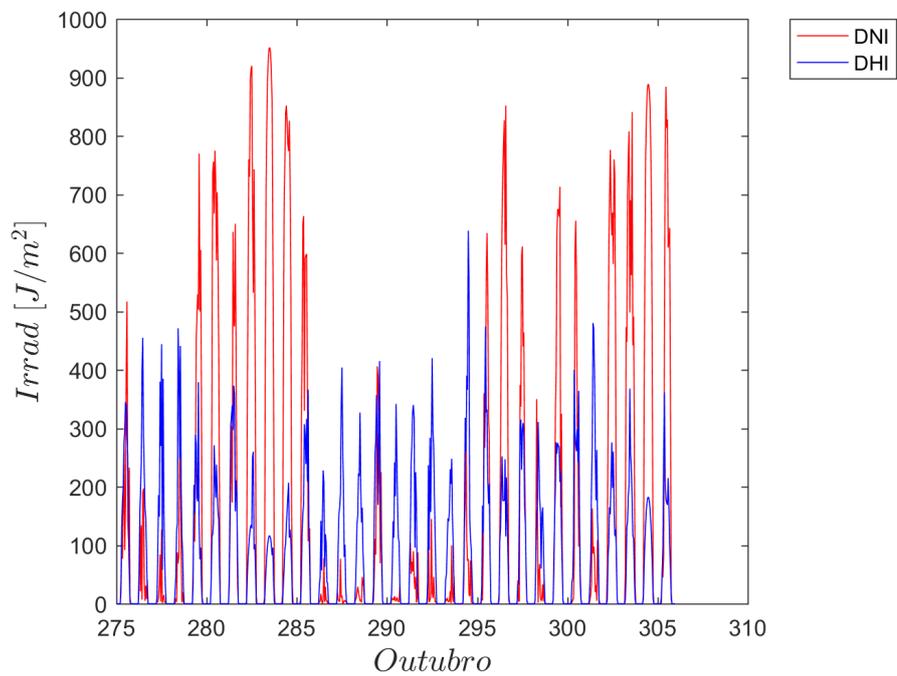


Figura 6.138: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Curitiba-PR.

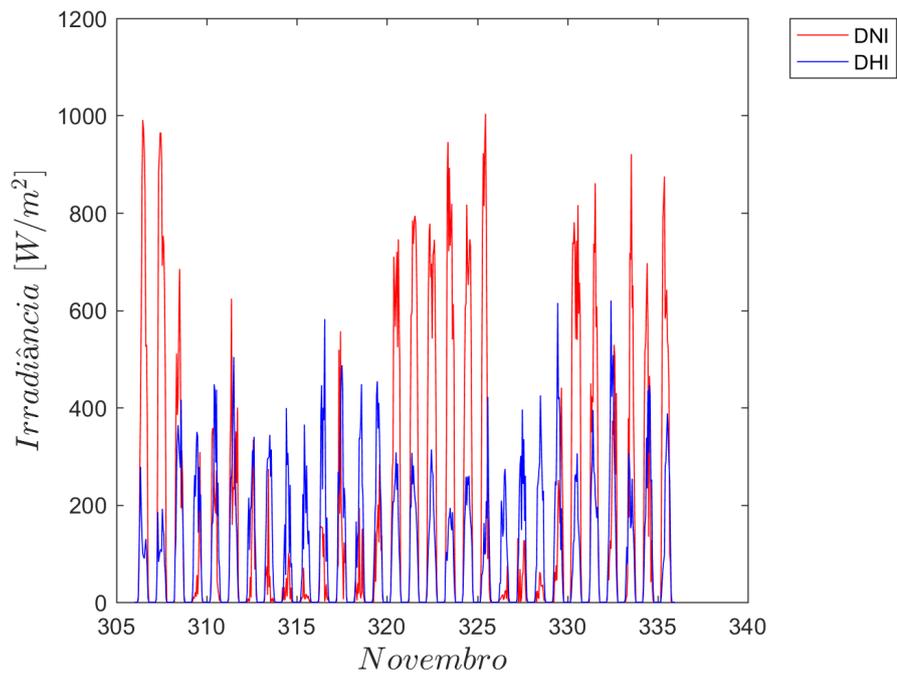


Figura 6.139: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Curitiba-PR.

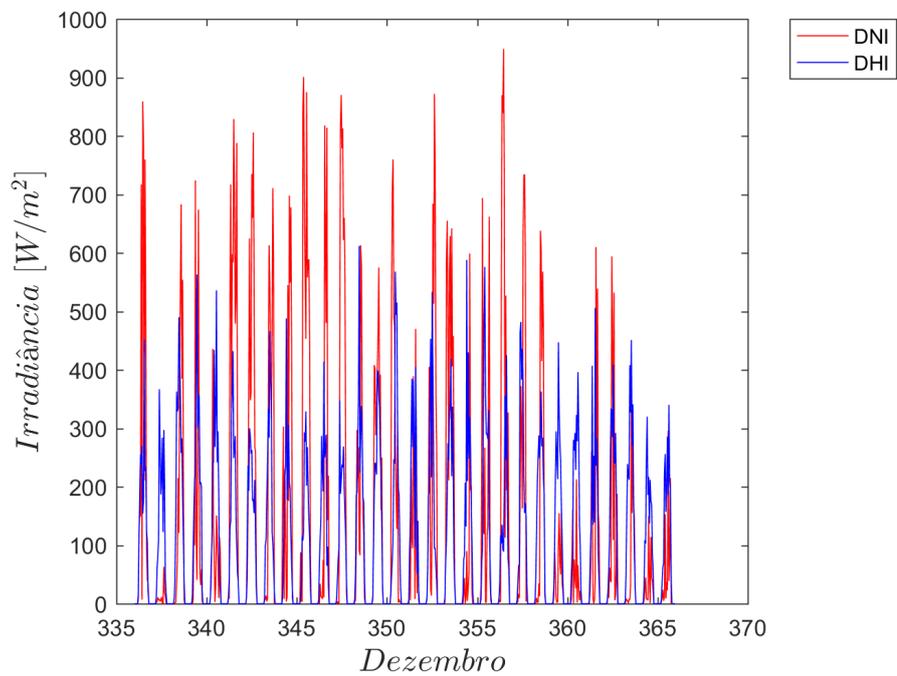


Figura 6.140: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Curitiba-PR.

6.9.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

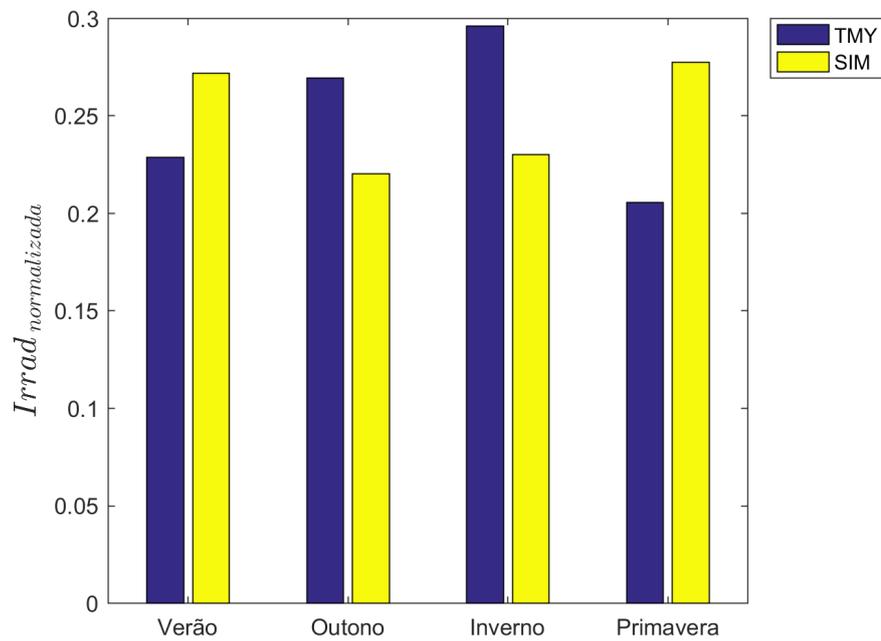


Figura 6.141: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Curitiba-PR.

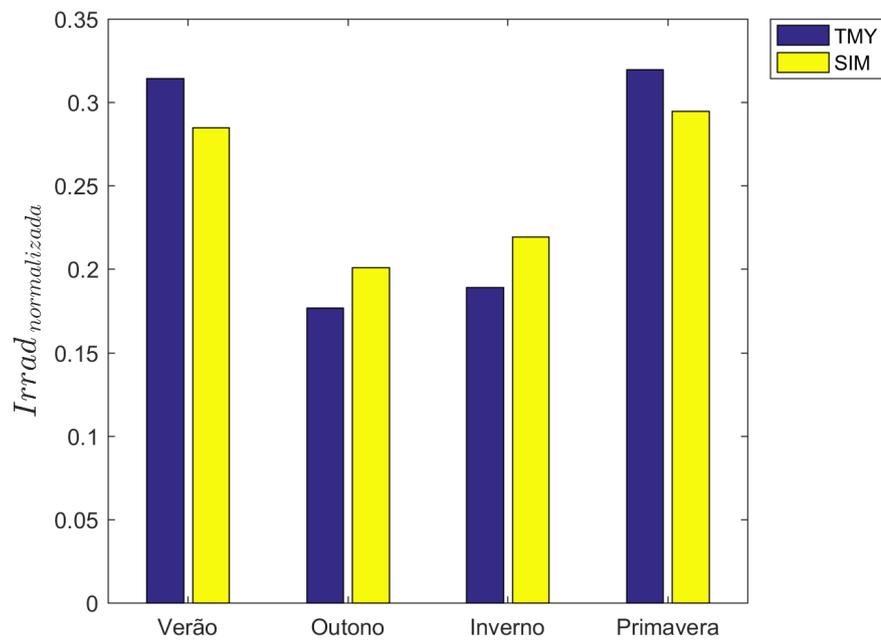


Figura 6.142: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Curitiba-PR.

6.9.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

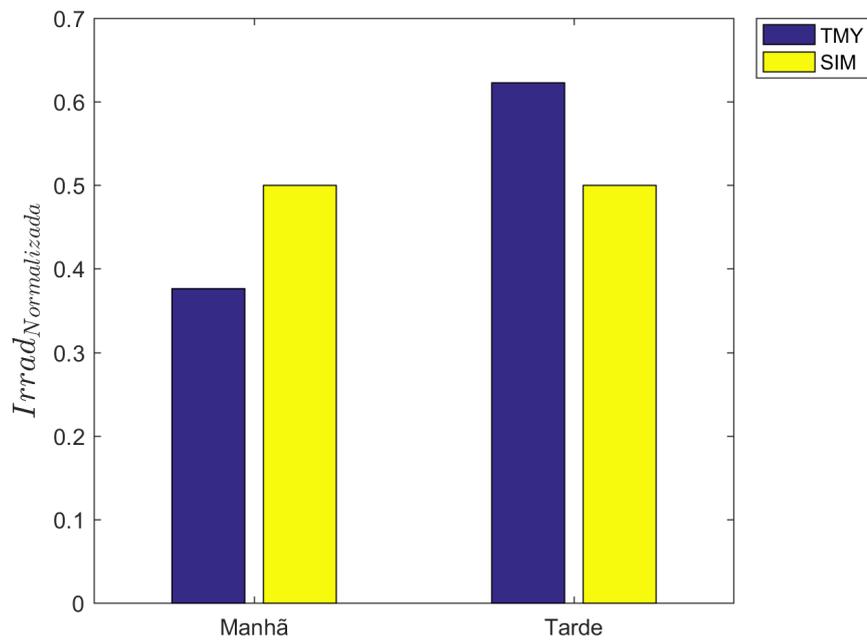


Figura 6.143: *Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Curitiba-PR.*

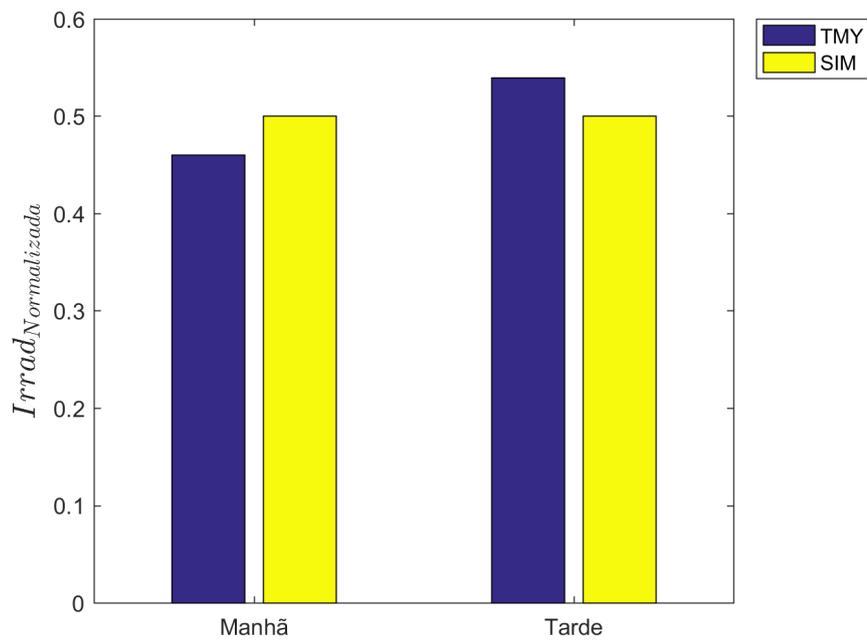


Figura 6.144: *Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Curitiba-PR.*

6.10 Santa Maria-RS

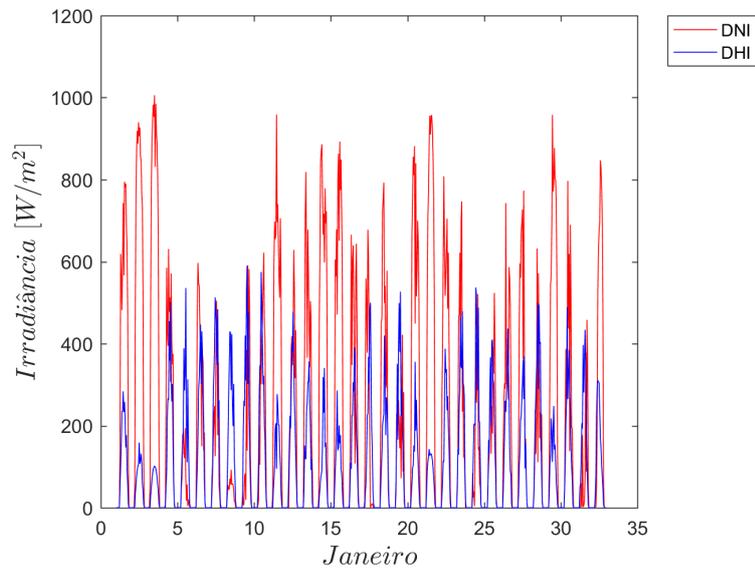


Figura 6.145: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Janeiro em Santa Maria-RS.

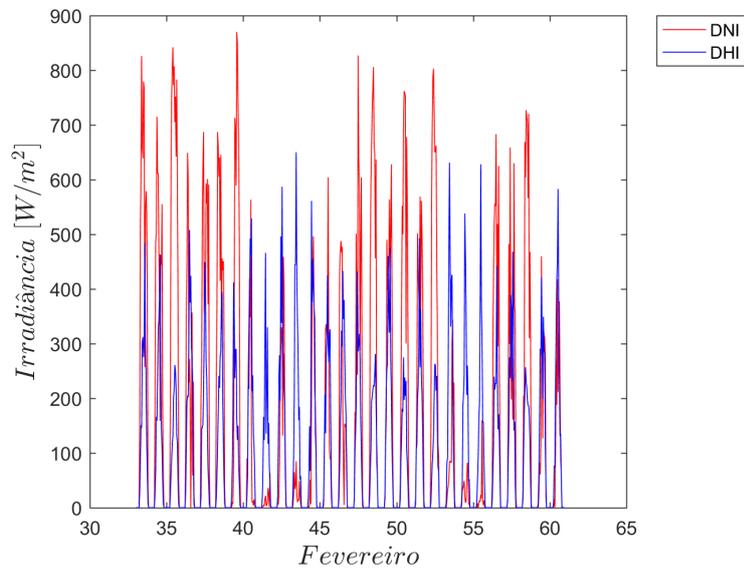


Figura 6.146: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Fevereiro em Santa Maria-RS.

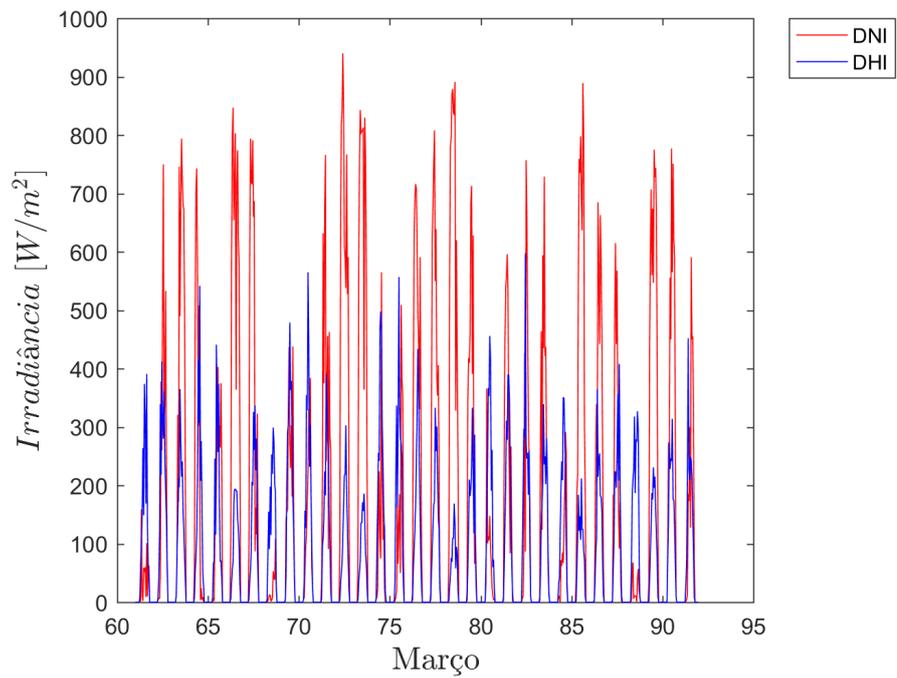


Figura 6.147: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Março em Santa Maria-RS.

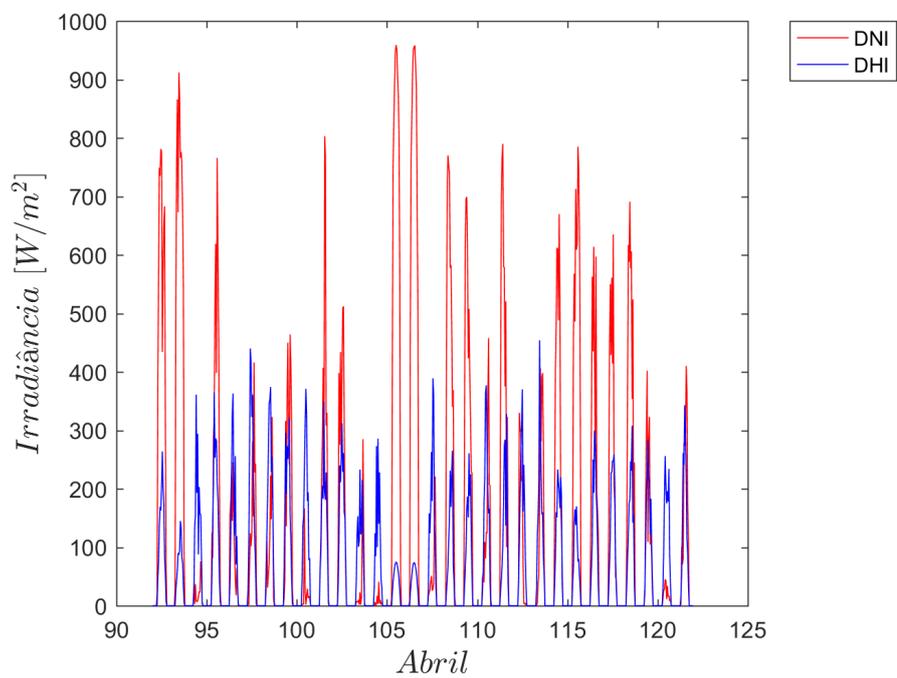


Figura 6.148: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Abril em Santa Maria-RS.

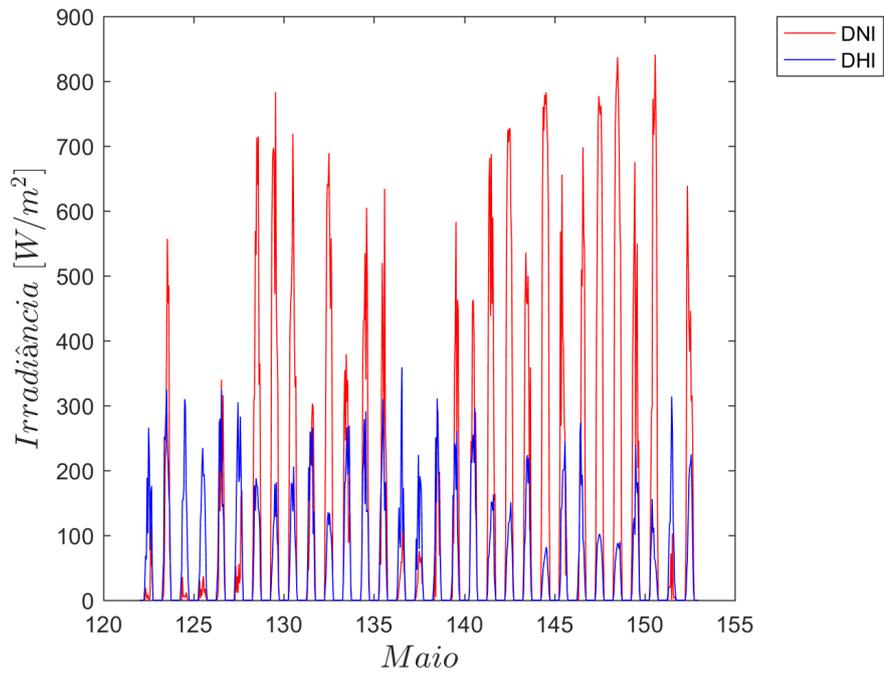


Figura 6.149: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Maio em Santa Maria-RS.

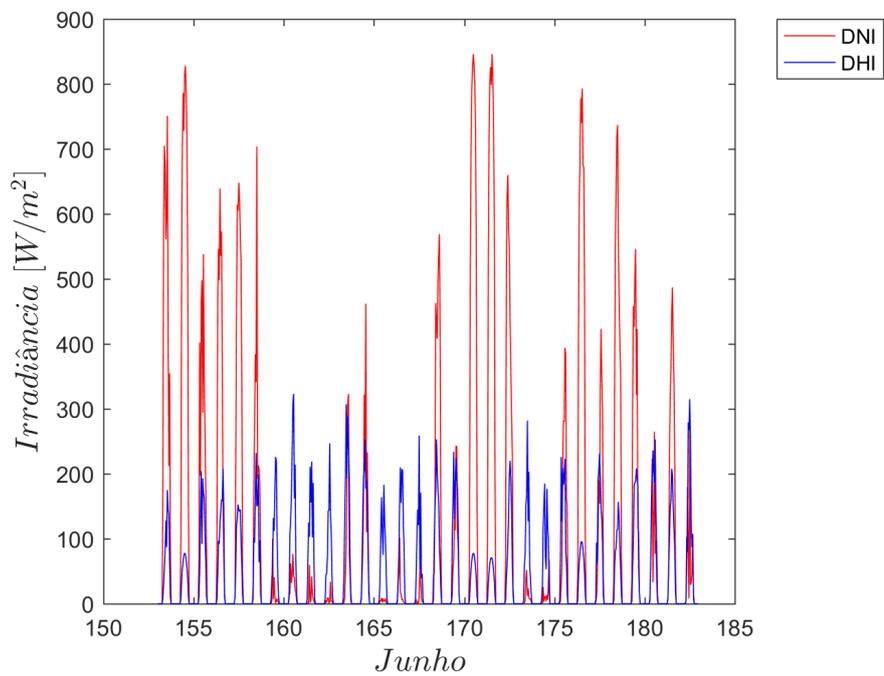


Figura 6.150: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Junho em Santa Maria-RS.

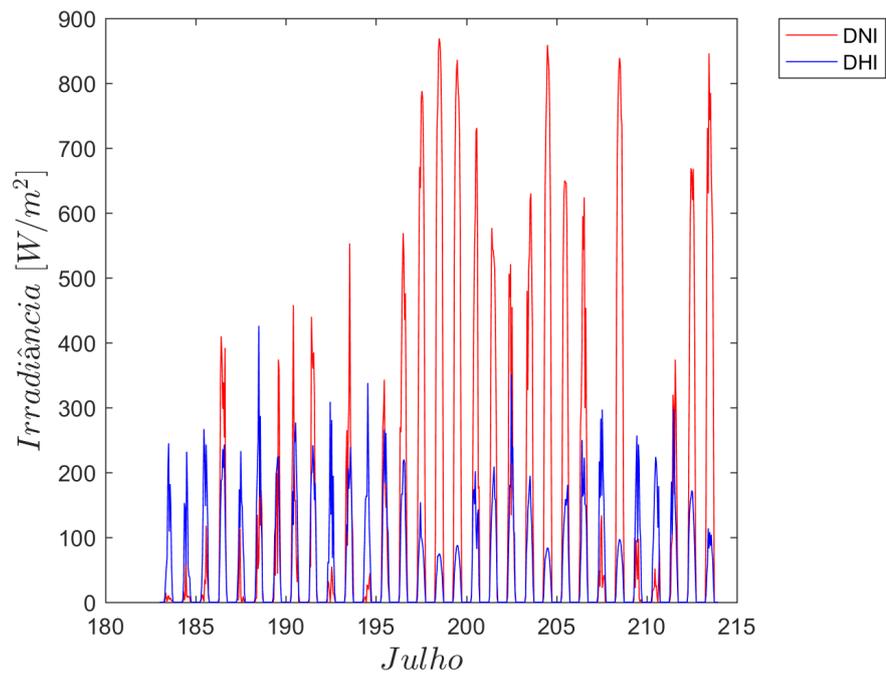


Figura 6.151: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Julho em Santa Maria-RS.

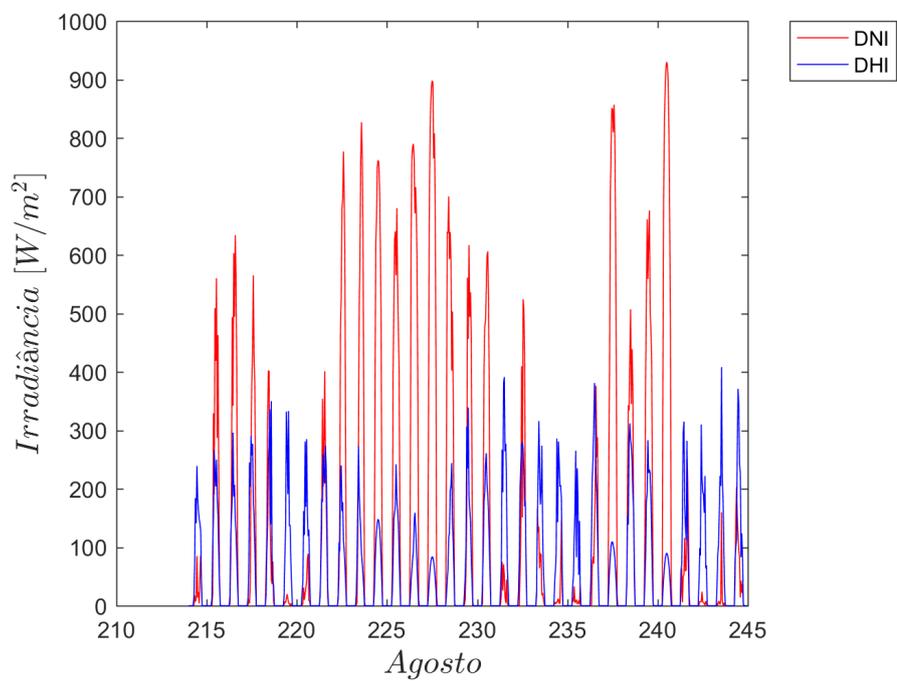


Figura 6.152: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Agosto em Santa Maria-RS.

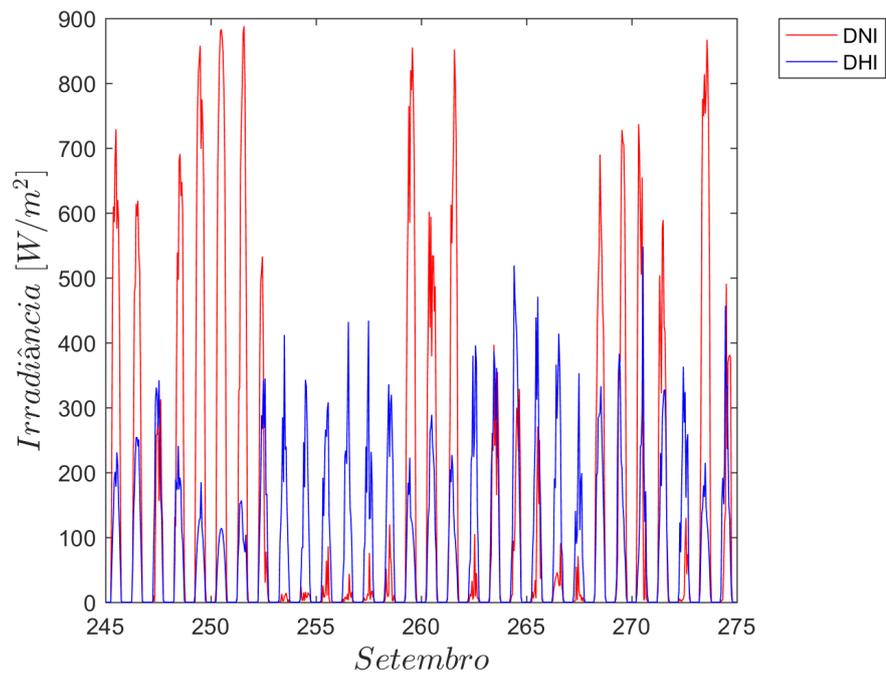


Figura 6.153: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Setembro em Santa Maria-RS.

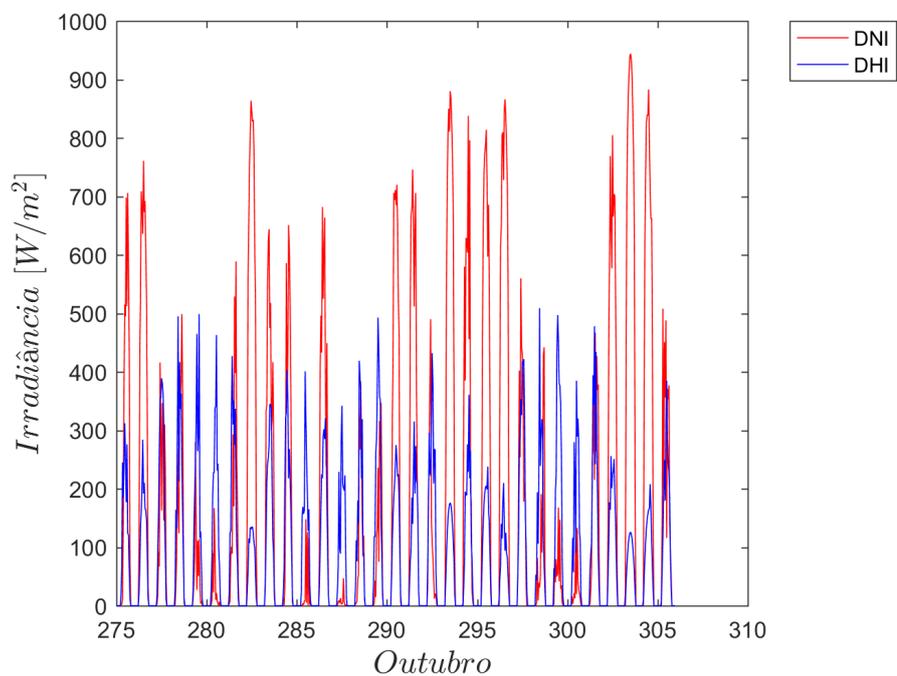


Figura 6.154: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Outubro em Santa Maria-RS.

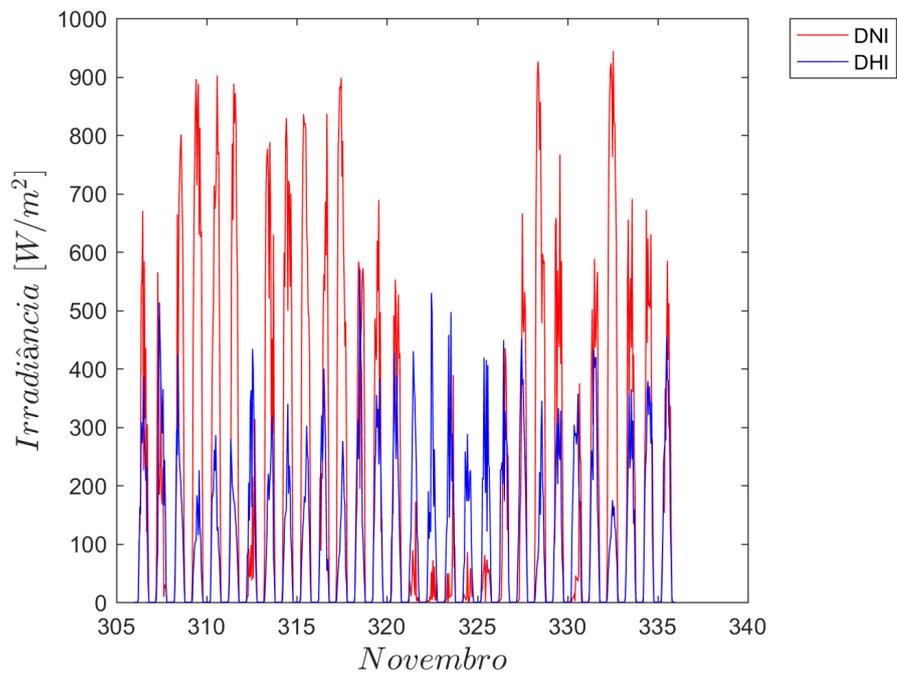


Figura 6.155: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Novembro em Santa Maria-RS.

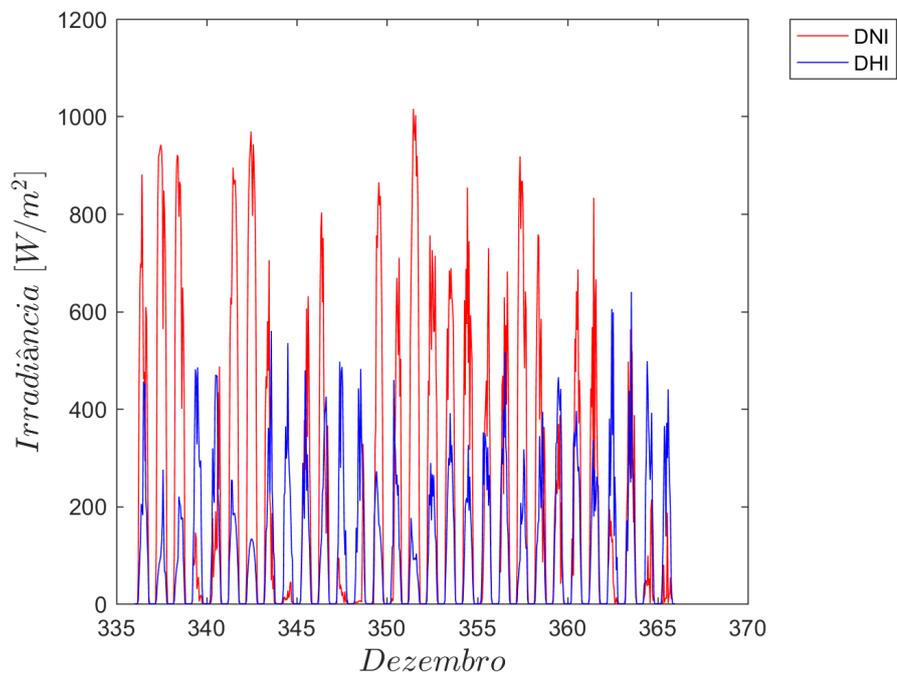


Figura 6.156: : Comparação entres a DNI e DHI Normalizados para o mês de Dezembro em Santa Maria-RS.

6.10.1 GRÁFICOS DNI E DHI SAZONAIS

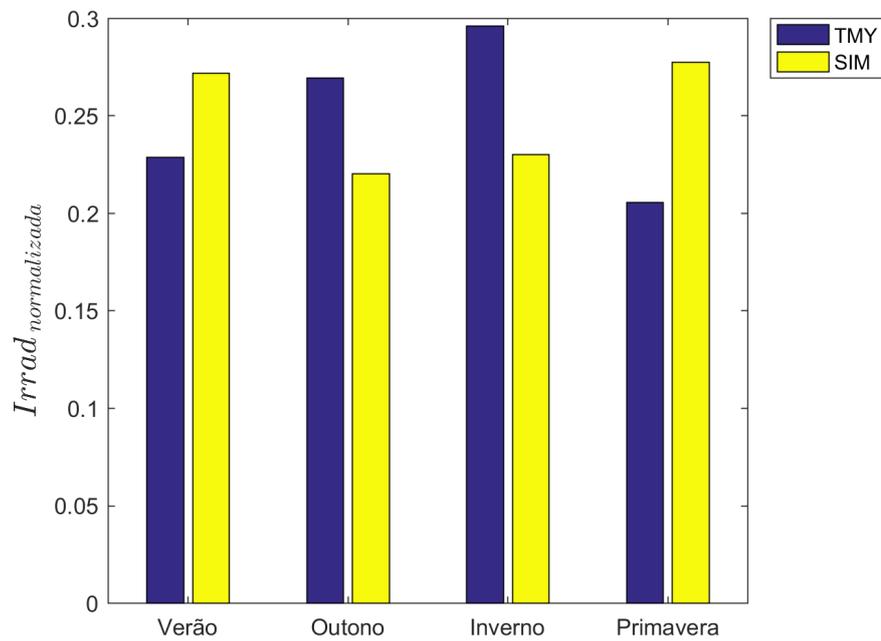


Figura 6.157: : Comparativo DNI normalizada sazonalmente e medidas em Santa Maria-RS.

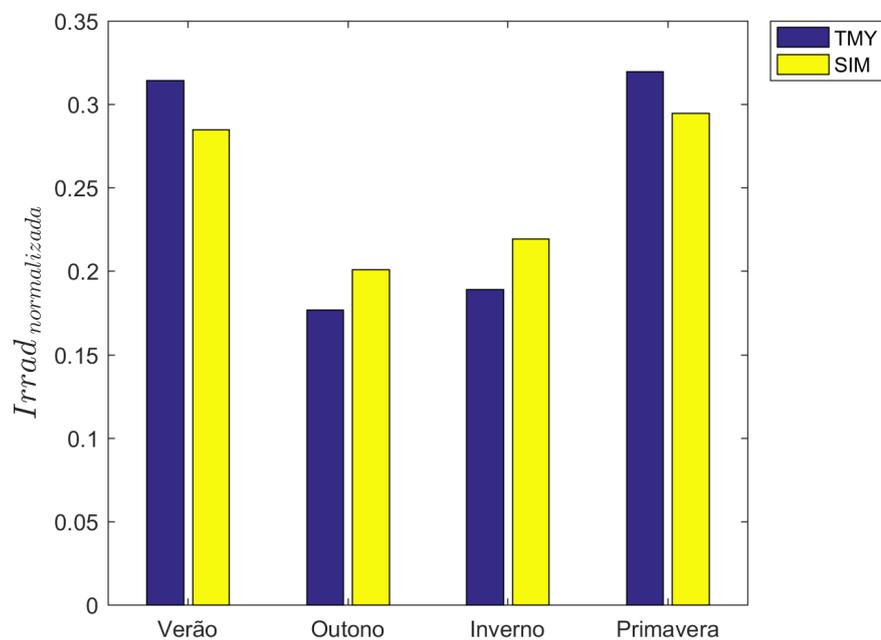


Figura 6.158: : Comparativo DHI normalizada sazonalmente e medidas em Santa Maria-RS.

6.10.2 GRÁFICOS DNI E DHI DIÁRIOS

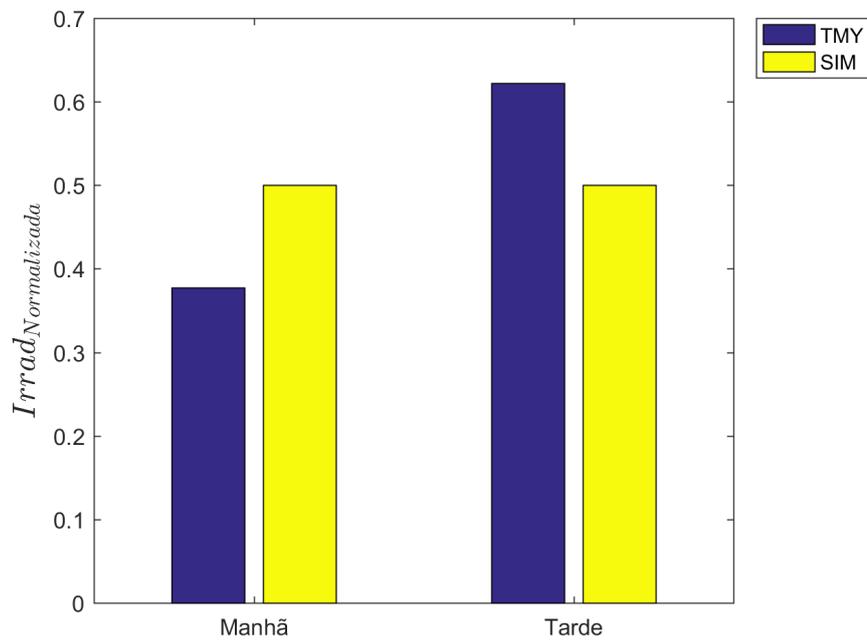


Figura 6.159: Variação do DNI normalizado ao longo do dia em Santa Maria-RS.

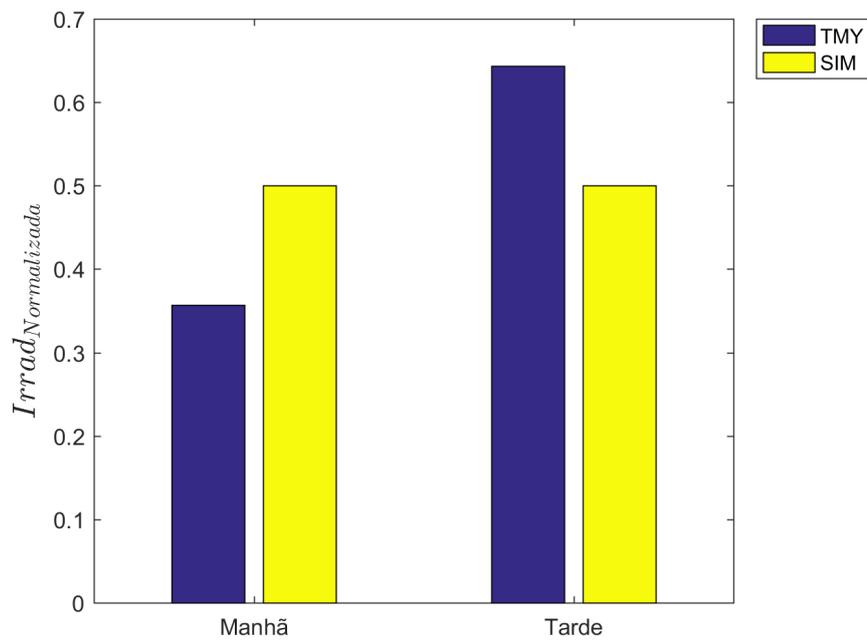


Figura 6.160: Variação do DHI normalizado ao longo do dia em Santa Maria-RS.