

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**RAUL HENRIQUE ERTHAL**

**ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA INCIDENTE EM MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO MODELOS DE IRRADIÂNCIA  
DIFUSA.**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA - PR**

**2021**

**RAUL HENRIQUE ERTHAL**

**ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA INCIDENTE EM MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO MODELOS DE IRRADIÂNCIA  
DIFUSA**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Jr.

**CURITIBA - PR**

**2021**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

RAUL HENRIQUE ERTHAL

### **ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO INCIDENTE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BASEADO EM MODELOS DE IRRADIÂNCIA DIFUSA**

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 29 de setembro de 2021, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues  
Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

---

Prof. Me. Romildo Alves dos Prazeres  
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jair Urbanetz Jr.  
Orientador - UTFPR

---

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo  
UTFPR

---

Me. Eng. Muriele Bester de Souza

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus. À minha família, que em todos os momentos me apoiaram para que conseguisse almejar mais esta formação profissional em um tema tão nobre atualmente. Ao prof. Dr. Jair Urbanetz Jr pela orientação, com sua larga experiência na área, sempre disposto a incentivar, sanar dúvidas, prestar esclarecimentos. Ao coordenador Dr. Marcelo Rodrigues e demais professores do Curso de Especialização em Energias Renováveis (CEER 2019) da UTFPR, pelos conhecimentos transmitidos durante a realização dos créditos. Aos componentes da banca examinadora, pela predisposição em participar da minha defesa, colaborando para a melhoria do trabalho. Ao LABENS (Laboratório de Energia Solar) e todo pessoal técnico envolvido, pela disponibilização dos dados necessários à realização do trabalho. E finalmente a todos os colegas de curso pela amizade, parceria e espírito colaborativo, apesar do afastamento físico provocado pela pandemia que vitimou milhares de pessoas.

*“Impossível? Não. Eu diria  
infinitamente improvável.”*

*Autor.*

## RESUMO

Na medida em que determinadas fontes primárias de energia se tornam escassas ou que representem perigo de degradação ambiental, novas tecnologias são agregadas às matrizes energéticas, dentre elas a solar fotovoltaica. A potência destes sistemas deve ser o suficiente para garantir requisitos técnicos e econômicos e atender à uma demanda de consumo de uma região. Dados de irradiância solar global, difusa e direta normais são registrados em estações solarimétricas e tornados públicos para serem utilizados nestes projetos. No entanto, nem sempre essas informações são disponibilizadas, por motivo dos altos custos dos equipamentos, e quando muito, somente a irradiância global é conhecida. Para contornar este problema, modelos são elaborados para estimar as componentes da irradiância global, que variam com o tempo, local e condições climáticas. Este trabalho avalia a irradiação incidente em módulos fotovoltaicos ao longo de fotoperíodos diários para fins de aferição de sistemas, aplicando o modelo DIRINT para avaliação da irradiância difusa. Um programa em linguagem *script* é elaborado e, a partir de dados de estação solarimétrica de referência, calcula os valores das componentes difusa e direta horizontal a partir dos valores medidos de irradiância global. Os resultados são gerados a partir de datas previamente escolhidas e confrontados qualitativamente com os dados solarimétricos da estação. Discrepâncias significativas foram observadas em todas os casos investigados, cujos valores de irradiância direta normal foram subestimados em relação aos valores medidos. Apesar das diferenças apresentadas, as oscilações devido a variações na cobertura de nuvens foram reproduzidas como esperado. Quando um modelo de irradiância difusa  $k_t \times k_d$  é utilizado, os resultados melhoram, apontando no sentido de aplicação do programa com dados de entrada que correspondam a modelos adaptados a localidades específicas. Por causa das discrepâncias observadas em relação ao modelo DIRINT, há indicação da necessidade de aplicação da mesma metodologia utilizando levantamento geoclimatológico aplicado às regiões de interesse.

**Palavras-chaves:** Irradiância. Sistemas fotovoltaicos. Modelos de transposição;

## ABSTRACT

As certain primary energy sources become scarce or represent a danger of environmental degradation, new technologies are added to energy matrices, including solar photovoltaics. The power of these systems must be enough to guarantee technical and economic requirements and meet a region's consumption demand. Normal global, diffuse and direct solar irradiance data are recorded in solarimetric stations and made public for use in these projects. However, this information is not always available, due to the high costs of the equipment, and at best, only the global irradiance is known. To get around this problem, models are designed to estimate the components of global irradiance, which vary with time, location and climatic conditions. This work evaluates the incident irradiation in photovoltaic modules along daily photoperiods for the purpose of calibrating systems, applying the DIRINT model by Perez (1992) to evaluate the diffuse irradiance. A script language program is created and, from solarimetric reference station data, calculates the values of the diffuse and direct horizontal components from the measured values of global irradiance. The results are generated from previously chosen dates and qualitatively compared with the solarimetric datas of the station. Significant discrepancies were observed in all investigated cases, whose normal direct irradiance values were underestimated in relation to the measured values. Despite the differences presented, the oscillations due to variations in cloud cover were reproduced as expected. When a  $k_t \times k_d$  diffuse irradiance model is used, the results improve, pointing towards the application of the program with input data that correspond to models adapted to specific localities. Because of the discrepancies observed in relation to the DIRINT model, there is an indication of the need to apply the same methodology using a geoclimatological survey applied to the regions of interest.

**Keywords:** Irradiance. photovoltaics systems. transpositions models.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Participação das energias renováveis no Brasil e no mundo em 2019. ....	18
Figura 2 – Participação das energias renováveis na matriz energética nacional. ....	18
Figura 3 – Classificação das “outras” energias renováveis na matriz energética. ....	18
Figura 4 - Geração elétrica (GWh) .....	19
Figura 5 - Matriz elétrica no Brasil e no mundo .....	19
Figura 6 – Parciais de contribuição das energias na matriz elétrica nacional. ....	20
Figura 7 - Caminho percorrido pela irradiação solar. ....	26
Figura 8 - Componentes da irradiância. ....	27
Figura 9 - Componentes da irradiância global. ....	28
Figura 10 - Irradiância incidente numa superfície inclinada. ....	29
Figura 11 - Ângulos de incidência do feixe direto normal sobre superfícies inclinadas. .....	30
Figura 12 - Valores de declinação solar ao longo do ano. ....	31
Figura 13 - Equação do tempo em função do dia durante o ano. ....	32
Figura 14 - Altura e azimute do Sol. ....	33
Figura 15 - Rede de estações padrão EPE da UTFPR. ....	35
Figura 16 - Pireliômetro. ....	36
Figura 17 – Piranômetro inclinado. ....	36
Figura 18 - Piranômetro horizontal. ....	36
Figura 19 – Partes componentes. ....	36
Figura 20 - Piranômetro com disco de sombreamento. ....	36
Figura 21 - Piranômetro com esferas de sombreamento e rastreador Solar. ....	36
Figura 22 - Estratégia de elaboração do programa. ....	37
Figura 23 – Fração difusa ( $k_d$ ) em função do índice de transmissibilidade ( $k_t$ ). ....	44
Figura 24 – Distribuição dos valores médios de ( $k_d$ ). ....	44
Figura 25 - Caminho da irradiância solar na atmosfera. ....	46
Figura 26 - Composição da irradiância incidente em superfície inclinada. ....	49
Figura 27 - Modelo isotrópico. ....	50
Figura 28 - Componentes da irradiância difusa no plano inclinado. ....	51
Figura 29 - Modelo isotrópico de Liu e Jordan. ....	52
Figura 30 - Modelo de Perez. ....	53

Figura 31 – Data 1 – Equinócio de outono no sul.....	57
Figura 32 – Data 3 – Equinócio de primavera no sul.....	57
Figura 33 – Data 2 Solstício de inverno no sul.....	57
Figura 34 – Data 4 Solstício de verão no sul.....	57
Figura 35 – Data 5 – Condição de céu encoberto.....	58
Figura 36 – Tela do SUNCALC.....	60
Figura 37 – Tela do SUNCALC.....	60
Figura 38 - Comparativo da altura do Sol entre SUNCALC e programa.....	61
Figura 39 - Valores de azimute e altura do Sol.....	63
Figura 40 - Inclinação dos raios solares.....	65
Figura 41 - Inclinação dos raios solares diários para painel horizontal.....	65
Figura 42 - Inclinação dos raios solares diário para painel com 10° de inclinação e azimute norte.....	65
Figura 43 - Inclinação dos raios solares diário para painel com 20° de inclinação e azimute norte.....	66
Figura 44 - Inclinação dos raios solares diário para painel com 30° de inclinação e azimute norte.....	66
Figura 45 - Inclinação dos raios solares diários para painel com 30° de inclinação e azimute 30°.....	67
Figura 46 - Inclinação dos raios solares diários para painel com 30° de inclinação e azimute 60°.....	67
Figura 47 - Inclinação dos raios solares diários para painel com 30° de inclinação e azimute 90°.....	67
Figura 48 - Fluxograma do programa principal.....	70
Figura 49 - Fluxograma do modelo DISC.....	71
Figura 50 - Fluxograma do modelo DIRINT.....	72
Figura 51 - Fluxograma do modelo de transposição.....	73
Figura 52 – Tela IDE do programa.....	74
Figura 53 - Tela de dados de engrada.....	74
Figura 54 - Tela de seleção de datas, albedo e modelo de irradiância.....	75
Figura 55 - Tela de seleção de dados de saída gráfica.....	75
Figura 56 - Tela de resultados gráficos.....	76
Figura 57- Irradiância direta normal Data 1.....	78
Figura 58 - Irradiância difusa Data 1.....	78

Figura 59 - Irradiância no plano inclinado Data 1.....	79
Figura 60 - Irradiância direta Data 1 normal (SOUZA, 2020) .....	80
Figura 61 - Irradiância difusa Data 1 (SOUZA, 2020).....	80
Figura 62 – Irradiância no plano inclinado - Data 1 (SOUZA, 2020). .....	80
Figura 63- Irradiância direta normal - Data 2.....	81
Figura 64 – Irradiância difusa - Data 2. ....	81
Figura 65 – Irradiância no plano inclinado - Data 2.....	81
Figura 66 - Irradiância direta normal - Data 3.....	82
Figura 67- Irradiância difusa - Data 3 .....	82
Figura 68- Irradiância no plano inclinado - Data 3.....	82
Figura 69– Irradiância direta normal - Data 4.....	83
Figura 70 – Irradiância difusa – Data 4. ....	83
Figura 71 - Irradiância no plano inclinado – Data 4 .....	84
Figura 72- Irradiância direta normal – Data 5.....	84
Figura 73- Irradiância difusa – Data 5 .....	84
Figura 74 - Irradiância no plano inclinado – Data 5.....	85
Figura 75 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 1.....	85
Figura 76 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 2.....	86
Figura 77 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 3.....	87
Figura 78 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 4.....	88
Figura 79 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 5.....	88

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Amplitude Modulada
BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DISC	<i>Direct Insolation Simulation Code</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
<i>ET</i>	Equação do Tempo
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nation</i>
HDKR	<i>Hay, Davies, Klucher e Reindl</i>
<i>HVL</i>	Hora Verdadeira Local
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico.
PVPS	<i>Photovoltaic Power Systems Programme</i>
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais.
STC	<i>Standart Test Conditions</i>
<i>SUN CALC</i>	<i>Sun Calculator</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a, b, c$	Constantes
$a_m$	Massa de ar;
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\cos$	Cosseno
$E$	Leste
$f$	Fator de brilho
$T_S$	Hora do Nascer do Sol;
$G$	Irradiância global
$G_o$	Irradiância extraterrestre;
$G_N$	Irradiância direta normal.
$G_{N_{DISC}}$	Irradiância direta normal do modelo DISC.
$G_{DIH}$	Irradiância direta horizontal
$G_{DIF}$	Irradiância difusa
$G_I$	Irradiância no plano inclinado
$G_{N_I}$	Irradiância direta no plano inclinado
$G_{R_I}$	Irradiância refletida do solo no plano inclinado
$G_{H_I}$	Irradiância refletida do horizonte no plano inclinado
$G_{DIF_I}$	Irradiância difusa no plano inclinado
$H_{leg}$	Hora legal
$k_n$	Índice de claridade de feixe direto
$k_{nc}$	Limite de céu limpo
$\delta k_n$	Variação de $k_n$ para condição de céu limpo
$k_t$	Índice de claridade total;
$k'_t$	Índice de claridade "primer".
$\delta k'_t$	Índice de estabilidade temporal
$K_d$	Fração difusa
$N$	Número de dias, Norte
$S$	Sul

$T_d$	Temperatura de ponto de orvalho
$t$	Tempo
$X$	Coeficiente DIRINT
$W$	Oeste, Índice de precipitação atmosférico
$w$	Ângulo horário local

## LISTA DE LETRAS GREGAS

$\alpha$	Albedo
$\beta$	Ângulo de inclinação da superfície inclinada;
$\delta$	Declinação solar;
$\gamma$	Azimute.
$\gamma_s$	Azimute do Sol
$\varepsilon$	Índice de claridade
$k$	Constante 1,041
$\Theta$	Ângulo de inclinação
$\theta_z$	Ângulo zenital;
$\Delta$	Fator de brilho
$\lambda$	Longitude
$\lambda_s$	Longitude do meridiano central
$\omega$	Ângulo horário do Sol;
$\varphi$	Latitude;

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DIRINT	Direct Normal Transmittance.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LABENS	Laboratório de Energia Solar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	TEMA .....	21
1.1.1	Delimitação do Tema.....	21
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS .....	22
1.3	OBJETIVOS .....	22
1.3.1	Objetivo Geral.....	22
1.3.2	Objetivos Específicos .....	23
1.4	JUSTIFICATIVA .....	23
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	24
1.7	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
1.7.1	Irradiância Solar .....	26
1.7.2	Incidência Solar Sobre uma Superfície Inclinada .....	29
1.7.3	Estações Solarimétricas .....	34
1.7.4	Instrumentos de Medição de Irradiância Solar. ....	35
1.7.5	Estratégia Para Elaboração do Programa .....	37
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>39</b>
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
2.2	MODELOS DE DECOMPOSIÇÃO DE IRRADIÂNCIA .....	43
2.2.1	Modelo de Decomposição de Erbs.....	43
2.2.2	Modelo de Decomposição DISC (MAXWELL, 1987).....	45
2.2.3	Modelo de Decomposição DIRINT .....	46
2.2.4	Irradiância no Plano Inclinado .....	48
2.2.5	Modelos de Transposição de Irradiância Difusa.....	50
2.2.5.1	Modelo isotrópico de Liu e Jordan (LIU, 1960).....	51
2.2.5.2	Modelo de Temps e Caulson.....	52
2.2.5.3	Modelo de Kucher .....	52
2.2.5.4	Modelo de Hay e McKay .....	52
2.2.5.5	Modelo de Perez Ineichen <i>et al.</i> (1990).....	53
2.3	DADOS E VERIFICAÇÕES PRELIMINARES .....	55
2.3.1	– Dados Solarimétricos .....	56

2.3.2	– Verificações Preliminares .....	59
2.3.2.1	– Cálculo do azimute e altura do Sol ao longo de um dia.....	59
2.3.2.2	– Verificação dos valores de irradiância medidos.....	68
2.3.3	– Descrição do Modelo.....	68
2.3.3.1	Determinação da irradiância direta normal - modelo DISC .....	70
2.3.3.2	Determinação da irradiância direta normal – modelo DIRINT .....	71
2.3.3.3	Determinação da irradiância em superfícies inclinadas.....	72
2.3.4	Informações Sobre O Programa E Interfaces de Entrada E Saída de Dados.	73
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>77</b>
3.1	COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE IRRADIÂNCIA MEDIDAS COM AS CALCULADAS. ....	77
3.1.1	Data 1–14/03/2020–Perto do Equinócio de Outono no Hemisfério Sul ..	77
3.1.2	Data 2–26/09/2020– Próximo ao Equinócio de Primavera no Hemisfério Sul	81
3.1.3	Data 4–30/12/2020–Próximo ao Solstício de Verão no Hemisfério Sul ..	83
3.1.4	Data 5–14/06/2020– Próximo ao Solstício de Inverno no Hemisfério Sul em Condição de Céu Nublado. ....	84
3.2	DECOMPOSIÇÃO DAS IRRADIÂNCIAS NO PLANO INCLINADO. ....	85
3.2.1	Data 1–14/03/2020– Próximo ao Equinócio de Outono no Hemisfério Sul.	85
3.2.2	Data 2–26/09/2020– Próximo ao Equinócio de Primavera no Hemisfério Sul.	86
3.2.3	Data 3–21/06/2020-Solstício de inverno no Hemisfério Sul. ....	86
3.2.4	Data 4–30/12/2020– Próximo ao Solstício de Verão no Hemisfério Sul.	87
3.2.5	Data 5–14/06/2020– Próximo ao Solstício de Inverno no Hemisfério Sul em Condição de Céu Nublado. ....	88
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>92</b>

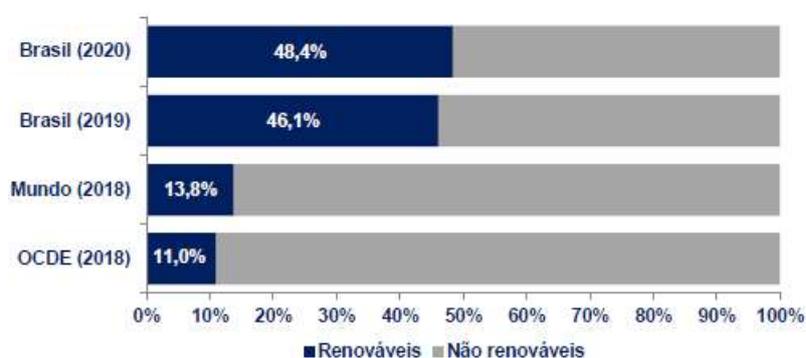
## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma sociedade sempre esteve ligado à exploração dos recursos naturais como forma de subsistência e, desde os tempos mais remotos, a curiosidade humana, aliada ao método experimental, inconsciente ou não, foram construindo o conhecimento tecnológico. A história mostra que a aplicação de recursos tecnológicos nas transformações de energia vem aumentando de forma inversa ao consumo de fontes primárias por conta da expectativa de exaurimento das reservas assim como pelos impactos ambientais por ela causados. Este processo contribuiu, não só para a sobrevivência da espécie, quanto para a melhoria da qualidade de vida. Desde as descobertas mais primitivas até a transformação do minério de ferro, o petróleo, a eletricidade, as máquinas térmicas, dentre muitos outros achados e inventos, promoveram um intenso desenvolvimento social, embora atrelados à disponibilidade dos recursos naturais, considerados como infindáveis. Com o aumento da densidade demográfica, a demanda por energia, principalmente originária de combustíveis fósseis, aumentou a ponto de ameaçar o equilíbrio ambiental em decorrência das agressões decorrentes do seu uso. Por questões diversas, como segurança, consciência ecológica, mas de imediato econômicas, anteendo um futuro previsível de colapso nas reservas, a sociedade naturalmente se mobiliza no intuito de otimizar os processos de transformação de energia, e, em paralelo, desenvolver outras que minimizem as emissões e maximizando fontes renováveis. Contrariamente às fontes primárias, como o petróleo, a maioria das renováveis são normalmente intermitentes, dentre as quais a solar e a eólica. Por serem fontes intermitentes, é desejável que parte do seu excedente seja direcionado à acumuladores como baterias, reservatórios térmicos e de ar comprimido, massas rotativas, etc., garantindo a estabilidade e confiabilidade dos sistemas (HE e WANG, 2018). Além destes desafios, e, no caso mais específico de tecnologias de captação de energia solar o sucesso dos projetos depende também da avaliação precisa da irradiância incidente. Esta, por sua vez, é função da posição relativa do Sol em relação à Terra, da localização geográfica, de condições climáticas, do tipo, orientação e posição do artefato de captação de energia.

Como normalmente nos lançamentos de novas tecnologias, o custo na maioria das vezes não é muito atraente, mas, na medida em que as políticas

energéticas vão evoluindo, incentivos fiscais são propostos no sentido de viabilizar a sua utilização. Segundo o BEN (Balanço Energético Nacional), divulgado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em 2021, a matriz energética do Brasil é caracterizada por fontes renováveis, como ilustra o gráfico de barras da Figura 1, com 48,4% do total, sendo que, no mundo, elas correspondem a apenas 13,8% (EPE, 2021).

**Figura 1 - Participação das energias renováveis no Brasil e no mundo em 2019.**



Fonte: (EPE, 2021)

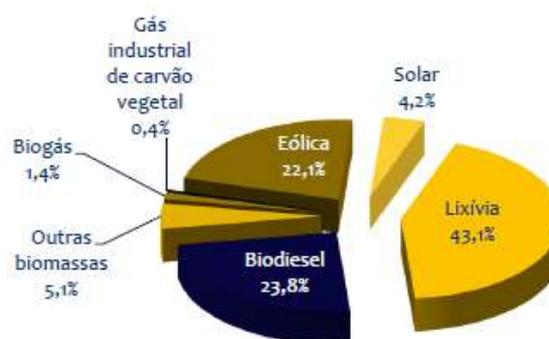
Como ilustrado na Figura 2, dos 48,4%, 7,7% correspondem à participação as ditas “outras energias”, dentre as quais se incluem a solar e a eólica, e deste montante, de acordo com a Figura 3, a solar abrange 4,2% (EPE, 2021).

**Figura 2 – Participação das energias renováveis na matriz energética nacional.**



Fonte: (EPE, 2021)

**Figura 3 – Classificação das “outras” energias renováveis na matriz energética.**



Fonte: (EPE, 2021)

Embora a energia solar ainda tenha participação tímida no arcabouço energético, foi a que mais cresceu em termos de geração elétrica no comparativo com 2019, elevando o valor anterior em 61,5%, como ilustrado na tabela da Figura 4.

**Figura 4 - Geração elétrica (GWh)**

Fonte	2019	2020	Δ 20/19
Hidrelétrica	397.877	396.327	-0,4%
Gás Natural	60.448	53.464	-11,6%
Eólica	55.986	57.051	1,9%
Biomassa <sup>2</sup>	52.543	56.167	6,9%
Nuclear	16.129	14.053	-12,9%
Carvão Vapor	15.327	11.946	-22,1%
Derivados do Petróleo <sup>3</sup>	6.926	7.745	11,8%
Solar Fotovoltaica	6.655	10.750	61,5%
Outras <sup>4</sup>	14.438	13.696	-5,1%
<b>Geração Total</b>	<b>626.328</b>	<b>621.198</b>	<b>-0,8%</b>

Fonte: (EPE, 2021)

Se olharmos para a matriz elétrica, 84,8% da energia gerada no Brasil em 2020 foi de fonte renovável contra 83,0% em 2019, 23% no mundo e 27% levantados pela OCDE como ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (EPE, 2021).

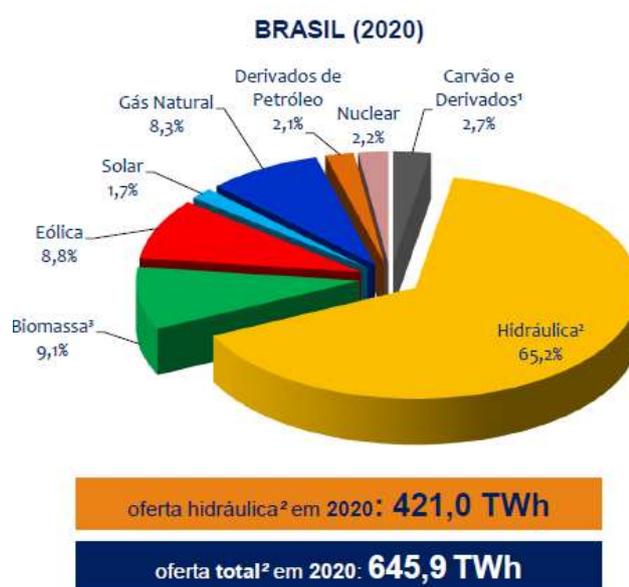
**Figura 5 - Matriz elétrica no Brasil e no mundo**



Fonte: (EPE, 2021)

Do montante nacional, a solar participou com 1,7% da energia gerada em 2020 no Brasil com ilustrado na Figura 6 (EPE, 2021).

Figura 6 – Parciais de contribuição das energias na matriz elétrica nacional.



Fonte: (EPE, 2021)

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), quando entrou em vigor a Resolução 482 de 17 de abril de 2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica partir de fontes renováveis, ou cogeração qualificada, dentro do limite de 75 kW, permitindo o fornecimento do excedente à rede de distribuição de sua localidade. Já as minigeradoras são autorizadas a produzir entre 75 kW e 3 MW para as fontes hídricas e entre 75 kW e 5 MW para as demais fontes. Segundo a (ABSOLAR, 2020) o Brasil passou de 26º lugar em 2017 para o 16º lugar no ranking dos países em termos de capacidade instalada de energia solar. Embora o vasto território brasileiro tenha uma das maiores incidências de irradiação solar do mundo, o país ainda tem um longo caminho a percorrer para se tornar líder na utilização desta tecnologia.

Como descrito, há razões para investimentos no sentido do melhor aproveitamento do potencial solar, trazendo por consequência, benefícios ao sistema interligado nacional. Questões técnicas são levadas em conta na melhoria do desempenho de plantas e otimização de projetos, através não só da aplicação de

equipamentos de boa qualidade tecnológica, mas também da avaliação precisa da irradiância incidente nos dispositivos de captação de energia solar de uma forma geral. A estimativa das irradiâncias futuras, no entanto, depende do histórico de medidas feitas ao longo de um determinado período e cobrindo a maior área do território de interesse possível. Por conta da quantidade e da complexidade dos equipamentos utilizados, a implantação de uma rede coletora de dados com estes requisitos torna-se inviável economicamente. No entanto, modelos semiempíricos podem cobrir uma parte deste desafio, produzindo estimativas de valores de irradiâncias baseadas no comportamento geoclimático de uma região.

## 1.1 TEMA

De acordo com (GÓMEZ, VIEIRA e DA SILVA, 2018), a obtenção de valores confiáveis de irradiância solar são importantes nos modelos climáticos e atmosféricos. Os modelos matemáticos têm a função de tentar reproduzir um determinado fenômeno ou processo baseado em requisitos pré-definidos e considerações mínimas que o tornem o mais simples e representativo possível. Após processo de validação, o modelo pode ser aplicado posteriormente em casos similares.

Este trabalho tem por tema elaborar um programa de estimativa da irradiância incidente em módulos fotovoltaicos baseado em modelos de irradiância difusa.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Elaborar um programa computacional em linguagem script que permita avaliar a irradiância incidente em módulos fotovoltaicos a partir do conhecimento do valor da irradiância global horizontal de determinada localização geográfica e do conhecimento dos valores de irradiâncias estimados através de modelos de irradiância solar difusas disponíveis na literatura. Dados solarimétricos gerados por estação homologada serão tomados como referência para validação dos resultados.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

De acordo com diversos trabalhos da literatura, o grande desafio dos projetos de sistemas de captação e energia solar reside na avaliação da irradiância incidente nos módulos fotovoltaicos de forma a suprir à demanda prevista pela instalação com o menor custo possível. Por isso, grandes investimentos são feitos na elaboração de mapas solares, a partir de dados extraídos de estações solarimétricas, compostas de equipamentos cada vez mais sofisticados e dispendiosos. Como dito na introdução, a irradiância depende de diversos fatores, o que a torna altamente não determinística e estocástica (Tao et al. 2010, apud (FREITAS, 2020)). No entanto, dados armazenados durante um longo período podem reduzir as incertezas, principalmente as relacionadas com a cobertura de nuvens, índices pluviométricos, campos de velocidade do vento e temperatura ambiente. Por conta disso, faz-se necessário cada vez mais, ampliar a rede de estações solarimétricas com equipamentos suficientes e adequados para registro dos dados de interesse, o que evidentemente exige investimentos significativos. Modelos matemáticos, no entanto, vêm sendo utilizados para preencher a lacuna da falta de instrumentação adequada.

Como citado em Da Silva (2019), os valores de irradiação encontram-se disponíveis nas bases de dados, em médias diárias ou mensais, muito úteis para aplicação em projetos de sistemas fotovoltaicos. Porém, em aplicações voltadas às atividades de aferição de instalações, como descrito em (GOUVEIA, MORO, *et al.*, 2016), é necessário ter conhecimento dos dados de irradiância em períodos de tempo reduzidos.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Elaborar um programa para estimar a irradiância incidente em superfícies inclinadas para fins de aferição, usando modelos de irradiância existentes na literatura, assim como promover validação experimental dos resultados de acordo com dados coletados pelo sistema de monitoramento de uma Instalação solarimétrica

localizada na sede Neville do Campus Curitiba da UTFPR. Os modelos serão aplicados ao longo de um fotoperíodo, minuto a minuto, para datas previamente escolhidas em função da época do ano e da cobertura de nuvens.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Fazer um levantamento do fundamento teórico necessário a respeito do assunto;

Levantar os modelos matemáticos existentes na literatura para avaliação das formas de irradiâncias incidentes em superfícies horizontais e inclinadas para diferentes orientações geográficas assim como conhecer os principais instrumentos de medição de dados solarimétricos;

Implementar modelos solarimétricos;

Escolher as datas e levantar dados experimentais de irradiância disponibilizados pelo sistema de monitoramento;

Obter os valores de irradiância estimados pelo modelo;

Comparar os resultados do modelo de irradiância com os dados medidos.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A partir da avaliação dos resultados produzidos por modelos de estimativa da irradiância incidente em superfícies inclinadas, e do conhecimento dos valores de irradiância global horizontal do local, disponibilizados publicamente, pode-se auferir determinado grau de confiabilidade destes dados quando aplicados em projetos de sistemas fotovoltaicos. Além disso, valores estimados de irradiâncias confiáveis são economicamente mais viáveis do que as medidas por instrumentos que requerem investimentos de instalação, operação e manutenção.

A linguagem python versão 3.8.3 foi escolhida para a elaboração do programa por sua simplicidade, agilidade, portabilidade e acessibilidade.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento deste trabalho compreende as seguintes etapas:

Fundamentação teórica sobre irradiação solar, classificação, características das estações solarimétricas e respectivos instrumentos de medidas de irradiância e sequência de construção do código do programa. Dentro desta mesma etapa, uma revisão bibliográfica é conduzida sobre trabalhos de modelos de estimativas de irradiância difusa e de avaliação de irradiância sobre superfícies inclinadas;

Elaboração de programa em linguagem *script* para cálculo de irradiância incidente sobre superfícies inclinadas tomando como referência valores de irradiância global obtidos de estação solarimétrica e modelos de irradiância difusa disponíveis na literatura;

Realização de validação dos resultados do programa através dos valores de irradiância disponibilizados pelo banco de dados da estação solarimétrica, apresentação e discussão dos resultados, conclusão e trabalhos futuros.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão é composto dos seguintes capítulos:

### 1 – Introdução

Apresentação de uma breve motivação e contextualização do trabalho, além da descrição geral do tema, justificativa, problemas e premissas, os objetivos a serem atingidos, assim como a metodologia a ser seguida. Uma fundamentação teórica é conduzida pela sua importância estrutural, informando sobre os conceitos básicos de irradiância solar, coordenadas celestes, estações solarimétricas, principais instrumentos de medição de irradiância. Uma revisão da literatura é feita no sentido de se definir os modelos de irradiância difusa e de transposição para o plano inclinado e respectivos graus de complexidade e aplicabilidade a serem utilizados na elaboração do programa;

### 2 – Desenvolvimento

Capítulo onde são fornecidas informações gerais sobre a estação fotovoltaica tomada como referência, o planejamento para disponibilização dos dados solarimétricos em função de datas criteriosamente escolhidas e a análise dos dados

disponibilizados. Na sequência são feitas algumas verificações preliminares a respeito do cálculo das coordenadas solares ao longo das datas de referência e avaliação dos horários matutinos e vespertinos dos crepúsculos do Sol. Em seguida é feita uma descrição do programa, assim como da sequência de execução por meio de fluxogramas lógicos.

### 3 - Resultados e discussões;

Neste capítulo são apresentados os valores calculados das irradiâncias no plano horizontal e inclinado na forma gráfica e comparados com os valores medidos para cada uma das datas previstas ao longo das datas escolhidos minuto a minuto e discussões são feitas simultaneamente à cada apresentação.

### 4 – Conclusão.

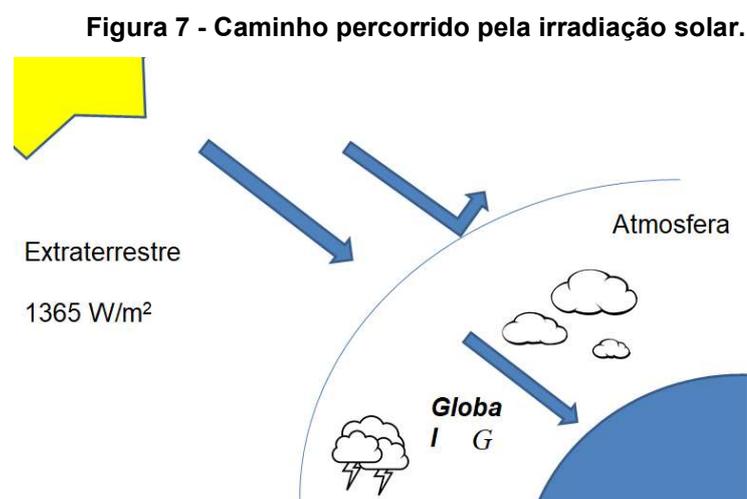
Como capítulo final, é feito um resumo sobre o que foi desenvolvido no trabalho, assim como comentários gerais a respeito de cada etapa superada e as respectivas conclusões. São apresentadas também algumas sugestões de atividades possíveis de serem realizadas no sentido de dar continuidade ou complementar algumas passagens que porventura precisem ser melhor investigadas.

## 1.7 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por finalidade agregar o conhecimento necessário para a avaliação da irradiância incidente em uma superfície plana inclinada. Inicialmente são descritos os tipos e os instrumentos utilizados para medição de irradiâncias. Segue-se a descrição da geometria e das coordenadas solares envolvidas na avaliação da irradiância sobre uma superfície inclinada. Por fim, uma revisão bibliográfica é conduzida com a finalidade de encontrar modelos de irradiância na literatura que possam ser aplicados no presente trabalho. Na sequência, os modelos de interesse são apresentados detalhadamente.

### 1.7.1 Irradiância Solar

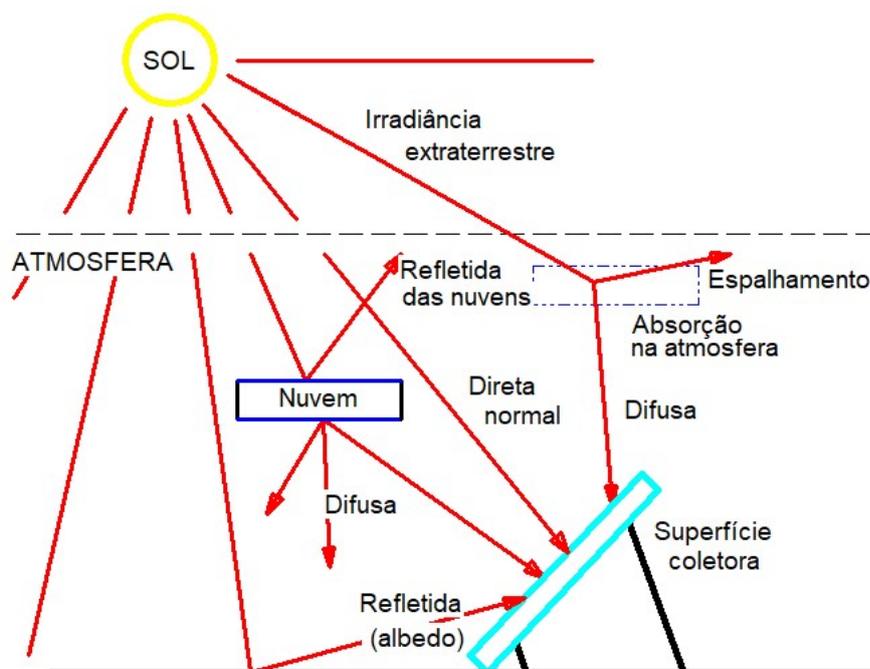
A irradiância solar, antes de chegar ao solo, atinge primeiramente a atmosfera terrestre, cuja composição varia no tempo e no espaço, afetando, por consequência, a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Conforme (GÓMEZ, VIEIRA e DA SILVA, 2018) o valor máximo de taxa de radiação incidente no topo da atmosfera, denominada por “irradiância extraterrestre” corresponde a  $1367,8 \text{ W/m}^2$ . Dependendo da cobertura e composição da atmosfera, parte dessa irradiação é absorvida pelas partículas suspensas no ar, como ilustrado na Figura 7.



Fonte: Autor

Parte da irradiância é desviada do caminho, chamada de “irradiação difusa” e o restante segue na direção original, chamada de “irradiação direta”. Após ultrapassar a camada de partículas da atmosfera a irradiação incide sobre a superfície da Terra onde sofre reflexões sucessivas, denominadas de “albedo” como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Componentes da irradiância.



Fonte: Adaptado de (DA SILVA, 2019)

Independente das atividades relacionadas com energia solar, é fundamental tomar conhecimento da terminologia empregada na área em conformidade com a norma (ABNT 10899, 2020), como descrito a seguir:

- ✓ A irradiância solar é dada em  $[W/m^2]$  e corresponde à potência incidente por unidade de área em uma determinada superfície. A “irradiação solar” corresponde à irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente um dia e por isso, dada em  $[Wh/m^2]$ ;
- ✓ A irradiância extraterrestre ( $G_0$ ) corresponde à potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal imaginária no topo da atmosfera, também conhecida como irradiância no topo da atmosfera ou constante solar  $G_0 \approx 1387,8 Wm^2$ .

- ✓ A Irradiância global ( $G$ ) é a potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal, obtido através de instrumentos denominados piranômetros;
- ✓ A irradiância direta normal ( $G_N$ ) é a potência incidente por unidade de área em uma superfície perpendicular ao feixe com visada direta ao Sol.;
- ✓ A irradiância direta ( $G_{DIH}$ ) horizontal corresponde à potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal decorrente do feixe solar, que pode ser calculada pela equação (1)

$$G_{DIH} = G_N \cos(\theta_z) \quad (1)$$

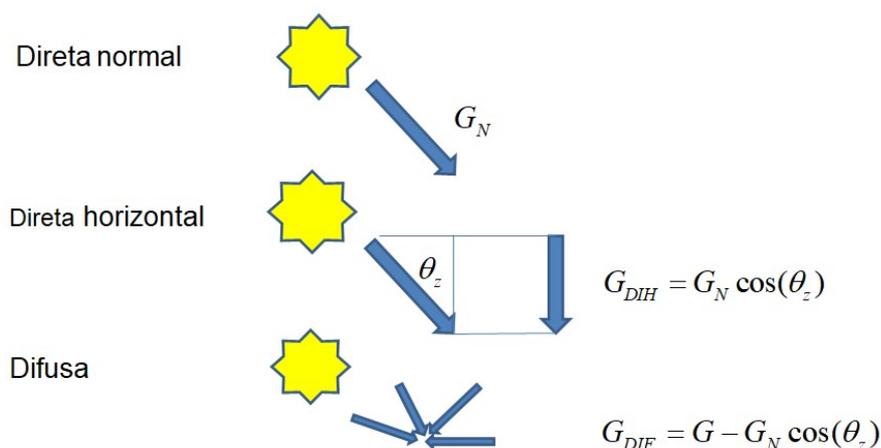
onde  $\theta_z$  é o ângulo ou distância zenital do Sol. A irradiação direta ( $H_{DH}$ ) é a irradiância direta integrada durante um intervalo de tempo específico, normalmente um dia;

- ✓ A irradiância difusa ( $G_{DIF}$ ) corresponde à potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal decorrente do espalhamento do feixe solar extraterrestre pelos constituintes atmosféricos. O valor da irradiância difusa pode ser encontrada pela equação (2)

$$G_{DIF} = G - G_N \cos(\theta_z) \quad (2)$$

A Figura 9 ilustra o que foi descrito acima.

**Figura 9 - Componentes da irradiância global.**



**Fonte: Autor.**

- ✓ A irradiância no plano inclinado ( $G_I$ ) é o valor da potência incidente sobre uma superfície inclinada por unidade de área.

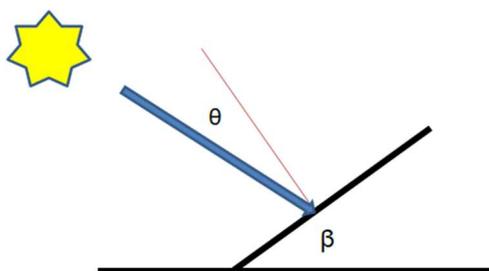
Embora não estejam contempladas me norma específica, as nomenclaturas das componentes das irradiâncias no plano inclinado são definidas pelo autor, considerando a mesma raiz das nomenclaturas adotadas na normativa, acrescida de um subscrito “I”:

- ✓ Irradiância direta normal no plano inclinado ( $G_{N\_I}$ ) é o valor da potência incidente na direção normal à superfície inclinada por unidade de área;
- ✓ Irradiância difusa no plano inclinado ( $G_{DIF\_I}$ ) é o valor da potência incidente sobre uma superfície inclinada decorrente do espalhamento do feixe solar extraterrestre pelos constituintes atmosféricos;
- ✓ Irradiância refletida do solo no plano inclinado ( $G_{R\_I}$ ) é o valor da potência incidente por unidade de área decorrente da reflexão dos raios solares sobre o solo vizinho, dependente do valor do albedo;
- ✓ Irradiância difusa de horizonte no plano inclinado ( $G_{H\_I}$ ) é o valor da potência incidente sobre uma superfície inclinada por unidade de área, decorrente da irradiância difusa de horizonte, considerada nos modelos de anisotropia.

### 1.7.2 Incidência Solar Sobre uma Superfície Inclinada

Na avaliação da irradiância incidente ao longo do dia sobre uma superfície plana e inclinada, como ilustrado esquematicamente na Figura 10, é preciso ter conhecimento da posição geográfica (latitude e longitude), orientação e inclinação, assim como da posição do Sol no instante de tempo correspondente.

Figura 10 - Irradiância incidente numa superfície inclinada.



Fonte: Autor

Para uma superfície plana qualquer, define-se o ângulo de incidência solar ( $\theta$ ) como ângulo entre os raios solares e o eixo normal à superfície considerada, que, de acordo com (DUFFIE e BECKMAN, 2013), é definido pela equação (3)

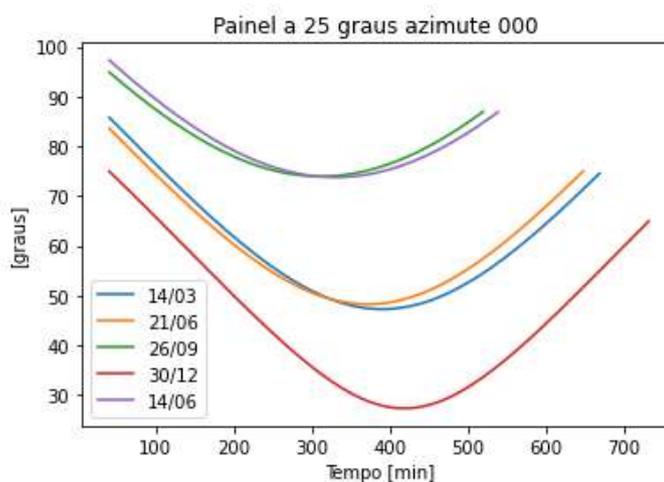
$$\cos \theta = \text{sen}(\varphi)\text{sen}(\delta)\cos(\beta) - \cos(\varphi)\text{sen}(\delta)\cos(\gamma)\text{sen}(\beta) + \cos(\varphi)\cos\delta\cos(w)\cos(\beta) + \text{sen}(\varphi)\cos(\delta)\cos(w)\text{sen}(\beta)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\text{sen}(w)\text{sen}\beta\text{sen}(\gamma) \quad (3)$$

em que  $\beta$  é a inclinação do painel em relação à horizontal,  $\varphi$  a latitude,  $\gamma$  é o azimute da superfície considerada e  $w$  o ângulo horário local. No caso de uma superfície horizontal, o ângulo de incidência solar é equivalente ao ângulo no zênite, cujo valor pode ser calculado pela equação (4) manipulando a equação (3) fazendo ( $\beta=0$ )

$$\cos \theta_z = \text{sen}(\varphi)\text{sen}(\delta) + \cos(\varphi)\cos\delta\cos(w) + \cos(\delta)\text{sen}(w)\text{sen}(\gamma) \quad (4)$$

A Figura 11 ilustra os valores dos ângulos de incidência da irradiância direta normal, calculados através da equação (3) sobre superfície inclinada em estudo para datas escolhidas para o desenvolvimento deste trabalho.

**Figura 11 - Ângulos de incidência do feixe direto normal sobre superfícies inclinadas.**



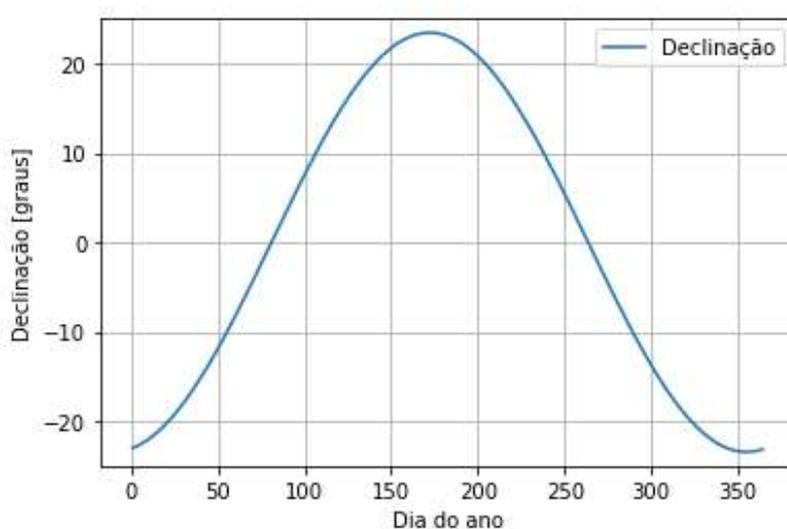
Fonte: Autor.

A declinação solar, decorre do movimento aparente do Sol em função da trajetória da Terra em torno do Sol, é dada pela equação (5)

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right], \quad (5)$$

sendo  $N$  o número de dias. Seu comportamento ao longo do ano encontra-se ilustrado na Figura 12, após implementação das equações no modelo proposto. Valores positivos indicam a ocorrência da primavera e verão no hemisfério norte assim como outono e inverno no Sul e assume valores entre  $-23,45^\circ$  e  $23,45^\circ$ , correspondentes aos solstícios.

**Figura 12 - Valores de declinação solar ao longo do ano.**



**Fonte: Autor.**

O ângulo horário do local  $w$ , definido pelo ângulo entre o meridiano superior do observador e o meridiano solar é dado pela equação (6)

$$w = (HVL - 12)15, \quad (6)$$

considerando que cada hora equivale à  $15^\circ$  de longitude.  $HVL$  é a hora verdadeira local calculada pela equação (7)

$$HVL = Hleg + ET \pm 4(\lambda_s - \lambda) - DS \quad (7)$$

sendo  $H_{leg}$  a hora legal do observador,  $ET$  a equação do tempo,  $\lambda_s$  a longitude do meridiano central do fuso horário e  $\lambda$  a longitude do observador. A diferença entre elas é adicionada ou subtraída caso o observador esteja à leste ou à oeste respectivamente do meridiano oficial.  $DS$  é a parcela correspondente ao horário de verão, que será computada dependendo do caso.

A equação do tempo  $ET$ , diferença entre a posição do Sol verdadeiro e o médio, é definida pela equação (8)

$$ET = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos(B) - 0,032077 \sin(B) - 0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \sin(2B)) \quad (8)$$

sendo  $B$  dado pela equação (9)

$$B = (N - 1) \frac{360}{364} \quad (9)$$

Os valores da equação do tempo  $ET$  ao longo do ano encontram-se ilustrados na Figura 13 após implementação das equações no modelo proposto.

**Figura 13 - Equação do tempo em função do dia durante o ano.**



**Fonte: Autor.**

O azimute do Sol  $\gamma_s$  é dado pela equação (10)

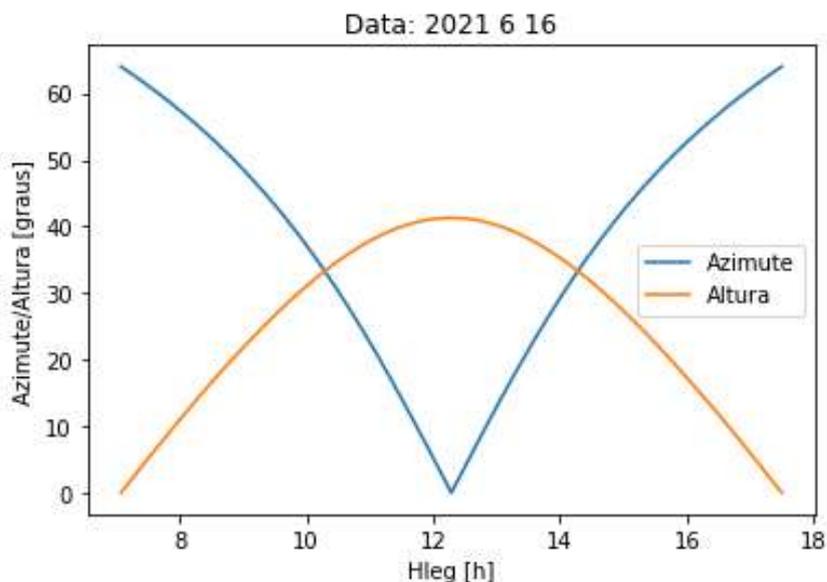
$$\gamma_s = \pm \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \operatorname{sen} \varphi - \operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen} \theta_z \cos \varphi} \right) \right|, \quad (10),$$

sendo a distância zenital ou ângulo no zênit definida pela equação (11)

$$\theta_z = \cos^{-1} (\cos \varphi \cos \delta \cos w + \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta), \quad (11)$$

e a altura do Sol o seu valor complementar. A Figura 14 ilustra valores de azimute e altura do Sol para um determinado dia do ano, no caso 16 de junho de 2021. Para um observador no hemisfério sul e voltado para o norte, vê o Sol nascer à leste e, à medida que as horas passam, vê o valor do azimute reduzir e a sua altura aumentar. No momento da passagem meridiana, o valor do azimute se inverte para oeste e a altura, que neste momento é máxima para a latitude, cai até atingir valor nulo no crepúsculo vespertino.

**Figura 14 - Altura e azimute do Sol.**



**Fonte: Autor.**

Os instantes do nascer e pôr do Sol são definidos em função dos valores dos ângulos horários referentes à passagem meridiana ou ao meio-dia verdadeiro. Assim como as relações citadas acima, de acordo com (DUFFIE e BECKMAN, 2013) este ângulo horário é definido pela equação (12)

$$w_s = \cos^{-1} \left( -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \right) = \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) \quad (12)$$

e a duração do dia pela equação (13)

$$\Delta t = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta), \quad (13)$$

visto que a variação angular entre o nascer e o pôr do Sol corresponde ao dobro do ângulo horário de cada período e que cada hora do dia corresponde à 15° de longitude.

### 1.7.3 Estações Solarimétricas

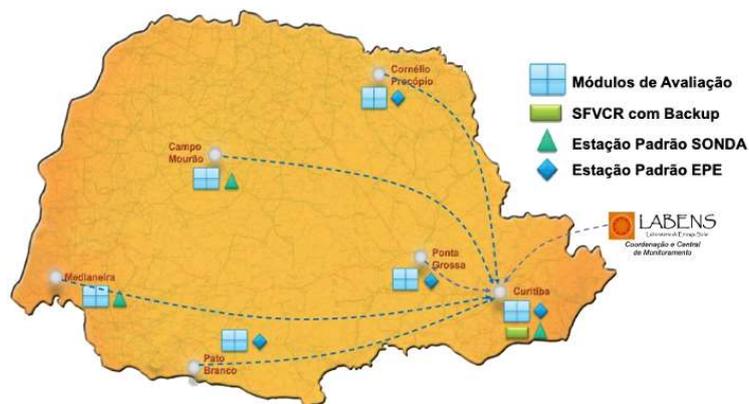
As estações solarimétricas são utilizadas para elaboração de banco de dados relacionados à irradiação solar para serem aplicados em diversas áreas, como na pesquisa fundamental, meteorologia, agronomia (influência da radiação solar nas taxas de evaporação e no crescimento das plantas, dentre outros) e na engenharia, na previsão e no estudo de viabilidade de instalação de estações de captação de energia solar na produção distribuída e centralizada de energia elétrica.

Existem basicamente dois modelos de estações solarimétricas: a SONDA e a EPE. As estações SONDA foram implantadas a partir de 2004 com o objetivo de elaborar uma base de dados para dar suporte à setores da sociedade envolvidos com pesquisa, planejamento e desenvolvimento relacionadas às fontes renováveis.

A EPE (Empresa de Pesquisa Energética) é uma estatal que foi criada com objetivo de dar suporte ao Ministério das Minas e Energia nas questões relacionadas com o planejamento energético. O padrão EPE para estações solarimétricas foi adotado para homogeneizar os procedimentos de habilitação de empresas participantes nos leilões de energia. A Figura 15 ilustra as localizações das estações padrão EPE da UTFPR, no estado do Paraná.

**Figura 15 - Rede de estações padrão EPE da UTFPR.**

*Rede de Estações de Pesquisa em Energia Solar - EPESOL da UTFPR*



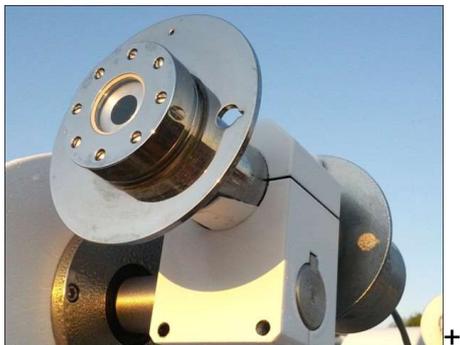
Fonte: <https://labens.ct.utfpr.edu.br/>

Por conta de custos de instalação e manutenção, da imensidão do território brasileiro, nem todas as regiões possuem estações solarimétricas em número esperado e, mesmo assim, nem todas as existentes possuem todos os radiômetros necessários para uma coleta de dados completa

#### 1.7.4 Instrumentos de Medição de Irradiância Solar.

Os equipamentos de uma estação solarimétrica são denominados de radiômetros, dentre os quais pode-se citar o pireliômetro ilustrado na Figura 16 para medição da irradiância direta, o piranômetro, podendo ser instalado tanto na posição inclinada (Figura 17) para medição das irradiâncias global sobre uma superfície com inclinação conhecida quanto na horizontal (Figura 18). A Figura 19 ilustra as partes componentes destes tipos de radiômetros. Além destes, ainda o piranômetro com disco de sombreamento (Figura 20) para medição da irradiância horizontal difusa e piranômetro com disco de sombreamento e rastreador solar (Figura 21).

**Figura 16 - Pireliômetro.**



Fonte: (Geo design internacional, 2021)

**Figura 17 – Piranômetro inclinado.**



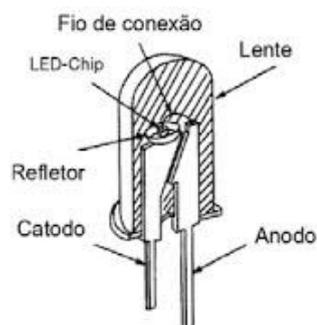
Fonte: (SILVEIRA, YANG, *et al.*, 2017)

**Figura 18 - Piranômetro horizontal.**



Fonte: <https://lh3.googleusercontent.com>

**Figura 19 – Partes componentes.**



Fonte: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com>

**Figura 20 - Piranômetro com disco de sombreamento.**



Fonte: <https://www.romiotto.com.br>

**Figura 21 - Piranômetro com esferas de sombreamento e rastreador Solar.**

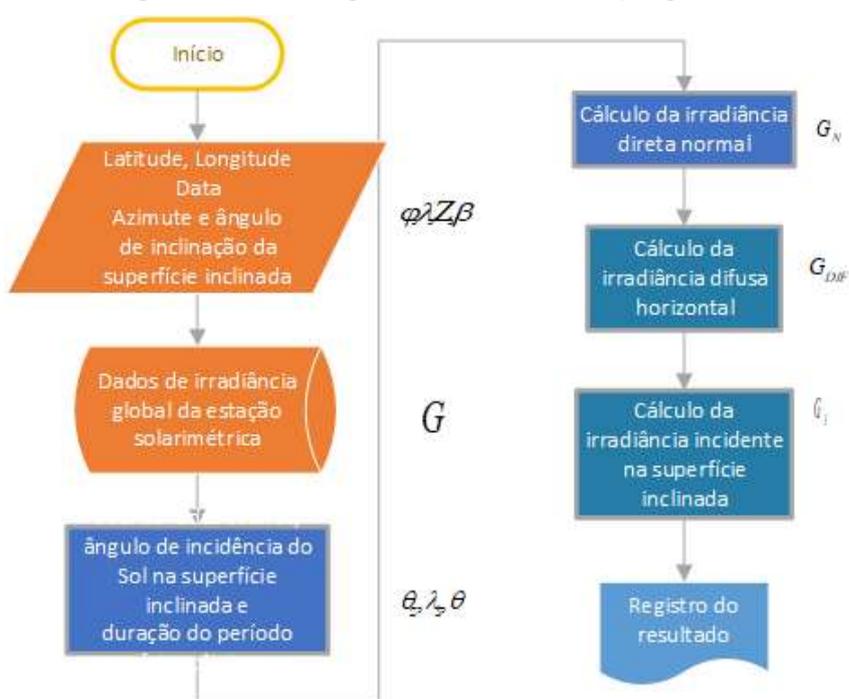


Fonte: <https://media-exp1.licdn.com>

### 1.7.5 Estratégia Para Elaboração do Programa

De acordo com o objetivo do presente trabalho, definido no item 1.3.1, e baseado no que foi descrito nos trechos intermediários, é possível aqui definir uma estratégia para elaboração do programa de simulação da avaliação da irradiância incidente em superfícies inclinadas, resumida pelo fluxograma da Figura 22.

Figura 22 - Estratégia de elaboração do programa.



Fonte: Autor.

Como o programa é para fins de aferição, o intervalo de tempo escolhido para o período fotovoltaico será o diário e, por questão de opção, a frequência de cálculo das irradiâncias será minuto a minuto. Como ilustrado no fluxograma, dados da posição geográfica da estação solarimétrica e da superfície inclinada, assim como seu azimute e inclinação, devem ser conhecidos. Na sequência, serão inseridos os dados de irradiância global e, com a avaliação das coordenadas celestes do Sol para cada instante de tempo. Em seguida calcula-se as irradiâncias direta normal e difusa através de modelo de irradiância da literatura e por balanço de irradiância, conforme a equação (2). Com as irradiâncias calculadas, o próximo passo é a determinação da irradiância no plano inclinado, através de modelo de transposição da literatura, assim como as irradiâncias difusa e/ou direta.

Uma pesquisa bibliográfica a ser conduzida no próximo item, permite a escolha dos modelos de irradiância difusa a serem aplicados no programa.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura contém diversos trabalhos desde os mais conceituais como o de Gómez, Vieira e Da Silva (2018), segundo o qual a irradiância solar ou extraterrestre pode ser avaliada em função da teoria dos corpos negros, que são os que emitem a maior quantidade de irradiação possível, até aqueles de suporte às aplicações tecnológicas mais imediatas. A obtenção de valores da irradiância solar com alta precisão são importantes nos modelos climáticos e atmosféricos, já que a química da atmosfera e da estratosfera também são influenciadas. De acordo com Souza, Escobedo *et al* (2011), existem dois tipos de modelo empregados nas estimativas da radiação Solar: *estatísticos ou de decomposição* e *paramétricos (determinísticos)*. O procedimento mais comum citado na literatura é a estimativa das componentes direta e difusa, a partir de valores medidos ou estimados da radiação global horizontal (LIU, 1960). Os modelos *paramétricos* dependem de informações detalhadas das condições atmosféricas locais e os modelos *estatísticos* são representados por equações matemáticas ajustadas como o trabalho de Beruski, Pereira e Sentelhas (2015). Alguns trabalhos tentam associar o valor da radiação solar como função da temperatura e da taxa pluviométrica, como o de Da Silva et al. (2012) através de equação obtidas por regressão linear cujas constantes estão atreladas à fenômenos locais. O conhecimento do valor da irradiação solar influencia diretamente na qualidade dos projetos de sistemas fotovoltaicos e como a irradiação incidente varia espacial e temporalmente é fundamental o acesso à base de dados de estações de medição de irradiância. Gouveia, Vieira e Da Silva (2016) realizaram trabalho de estudo de caso aplicado a sistema fotovoltaico conectado à rede comparando a energia elétrica gerada a partir de três bases de dados: INMET (2012 – 2015), Atlas Brasileiro de Energia solar (1995 – 2005) e projeto SWERA, este último tomando a correção do ângulo de inclinação através de software específico. Na mesma direção, considerando também a *influência da temperatura* dos módulos fotovoltaicos, Yang, Souza *et al.* (2020) levantaram as taxas de desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Para avaliar a irradiação total incidente no plano inclinado, foi aplicado o método HDKR, em homenagem aos pesquisadores Hay, Davies, Klucher

e Reindl, considerando as radiações direta, difusa isentrópica, difusa circunsolar, difusa do horizonte e refletida pelo solo, esta última desenvolvida por Duffie e Beckman (2013), citados naquele trabalho. De acordo com Iqbal (1983) apud (DA SILVA, 2019), em aplicações relacionadas a energia solar, o conhecimento das componentes da irradiância horizontal é importante, pois cada uma dessas variáveis afeta o sistema de maneiras diferentes e são consideradas separadamente na etapa de transposição para o plano inclinado. Os modelos de Liu (1960), Hay e Davies (1979) e Perez, Ineichen *et al.* (1987) são aplicados para avaliação da radiação difusa. Como a obtenção de valores e irradiâncias global, difusa e direta em muitos casos se torna inviável por conta dos custos dos equipamentos envolvidos (piranômetros, piranômetros com disco de sombreamento e pireliômetros), modelos de estimativas de irradiâncias difusas foram estudados pela comunidade científica para contornar este problema. Conhecendo esta parcela da irradiância incidente, pode-se estimar, por um simples balanço de energia, o correspondente valor da irradiância direta a partir da irradiância global horizontal. Modelos de decomposição de irradiância, portanto, são previstos no sentido de compensar a ausência de dados de equipamentos específicos. Souza e Macagnan (2018) estudaram cinco modelos de estimativa de irradiância difusa: Orgill (1977), Erbs (1982), Rendl (1990) e Ridley (2010), em comparação com dados medidos em algumas cidades brasileiras pelas estações SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais). Estes modelos sugerem a aplicação de equações algébricas que representem a relação entre os coeficientes de transmissibilidade  $K_t$  e difusibilidade  $k_d$ , valores obtidos de dados coletados de estações solarimétricas. A partir dos dados disponibilizados pela rede SONDA e seis cidades, foram elaborados os gráficos dos pontos  $K_t \times k_d$  posteriormente tratados estatisticamente. Esta mesma metodologia é aplicada nos trabalhos de Sclar (2003), Souza, Escobedo *et al.* (2011) e Souza (2020). Neste trabalho especificamente, foram aplicados modelos de radiação difusa a partir de dados de radiação global horizontal e, por consequência, dos valores de radiação direta. De posse dos resultados, foi avaliada a irradiância global sobre planos inclinados, através do modelo isotrópico de Liu (1963). O modelo que melhor representou a relação entre os fatores de transmissibilidade e de difusibilidade foi o de Erbs (1982), e o modelo de Liu (1960) (pioneiro da estimativa da estimativa da radiação difusa) foi o que estatisticamente mais adequado para representar a

irradiação difusa para a cidade de Curitiba-PR, apresentando um coeficiente de Pearson de 0,956. Os modelos de radiação difusa compreendem parâmetros como altitude, latitude, altitude solar, turbidez atmosférica, vapor d'água, temperatura, umidade relativa, distribuição de nuvens, que estão atrelados a variações temporais e espaciais. Perez *et al.* (1986) apresentam modelo anisotrópico que considera os brilhos circunsolar e de horizonte na avaliação da irradiância incidente sobre superfícies inclinadas a partir de equacionamento da irradiância difusa horizontal. A equação governante contempla características geométricas e coeficientes avaliados através da condição do céu, definido por três parâmetros considerados independentes, quais sejam o brilho (percentual da irradiância global horizontal da soma das irradiâncias direta e global horizontal), o ângulo zenital do Sol e a irradiância difusa horizontal. A avaliação destes coeficientes se constitui na parte estatística do trabalho e se baseia nos dados experimentais obtidos de leitura de piranômetros instalados em locais estrategicamente escolhidos. Com os dados colhidos, os coeficientes contidos na equação governante são otimizados por um processo de ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Os resultados foram comparados com os modelos de Liu (1960), Hay e Davies (1979) e Klucher (1979). Perez, Ineichen *et al.* (1987) elaboraram um modelo de decomposição de irradiância com uma modificação que teve por fim simplificar a versão anterior levando-se em conta impactos da composição da atmosfera e existência de aerossóis, assim como albedo, altitude e cobertura de nuvens locais. O modelo incorpora dois componentes importantes: um geométrico incluindo o disco solar e a irradiação do horizonte sobreposto por um fundo isotrópico e o segundo componente é empírico, estabelecido por dois coeficientes que são função das condições de insolação. Estas condições são parametrizadas pela posição do Sol, do brilho do céu e sua claridade respectivamente representados pelo ângulo no zênit, a irradiância horizontal difusa e um parâmetro  $\mathcal{E}$  (claridade), função das irradiâncias difusa horizontal e direta normal. Para otimizar o processo de parametrização das leituras, uma manipulação algébrica sobre o modelo original foi elaborada. Perez, Stewart *et al.* (1988) obtiveram os coeficientes do modelo anisotrópico de Perez, Ineichen *et al.* (1987) para avaliação da irradiância difusa recebida por uma superfície inclinada baseado na irradiância global e direta ou difusa horizontal, levando-se em conta coeficientes representativos do *brilho circunsolar e de horizonte* e baseado em dados de diferentes localidades e condições climáticas distintas dos Estados Unidos. Perez, Seals *et al.* (1990b) apresentaram uma avaliação

de modelos de Erbs et al., Skartveit e Olseth e Maxwell, citados naquele trabalho, para predição da irradiância direta a partir da global em curtos intervalos de tempo. A validação é feita por um vasto banco de dados experimentais englobando 14 locais na Europa e Estados Unidos. Os locais foram escolhidos a fim de representar uma variedade de climas, incluindo os continentais úmidos, de grandes altitudes, subtropical e poluídos. Embora o modelo se adapte melhor a alguns destes climas, teve uma boa representatividade geral. Perez, Ineichen *et al.* (1990) tratam do modelo de parametrização da irradiância baseada em valores da irradiância global na tentativa de obtenção do índice de transmissibilidade ( $k_t$ ) independente do ângulo do zênit ou da altura solar utilizando a equação de Kasten's. Outra limitação a ser vencida foi a da dificuldade de contemplar diferentes condições de insolação, fazendo com que este modelo seja mais preciso que o DISC de Maxwell (1987) no que diz respeito à decomposição de irradiância global em direta e difusa. Os mesmos autores Perez, Ineichen *et al.* (1990), apresentam em outro trabalho, um modelo de decomposição de irradiância baseado em dados levantados ao longo de três anos em 10 localidades distribuídas nos Estados Unidos e na Europa contemplando diferentes características climáticas, inclusive o índice pluviométrico. As entradas do modelo levam em conta a altura solar, o coeficiente de claridade, representativo da variação da condição atmosférica entre céu aberto e nublado, o brilho do céu, representativo da opacidade e espessura das nuvens e a umidade absoluta, avaliada a cada três horas. Perez, Ineichen *et al.* (1992) elaboraram o modelo DIRINT, a partir do modelo DISC, utilizando um vasto banco de dados climáticos para avaliação da irradiância direta normal. Os modelos são tecnicamente diferentes, mas funcionalmente equivalentes, sendo o segundo baseado numa relação linear. Ambos foram capazes de contemplar dados de ponto de orvalho das localidades como dado adicional e os resultados mostraram estatisticamente um avanço em relação aos modelos existentes de Maxwell, (1987) e Erbs (1982) tomados como comparação.

Após a presente revisão bibliográfica, o modelo de Perez, Ineichen *et al.* (1992) foi o escolhido para a avaliação da irradiação difusa por conta da maior sua maior abrangência de parâmetros geoclimáticos envolvidos e por ser este o modelo aplicado em códigos de programas utilizados em projetos de sistemas fotovoltaicos. Embora o modelo de irradiância proposto limitar a sua aplicabilidade para regiões entre as latitudes de 28°N e 45°N e a influência de um dos parâmetros envolvidos (índice de transmissibilidade “*primer*”) para altitudes acima de 1000 m, há o interesse

em se verificar as discrepâncias nos resultados decorrentes do espelhamento da faixa de latitude no hemisfério sul, considerando a diversidade de localidades e condições geoclimáticas aplicadas àquele modelo.

## 2.2 MODELOS DE DECOMPOSIÇÃO DE IRRADIÂNCIA

Este item trata de detalhes de modelos de decomposição de irradiância pesquisados na literatura, dentre eles o de Erbs, DISC (*Direct Insolation Simulation Code*) e DIRINT (*Direct Normal Transmittance*), que estimam as componentes difusa e direta da irradiação global horizontal. A irradiância global tem duas componentes, avaliadas pela equação (14)

$$G = G_{DIF} + G_{DIH} \quad (14)$$

onde  $G_{DIH}$  é a componente da irradiância direta ( $G_N$ ) perpendicular ao plano horizontal. Esta componente pode ser obtida por meio de medição experimental ou indiretamente através dos modelos de irradiância difusa, descrito a seguir.

### 2.2.1 Modelo de Decomposição de Erbs

Neste modelo a irradiância difusa é obtida a partir da global horizontal por um fator de correlação  $f_d$ , ligado ao índice de claridade ou transmissibilidade do local ( $k_t$ ) de acordo com a equação (15)

$$G_{DIF} = f_d G \quad (15)$$

De acordo com (ERBS, 1982), o valor desta correlação é aplicado em três zonas distintas dos valores de  $k_t$ , representado pelas equações (16), (17) e (18), obtidas experimentalmente através de leituras de dados solarimétricos locais.

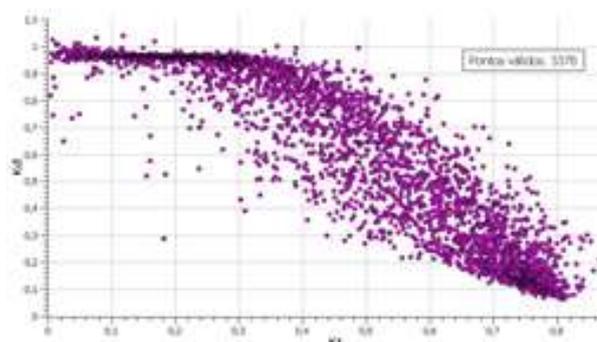
$$f_d = 1.0 - 0.09k_t \dots \dots \dots k_t \leq 0.22 \quad (16)$$

$$f_d = 0.9511 - 0.1604k_t + 4.388k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.336k_t^4 \dots \dots 0.22 < k_t \leq 0.80 \quad (17)$$

$$f_d = 0.165 \dots \dots \dots k_t > 0.80 \quad (18)$$

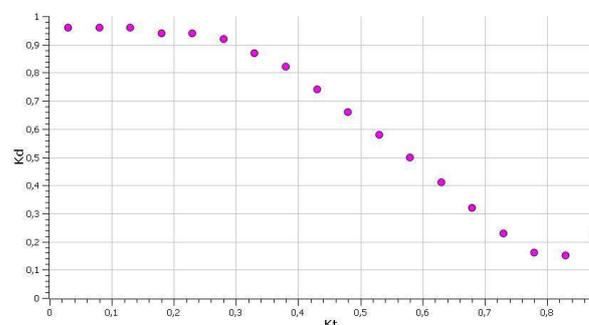
Este método, na realidade, tenta reproduzir a relação entre os índices de claridade  $k_t$ , e o de difusibilidade  $k_d$ , e, conseqüentemente as irradiâncias global e difusa. Sabendo-se o valor daquela, automaticamente se estima a parcela difusa, como demonstrados através da Figura 23 e da Figura 24, pelos pontos dispersos ou em relação à média, respectivamente.

**Figura 23 – Fração difusa ( $k_d$ ) em função do índice de transmissibilidade ( $k_t$ )**



Fonte: (SOUZA, 2020)

**Figura 24 – Distribuição dos valores médios de ( $k_d$ ).**



Fonte: (SOUZA, 2020)

Neste caso, a autora propôs uma correlação representada pela (19)

$$\frac{G_{DIF}}{G} = 0.914 + 0.970k_t - 3.985k_t^2 + 1.900k_t^3, \quad (19)$$

válida no intervalo de  $0 \leq k_t \leq 0.78$ , sendo as constantes determinadas por um procedimento de ajuste. Vale ressaltar aqui que o comportamento dos pontos registrados no gráfico da Figura 23 é consequência das condições meteorológicas de uma região específica em estudo que, no caso, a cidade de Curitiba-PR. Este, portanto, se caracteriza em um trabalho potencialmente interessante sob o ponto de vista de validação do modelo do presente trabalho. No caso do modelo de Erbs, o autor divide o conjunto de pontos medidos em três regiões distintas e o grau da equação é definido em função de cada comportamento.

Tendo a irradiância global e a difusa estimada pelo modelo empírico, obtém-se a irradiância direta normal pela equação (20).

$$G_N = \frac{G_{DIH}}{\cos \theta_z} = \frac{G - G_{DIF}}{\cos \theta_z} \quad (20)$$

### 2.2.2 Modelo de Decomposição DISC (MAXWELL, 1987)

O modelo DISC tem a finalidade de determinar a irradiância direta normal ( $G_N$ ) através da relação empírica entre o índice de claridade global  $k_t$  e o de claridade de feixe direto  $k_n$ , representado pela equação (21)

$$G_N = G_0 k_n \quad (21)$$

onde

$$k_n = k_{nc} - \delta k_n. \quad (22)$$

$k_{nc}$  uma função da “massa de ar” definida pela (23)

$$k_{nc} = 0,866 - 0,122am + 0,0121am^2 - 0,000653am^3 + 0,000014am^4 \quad (23)$$

e

$$\delta k_n = a + be^{(c*am)}. \quad (24)$$

Os valores de “a” e “b” dependem de duas faixas de valores do índice de claridade global  $k_t$  conforma os conjuntos de equações (25) e (26).

Para  $k_t \leq 0,6$

$$\begin{aligned} a &= 0,512 - 1,56k_t + 2,286k_t^2 - 2,222k_t^3 \\ b &= 0,370 + 0,962k_t \\ c &= -0,280 + 0,932k_t - 2,048k_t^2 \end{aligned} \quad (25)$$

Para  $k_t > 0,6$

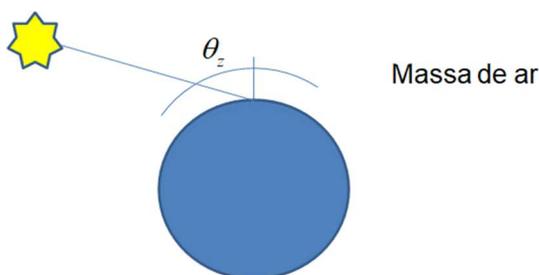
$$\begin{aligned} a &= -5,743 + 21,77k_t - 27,49k_t^2 + 11,56k_t^3 \\ b &= 41,4 - 118,5k_t + 66,05k_t^2 + 31,90k_t^3 \\ c &= -47,01 + 184,2k_t - 222,0k_t^2 + 73,81k_t^3 \end{aligned} \quad (26)$$

Segundo a norma (ABNT 10899, 2020), a massa de ar é a razão entre o caminho óptico percorrido pelos raios solares na atmosfera, ilustrado esquematicamente na Figura 25, e o caminho vertical na direção de zênite ao nível do mar e calculada por Kasten (1966) apud (MAXWELL, 1987), conforme a equação (27)

$$am = \frac{1}{\left[ \cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.2531} \right]} \quad (27)$$

válida para  $\theta_z \leq 70^\circ$ .

**Figura 25 - Caminho da irradiância solar na atmosfera.**



**Fonte: Autor.**

Vale reforçar aqui que o modelo DISC foi desenvolvido e validado para localidades continentais entre as latitudes de **28 N e 45 N** (MAXWELL, 1987).

### 2.2.3 Modelo de Decomposição DIRINT

O modelo DIRINT foi proposto por Perez, Ineichen *et al.* (1992) e é uma evolução do modelo DISC, com um diferencial que é a possibilidade de utilizar dados de temperatura de ponto de orvalho, se disponível. A condição de insolação do local é parametrizada em espaço multidimensional e cada dimensão é uma função direta da condição do céu. Basicamente, a irradiância direta normal é avaliada pela equação (28)

$$G_N = G_{N_{DISC}} X(k'_t, \theta_z, W, \delta k'_t) \quad (28)$$

onde  $W$  é o índice de precipitação atmosférica calculado pela equação (29)

$$W = e^{(0,07T_d - 0,075)} \quad (29)$$

$T_d$  é a temperatura de ponto de orvalho do local em [°C].

$k'_t$ , denominado índice de claridade, representa condição meteorologicamente semelhante, mas independentemente da posição do Sol (PEREZ, INEICHEN, *et al.*, 1990), representado pela equação (30)

$$k'_t = \frac{k_t}{1,031e^{\frac{-1,4}{0,9 + \frac{9,4}{am}} + 0,1}} \quad (30)$$

O modelo DIRINT introduz também um coeficiente  $\delta k'_t$ , chamado de índice de estabilidade temporal, avaliado pela equação (31), para diferenciar valores relacionados com as condições parciais de cobertura de nuvens provocando saltos de uma hora para outra de condições homogêneas como nevoeiros ou finas camadas de cirros.

$$\delta k'_t = 0,5(|k'_t - k'_{t+1}| + |k'_t - k'_{t-1}|) \quad (31)$$

O valor deste parâmetro permite distinguir condições de céu muito nublado e parcialmente nublado, em que valores oscilando de baixos altos representam condições atmosféricas estáveis e instáveis respectivamente. Para o caso em que algum valor da série de  $\delta k'_t$  não esteja disponível, como no instante do nascer e pôr do Sol, adota-se a aproximação definida pela equação (32)

$$\delta k'_t = |k'_t - k'_{t\pm 1}| \quad (32)$$

A função  $X(k'_t, \theta_2, W, \delta k'_t)$  é avaliada através de seus quatro parâmetros de condição de insolação inseridos em uma tabela BINS do modelo Perez, Ineichen *et*

al. (1992) reproduzida pela Tabela 1. Esta tabela representa uma matriz 6 x 6 x 5 x 7, inserida no anexo do trabalho de Da Silva (2019).

**Tabela 1 - Bins do modelo DIRINT.**

Bin	$k_t$		$\theta_z$		$w$		$\delta k_t$	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
1	0	0,24	0	25	0	1	0	0,015
2	0,24	0,4	25	40	1	2	0,015	0,035
3	0,4	0,56	40	55	2	3	0,035	0,07
4	0,56	0,7	55	70	3	$\infty$	0,07	0,15
5	0,7	0,8	70	80	0	$\infty$	0,15	0,3
6	0,8	1	80	90			0,3	1
7							0	1

**Fonte:** Adaptado de (PEREZ, INEICHEN, *et al.*, 1992).

Segundo o autor, algumas restrições quanto ao uso desta tabela devem ser levadas em conta. Em primeiro lugar, a limitação da distância zenital menor que 85°. Os bins 5 e 6, para  $w$  e  $\delta k_t$  respectivamente, não são considerados e valores de  $k_t$  acima de 0,85 são suspeitos em localidades em altitudes abaixo de 1000 m.

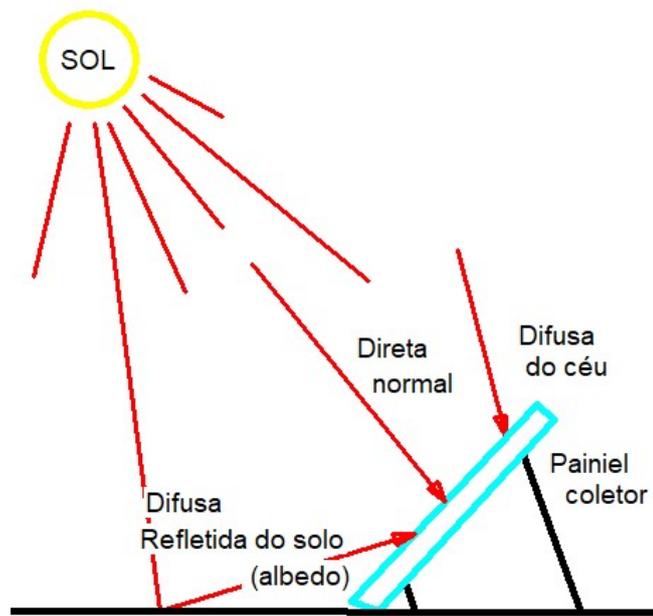
#### 2.2.4 Irradiância no Plano Inclinado

Como já mencionado, a irradiância no plano inclinado ( $G_I$ ) corresponde à potência incidente por unidade de área em um plano inclinado em relação à horizontal, também denominada irradiância total, cujas componentes encontram-se ilustrada na Figura 26. De acordo com Scola (2003) modelos de irradiância no plano inclinado são necessários por causa da dificuldade de medição e pode ser calculada pela equação (33).

$$G_I = G_{N\_I} + G_{R\_I} + G_{DIF\_I} \quad (33)$$

$G_{N\_I}$ ,  $G_{R\_I}$ ,  $G_{DIF\_I}$  são as irradiâncias direta normal ao plano inclinado, refletida pelo solo e difusa respectivamente.

Figura 26 - Composição da irradiância incidente em superfície inclinada.



Fonte: Autor.

A irradiância direta é a componente da irradiação direta normal de acordo com o ângulo de incidência no módulo e, portanto, definido pela equação (34).

$$G_{N_I} = G_N \cos \theta \quad (34)$$

A irradiância refletida pelo solo é uma componente da fração da irradiância global horizontal, representada pelo albedo, sobre a superfície inclinada, avaliada pela equação (35).

$$G_{R_I} = G\alpha \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (35)$$

sendo “ $\alpha$ ” o albedo, que depende da composição do entorno, estimado, por exemplo, através dos valores representados na Tabela 2, função das características refletivas do entorno.

Tabela 2 - Estimativas de albedo.

Característica do entorno	albedo	Característica do entorno	albedo
Ambientes urbanos	0.14-0.22	Asfalto seco	0.09-0.15
Gramma	0.15-0.25	Asfalto molhado	0.18
Gramma fresca	0.26	Concreto	0.25-0.35
Neve fresca	0.82	Tijolos vermelhos	0.33
Neve molhada	0.55-0.75	Alumínio	0.85

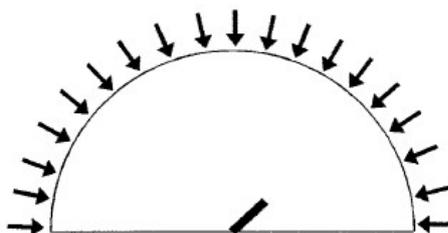
Autoria: Adaptado de (QU, LIANG, *et al.*, 2015).

### 2.2.5 Modelos de Transposição de Irradiância Difusa

Existem dois tipos de modelos simplificados para a descrição da radiação difusa: os modelos não-direcionais e os direcionais. Os modelos não-direcionais, determinados empiricamente a partir de medidas obtidas com sensores planos, não fornecem nenhuma informação de existência de gradientes da irradiância difusa no hemisfério do céu. Com exceção do modelo isotrópico, o que fazem é estabelecer incrementos da irradiância de determinadas zonas do céu (circunsolar e horizonte). Os modelos direcionais, por sua vez, são determinados através de medidas realizadas com instrumentos com campo de visão reduzido. Estas medidas permitem mapear o hemisfério celeste para diferentes condições do céu e diferentes posições do Sol (MACAGNAN, 2010).

Os modelos de irradiância difusa são classificados, portanto em isotrópicos e anisotrópicos. O modelo isotrópico considera que a irradiância difusa se espalha uniformemente na mesma intensidade em todas as direções da cúpula celeste, como ilustrado na Figura 27.

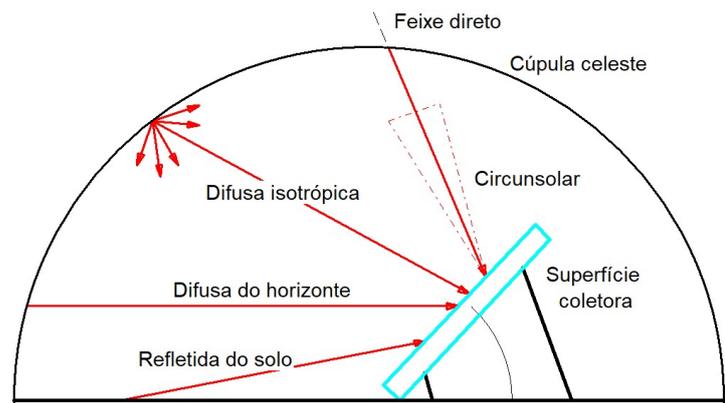
Figura 27 - Modelo isotrópico.



Fonte: Adaptado de (DUFFIE e BECKMAN, 2013)

Os modelos anisotrópicos consideram a natureza anisotrópica da irradiância difusa, ou seja, a irradiância incidente em uma superfície inclinada pode conter, além da isotrópica, componentes circunsolar, difusa do horizonte e refletida do solo, como ilustrado na Figura 28. ((GUEYMARD, 1987), (INEICHEN, 2011), (REINDL et al., 1990a), (DAVID et al., 2013) apud (DA SILVA, 2019).

**Figura 28 - Componentes da irradiância difusa no plano inclinado.**



**Fonte: Adaptado de** (DUFFIE e BECKMAN, 2013)

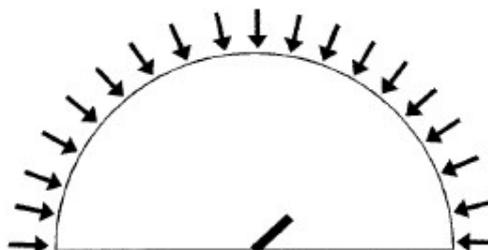
Dentre os modelos pode-se relacionar: o isotrópico de Liu e Jordan (1960) e os anisotrópicos de Temps e Caulson apud (MACAGNAN, 2010), Klucher (1979), Hay and McKay (2010), Reindl apud (MACAGNAN, 2010) e de Perez *et al.* (1990).

#### 2.2.5.1 Modelo isotrópico de Liu e Jordan (LIU, 1960)

Este é o modelo mais simples e considera que a irradiância encontra-se distribuída uniformemente ao longo da capa celeste, como ilustrado na Figura 29, sendo a difusa no plano inclinado dada pela relação geométrica da equação (36)

$$G_{DIF\_I} = G_{DIF} \frac{1 + \cos \beta}{2} . \quad (36)$$

**Figura 29 - Modelo isotrópico de Liu e Jordan.**



**Fonte:** (MACAGNAN, 2010)

#### 2.2.5.2 Modelo de Temps e Caulson

O modelo anisotrópico de Temps e Caulson apud (MACAGNAN, 2010), considera a anisotropia da radiação difusa que se manifesta, de forma geral, como um aumento da intensidade perto do horizonte e na região circumsolar. São considerados dois fatores que representam maiores intensidades do brilho solar tanto no horizonte como em torno do Sol. Este modelo não considera, no entanto, a radiação difusa em céus nublados ou parcialmente nublados.

#### 2.2.5.3 Modelo de Kucher

O modelo de Klucher (1979) se propõe a cobrir a deficiência do modelo anterior, considerando um fator de ajuste relativo à irradiância difusa de céu nublado e parcialmente nublado. As componentes de brilho no horizonte e movimento circumsolar, são ajustados de acordo com um fator específico. Este modelo difere de Liu e Jordan pela inclusão de um fator relativo à componente de brilho no horizonte e de outro à componente circumsolar.

#### 2.2.5.4 Modelo de Hay e McKay

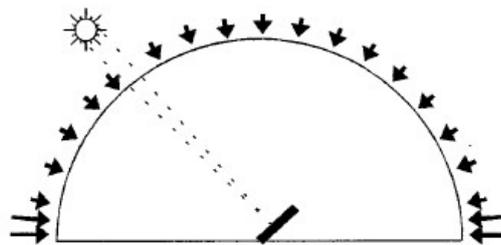
O modelo de Hay e McKay (2010) considera os componentes isotrópicos e circumsolar da irradiância difusa. Um fator de anisotropia ou índice de transmissão da radiação direta que, se considerado nulo, o modelo passa a ser isotrópico.

Detalhes destes modelos anisotrópicos podem ser consultados em, (MACAGNAN, 2010).

#### 2.2.5.5 Modelo de Perez Ineichen *et al.* (1990)

O modelo de Perez, representado pela equação (37), considera as três componentes de irradiância difusa (isotrópica, circumsolar e horizonte) e inclui dois coeficientes de anisotropia circumsolar e de horizonte que variam com os índices de claridade e de brilho, possibilitando a aplicação num espectro celestial maior como ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Modelo de Perez.



Fonte: (MACAGNAN, 2010)

$$G_{DIF\_I} = G_{DIF} \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \left( \frac{a}{b} \right) + F_2 \sin \beta \right] \quad (37)$$

onde

$$F_1 = \max \left[ 0, (f_{11}(\varepsilon) + f_{12}(\varepsilon)\Delta + f_{13}(\varepsilon)\theta_z) \right] \quad (38)$$

$$a = \max [0, \cos \theta]$$

$$b = \max [\cos(85^\circ), \cos(\theta_z)]$$

e

$$F_2 = f_{21}(\varepsilon) + f_{22}(\varepsilon)\Delta + f_{23}(\varepsilon)\theta_z \quad (39)$$

com  $\theta_z$  em radianos.  $F_1$  e  $F_2$  são os coeficientes de anisotropia circumsolar e do horizonte, parâmetros que facilitam o processo de ajuste dos dados. O fator de brilho  $\Delta$  é definido pela equação (40).

$$\Delta = \frac{G_{DIF} am}{G_0} \quad (40)$$

Com o valor do índice de claridade relativo à equação (41)

$$\varepsilon = \frac{\frac{G_{DIF} + G_N}{G_{DIF}} + k\theta_z^3}{1 + k\theta_z^3}, \quad (41)$$

sendo  $k$  uma constante que vale 1,041, entra-se com o valor na Tabela 3 para obtenção da categoria discreta que representa a condição de cobertura do céu. Importante registrar aqui que  $\Delta$  e  $\varepsilon$  representam duas características da atmosfera, a opacidade/espessura das nuvens e a transição entre céu completamente nublado e totalmente claro, respectivamente (PEREZ, INEICHEN, *et al.*, 1990).

**Tabela 3 - Categorias discretas do índice de claridade (Perez et al. 1990).**

$\varepsilon$	Limite inferior	Limite superior
1 Céu nublado	1	1,065
2	1,065	1,23
3	1,23	1,5
4	1,5	1,95
5	1,95	2,8
6	2,8	4,5
7	4,5	6,2
8 Céu limpo	6,2	-

**Fonte:** Adaptado de (PEREZ, INEICHEN, *et al.*, 1990)

Com este valor, entra-se na Tabela 4 para obtenção dos parâmetros  $f_{i,j}$ , que são os coeficientes de irradiâncias para qualquer localidade, como proposto pelo autor.

**Tabela 4 - Coeficientes de irradiância para todas as localidades propostas por Perez.  
(Perez et al. 1990).**

$\epsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
1	-0,008	0,588	-0,062	-0,06	0,072	-0,022
2	0,13	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
3	0,33	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
4	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
5	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
6	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
7	1,060	-1,6	-0,359	0,264	-1,127	0,131
8	0,678	-0,327	-0,25	0,156	-1,377	0,251

Fonte: Adaptado de Perez, Ineichen *et al.* (1990).

### 2.3 DADOS E VERIFICAÇÕES PRELIMINARES

Como descrito anteriormente, o objetivo do trabalho consiste na avaliação da irradiância incidente em superfícies inclinadas com base nas informações de valores de irradiância global disponíveis e nos modelos de irradiância difusa e de transposição. Os resultados do modelo serão comparados com dados de irradiância de banco de dados de uma estação solarimétrica padrão SONDA, localizada em Curitiba na sede Neville do Campus Curitiba da UTFPR.

Posição geográfica da estação: Latitude: 25,50641S (25°30'30" S) Longitude: 049,3177W (049°19'5" W).

Altitude: 932 m;

Os valores de irradiância global medidos serão tomados como referência para o cálculo das irradiâncias direta normal, difusa e direta horizontais. O modelo de Perez, descrito no item 2.2.3 é aplicado para o cálculo da irradiância difusa. Na sequência o modelo de transposição do mesmo autor, descrito no item 0 é aplicado na avaliação das irradiâncias no plano inclinado.

Para aplicação do modelo foram escolhidas quatro datas de 2020, considerando a condição do céu e também períodos distintos relacionadas às variações nas coordenadas solares, resumidas na Tabela 5.

**Tabela 5 – Planejamento de escolha de datas para aplicação do modelo.**

Data	Condição do céu	Período
------	-----------------	---------

1	14 de março	- Aberto com oscilações de nebulosidade pela manhã;	- Próximo ao equinócio de outono no hemisfério sul;
2	21 de junho	- Aberto;	- Solstício de inverno no hemisfério sul;
3	26 de setembro	- Aberto com oscilações de nebulosidade à tarde;	- Próximo ao equinócio de primavera no hemisfério sul;
4	30 de dezembro	- Aberto com nuvens esparsas;	- Próximo ao solstício de verão no hemisfério sul.
5	14 de junho	- Nublado.	

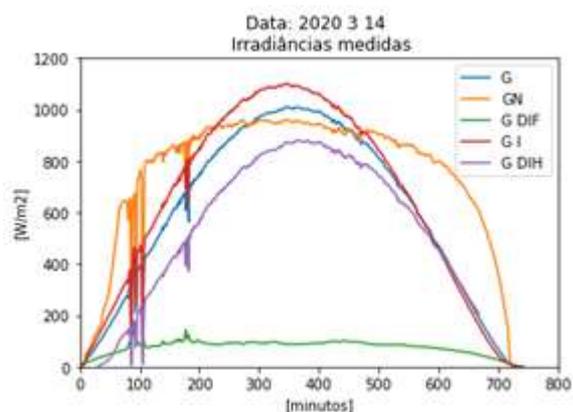
**Fonte: Autor.**

A data 4 foi escolhida para se verificar a resposta do modelo às condições de nebulosidade esparsas. A data 5, por sua vez, foi escolhida aleatoriamente para representar um dia com céu encoberto e alta incidência de nebulosidade, com a finalidade de se verificar a resposta do modelo às alterações bruscas dos valores de irradiação solar e de baixa irradiância direta.

### 2.3.1 – Dados solarimétricos

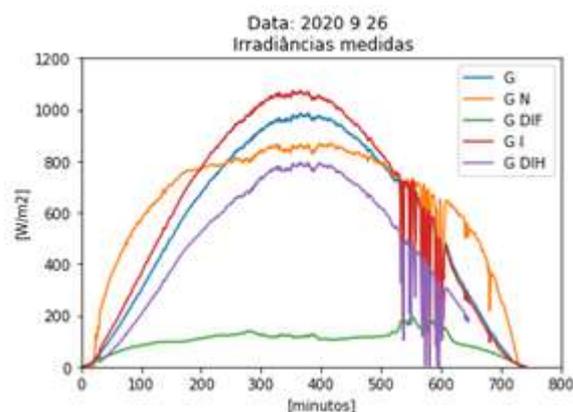
De posse das datas escolhidas, os dados solarimétricos correspondentes são apresentados neste item através da Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 correspondem aos valores das irradiâncias global ( $G$ ), direta normal ( $G_N$ ), difusa ( $G_{DIF}$ ) e plano inclinado ( $G_I$ ) acompanhados das respectivas horas legais minuto a minuto ao longo do dia fotosolar. As temperaturas de ponto de orvalho ( $TPO$ ) também são disponibilizadas, mas separadamente junto aos arquivos de dados.

**Figura 31 – Data 1 – Equinócio de outono no sul.**



Fonte: Adaptado de LABENS.

**Figura 32 – Data 3 – Equinócio de primavera no sul.**

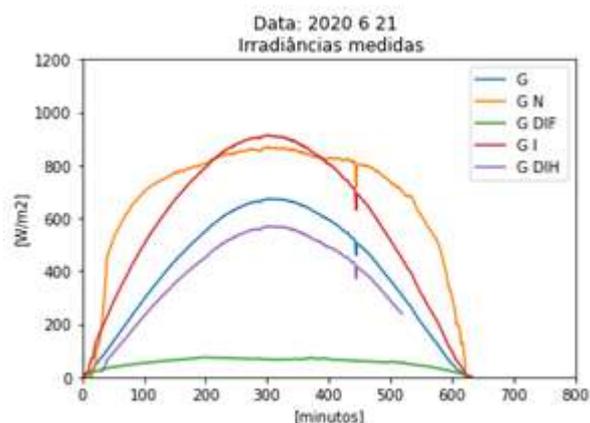


Fonte: Adaptado de LABENS.

Como as datas 1 e 3 correspondem aos equinócios de outono e primavera no hemisfério sul, era de se esperar que os gráficos das irradiâncias se comportassem como os da Figura 31 e Figura 32, já que as declinações do sol nestes momentos são nulas. Embora ocorram desvios por conta das condições climáticas nestas datas, o comportamento das curvas é semelhante tanto quanto à forma quanto à intensidade.

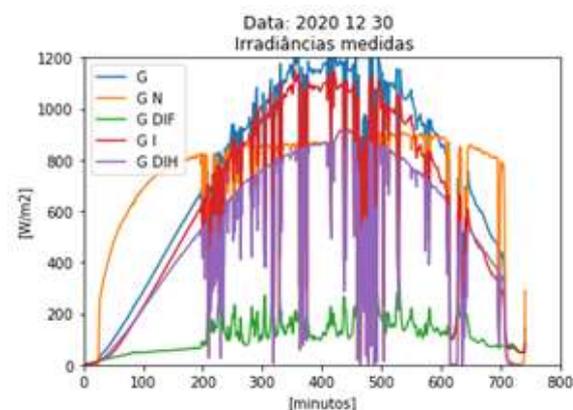
Como forma de verificação qualitativa dos valores experimentais apresentados, estão inseridos também nos gráficos os valores das irradiâncias diretas horizontais ( $G_{DIH}$ ), mesmo que obtidos de forma indireta a partir dos valores das irradiâncias diretas normais. Neste caso, admite-se aqui que os desvios decorrentes de erros instrumentais e no cálculo da distância zenital, estimados a posteriori no item 2.3.2, são irrelevantes em uma análise qualitativa.

**Figura 33 – Data 2 Solstício de inverno no sul.**



Fonte: Adaptado de LABENS.

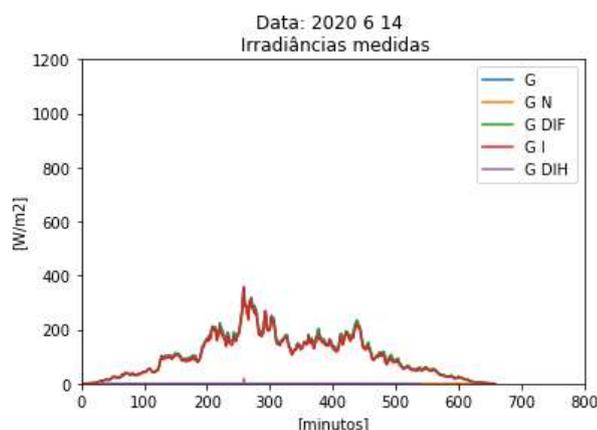
**Figura 34 – Data 4 Solstício de verão no sul.**



Fonte: Adaptado de LABENS.

Na condição de céu encoberto, ilustrado no gráfico da Figura 35, nota-se concordância entre os valores medidos, já que praticamente a única irradiância presente é a difusa.

**Figura 35 – Data 5 – Condição de céu encoberto.**



**Fonte: Adaptado de LABENS.**

A Tabela 6 lista os equipamentos instalados na estação solarimétrica da UTFPR, usados neste trabalho para levantamento dos valores de irradiância global, direta normal, difusa assim como temperatura e umidade relativa do ar, compondo os dados experimentais utilizados como entrada e validação do modelo.

**Tabela 6 - Equipamentos instalados na estação solarimétrica da UTFPR.**

Equipamento	Modelo	Parâmetro medido	Fabricante
Piranômetro	CMP 10	Radiação global horizontal	Kipp&Zonen
Piranômetro	CMP 10	Radiação global no plano inclinado	Kipp&Zonen
Piranômetro	CMP 10	Radiação difusa	Kipp&Zonen
Pireliômetro	CHP 1	Radiação direta normal	Kipp&Zonen
Termohigrômetro	41382VC	Umidade relativa e temperatura do ar	Young

**Fonte: (SOUZA, 2020)**

### 2.3.2– Verificações Preliminares

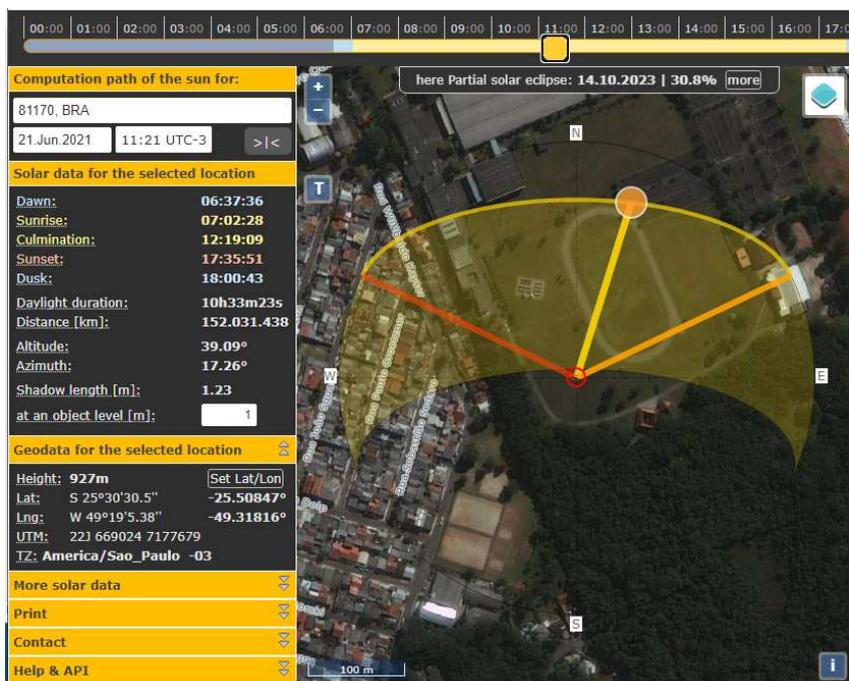
Antes de se aplicar o modelo algumas verificações preliminares foram feitas no sentido de validar os valores de azimute e distância zenital do Sol assim como a coerência entre os valores de irradiâncias medidos.

#### 2.3.2.1– Cálculo do azimute e altura do Sol ao longo de um dia

Como o ângulo de inclinação dos raios solares, avaliada pela equação (3), depende da posição do Sol em determinada posição e instante, torna-se importante avaliar os valores do azimute, altura e declinação do Sol. Para isto foi elaborada uma rotina de cálculo para avaliação destes parâmetros ao longo do dia a partir do crepúsculo matutino até o vespertino. O azimute representado pela equação (10) e a altura correspondendo ao complemento da distância zenital, pela equação (11).

Para validação dos resultados de altura, azimute, momentos do crepúsculo matutino e vespertino, foi escolhido um software denominado “SUNCALC” (AGAFONKIN, 2021). Suas telas são apresentadas nas Figura 36 e Figura 37. O local escolhido foi o mesmo escolhido para desenvolvimento deste trabalho e para o dia 21/06/2021, dia do solstício de inverno no hemisfério sul. As figuras informam sobre os momentos dos crepúsculos civis (07:02:36 e 17:35:51 respectivamente), da passagem meridiana (12:19:09, 12,319 hs) e por consequência, da duração do dia qual seja, 10:33:15 (10,554 hs). Na imagem congelada, o ponto central corresponde ao local de estudo. A linha mais à direita corresponde à linha do meridiano local e a da esquerda marca a direção do azimute do crepúsculo vespertino. Neste momento, às 11:21 hs HMG ou 14:21 H<sub>leg</sub> o azimute do Sol é de 17,26° W e a altura 39,09°. Na janela inferior pode-se notar o registro das coordenadas geográficas do local.

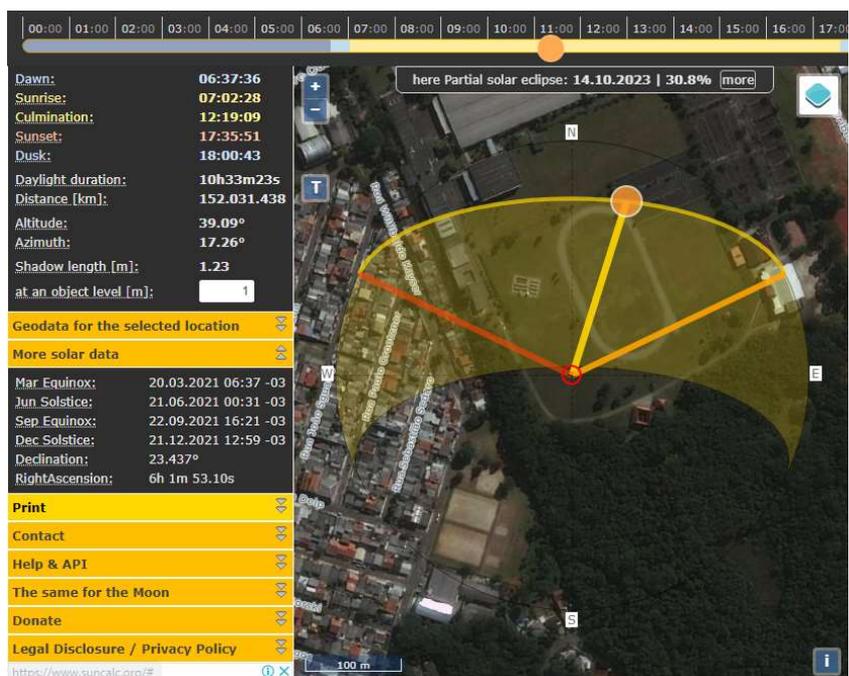
Figura 36 – Tela do SUNCALC.



Fonte: Adaptado do SUNCALC

Na janela inferior da Figura 37 pode-se observar o valor da declinação do Sol naquele momento, 23,437°.

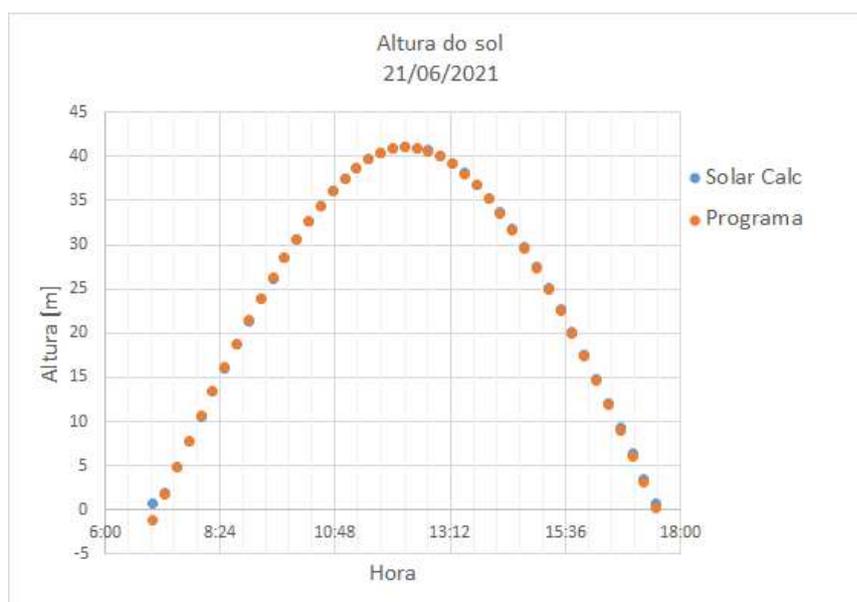
Figura 37 – Tela do SUNCALC.



Fonte: Adaptado do SUNCALC.

Os resultados desta rotina assim como os obtidos pelo software SUNCALC são apresentados na Tabela 7 e representados graficamente na Figura 38. Pode-se notar visualmente pela curva da altura do Sol nesta figura que os resultados são muito próximos entre si.

**Figura 38 - Comparativo da altura do Sol entre SUNCALC e programa.**



**Fonte: autor.**

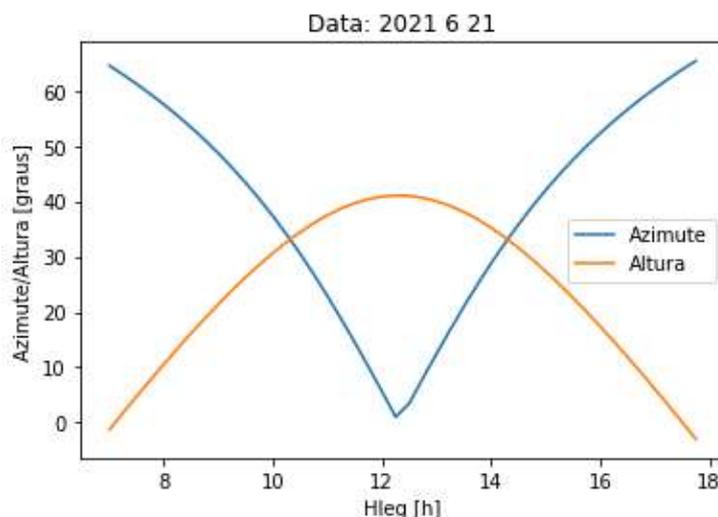
Como forma de validação quantitativa, de acordo com a Tabela 7, os erros relativos médios entre as alturas e azimutes ficaram em torno de 2,81 e 0,33% respectivamente sendo que, as maiores diferenças ocorreram nas alturas correspondentes aos crepúsculos e na passagem meridiana os quais não comprometem a validação.

Tabela 7 - Comparativo da altura do Sol calculada pelo SUNCAL e o programa.

Hora	Altura [m]			Azimute [graus]				
	SolarCalc	Programa	Desvio [%]	SolarCalc	Programa	Desvio [%]		
7:00	0,69	-1,25		64,58	64,5			
7:15	1,95	1,79	-8,21%	62,96	62,88	-0,13%		
7:30	4,8	4,77	-0,63%	61,26	61,17	-0,15%		
7:45	7,69	7,71	0,26%	59,47	59,37	-0,17%		
8:00	10,54	10,6	0,57%	57,57	57,47	-0,17%		
9:00	21,35	21,43	0,37%	48,76	48,63	-0,27%		
10:00	30,61	30,68	0,23%	37,45	37,28	-0,45%		
11:00	37,46	37,5	0,11%	23,03	22,82	-0,91%		
11:15	38,67	38,7	0,08%	18,94	18,72	-1,16%		
11:30	39,65	39,67	0,05%	14,69	14,46	-1,57%		
11:45	40,380	40,38	0,00%	10,3	10,07	-2,23%		
Passagem meridiana	12:00	40,850	40,85	0,00%	5,81	5,57	-4,13%	
	<b>12:15</b>	<b>41,060</b>	<b>41,04</b>	<b>-0,05%</b>	<b>1,27</b>	<b>1,03</b>	<b>-18,90%</b>	
	<b>12:19</b>	<b>12:30</b>	<b>41,000</b>	<b>40,97</b>	<b>-0,07%</b>	<b>3,29</b>	<b>3,53</b>	<b>7,29%</b>
	12:45	40,670	40,62	-0,12%	7,82	8,05	2,94%	
	13:00	40,080	40,02	-0,15%	12,27	12,5	1,87%	
	14:00	35,33	35,21	-0,34%	28,61	28,8	0,66%	
	15:00	27,49	27,33	-0,58%	41,87	42,02	0,36%	
	16:00	17,59	17,38	-1,19%	52,2	52,31	0,21%	
	17:00	6,4	6,01	-6,09%	60,28	60,37	0,15%	
	17:15	3,52	3,14	-10,80%	62,03	62,12	0,15%	
	17:30	0,74	0,12	-83,78%	63,69	63,78	0,14%	
			<b>Desvio Médio [%]</b>	<b>-2,68%</b>		<b>Desvio Médio [%]</b>	<b>-0,34%</b>	

Fonte: autor.

De acordo com o software SUNCALC, o instante da passagem meridiana é 12<sup>h</sup>:19' e a altura do Sol de 41'. Embora a rotina não preveja este valor, esta mesma altura calculada corresponde ao intervalo de inversão de azimute de 1,03°E para 3,53°W. O gráfico da Figura 39 ilustra os comportamentos da altura e azimute do Sol para o dia 21/06/21 no local da instalação fotovoltaica. O ponto de inflexão da curva do azimute representa a inversão do azimute no momento da passagem meridiana da direção E para W, correspondendo ao maior valor da altura do Sol.

**Figura 39 - Valores de azimute e altura do Sol.**

Fonte: autor.

Os momentos dos crepúsculos matutino e vespertinos também foram avaliados indiretamente através da avaliação do ângulo horário local do Sol pela equação (12) e as comparações estão ilustradas através da Tabela 8.

**Tabela 8 - Momentos dos crepúsculos.**

Hora do crepúsculo matutino			Hora do crepúsculo vespertino		
Solar calc	Programa	Diferença	Solar calc	Programa	Diferença
7:02:28	07:06:07	00:03:39	17:35:51	17:30:36	0:05:15

Fonte: autor.

Embora as diferenças entre os valores estiveram entre três e cinco minutos, estes intervalos não irão influenciar significativamente nos valores de irradiância esperados sobre superfícies inclinadas, já que as alturas do Sol correspondentes a estes instantes serão muito pequenas.

Foi feito também uma plotagem do comportamento da curva de inclinação da incidência raios solares sobre a superfície de captação, avaliada através da equação (3), já que esta informação é fundamental para avaliação da irradiância direta normal pelo modelo de transposição de irradiância descrito no item 2.2.5.

Foram analisadas algumas situações específicas para fins de verificação da coerência dos valores da inclinação dos raios solares sobre uma superfície plana localizada na posição geográfica da estação solarimétrica da UTFPR, quais sejam:

latitude 25°30'30" S, longitude 049°19'05" W e o dia escolhido foi o 21 de junho, data do solstício de inverno no hemisfério sul.

**Caso 1: Superfície inclinada de 35° com azimute 000°.**

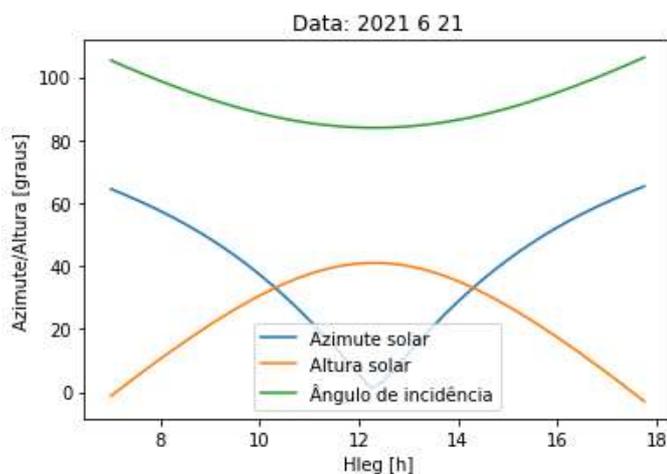
Os valores da inclinação dos raios solares ao longo do fotoperíodo foram registrados na Tabela 9 e apresentados graficamente na Figura 40.

**Tabela 9 – Direção da incidência solar sobre a superfície inclinada.**

Hora legal	Inclinação dos raios solares na superfície [graus]	Hora legal	Inclinação dos raios solares na superfície [graus]
7:00	105.35	12:30	83.99
7:15	103.64	12:45	84.13
7:30	101.97	13:00	84.38
7:45	100.35	13:15	84.74
8:00	98.77	13:30	85.21
8:15	97.25	13:45	85.79
8:30	95.79	14:00	86.46
8:45	94.4	14:15	87.24
9:00	93.07	14:30	88.12
9:15	91.82	14:45	89.08
9:30	90.64	15:00	90.14
9:45	89.55	15:15	91.28
10:00	88.54	15:30	92.5
10:15	87.62	15:45	93.79
10:30	86.8	16:00	95.16
10:45	86.08	16:15	96.59
11:00	85.46	16:30	98.08
11:15	84.94	16:45	99.63
11:30	84.53	17:00	101.24
11:45	84.23	17:15	102.85
12:00	84.04	17:30	104.58
12:15	83.96		106.31

Fonte: Autor.

**Figura 40 - Inclinação dos raios solares.**

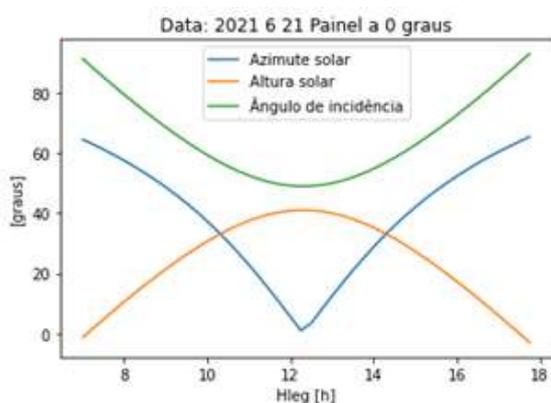


Fonte: Autor.

Considerando a declinação do Sol e orientação do painel norte, pode-se observar a simetria dos valores de incidência da radiação solar como esperado. Após o crepúsculo matutino, o ângulo de incidência é máximo, reduzindo de valor à medida que se aproxima do momento da passagem meridiana, ou de altura máxima do Sol, quando assume o menor valor. Isto acontece por conta da combinação de valores de inclinação do painel, declinação solar e azimute.

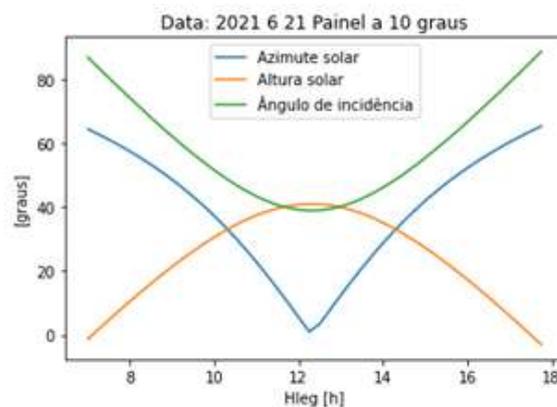
**Caso 2: Painel com azimute  $000^\circ$  na posição horizontal e inclinado de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $30^\circ$ .**

**Figura 41 - Inclinação dos raios solares diários para painel horizontal.**



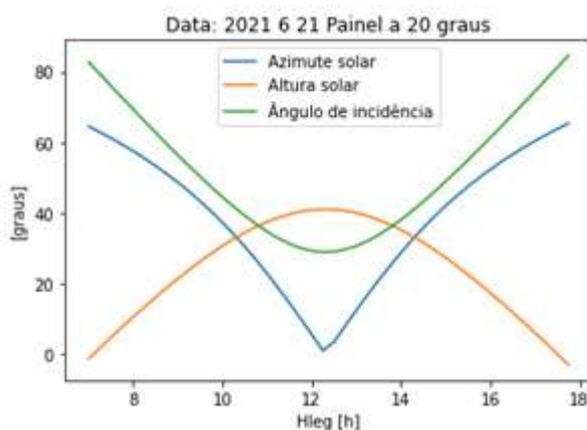
Fonte: Autor.

**Figura 42 - Inclinação dos raios solares diário para painel com  $10^\circ$  de inclinação e azimute norte.**



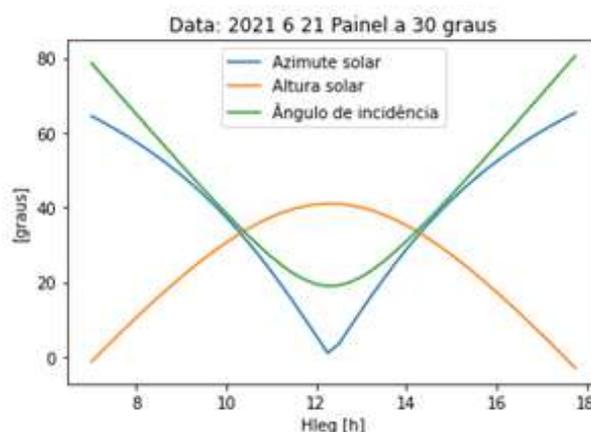
Fonte: Autor.

**Figura 43 - Inclinação dos raios solares diário para painel com 20° de inclinação e azimute norte.**



Fonte: Autor.

**Figura 44 - Inclinação dos raios solares diário para painel com 30° de inclinação e azimute norte.**



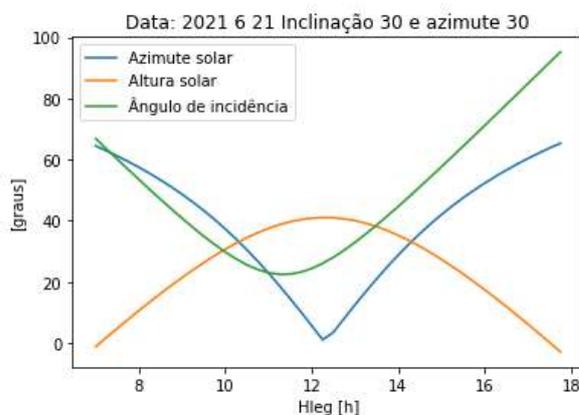
Fonte: Autor.

Como se pode observar na Figura 41, com a superfície plana na posição horizontal, o ângulo de incidência corresponde à distância zenital do Sol, ou o complemento da sua altura. Nas figuras seguintes, à medida que se inclina o painel no sentido do norte, o ângulo de incidência solar diminui, já que a perpendicular à superfície se aproxima da posição do Sol, o que se nota mais claramente durante o momento da passagem meridiana.

### **Caso 3: Painel com 30° de inclinação mas com azimutes variando de 30°, 60° e 90°;**

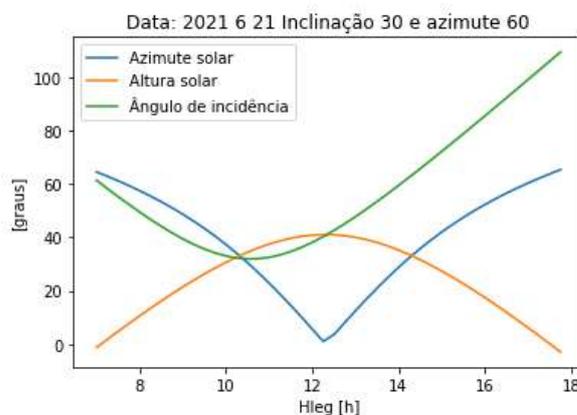
Nestas condições, as curvas de inclinações dos raios solares são assimétricas, como esperado. Durante o período matutino, os valores das inclinações são menores, pois, desviando a orientação do painel para leste produz o mesmo efeito que o da inclinação do painel na direção do Sol, ou seja, o da redução da inclinação dos raios solares. Para o painel orientado na direção leste em 30° no período vespertino os valores aumentam significativamente, provocando a redução da componente perpendicular ao painel, até atingir o valor de 90° às 17<sup>h</sup>20<sup>m</sup> quando a superfície deixa de ser atingida pelos raios solares, embora o crepúsculo vespertino ocorra às 17<sup>h</sup>30<sup>m</sup>, como mostrado na Tabela 8. Para o caso do azimute de 60° a ausência de irradiação incidente ocorre aproximadamente às 16<sup>h</sup>22<sup>m</sup>.

**Figura 45 - Inclinação dos raios solares diários para painel com 30° de inclinação e azimute 30°.**



Fonte: Autor.

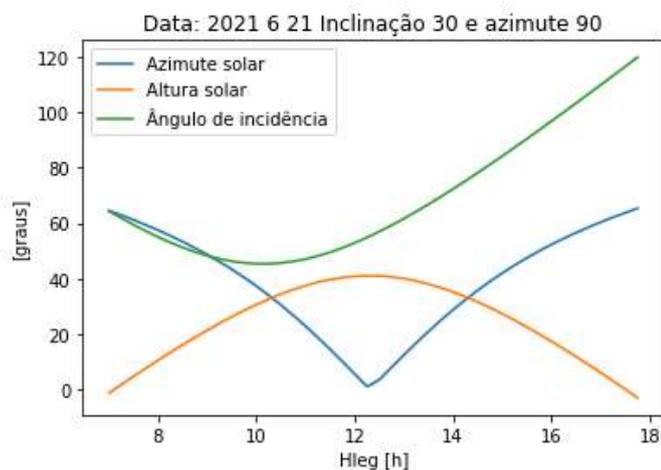
**Figura 46 - Inclinação dos raios solares diários para painel com 30° de inclinação e azimute 60°.**



Fonte: Autor.

No caso extremo de orientação do painel na direção leste ou azimute de 90°, as inclinações dos raios solares se comportam como ilustrado na Figura 47 e, para este caso, a incidência se anula aproximadamente às 15<sup>h</sup>30<sup>m</sup>.

**Figura 47 - Inclinação dos raios solares diários para painel com 30° de inclinação e azimute 90°.**



Fonte: Autor.

Embora estes valores de azimute da superfície inclinada não sejam aplicados neste trabalho, esta atividade serve como avaliação qualitativa do modelo quanto ao comportamento das coordenadas solares em outras orientações, caso da maioria das situações reais.

Em função da análise apresentada neste item, a rotina de avaliação das coordenadas solares pode ser considerada válida para aplicação do programa de avaliação de irradiância incidente sobre superfícies inclinadas.

### 2.3.2.2– Verificação dos valores de irradiância medidos

Neste item é verificada a coerência entre os valores de irradiância difusa (obtida através de leituras no piranômetro com disco de sombreamento) e os de direta normal (obtidas com os pireliômetros) medidos, com os valores de irradiância global obtida pelo piranômetro, representados pela equação (42)

$$G = G_N \cos \theta_z + G_{DIF} . \quad (42)$$

O resultado desta verificação encontra-se ilustrado na Tabela 10.

**Tabela 10 - Desvios dos valores medidos.**

Datas	14/03	21/06	26/09	30/12	14/06
Desvios médios	-5,28%	-5,42%	-6,10%	-9,10%	-1,14%

**Fonte: Autor.**

Como não é feita nenhuma análise de incertezas neste procedimento, a diferença média de 5,4% entre as datas previstas não é considerada neste trabalho.

### 2.3.3– Descrição do Modelo

Basicamente, o modelo segue os passos mostrados no fluxograma da Figura 48 de acordo com a descrição abaixo:

#### 1 – Entrada de dados:

- Posição geográfica do painel;
- Orientação e inclinação do painel;
- Data;

- Escolha do tipo de superfície vizinha ao painel para enquadramento do albedo.

2 – Inserção do banco de dados de:

Irradiância global, difusa horizontal, direta normal, no plano inclinado e temperatura de ponto de orvalho;

3 – Cálculo da declinação do Sol e instantes dos crepúsculos matutino e vespertino e duração do dia;

4 – Escolha do intervalo de tempo entre aquisição de valores de irradiância;

5 - Calcular as coordenadas celestes do Sol: Azimute e distância zenital ( $\gamma_s$ ,  $\theta_z$ );

6 – Determinação da irradiância direta normal pelo modelo DISC ( $G_{N\ DISC}$ );

7 – Cálculo da irradiância direta normal pelo modelo DIRINT ( $G_N$ );

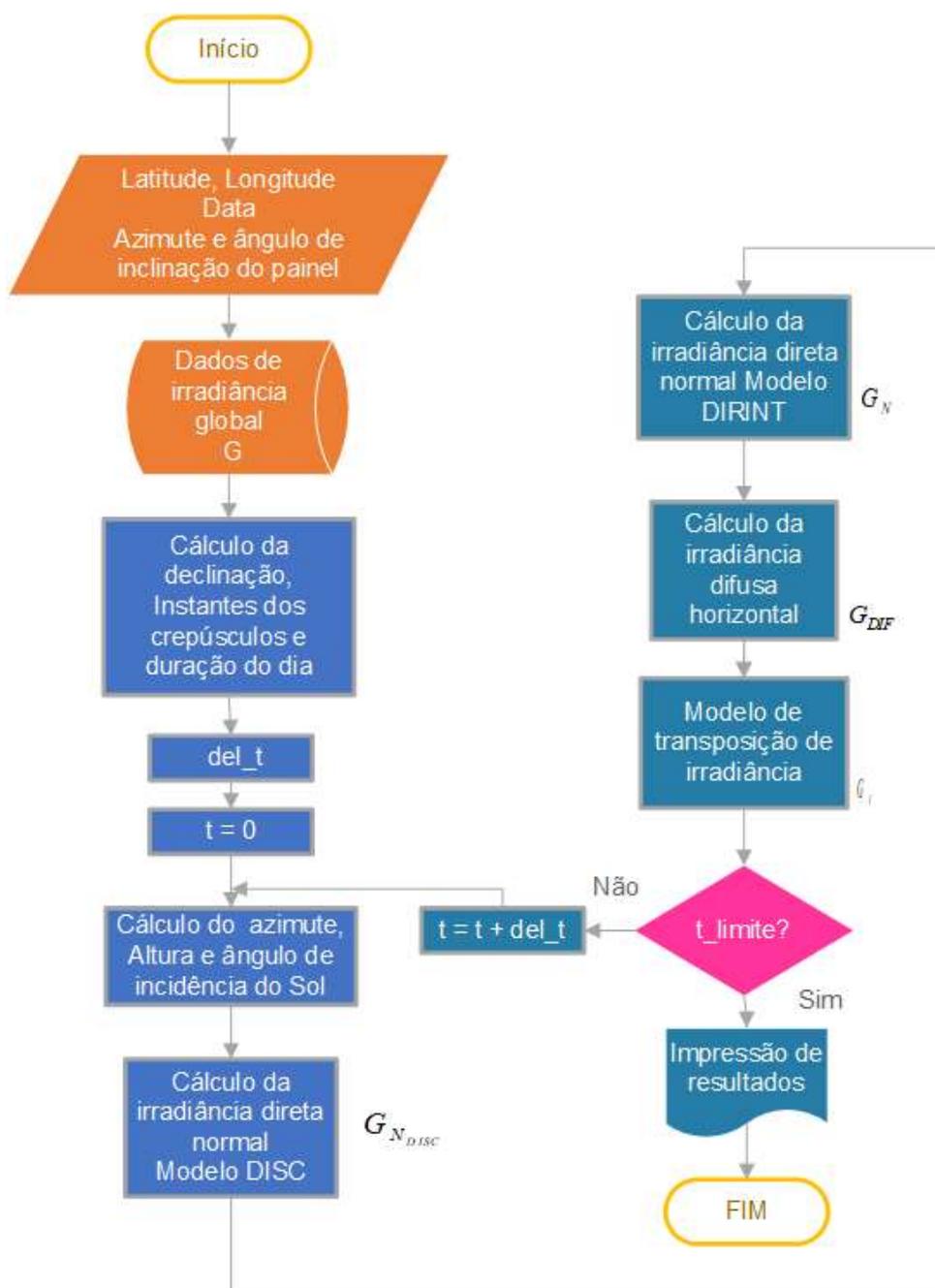
8 – Cálculo da irradiância difusa horizontal ( $G_{DIF}$ );

9 – Determinação da irradiância direta sobre o painel com inclinação conhecida ( $G_I$ );

10 – Comparação do instante de tempo com o instante do crepúsculo vespertino;

11 – Caso o instante de tempo não coincida com o limite, o valor do instante de tempo é corrigido pelo diferencial de tempo escolhido e o processo de cálculo se repete através de novas coordenadas celestes do Sol.

Figura 48 - Fluxograma do programa principal.

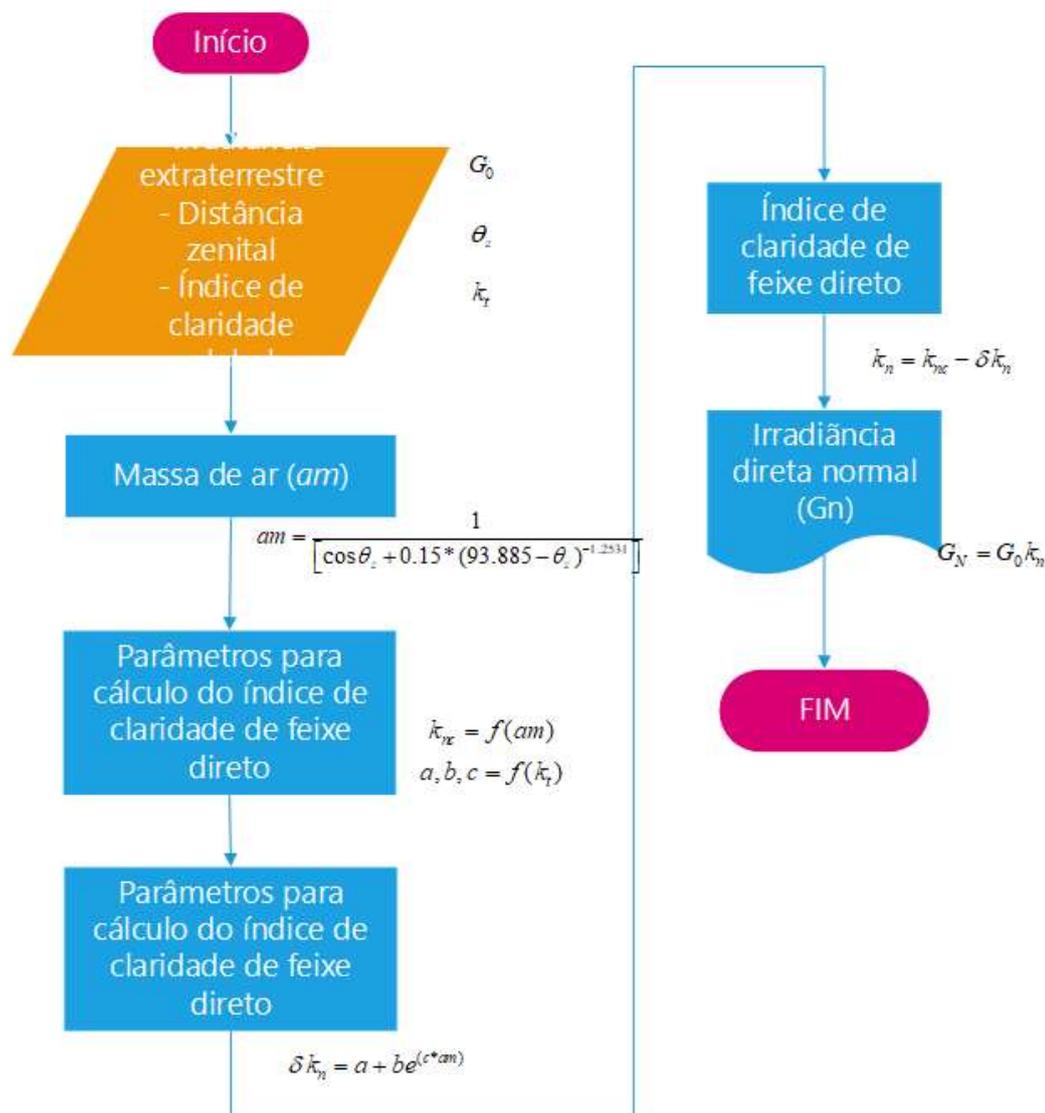


Fonte: Autor.

### 2.3.3.1 Determinação da irradiância direta normal - modelo DISC

Como mostrado no item 2.2.2, o modelo DISC tem por objetivo a obtenção da irradiância direta normal, cujo desenvolvimento é representado pelas equações (21) a (27) e resumido pelo fluxograma da Figura 49.

Figura 49 - Fluxograma do modelo DISC.



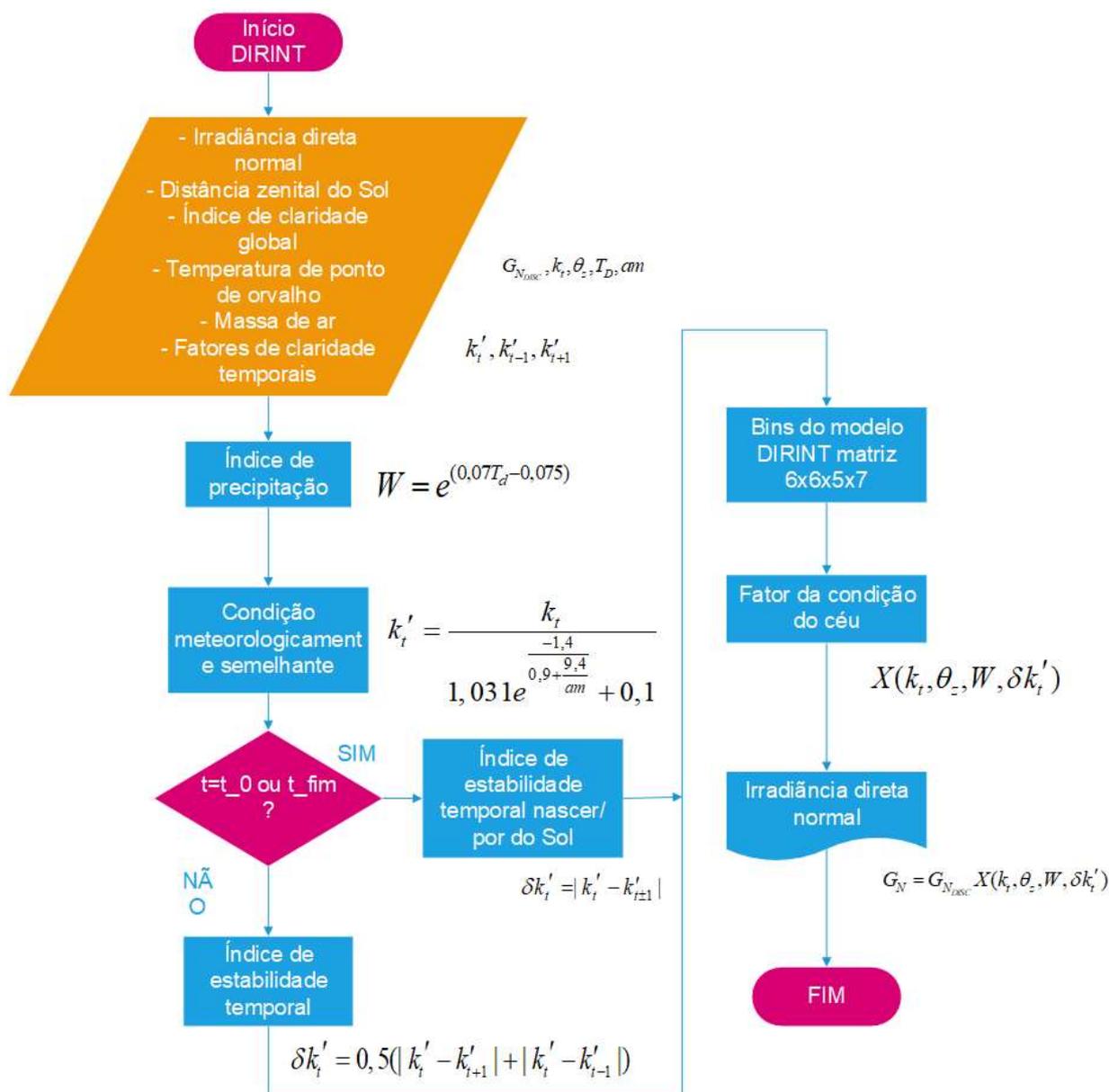
Fonte: Autor.

### 2.3.3.2 Determinação da irradiância direta normal – modelo DIRINT

Como mostrado no item 2.2.3, o modelo DIRINT tem por objetivo a obtenção da irradiância direta normal a partir do valor da irradiância direta normal obtida pelo modelo DISC, levando-se em conta o fator de claridade total, a distância zenital, o índice de precipitação atmosférico e o índice de estabilidade temporal e seu desenvolvimento é representado pelas equações (28) a (32) além da Tabela 1 para definição do elemento a ser retirado da matriz DIRINT, representativo da função

$X(k_t, z, W, \delta k_t')$ . O fluxograma da Figura 50 ilustra a sequência de cálculos necessária para tal.

Figura 50 - Fluxograma do modelo DIRINT.



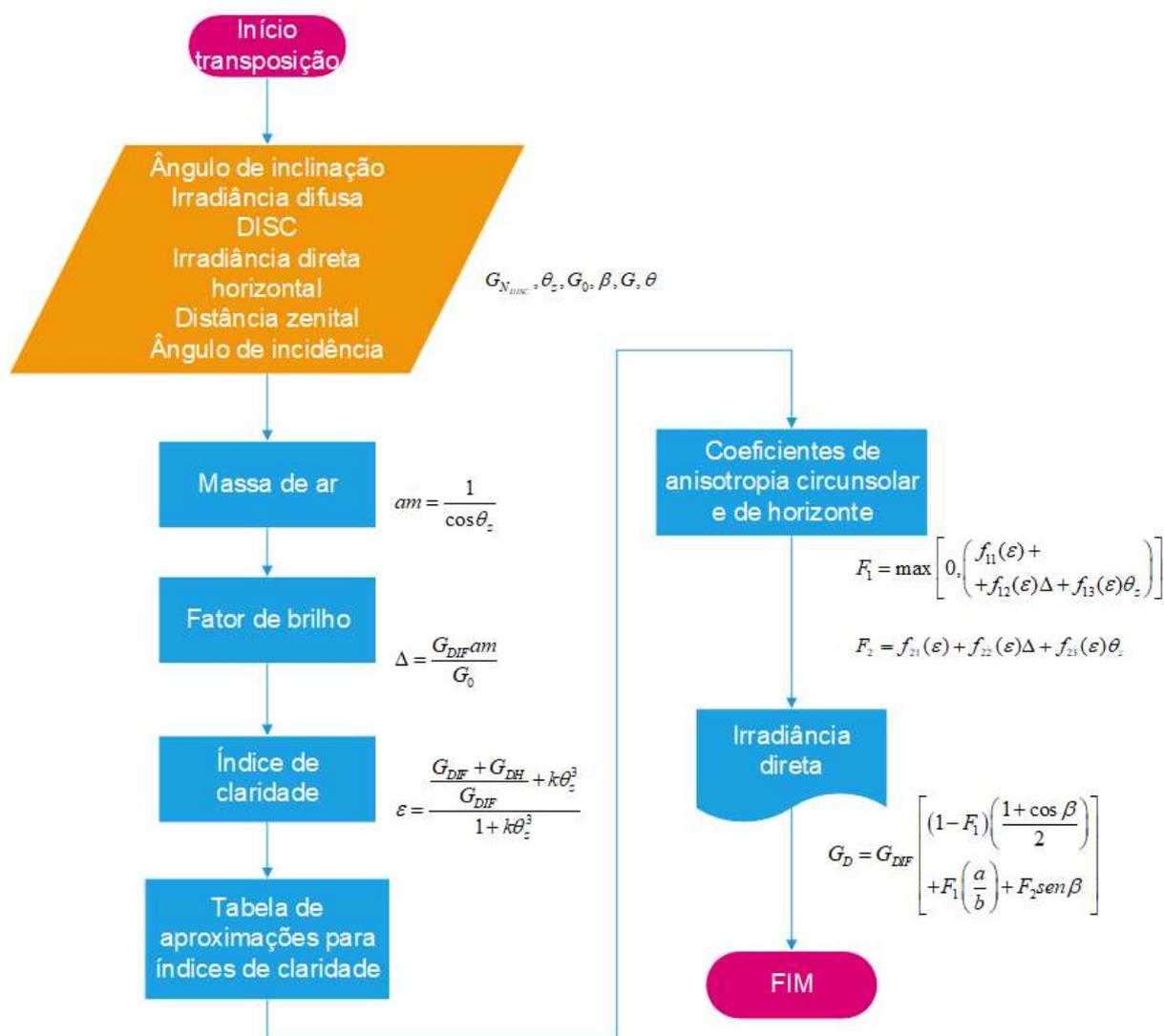
Fonte: Autor.

### 2.3.3.3 Determinação da irradiância em superfícies inclinadas

Como mostrado no item 0, o modelo de transposição tem por objetivo a obtenção da irradiância direta sobre um painel fotovoltaico com inclinação conhecida. Seu desenvolvimento é representado pelas equações (37) a (41) além da aplicação

da tabela de definição do índice de claridade representado na Tabela 3 e dos coeficientes de irradiância da Tabela 4. O fluxograma da Figura 51 ilustra a sequência de cálculos necessária para tal.

Figura 51 - Fluxograma do modelo de transposição.



Fonte: Autor.

#### 2.3.4 Informações sobre o programa e interfaces de entrada e saída de dados.

Como informado no texto deste trabalho, a linguagem python versão 3.8 foi utilizada para elaboração do código do programa e as figuras a seguir ilustram as telas de acesso ao programa principal e entrada e saída de dados. Note que não foi realizado nenhum trabalho de aprimoramento da interface com o usuário visto que as

informações são transferidas diretamente para ou da janela de comunicação do programa.

**Figura 52 – Tela IDE do programa.**

```

1      # -*- coding: utf-8 -*-
2      """
3      Created on Mon May 31 14:59:45 2021
4
5      @author: Raul Henrique Erthal
6      """
7      import math
8
9      def latDD(x):
10         D = int(x[0:2])
11         M = int(x[2:4])
12         S = float(x[4:])
13         DD = D + float(M)/60 + float(S)/3600
14         return DD
15
16     def longDD(x):
17         D = int(x[0:3])
18         M = int(x[3:5])
19         S = float(x[5:])
20         DD = D + float(M)/60 + float(S)/3600
21         return DD
22

```

**Figura 53 - Tela de dados de entrada.**

```

Python 3.8.3 (default, Jul 2 2020, 17:28:51) [MSC v.1916 32
bit (Intel)]
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.

IPython 7.16.1 -- An enhanced Interactive Python.

In [1]: runfile('C:/Users/raule/Google Drive/
ENERGIAS_RENOVAVEIS_2020/PROJETO_TCC/PYTHON/PRINCIPAL/
MODELO.py', wdir='C:/Users/raule/Google Drive/
ENERGIAS_RENOVAVEIS_2020/PROJETO_TCC/PYTHON/PRINCIPAL')
argdia14_mar-1
argdia26_set-2
argdia21_jun-3
argdia30_dez-4
argdia14_jun20_nov-5

Escolha o dia:

```

**Fonte: IDE Python 3.8.3.**

A Figura 52 informa sobre o autor, data e horário de criação e um pequeno trecho do início do código do programa. Os dados são inseridos diretamente na tela, começando pela escolha da data de interesse para simulação como ilustrado na Figura 53.

Na tela da Figura 54 , é inserida a informação da característica do entorno da superfície inclinada para definição do albedo, assim como o modelo de irradiância difusa. Na tela da Figura 55, o usuário escolhe o dado gráfico de interesse para a saída do programa e, finalmente, na Figura 56, um exemplo de tela de saída gráfica.

Figura 54 - Tela de seleção de datas, albedo e modelo de irradiância.

```

Console 1/A
Drive/ENERGIAS_RENOVAVEIS_2020/PROJETO_TCC/PYTHON/PRINC
arqdia14_mar_-1
arqdia26_set-2
arqdia21_jun-3
arqdia30_dez-4
arqdia14_jun20_neb-5

Escolha o dia: 1
Ambientes urbanos - 1
Grama - 2
Grama fresca - 3
Neve fresca - 4
Neve molhada - 5
Asfalto seco - 6
Asfalto molhado - 7
Concreto - 8
Tijolos vermelhos - 9
Alumínio - 10

Escolha dentre as opções acima:2
2
albedo = 0.200
Modelo de irradiância direta e plano inclinado
Erbs_isotropico - 1
Reindl - 2
Mod 3 - 3
Dirint - 4

Entre com o modelo de irradiância direta desejado:4

```

Fonte: IDE Python 3.8.3.

Figura 55 - Tela de seleção de dados de saída gráfica.

```

COORDENADAS SOLARES (Inclinação) 0
COORDENADAS SOLARES (Azimute,incl,dist zenital) 1

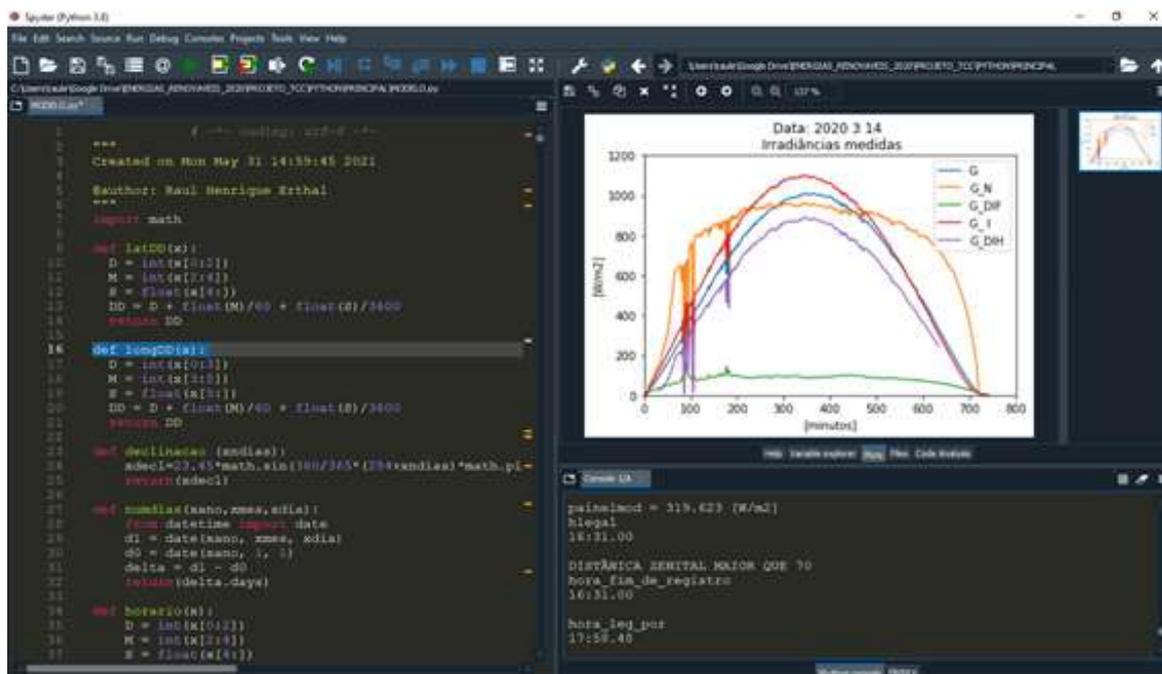
IRRADIÂNCIAS
G - Global medida : 2
GN_med - Direta normal medida : 3
GN_calc - Direta normal calculada : 4
GDIH_med - Direta horizontal medida: 5
GDIH_calc - Direta horizontal calculada : 6
GDIF_med - Difusa medida : 7
GDIF_calc - Difusa calculada : 8
GI_med - Plano inclinado medida : 9
GI_calc - Plano inclinado calculada: 10
GDIFI - Difusa no plano inclinado : 11
GRI - Refletida no plano inclinado : 12
GNI - Direta normal no plano inclinado : 13
Gmed - Irradiâncias medidas : 14
Comp GN - Irrad GN med e calc : 15
Comp dif - Irrad G DIF med e calc : 16
Comp inc - Irrad G I med e calc : 17
Irrad inc - Decomposição no plano inclinado: 18

Entre com o tipo de gráfico desejado:

```

Fonte: IDE Python 3.8.3.

Figura 56 - Tela de resultados gráficos.



Fonte: IDE Python 3.8.3.

### 3 RESULTADOS

Feitas as validações das coordenadas solares para o local escolhido, de posse dos dados solarimétricos para as respectivas datas, assim como a apresentação dos fluxogramas que representam o modelo adotado, seguem-se neste item os resultados obtidos.

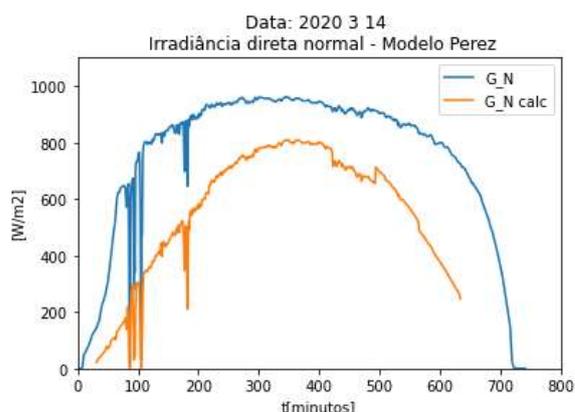
#### 3.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE IRRADIÂNCIA MEDIDAS COM AS CALCULADAS.

As comparações entre as irradiâncias direta normal, difusa e na superfície inclinada são feitas data a data e cada parâmetro representado em gráficos separadamente.

##### 3.1.1 Data 1–14/03/2020–Perto do Equinócio de Outono no Hemisfério Sul

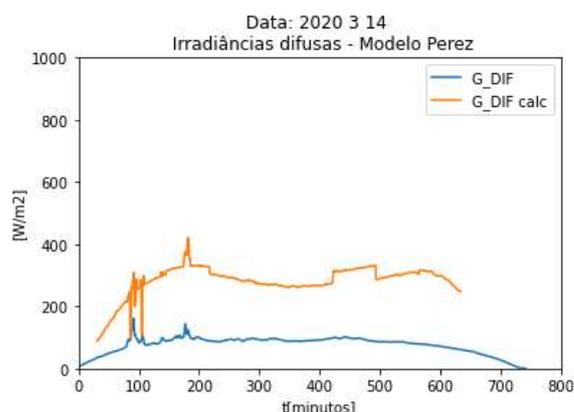
Os valores relativos à irradiância direta normal estão representados na Figura 57, onde se pode notar uma discrepância significativa entre os valores medidos e calculados, estes subestimados pelo modelo. Por conta da dependência direta, este comportamento é automaticamente reproduzido na curva de irradiância difusa, ilustrada na Figura 58. Valores subestimados pelo modelo acabam superestimando valores de irradiância difusa, por conta do balanço de irradiância já mostrado através da equação (42). Como esperado, observa-se que o modelo reproduz as oscilações de cobertura do céu nos mesmos instantes em que elas são constatadas.

Figura 57- Irradiância direta normal Data 1



Fonte: Adaptado de LABENS.

Figura 58 - Irradiância difusa Data 1.



Fonte: Adaptado de LABENS.

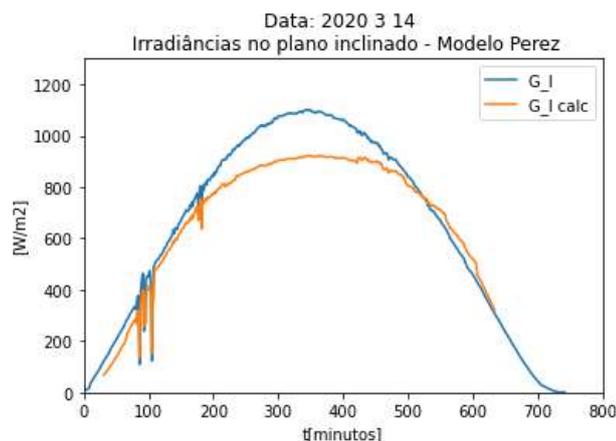
Uma das razões que podem ter levado a este resultado seria a recomendação de aplicabilidade do modelo DISC para localidades entre as latitudes de 28 e 45 N, onde o clima é temperado com características climáticas diferentes da região tropical. Vale citar também que, localidades em latitudes menores produziram distâncias zenitais maiores e, portanto, maiores valores de incidência solar. A outra justificativa possível, mas não tão significativa, seria o fato de que o modelo prevê a altitude mínima de 1000 m como restrição para os valores sugeridos para os índices de claridade do modelo DIRINT.

Chama-se atenção aqui para dois instantes registrados na Figura 57, quando os valores das irradiâncias no plano inclinado variam significativamente quando próximos aos instantes 400 e 490 mins. Após análise do modelo, constatou-se que esta suposta anomalia está relacionada com a variação do índice de brilho ( $\varepsilon$ ), avaliado pela equação (41), quando o valor obtido ultrapassa o limite superior da Tabela 3, fazendo com que o valor inteiro discreto mude, provocando um salto no valor do índice de anisotropia do horizonte  $F_2$  e de aproximadamente  $50 \text{ W/m}^2$  nos valores das irradiâncias difusas (equação (37)) naqueles instantes de tempo, em torno de 7,4% do valor da irradiância máxima calculada.

A interrupção na impressão das irradiâncias que ocorre aproximadamente no instante 630 mins se deve ao fato da distância zenital ter ultrapassado o valor de  $70^\circ$ , restrição de aplicação do modelo de transposição.

A Figura 59, resultante da aplicação do modelo de transposição por sua vez, ilustra o comportamento da irradiância incidente no plano inclinado.

**Figura 59 - Irradiância no plano inclinado Data 1.**



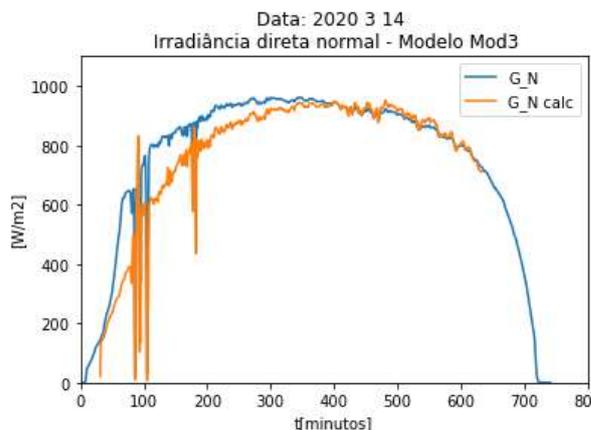
**Fonte: Adaptado de LABENS.**

Apesar dos valores de irradiância direta normais não concorrerem com os medidos, como observado nos gráficos anteriores, até o instante 130 min aproximadamente, nota-se uma concordância entre os valores calculados e medidos, o que não significa coerência física, mas aparentemente o resultado da combinação de valores subestimados de irradiância direta normal com os valores superestimados de irradiâncias difusas.

As discrepâncias dos valores de irradiância direta normal e difusa acabam produzindo também valores de irradiância subestimados no plano inclinado entre os instantes 150 e 510 mins.

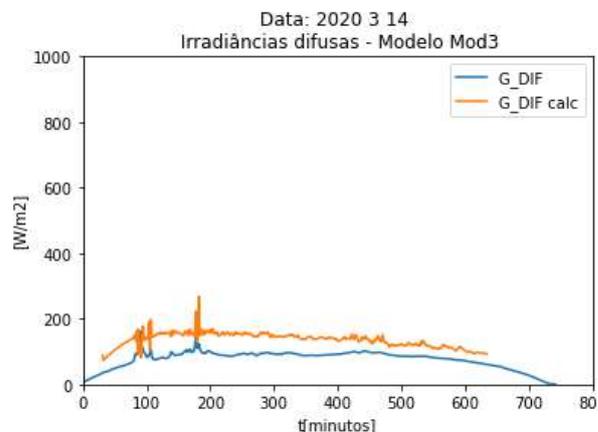
Após a constatação das discrepâncias entre os valores de irradiâncias medidas e calculadas, utilizando o modelo DISC/DIRINT, foi feita uma verificação do comportamento do modelo avaliando a irradiância difusa através do modelo (SOUZA, 2020), representado pela equação (19) e elaborado com base em dados levantados para a cidade de Curitiba através da mesma estação solarimétrica. O modelo de transposição utilizado foi o de Perez, ou seja, o mesmo das simulações anteriores. Os resultados estão ilustrados na Figura 60, Figura 61 e Figura 62.

**Figura 60 - Irradiância direta Data 1 normal (SOUZA, 2020)**



Fonte: Adaptado de LABENS.

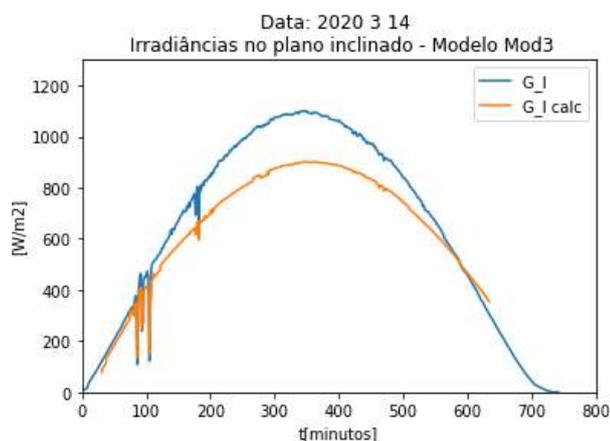
**Figura 61 - Irradiância difusa Data 1 (SOUZA, 2020)**



Fonte: Adaptado de LABENS.

No caso da irradiância direta normal, o desvio médio observado na aplicação do modelo Souza (2020) foi de 7,5 % contra 36% do modelo DISC/DIRINT de Perez (1990). Estas defasagens entre resultados podem estar relacionadas, portanto, com a fonte dos valores das irradiâncias globais medidas.

**Figura 62 – Irradiância no plano inclinado - Data 1 (SOUZA, 2020).**



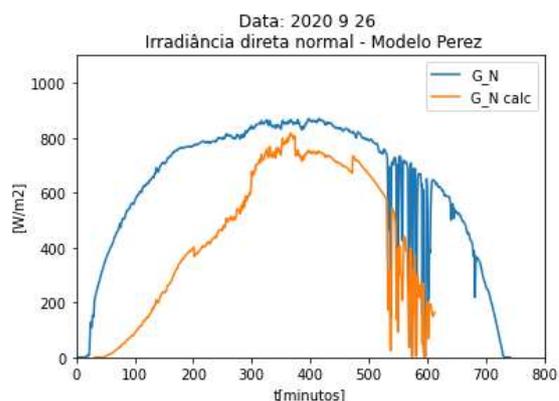
Fonte: Adaptado de LABENS.

As mesmas tendências observadas para as irradiâncias direta normais utilizando o modelo DISC/DIRINT nesta data são reproduzidas nas outras, como se vai constatar nos itens a seguir.

### 3.1.2 Data 2–26/09/2020– Próximo ao Equinócio de Primavera no Hemisfério Sul

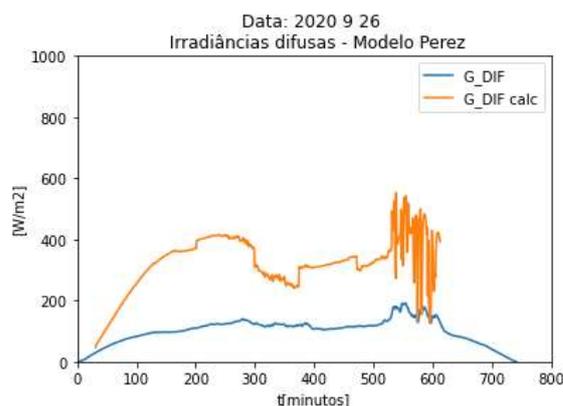
Como na data anterior, de acordo com a Figura 63, Figura 64 e Figura 65, os valores calculados são subestimados em relação aos medidos.

**Figura 63- Irradiância direta normal - Data 2.**



**Fonte: Adaptado de LABENS.**

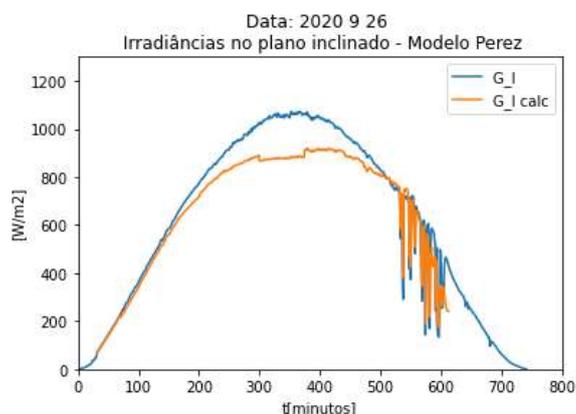
**Figura 64 – Irradiância difusa - Data 2.**



**Fonte: Adaptado de LABENS.**

Neste caso especialmente, as variações bruscas observadas nos valores de irradiância da data 1, por causa da mudança nos valores discretos dos índices de claridade ( $\varepsilon$ ), se repetem aqui, porém em maior número próximos aos instantes 200, 300, 380 e 470.

**Figura 65 – Irradiância no plano inclinado - Data 2.**



**Fonte: Adaptado de LABENS.**

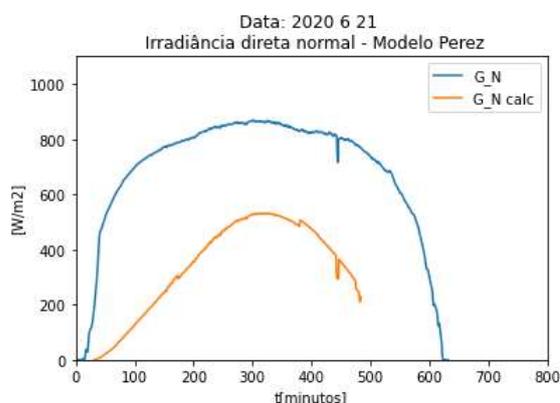
Por causa da dependência direta estes degraus são automaticamente transferidos para as irradiâncias difusas e sobre o plano inclinado. A princípio, estes

saltos talvez não sejam um problema para fins de avaliação de energia gerada pelo painel pois, na maioria dos casos, cada salto é compensado por outros em instantes posteriores, podendo ser aplicada então uma curva média representativa do comportamento da irradiância nos trechos onde eles acontecem.

Data 3–21/06/2020-Solstício de Inverno no Hemisfério Sul.

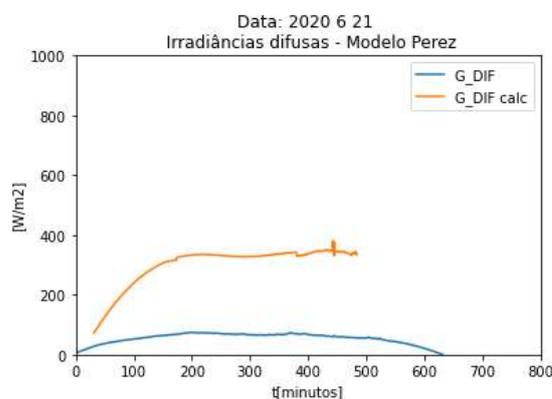
Durante o solstício de inverno no hemisfério sul a declinação do Sol é máxima ao norte e, portanto, máximas são as distâncias zenitais para o local da estação solarimétrica. Neste caso, a componente da irradiância direta horizontal ( $G_{DIH}$ ) é relativamente a menor do ano, como se constata na Figura 66. Da mesma forma que nas datas anteriores, persiste ainda a discrepância e, neste caso especialmente significativa entre os valores medidos e calculados.

**Figura 66 - Irradiância direta normal - Data 3**



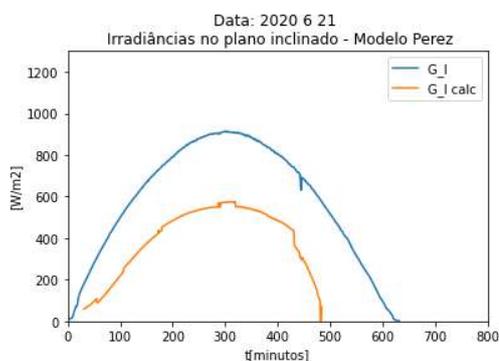
Fonte: Adaptado de LABENS.

**Figura 67- Irradiância difusa - Data 3**



Fonte: Adaptado de LABENS.

**Figura 68- Irradiância no plano inclinado - Data 3**

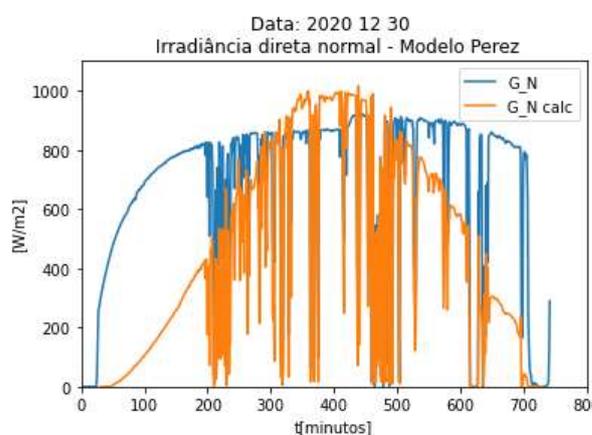


Fonte: Adaptado de LABENS.

### 3.1.3 Data 4–30/12/2020–Próximo ao Solstício de Verão no Hemisfério Sul

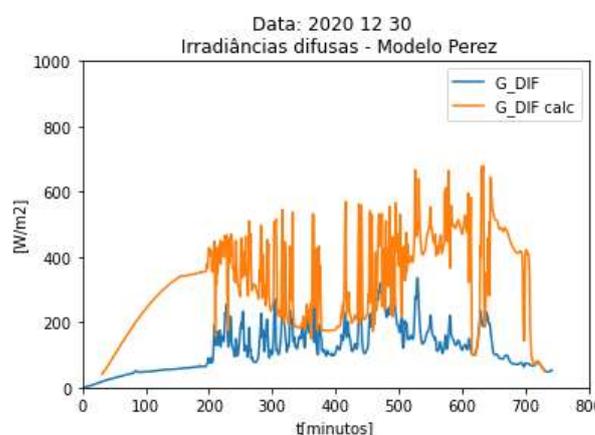
Com se observa nos gráficos da Figura 69, Figura 70 e Figura 71, nesta data já se observa que há mudanças mais significativas da cobertura de nuvens, razão pela qual as oscilações mais frequentes nos valores das irradiâncias. Observa-se também neste caso que os valores calculados de irradiância direta normais até ultrapassam os valores medidos entre os instantes de 300 a 530 mins. aproximadamente.

**Figura 69– Irradiância direta normal - Data 4.**



Fonte: Adaptado de LABENS.

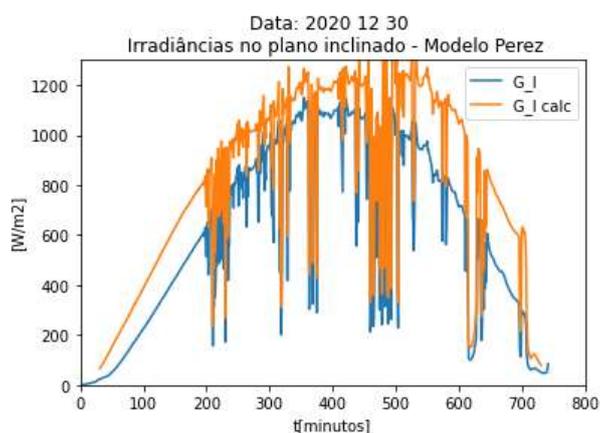
**Figura 70 – Irradiância difusa – Data 4.**



Fonte: Adaptado de LABENS.

Os valores de irradiância calculadas no plano inclinado, registrados no gráfico da Figura 71 neste caso, estão superestimados em aproximadamente 60%. De momento, ter-se-ia de realizar uma análise de sensibilidade envolvendo os parâmetros do modelo, descrito no item 0, para se tentar descobrir uma justificativa para tal.

**Figura 71 - Irradiância no plano inclinado – Data 4**

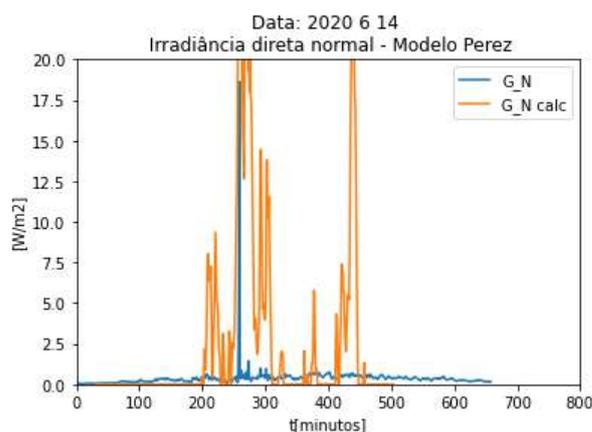


Fonte: Adaptado de LABENS.

### 3.1.4 Data 5–14/06/2020– Próximo ao Solstício de Inverno no Hemisfério Sul em Condição de Céu Nublado.

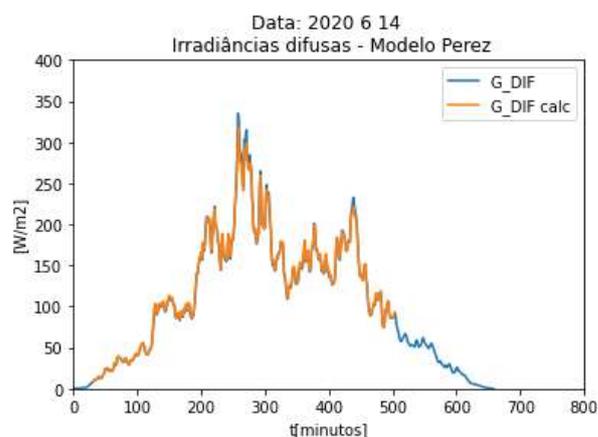
De acordo com o gráfico da Figura 72, em condição de céu nublado, a irradiância direta normal fica comprometida, preponderando a difusa, cujos valores estão presentes no gráfico da Figura 73.

**Figura 72- Irradiância direta normal – Data 5.**



Fonte: Adaptado de LABENS.

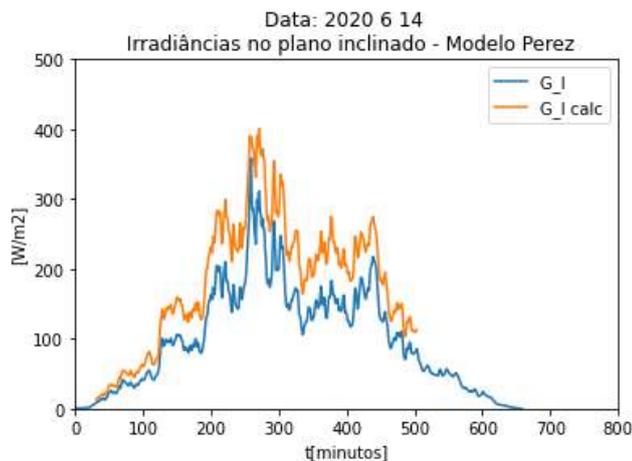
**Figura 73- Irradiância difusa – Data 5**



Fonte: Adaptado de LABENS.

Os resultados da irradiância no plano inclinado, assim como na data 4, apresentaram-se em torno de 60% maiores que os medidos, como verificado através da Figura 74.

**Figura 74 - Irradiância no plano inclinado – Data 5.**



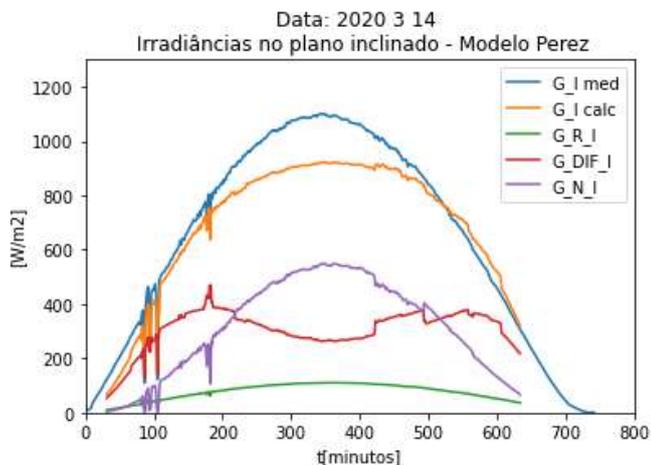
Fonte: Adaptado de LABENS.

### 3.2 DECOMPOSIÇÃO DAS IRRADIÂNCIAS NO PLANO INCLINADO.

Neste item são apresentadas as componentes das irradiâncias incidentes na superfície inclinada, avaliadas pelas equações do item 2.2.4, quais sejam: normal, refletida e difusa. A irradiância normal, de acordo com a equação (34), função da irradiância direta normal ( $G_N$ ) e do ângulo de incidência na superfície inclinada  $\theta$ , obtido pela equação (3).

#### 3.2.1 Data 1–14/03/2020– Próximo ao Equinócio de Outono no Hemisfério Sul.

**Figura 75 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 1.**



Fonte: Adaptado de LABENS.

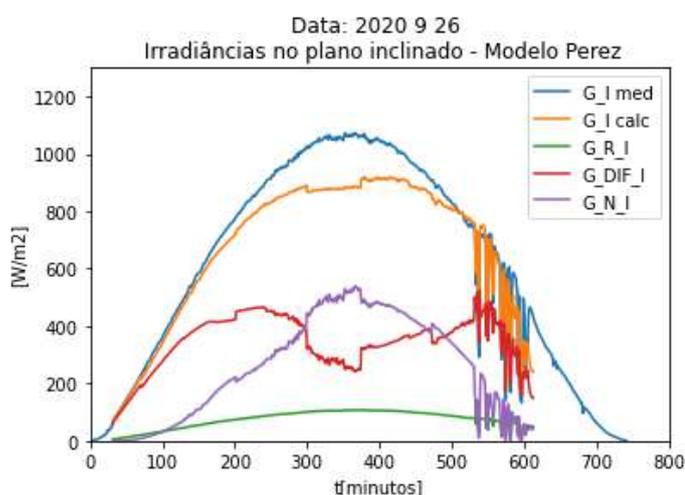
Neste caso, assim como apontado no item 3.1, a discrepância apontada nos valores calculados da irradiância direta normal ( $G_N$ ) acabam sendo transferidos para os valores de irradiância direta normal no plano inclinado ( $G_{N_I}$ ) neste modelo de transposição. Portanto, os valores calculados da irradiância incidente na superfície inclinada ( $G_I$ ) são questionáveis e necessitam ser investigados oportunamente.

Apesar destas discrepâncias, os valores das irradiâncias refletida ( $G_{R_I}$ ) e difusa ( $G_{DIF_I}$ ) são registrados nas proporções que cabem à cada uma através das equações (35) e (37).

### 3.2.2 Data 2–26/09/2020– Próximo ao Equinócio de Primavera no Hemisfério Sul.

Como já observado anteriormente, os comportamentos das curvas relativas às datas 1 e 2 são bastante parecidos, visto que nos equinócios, a posição do Sol com declinação nula é a mesma em relação à planta fotovoltaica, e também porque foram escolhidas datas de condições meteorológicas semelhantes e com pequenas oscilações de nebulosidade, no período matutino para a data 1 e vespertino na data 2.

**Figura 76 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 2.**



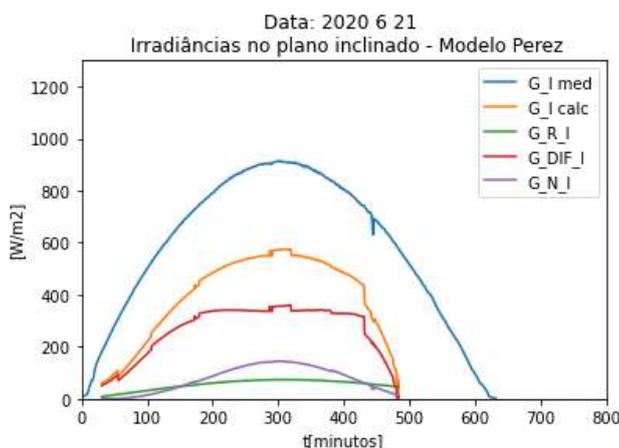
**Fonte: Adaptado de LABENS.**

### 3.2.3 Data 3–21/06/2020-Solstício de inverno no Hemisfério Sul.

Observações semelhantes feitas nas datas 1 e 2 podem ser aplicadas também para esta data, cujo gráfico encontra-se ilustrado na Figura 77, reforçando

apenas que, aquelas variações bruscas nos valores das irradiâncias no plano inclinado acabam sendo representadas aqui também. Isto, no entanto, não se observa na componente da irradiância direta normal no plano inclinado, já que estes valores são obtidos pela componente da irradiância normal direta sobre a superfície inclinada, registrada no gráfico da Figura 66.

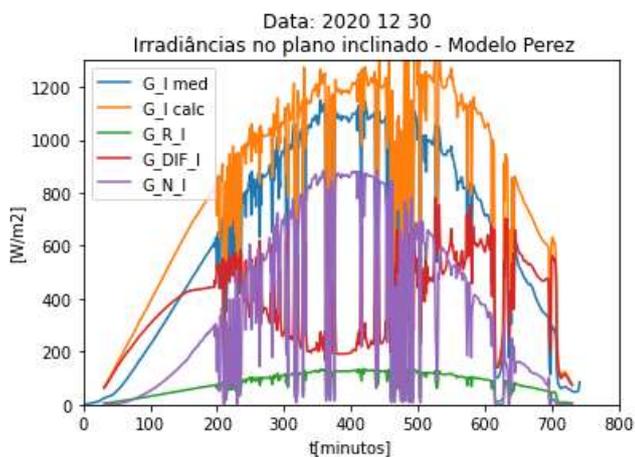
**Figura 77 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 3.**



**Fonte: Adaptado de LABENS.**

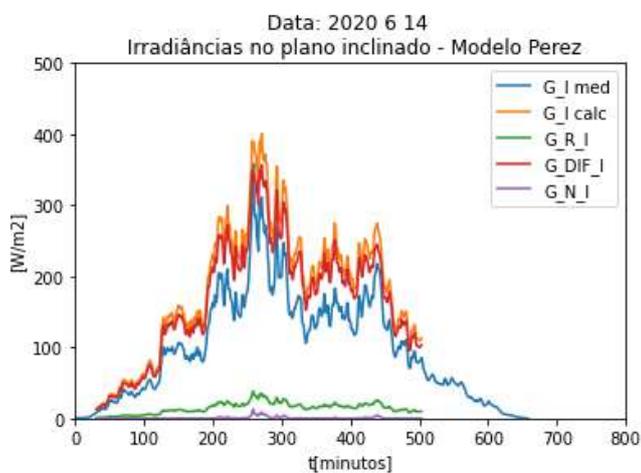
### 3.2.4 Data 4–30/12/2020– Próximo ao Solstício de Verão no Hemisfério Sul

Observando as curvas do gráfico da Figura 78 observa-se que os valores das irradiâncias diretas normais ( $G_{IN}$ ) são maiores em determinados momentos que nas outras datas em função dos menores valores dos ângulos de incidência sobre a superfície inclinada ( $\theta$ ) que são registrados ao longo do dia como já ilustrado na Figura 11.

**Figura 78 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 4.**

Fonte: Adaptado de LABENS.

3.2.5 Data 5–14/06/2020– Próximo ao Solstício de Inverno no Hemisfério Sul em Condição de Céu Nublado.

**Figura 79 - Decomposição de irradiâncias no plano inclinado – Data 5.**

Fonte: Adaptado de LABENS.

## 4 CONCLUSÃO

Foi elaborado um programa para avaliação da irradiância incidente em superfícies inclinadas baseado em dados experimentais de irradiância global e alimentado por modelos de irradiância difusa já conhecidos da literatura. Como observado no texto introdutório, modelos semiempíricos têm a finalidade de compensar a ausência de instrumentos de medição dispendiosos fornecendo, no lugar destes, estimativas de irradiâncias necessárias em aferições de sistema fotovoltaicos.

Os resultados foram comparados com dados experimentais de irradiância difusa, direta normal e direta sobre a superfície inclinada, obtidos de banco de dados da estação solarimétrica instalada na Sede Neville do Campus Curitiba da UTFPR.

Para avaliação das irradiâncias direta normal, difusa e direta horizontal foram utilizados os valores das irradiâncias globais medidas como dados de entrada nos modelos DISC de Maxwell (1987) e DIRINT de Perez, Ineichen *et al.* (1992) e as irradiâncias incidentes no plano inclinado por modelos de transposição das irradiâncias direta normal, refletida e, por fim a difusa pelo modelo de Perez. O programa foi escrito em linguagem script Python 3.8.3, por sua simplicidade, acessibilidade e portabilidade. Alguns testes preliminares foram feitos para fins de verificação das coordenadas celestes do Sol e do valor do ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície inclinada, sendo os resultados comparados com o programa SOLARCALC (SUNCALC). Além disso, foram avaliados os desvios entre os valores medidos das irradiâncias direta normal e difusa com os das irradiâncias globais, sendo constatado um desvio médio de 5,4% considerando os dados das cinco datas escolhidas.

Os valores das irradiâncias no plano inclinado foram calculados minuto a minuto ao longo do período fotosolar e os resultados foram apresentados na forma gráfica sobre os quais foi feita uma análise qualitativa para cada data escolhida.

Discrepâncias significativas foram observadas entre os valores de irradiância direta normal em todas os casos investigados, sendo os calculados subestimados em relação aos medidos. Por dependência direta, os valores das irradiâncias difusas foram superestimados em relação aos esperados. Dentre as possíveis razões, pode-se citar que, a aplicação do modelo DISC é recomendada pelo autor somente em localidades situadas entre as latitudes 28°N e 45°N. Esta informação já era conhecida

quando do conhecimento do modelo, porém, havia uma expectativa de que o perfil climatológico das localidades escolhidas no hemisfério norte pudesse ser aplicado de forma espelhada no hemisfério sul, mesmo na latitude 25 S, com desvios aceitáveis. Além disso, há uma outra restrição de que os valores do índice de claridade previstos no modelo DIRINT só possam ser aplicados em altitudes acima de 1000 m, diferentemente da estação solarimétrica deste trabalho, localizada numa região de clima subtropical e altitude de 932 m.

Constatada a discrepância esperada pela aplicação do modelo de irradiância difusa escolhida, este foi substituído pelo modelo de Souza (2020), que contempla dados geoclimatológicos da cidade de Curitiba-PR, obtidos da mesma estação solarimétrica. Neste caso, apenas a data 1 (14 de março) foi analisada e os resultados apresentaram uma significativa melhora, quando a diferença entre os valores de irradiância direta normal ficando em torno de 7,5%.

Apesar das diferenças apresentadas entre os valores de irradiâncias, as oscilações devido às variações na cobertura de nuvens foram satisfatoriamente reproduzidas. Outro ponto importante foi que, apesar dos valores subestimados das irradiâncias direta normais e os superestimados das difusas, estes desvios acabaram sendo compensados, e, exceto na data 3 (21 de junho), provocaram concordância satisfatória entre os valores medidos e calculados de irradiância incidente sobre a superfície inclinada.

A menos que os resultados deste trabalho sejam revistos quanto à possíveis discrepâncias de implementação do modelo, é prudente considerar que a utilização dos resultados não reproduza satisfatoriamente o comportamento dos valores de irradiância difusa e direta horizontal aplicando o modelo de Perez para cálculo da irradiância difusa. Entretanto, o mesmo não pode ser dito no caso dos valores de irradiância sobre a superfície inclinada que, na maioria dos casos apresentaram uma concordância considerável.

Para confirmar a suposição de aplicabilidade do modelo, ter-se-ia que reproduzir a metodologia de obtenção dos dados medidos tomando como referência localidades situadas no hemisfério sul com a maior diversidade geoclimatológica possível.

Por conta dos resultados apresentados há uma forte indicação de que o modelo de irradiância de Perez esteja provocando um sobredimensionamento das

potências de superfícies fotovoltaicas, por conta dos valores subestimados das irradiâncias direta normais.

Pela melhor concordância entre os valores de irradiância obtidos com a aplicação do modelo de Souza (2020), este trabalho aponta no sentido de aplicação do programa com dados de entrada que correspondam às equações de regressão de funções  $k_d \times k_t$ , ou modelos de Erbs adaptados a localidades específicas.

Para finalizar este capítulo, sugere-se como trabalhos futuros investigar a aplicação do modelo para maior número de datas e promovendo análise estatística entre os valores de irradiância calculados e medidos; validar resultados de irradiância no plano inclinado com valores de irradiância medidos em superfícies posicionadas próximas à estação solarimétrica com ângulo de inclinação e azimutes diferentes do ideal; implementar uma interface do programa com o usuário; realizar adaptação da metodologia utilizada pelo modelo de Perez utilizando dados de localidades situadas entre latitudes que englobem uma grande parte das regiões do território nacional, contemplando diversas condições geoclimatológicas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT 10899. Energia solar fotovoltaica — Terminologia. In: \_\_\_\_\_ **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS**. Rio de Janeiro.: [s.n.], 2020.
- ABSOLAR. **Benefícios da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil**. São Paulo. 2020. (24).
- AGAFONKIN, V. <http://suncalc.net/#/51.508,-0.125,2/2021.06.25/15:56>. **Sun Calc**, 25 jun. 2021.
- BERUSKI, G. C.; PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C. Desempenho de diferentes estimativas de radiação solar global em Ponta Grossa, PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 2, p. 205-2013, 2015.
- DA SILVA, M. K. **Estudo de modelos matemáticos para análise**. Campinas: Dissertação de Mestrado, 2019.
- DA SILVA, V. J. et al. Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. **Ciência Rural**, v. 12, n. 2, p. 276-282, Fevereiro 2012. ISSN 0103-8478.
- DRECHMER, P. A. O.; RICIERI, R. P. Irradição global, direta e difusa para a região de Cascavel, estado do Paraná. **Acta Sci. Technol.**, Cascavel, PR, v. 8, n. 1, p. 73-77, Janeiro 2006.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Process**. New Jersey: Wiley, 2013.
- EPE. **BEN 2021, Relatório Síntese**. EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas. Brasília. 2021.
- ERBS, D. G. . K. S. A. . D. J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction. **Solar Energy**, v. 28, n. 4, p. 293-302, 1982.

ESCOBEDO, J. F. et al. RADIAÇÕES GLOBAL, DIRETA E DIFUSA: II – MODELOS DE ESTIMATIVA DIÁRIOS, 2004. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/283219417>>.

FREITAS, D. V. . S. M. B. . T. E. A. . U. J. . J. . T. G. M. **COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE IRRADIAÇÃO NO PLANO**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, CE: [s.n.]. 2020.

GEO design internacional. **Geo design internacional**, 2021. Disponível em: <<http://recursosolar.geodesign.com.br/>>. Acesso em: 11 set. 2021.

GÓMEZ, J. M. . F.; VIEIRA, L. E.; DA SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, p. 12, 2018.

GOUVEIA, D. C. et al. **Comparação de resultados de Geração de energia elétrica de diferentes bases de dados de irradiação - estudo de casos em Curitiba**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte - MG: [s.n.]. 4 a 7 Abril 2016.

HAY, J. E.; DAVIES, J. A. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. **Solar Energy**, v. 3, n. 4, p. 301-307, 1979.

HE, W.; WANG, J. Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 87, p. 75-95, 2018. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)>.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 23, p. 111-114, 1979.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation to tilted surfaces. In: \_\_\_\_\_ **Solar Energy**. [S.I.]: Pergamon press Ltd., v. 23, 1979. p. 111-114.

LIU, B. Y. H. . J. R. C. **Solar Energy**, v. 4, p. 1 - 19, 1960.

LIU, B. Y. H. . J. R. C. The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors. **Solar Energy**, v. 7, n. 2, p. 53-74, 1963.

MACAGNAN, M. H. **Introdução à radiação solar**. São Leopoldo: [s.n.], 2010.

MAXWELL, E. L. **A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Isolation**. Solar Energy Research Institut. Golden. 1987.

ORGILL, J. F. . H. K. G. T. Correlational equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v. 19, p. 357-359, 1977.

PEREZ, R. et al. An anisotropic hourly radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation. **Solar Energy**, v. 36, n. 6, p. 481- 497, 1986. ISSN ISSN 0038092X.

PEREZ, R. et al. A new simplified version of the perez diffuse Irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 39, n. 3, p. 221-231, 1987.

PEREZ, R. et al. **The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model**. Albany - NY. 1988.

PEREZ, R. et al. Making full use of the clearness index for parameterizing insolation conditions. **Solar Energy**, v. 45, n. 2, p. 111 - 114, 1990.

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, p. 271 - 289, 1990.

PEREZ, R. et al. Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance – Prospects for performance improvements. **Solar Energy**, v. 44, p. 99 - 108, 1990b.

PEREZ, R. R. et al. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. In: \_\_\_\_\_ **ASHRAE Transactions**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 98, 1992. p. 354 - 369.

QU, Y. et al. Mapping Surface Broadband Albedo from Satellite Observations: A review of literatures and algorithms and products. **Remote Sens**, p. 990-1020, 2015.

RECIERI, R. P. et al. **Modelos de estimativa da radiação difusa diária em Cascave**. XXIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Viçosa: [s.n.]. 1995. p. 20-25.

REINDL, D. T. . B. W. A. . D. J. A. DIFFUSE FRACTION CORRELATIONS. **Solar Energy**, v. 45, n. 1, p. 1-7, 1990.

RIB Sol energia solar, 2021. Disponível em: <<https://ribsol.com.br/sistemas-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 11 set. 2021.

RIDLEY, B. . B. J. . L. P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictor. **Renewable Energy**, p. 478-483, 2010.

SCOLAR, J. . M. D. . E. J. F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 21, p. 3, 2003.

SILVEIRA, C. O. et al. **Estudo da Influência Causada pelas Diferenças Técnicas de Piranômetros na**. [S.l.], p. 1225. 2017.

SOUZA, A. P. et al. Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, n. 3, p. 277-288, 25 março 2011.

SOUZA, G. K.; MACAGNAN, M. H. **Comparação de modelos de radiação difusa horária a partir de dados medidos pela rede sonda em algumas cidades do Brasil**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado.: [s.n.]. 2018.

SOUZA, M. B. **Análise e estimativa das componentes da radiação solar**. Curitiba: [s.n.], 2020.

TIEPOLO, G. M. et al. **Atlas de energia solar do Paraná - Resultados**. Gramado: [s.n.]. 20 abril 2018.

TONIN, F. S. **Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na Cidade de Curitiba**. Curitiba: UTFPR, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) da, 2017.

URBANETZ JR., J. et al. Análise da operação de sistemas fotovoltaicos instalados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná., Fortaleza, CE., 2017.

YANG, R. L. et al. **Estimativa da taxa de desempenho a partir da potência de saída para um sistema fotovoltaico em Curitiba**. VIII Conferência Brasileira de Energia Solar - Fortaleza. Fortaleza: [s.n.]. 2020.