

MAURY MARTINS DE OLIVEIRA JUNIOR

**Avaliação por simulação de projetos para sistemas  
fotovoltaicos**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

O48a  
2015  
Oliveira Junior, Maury Martins de, 1989-  
Avaliação por simulação de projetos para sistemas  
fotovoltaicos / Maury Martins de Oliveira Junior. – Viçosa, MG,  
2015.  
xv, 78f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Delly Oliveira Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Radiação solar - Estimativas. 2. Medição de superfície.  
3. Modelos matemáticos. 4. Radiação solar - Medição.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.  
II. Título.

CDD 22. ed. 523.72

MAURY MARTINS DE OLIVEIRA JUNIOR

**Avaliação por simulação de projetos para sistemas  
fotovoltaicos**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de agosto de 2015



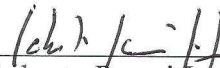
Elizabeth Marques Duarte Pereira



Paulo Marcos de Barros Monteiro



José Helvécio Martins



Roberto Frecci Lopes



Delly Oliveira Filho  
(Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Delly pela orientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho e na minha formação.

Aos Professores co-orientadores Aristides Ribeiro e Francisco de Assis Carvalho Pinto.

À CEMIG pela bolsa de pesquisa vinculado ao projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D ANEEL CEMIG D308. Ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG pelo apoio técnico e financeiro fornecido a esse trabalho.

Aos alunos de graduação Zachary Theodore Tyler e Edinei José Araújo Martins pela ajuda na realização dos trabalhos.

Pelos colegas do Departamento de Engenharia Agrícola pela cooperação nas disciplinas e contribuição na pesquisa.

Aos amigos da república, Maurício, Gustavo, Zé Campos, Douglas e Thales, pela amizade e companheirismo.

Aos familiares e amigos que me incentivaram e apoiaram nesta fase do meu desenvolvimento profissional e pessoal.

## **BIOGRAFIA**

Maury Martins de Oliveira Júnior nasceu no dia 25 de fevereiro de 1989 em Belo Horizonte, Minas Gerais. Filho de Conceição Aurea Vieira Aguiar e Maury Martins de Oliveira Neto.

Ingressou no curso de Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais no ano de 2008, tendo colado grau em 09 de agosto de 2013.

Em agosto de 2013 iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Energia, concentrando suas pesquisas na área de energia solar fotovoltaica.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS .....	ix
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Energia fotovoltaica no contexto da demanda mundial e regional de energia elétrica .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Conteúdo dos capítulos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>3</b>
<b>2. OTIMIZAÇÃO DA INCLINAÇÃO E DA ORIENTAÇÃO SOBRE A RADIAÇÃO ANUAL INCIDENTE .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Introdução .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1. Radiação solar .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.2. Geometria solar .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.3. Radiação solar extraterrestre .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.4. Radiação solar incidente sobre a superfície terrestre .....</b>	<b>11</b>
<b>2.3. Metodologia .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5. Conclusão .....</b>	<b>26</b>
<b>2.6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>26</b>
<b>3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM RASTREAMENTO SEM RETROALIMENTAÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1. Introdução .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2. Rastreamento solar .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3. Metodologia .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5. Conclusões .....</b>	<b>47</b>
<b>3.6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>48</b>
<b>4. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1. Sugestões de trabalhos futuros .....</b>	<b>54</b>
Apêndice: Rotina em Octave .....	55

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 – Dias médios recomendados para cada mês e seu valor em dia do ano, válido para valores absolutos de latitude  $|\phi| \leq 66,5^\circ$ .
- Tabela 2.2 – Coeficientes de brilho do modelo de Perez em função da faixa do parâmetro de claridade,  $\varepsilon$ .
- Tabela 2.3 – Valores de inclinação,  $\beta$ , e orientação,  $\gamma$ , para o ponto com maior incidência de radiação solar total anual, respectiva radiação solar anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, radiação solar total anual para superfície com ângulo de inclinação igual à latitude,  $\beta = \phi$  e orientada em direção ao norte,  $\gamma = 180^\circ$ , radiação solar total anual para superfície horizontal e aumento da radiação solar incidente máxima em relação à superfície horizontal para diferentes localidades.
- Tabela 3.1 – Desempenho de sistema de rastreamento biaxial ideal, i.e. superfície sempre perpendicular aos raios solares, em relação a um sistema com inclinação igual à latitude e orientado em direção ao norte

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Geometria da radiação solar direta.
- Figura 2.2 – Distribuição da radiação difusa dividida em suas três parcelas mais a radiação refletida pelo sol.
- Figura 2.3 – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Manaus, AM, 3,1°S.
- Figura 2.4 – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Garanhuns, PE, 8,88°S.
- Figura 2.5 – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Brasília, DF, 15,77°S.
- Figura 2.6 – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Belo Horizonte, MG, 19,8°S.
- Figura 2.7 – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Campo Grande MS, 20,43°S.
- Figura 2.8 – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Joaçaba, SC, 27,17°S.
- Figura 2.9 – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de São Gabriel, RS, 30,33°S.
- Figura 3.1 – Aumento no desempenho de um sistema de rastreamento uniaxial em relação a um sistema fixo com inclinação de 25° (Drury et al., 2014).
- Figura 3.2 – Aumento no desempenho de um sistema com rastreamento biaxial em relação a um sistema fixo com inclinação de 25° (Drury et al., 2014).
- Figura 3.3 – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Manaus, AM (3° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .

- Figura 3.4 – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Garanhuns, PE (8° S), para os algoritmos de sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .
- Figura 3.5 – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Brasília, DF (15° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .
- Figura 3.6 – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Belo Horizonte, MG (19° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .
- Figura 3.7 – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Campo Grande, MS (20° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .
- Figura 3.8 – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Joaçaba, SC (27° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .
- Figura 3.9. – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de São Gabriel, RS (30° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .
- Figura 3.10 - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Manaus, AM (3° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .
- Figura 3.11 - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Garanhuns, PE (8° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

- Figura 3.12 - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Brasília, DF (15° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .
- Figura 3.13 - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Belo Horizonte, MG (19° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .
- Figura 3.14 - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Campo Grande, MS (20° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .
- Figura 3.15 - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Joaçaba, SC (27° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .
- Figura 3.16 - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação  $\beta$  igual à latitude local  $\phi$  em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de São Gabriel, RS (30° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	-	Altitude local, m;
$A_i$	-	Índice de anisotropia, adimensional;
$F_1$	-	Coefficiente circunsolar, adimensional;
$F_2$	-	Coefficiente de clareamento do horizonte, adimensional;
$F_{c-hz}$	-	Fator de forma do coletor para o horizonte, adimensional;
$F_{c-s}$	-	Fator de forma do coletor (superfície) para o céu, adimensional;
$F_{c-solo}$	-	Fator de forma do coletor para o solo, adimensional;
$f$	-	Fator de correção, adimensional;
$G$	-	Radiação solar global em superfície horizontal, W/m <sup>2</sup> ;
$G_c$	-	Radiação solar global incidente em dia claro sobre superfície horizontal, W/m <sup>2</sup> .
$G_{c,dif}$	-	Radiação solar difusa incidente em dia claro sobre superfície horizontal, W/m <sup>2</sup> ;
$G_{c,dir}$	-	Radiação solar direta incidente em dia claro sobre superfície horizontal, W/m <sup>2</sup> ;
$G_{cs}$	-	Constante solar, W/m <sup>2</sup> ;
$G_o$	-	Radiação solar extraterrestre incidente em uma superfície horizontal, W/m <sup>2</sup> ;
$G_{o,n}$	-	Radiação solar extraterrestre em uma superfície perpendicular aos raios solares, W/m <sup>2</sup> ;
$H$	-	Radiação solar global diária incidente em uma superfície horizontal, J/m <sup>2</sup> ;
$H_{inc}$	-	Radiação solar global diária incidente sobre superfície inclinada, J/m <sup>2</sup> .
$H_o$	-	Radiação solar extraterrestre diária incidente em uma superfície horizontal, J/m <sup>2</sup> ;

$I$	-	Radiação solar global horária incidente em uma superfície horizontal, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dif}$	-	Radiação solar difusa horária para superfície horizontal, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dif,cs}$	-	Radiação solar difusa horária circunsolar, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dif,hz}$	-	Radiação solar difusa horária devido ao clareamento do horizonte, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dif,inc}$	-	Radiação solar difusa horária para superfície inclinada, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dif,iso}$	-	Radiação solar difusa horária isotrópica, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dir}$	-	Radiação solar direta horária para superfície horizontal, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dir,inc}$	-	Radiação solar direta horária para superfície inclinada, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{dir,n}$	-	Radiação solar direta horária sobre superfície normal aos raios solares, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{inc}$	-	Radiação solar global horária sobre superfície inclinada, J/m <sup>2</sup> ;
$I_o$	-	Radiação solar extraterrestre horária incidente em uma superfície horizontal, J/m <sup>2</sup> ;
$I_{o,n}$	-	Radiação solar extraterrestre horária incidente sobre superfície normal aos raios solares, J/m <sup>2</sup> ;
$K_t$	-	Índice de claridade em média diária, adimensional;
$k_{dif}$	-	Fração da radiação solar difusa horária em relação à radiação solar global, em média horária, adimensional;
$k_t$	-	Índice de claridade em média horária, adimensional;
$m$	-	Massa de ar, adimensional;
$n$	-	Número do dia do ano, adimensional;
$R_{dir}$	-	Fração da radiação direta em superfície inclinada sobre a radiação direta em superfície horizontal, adimensional;
$r_t$	-	Fração da radiação solar horária em relação à radiação solar diária, adimensional;
$\alpha_s$	-	Ângulo de elevação solar, °;
$\beta$	-	Ângulo de inclinação da superfície, °;
$\gamma$	-	Ângulo de azimute da superfície, °;
$\gamma_s$	-	Ângulo de azimute solar, °;
$\Delta$	-	Parâmetro de brilho da abóbada celeste, adimensional;
$\delta$	-	Declinação solar, °;
$\varepsilon$	-	Parâmetro da claridade da abóbada celeste, adimensional;
$\theta$	-	Ângulo de incidência da componente direta da radiação solar, °;

$\theta_z$	-	Ângulo zenital, °;
$\lambda$	-	Comprimento de onda, $\mu\text{m}$ ;
$\rho_{solo}$	-	Refletividade do solo, adimensional;
$\tau_{dif}$	-	Índice de transmissividade da atmosfera para a radiação solar difusa, adimensional;
$\tau_{dir}$	-	Índice de transmissividade da atmosfera para a radiação solar direta, adimensional;
$\phi$	-	Latitude, °;
$\omega$	-	Ângulo solar, °;
$\omega_1$	-	Ângulo horário no início do intervalo, °;
$\omega_2$	-	Ângulo horário no final do intervalo, °; e
$\omega_s$	-	Ângulo horário de pôr do sol, °.

## RESUMO

OLIVEIRA JUNIOR, Maury Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2015. **Avaliação por simulação de projetos de sistemas fotovoltaicos**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Aristides Ribeiro e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

O presente trabalho teve como objetivo o estudo dos efeitos da inclinação e orientação de uma superfície absorvedora sobre a radiação solar anual incidente e do potencial de aumento da radiação incidente por meio de sistemas de rastreamento em dois eixos com controle sem retroalimentação para sete cidades brasileiras distribuídas pelo Brasil com latitudes variando de 3° S a 30° S. Os efeitos da inclinação e orientação de sistemas fixos sobre a radiação solar anual incidente foram avaliados com base em dados típicos de radiação solar global em superfície horizontal. Foi observado que os conjuntos de valores fixos de inclinação e orientação que resultavam na máxima radiação solar incidente apresentavam um aumento na radiação de até 6,44 % em relação a superfícies horizontais. Este aumento foi nulo para a cidade de Manaus, AM (3° S) e aumentou gradativamente até 6,44 % para a cidade de São Gabriel (30° S), cidades de menor e maior latitude estudadas, respectivamente. Para as cidades com as menores latitudes estudadas, i.e. 3° S e 8° S, a orientação do sistema não influenciou de forma significativa a radiação incidente, para valor fixo de inclinação do sistema. Nestes casos, a radiação solar anual incidente permaneceu acima de 98 % da radiação solar máxima encontrada para as respectivas cidades independente da orientação do sistema. Esta influência se tornou mais significativa a medida que o valor de latitude aumentou encontrando-se que a orientação pode apresentar um desvio de 35° em relação a orientação com máxima radiação solar incidente, ou seja, em direção ao norte, para o caso de São Gabriel, RS, com latitude de 30° S. A inclinação com máxima radiação solar incidente do sistema apresentou valores inferiores aos valores tradicionalmente indicados, i.e., inclinação igual à latitude, para todas as cidades, para orientação fixa em direção ao norte. Nesse caso, a inclinação igual

à latitude pertencia à faixa de valores que recebem radiação solar superior a 98 % da radiação máxima para todos os casos estudados. A avaliação dos sistemas de rastreamento em dois eixos e controle sem retroalimentação foi realizada por meio de simulações com cinco tipos de algoritmos de rastreamento solar. O primeiro algoritmo realiza a reorientação do sistema em função do intervalo entre valores do ângulo horário  $d\omega$ , o segundo em função da diferença entre o ângulo de incidência e seu valor ideal i.e., superfície sempre perpendicular aos raios solares,  $d\theta$ , o terceiro em função da diferença entre o ângulo de inclinação e no seu valor ideal  $d\beta$ , o quarto em função da diferença entre o ângulo de azimute e seu valor ideal  $d\gamma$  e o quinto em função da combinação das duas diferenças anteriores  $dE$ . Os desempenhos dos algoritmos foram comparados por meio das médias anuais do número de reorientações diárias requerido para que a radiação incidente sobre a superfície fosse superior a 95 % da radiação solar no caso de rastreamento ideal, i.e. superfície sempre perpendicular à radiação solar. Os melhores resultados foram obtidos para as cidades estudadas com valor intermediário de latitude, i.e. Brasília, Belo Horizonte e Campo Grande. Foi observado ainda que a discrepância entre todos os algoritmos analisados foi menor para as cidades com maior valor de latitude. Foi obtido um melhor desempenho dos algoritmos com base em  $d\omega$  e  $d\theta$  para todas as cidades, sendo superior a 95 % da radiação no caso ideal e com uma média anual de cerca de 12 reorientações diárias. O quinto algoritmo estudado, com base em  $dE$ , avaliou combinações de pesos para os critérios  $d\gamma$  e  $d\beta$ , obtendo-se desempenho intermediário entre os algoritmos baseados em  $d\omega$  e  $d\beta$ . Portanto, o algoritmo de rastreamento com base no ângulo horário foi considerado o mais indicado por apresentar maior incidência de radiação na superfície absorvedora para uma menor média de reorientações diárias e apresentar maior simplicidade de implementação.

## ABSTRACT

OLIVEIRA JÚNIOR, Maury Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2015. **Evaluation by simulations of photovoltaic systems design.** Advisor: Delly Oliveira Filho. Co-advisors: Aristides Ribeiro and Francisco de Assis Carvalho Pinto.

The objective of this work was to study the effects of the inclination and orientation of a surface on its annual incident radiation through simulations and the potential increase in the incident radiation by the use of open-loop dual axis tracking control systems for seven Brazilian cities with latitudes varying from  $3^{\circ}$  S to  $30^{\circ}$  S. The effects of the inclination and orientation of fixed system on the annual incident solar radiation based on typical annual solar radiation data for horizontal surfaces were evaluated. It was obtained that the set of inclination and orientation values with maximum solar radiation provided gains in incident solar radiation of up to 6.44 % over horizontal surfaces. There was no gain for the city of Manaus, AM ( $3^{\circ}$  S) and increased up to 6.44 % for the city of São Gabriel, RS ( $30^{\circ}$  S), cities with the lowest and highest values of latitude, respectively. For the studied cities with lowest latitudes, i.e.  $3^{\circ}$  S and  $8^{\circ}$  S, the system orientation did not affect significantly the incident solar radiation, for a fixed inclination angle. In such cases, the yearly incident solar radiation remained above 98 % of the maximum estimated solar radiation independent of the system orientation. This effect becomes more significant as the latitude rises and it was obtained that the orientation can have a deviation of up to  $35^{\circ}$  in relation to the orientation with maximum value of incident solar radiation, i.e. oriented towards the north, for the city of São Gabriel, RS ( $30^{\circ}$  S). The system inclination with maximum incident solar radiation values was found to be lower than the usually indicated values, i.e., inclination equal to the latitude, for all locations studied, for surfaces oriented towards the north. In such cases, the inclination equal to the latitude belonged to the range of values that resulted in radiation higher than 98 % of the optimal case, in all studied cases. The evaluation of dual axis open loop solar tracking systems consisted in the

simulation of five types of solar tracking algorithms. The first based on the interval between solar hour  $d\omega$ , the second based on the difference between the incidence angle and its ideal value  $d\theta$ , the third based on the difference between the inclination and its ideal value  $d\beta$ , the fourth based on the difference between the orientation and its ideal value  $d\gamma$  and one algorithm based on the combination of the two latter differences  $dE$ . The performance of the algorithms were compared using the annual mean values of daily reorientations required to receive at least 95 % of the radiation received in the ideal case, i.e. surface always perpendicular to the solar radiation. The biggest gains were obtained for surfaces located in the studied cities with intermediary values of latitude, i.e. Brasilia, Belo Horizonte and Campo Grande. It was also observed that the difference between the algorithms became smaller as the value of local latitude increased. For all cities the best performance was obtained for the algorithms based on  $d\omega$  and  $d\theta$ , reaching 95 % of the ideal case radiation and with an annual mean of 12 daily reorientations. The algorithms based on  $dE$  were studied varying the weights given to  $d\gamma$  and  $d\beta$ , obtaining intermediary performance between the algorithms based on  $d\omega$  and based on  $d\beta$ . Therefore, the algorithm based solely on the hour angle was found to be the most appropriate for the evaluated cases as it provides higher energy for lower values of yearly mean number of daily reorientations and is simpler to implement.

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1. Energia fotovoltaica no contexto da demanda mundial e regional de energia elétrica**

O consumo mundial de energia apresentou crescimento anual médio 1,5 % nos últimos anos. No ano de 2014 foi observada pela primeira vez em 40 anos a estabilização das emissões de gás carbônico associadas ao consumo de energia, em parte devido a maior penetração das energias renováveis e ao aumento da eficiência no uso da energia, conforme apresentado pelo Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> century (REN21, 2015). Estima-se que cerca de 19,1 % do consumo global de energia e 22,8 % do consumo de energia elétrica seja fornecido a partir de fontes renováveis. O consumo global de energia elétrica a partir de fontes renováveis é composto por cerca de 72,8 % de energia hidroelétrica, seguido de 13,6 % de energia eólica, 7,9 % de bioenergia e 3,9 % de solar fotovoltaica. A geração mundial de energia elétrica a partir de fontes renováveis cresce a uma taxa média de 5,9 % ao ano. No ano de 2014 as energias eólica e solar fotovoltaica obtiveram crescimento recorde em sua capacidade de geração de energia, sendo adicionados 51 GWp e 40GWp no ano de 2014, respectivamente. Além disso, dos 177 GWp de capacidade global de geração da energia solar fotovoltaica, mais de 60 % foram instalados nos últimos três anos (REN21, 2015). Um dos fatores que incentivou este crescimento da energia solar fotovoltaica foi a redução no custo dos módulos fotovoltaicos. O custo de módulos fotovoltaicos de silício, que são utilizados na maioria dos sistemas disponíveis no mercado fotovoltaico, representando cerca de 87 % do mercado em 2011, apresentaram redução no custo de cerca de 45 % somente no período de 2010 ao início de 2012 (Candelise et al, 2013).

A expansão média das capacidades instaladas de fontes renováveis de energia elétrica no Brasil foi de cerca de 10,7 % ao ano. A potência instalada de sistemas de energia solar fotovoltaica no Brasil ainda é pequena, em relação a países da OCDE, apesar dos elevados níveis de radiação solar em grande parte do território brasileiro. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2033 desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), empresa vinculada ao Ministério de Minas e Energia há uma projeção de que em 2033 a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica atinja os 664 MWp. Somente no ano de 2015 foram planejados três leilões de energia de reserva (LER). O primeiro LER contratou um total de 30 empreendimentos de energia fotovoltaica com capacidade instalada de 1.043 MWp (EPE, 2015a). O segundo LER, marcado para o dia 13 de novembro de 2015, bateu recorde de projetos cadastrados, 646

para energia fotovoltaica e 730 para energia eólica, com capacidades instaladas de 20.953 MWp e 17.964 MWp, respectivamente (EPE, 2015b).

Assim como o aumento da potência instalada, a energia solar foi assunto de um número crescente de artigos científicos. De acordo com Du et al. (2014), a taxa de publicações científicas na área de energia solar a partir de 2006 sofreu um aumento anual médio superior a 15 %, elevando-se de 350 em 2006 para 1004 publicações em 2011, considerando somente artigos nas bases de dados do Science Citation Index e do Social Science Citation Index. Neste sentido, pode-se destacar o tema de energia e combustível como o de maior número de publicações no intervalo de 1992-2011 (Du et al., 2014).

Grande parte destes estudos teve como objetivo a redução do custo da instalação ou aumento na eficiência da produção de energia a partir de módulos fotovoltaicos, de forma a acelerar a inserção desta tecnologia no mercado. Dentre estes estudos encontram-se: (i) estudos de avaliação do ângulo de inclinação do sistema; (ii) desenvolvimento de novas tecnologias de células fotovoltaicas; (iii) utilização de estruturas refletoras para o incremento da radiação incidente sobre o módulo; (iv) estudo de sistemas de rastreamento solar; e (v) desenvolvimento de seguidores da máxima transferência de potência, reduzindo por exemplo os efeitos das variações da temperatura e do sombreamento sobre o desempenho dos sistemas.

A definição do ângulo de inclinação de um módulo fotovoltaico fixo já foi alvo de diversos estudos e, de acordo com Yadav e Chandel (2013), apesar da regra mais utilizada, i. e., a de se utilizar uma inclinação igual a latitude, ser adequada na maioria dos casos, esta pode levar a um superdimensionamento do sistema, acarretando em aumento nos custos do sistema. Um exemplo de fator que pode alterar na recomendação técnica da inclinação do sistema é a variação da nebulosidade local ao longo do ano. A variação do ângulo de inclinação,  $\beta$ , e do ângulo de azimute,  $\gamma$ , do sistema fotovoltaico tem efeito direto na quantidade de energia incidente nos módulos e a sua determinação é de grande importância. O ângulo  $\beta$  influencia também no número máximo de painéis que podem ser alocados em determinada área, devido a distância que deve ser mantida entre módulos para se evitar o sombreamento entre eles.

O uso de rastreamento solar é uma alternativa que pode aumentar a energia anual recebida pelo sistema em cerca de até 50 %. O rastreamento solar também é necessário em instalações com alta concentração de radiação e que requerem que o sistema esteja orientado em direção ao Sol para garantir uma distribuição uniforme da radiação sobre o módulo fotovoltaico. Sistemas fotovoltaicos com alta concentração da radiação requerem o uso de células com maior resistência à valores elevados de radiação e temperatura, o

que aumenta o custo do sistema. O rastreamento solar é uma alternativa utilizada em nível comercial, como na base aérea de Nellis e em cerca de 37 % das instalações fotovoltaicas na Espanha (Gómez-Gil et al., 2012). O rastreamento solar pode ser realizado em um ou dois eixos e pode utilizar um sistema de controle com retroalimentação, que utilizam sensores de medição, que podem ser sensores de radiação por exemplo, ou sem retroalimentação, que utilizam cálculos da posição do Sol com base no dia, hora e local de instalação. No entanto, a utilização da reorientação dos módulos implica em um aumento no investimento inicial e nos gastos com a manutenção do sistema, além de também consumir parte da energia extra gerada.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da variação da inclinação e da orientação sobre o valor da radiação anual recebida e do uso de rastreadores solares de dois eixos com controle sem retroalimentação por meio de simulação para localidades com radiação solar observadas contrastantes no território brasileiro.

## **1.2. Conteúdo dos capítulos**

Esta dissertação está dividida da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma avaliação por meio de simulação dos efeitos da variação da inclinação e da orientação sobre a radiação incidente para sistemas fixos para o período de um ano, com base em valores típicos de radiação solar para sete cidades brasileiras. Foram realizadas simulações para uma série de valores de inclinação e de orientação de superfícies, obtendo-se a radiação solar anual incidente para cada caso. Os objetivos foram obter a orientação e inclinação ótimas para o aproveitamento da radiação solar e servir de ferramenta de auxílio ao dimensionamento de sistemas de energia solar fotovoltaica.

O capítulo 3 apresenta uma comparação de cinco tipos de algoritmos de controle sem retroalimentação para sistemas de rastreamento solar em dois eixos para as sete cidades brasileiras selecionadas. O objetivo deste capítulo foi de avaliar o aumento na radiação incidente para os algoritmos estudados em função do número de reorientações diárias tendo como caso base a orientação em função do ângulo horário.

O capítulo 4 apresenta as conclusões finais do trabalho.

## **1.3. Referências Bibliográficas**

Candelise, C.; Winkler, M.; Gross, R.J.K.. 2013. *The dynamics of solar PV costs and prices as a challenge for technology forecasting*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 26, 96–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.012> .

Du, H.; Li, N.; Brown, M.A.; Peng, Y.; Shuai, Y. 2014. *A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: the expansion and evolution of a research field*. Renewable Energy 66, 696–706. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.018> .

Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. 2014. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*, Brasília: MME/EPE.

Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. 2015. *1º Leilão de Energia de Reserva 2015 garante investimentos de R\$ 4,3 bi no país*, Brasília: MME/EPE. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/1%C2%BA%20Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202015/1%C2%BALeil%C3%A3odeEnergia%20de%20Reserva2015contata1GWpdeenergiasolar.aspx> .

Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. 2015. *Inscrição para 2º LER 2015 bate recorde: 1.379 projetos de energia eólica e solar*, Brasília: MME/EPE. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/1%C2%BA%20Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202015/1%C2%BALeil%C3%A3odeEnergia%20de%20Reserva2015contata1GWpdeenergiasolar.aspx> .

Gómez-Gil, F.J.; Wang, X.; Barnett, A., 2012. *Energy production of photovoltaic systems: fixed, tracking, and concentrating*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 306–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.156> .

Martins, F.R.; Pereira, E.B., 2011. *Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil*. Energy Policy 39. 4378–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.058> .

Renewable Energy Policy Network for the 21st century, REN21, 2015. *Renewables 2015 Global status report*. (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9815934-6-4.

Yadav, A. K.; Chandel, S. S., 2013. *Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 503–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027> .

## 2. OTIMIZAÇÃO DA INCLINAÇÃO E DA ORIENTAÇÃO SOBRE A RADIAÇÃO ANUAL INCIDENTE

### 2.1. Introdução

A geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos, em grande parte dos empreendimentos, se dá a partir de módulos fixos dispostos ao longo de uma determinada superfície, que pode ser um telhado ou uma planície por exemplo. O potencial de geração de energia ao longo da vida útil deste sistema depende de sua geometria em relação ao Sol e da latitude local, sendo esta geração variável ao longo do dia e do ano.

A posição do Sol no céu é definida pelos ângulos de azimute solar  $\gamma_s$  e de zênite  $\theta_z$ , enquanto a geometria da superfície é determinada por sua inclinação, medida pelo ângulo de inclinação  $\beta$ , e por sua orientação, medida pelo ângulo de azimute da superfície  $\gamma$ . Os ângulos  $\gamma_s$  e  $\theta_z$  dependem da latitude local, da hora do dia e do dia do ano. Uma regra de projeto amplamente difundida é a utilização de  $\beta$  igual ao valor absoluto da latitude local com a superfície orientada em direção ao norte, caso a superfície esteja no hemisfério sul, ou em direção ao sul, para o hemisfério norte. Vários estudos avaliaram a inclinação ótima para diferentes localidades e foi observado que, apesar de esta regra ser adequada em muitos casos, ela pode levar a um superdimensionamento do sistema, elevando os custos do empreendimento. É aconselhável, portanto, o estudo da melhor inclinação e orientação do sistema para cada caso particular sendo importante, também, o estudo dos modelos de radiação mais adequados para o local (Yadav e Chandel, 2013).

Bakirci (2012) obteve os ângulos ótimos de inclinação para oito cidades na Turquia por meio de simulação obtendo inclinações ótimas de 5,25° a 9,2° inferiores à latitude local e aumento na radiação incidente da ordem de 6,0 % em relação a sistemas com inclinação igual à latitude (que neste estudo variou de 36,6° N a 41,2° N). Jafarkazemi e Saadabadi (2013) obtiveram a inclinação ótima de 22,0° para a cidade de Abu Dhabi, cuja latitude é de 24,4° N, usando um método empírico com base nos valores de radiação medidos para uma superfície horizontal e com um aumento da 5,7 % em relação a um sistema posicionado no plano horizontal. No trabalho de Khorasanizadeh et al. (2014) foi obtida a inclinação ótima de 32,0° para a cidade de Tabass, Iran, com latitude de 33,4° N e aumento de 13,8 % por meio da estimativa da radiação incidente com base em modelos empíricos e na radiação em superfície horizontal. Kamanga et al. (2014) realizaram um experimento no distrito de Zomba (15° S 35° L) em que foram realizadas medições da radiação incidente ao longo de um ano para quatro sistemas fotovoltaicos

com inclinações de 0°, 15°, 20° e 25°, sendo obtido que o sistema com 25° apresentou os maiores valores de radiação incidente, que foi cerca de 4,4 % superior ao sistema horizontal. Khario et al. (2015) avaliaram nove modelos de radiação difusa para serem usados na estimativa da radiação em uma superfície inclinada e obtiveram o ângulo de inclinação ótimo de 23 ° para a cidade de Sindh, Paquistão (25° N) e aumento de 17,8 % no valor da radiação incidente em relação a superfícies horizontais. Assim, esta pesquisa se justifica por não haver uma linearidade entre os valores indicados pelas pesquisas anteriores, o que pode ser explicado por outros fatores climáticos, como a nebulosidade.

Os objetivos específicos desse capítulo são: (i) obter os ângulos de inclinação e azimute que resultem na máxima incidência de energia sobre a superfície, (ii) obter a radiação incidente para diferentes valores de ângulo de incidência e orientação; e (iii) calcular as faixas de valores para os quais uma superfície recebe mais de 98 % da radiação incidente no caso com máxima incidência de radiação solar para sete cidades no Brasil com diferentes latitudes e altitudes.

## **2.2. Revisão bibliográfica**

Inicialmente será apresentada uma revisão da bibliografia básica de radiação solar com o objetivo de introduzir os conceitos e nomenclatura utilizados neste trabalho usando Duffie e Beckman (2006) como a principal referência.

### **2.2.1. Radiação solar**

O Sol emite radiação aproximadamente como um corpo negro a uma temperatura de cerca de 5.800 K, concentrando-se nos comprimentos de onda ( $0,2 \mu m \leq \lambda \leq 3,0 \mu m$ ) do espectro com pico em  $\lambda \approx 0,5 \mu m$ . O fluxo de energia solar diminui à medida que a radiação se afasta do Sol até chegar ao limite externo da superfície terrestre (Incropera et al., 2008). A radiação extraterrestre varia cerca de  $\pm 3,3 \%$  devido à variação da distância entre a Terra e o Sol, sendo que a distância média entre os centros do Sol e da Terra é de  $1,495 \times 10^{11}$  m. À medida que a radiação atravessa a atmosfera ela sofre alterações em sua intensidade e direção devido à absorção e espalhamento pelos constituintes da atmosfera. A parcela da radiação solar que sofre efeito de dispersão pela atmosfera é chamada de radiação solar difusa e a parcela que não sofre variação em sua direção, é denominada radiação solar direta (Duffie e Beckman, 2006).

A radiação recebida por  $m^2$  de superfície à distância média Sol Terra no topo da atmosfera terrestre e perpendicular à direção de propagação da radiação solar por unidade

de tempo tem valor quase fixo e é definida como constante solar,  $G_{cs} = 1.367 \text{ W/m}^2$ . A radiação extraterrestre incidente em uma superfície perpendicular à radiação solar  $G_{o,n}$  pode ser calculada em função do dia do ano  $n$  conforme a Equação 2.1 (Duffie e Beckman, 2006).

$$G_{o,n} = G_{cs} (1,00010 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B) \quad (2.1)$$

em que,

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.2)$$

### 2.2.2. Geometria solar

O Sol varia sua posição em relação ao plano do Equador ao longo do ano, o ângulo definido pela posição angular do Sol e o plano do Equador ao meio-dia solar é definido como ângulo de declinação solar  $\delta$ , que adota valor positivo quando sobre o hemisfério norte e negativo no hemisfério sul. O valor de  $\delta$  varia de  $-23,45^\circ$  sobre o trópico de capricórnio a  $+23,45^\circ$  sobre o trópico de câncer, podendo ser calculado pela Equação 2.3 (Duffie e Beckman, 2006).

$$\delta = 180/\pi (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002679 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \quad (2.3)$$

O deslocamento angular do Sol a leste e a oeste do meridiano local devido à rotação da Terra é definido como ângulo horário  $\omega$ , sendo que neste estudo será utilizada a convenção de valores negativos de  $\omega$  para a manhã e positivos durante a tarde. Além do ângulo de declinação e ângulo horário, a posição solar também é descrita em função da latitude local  $\phi$  em que será avaliada a incidência da radiação pelos ângulos de zênite  $\theta_z$  e de azimute solar  $\gamma_s$ . O ângulo  $\theta_z$  é definido como o ângulo entre a vertical e a direção de incidência da radiação direta e pode ser obtido pela Equação 2.4 (Duffie e Beckman, 2006).

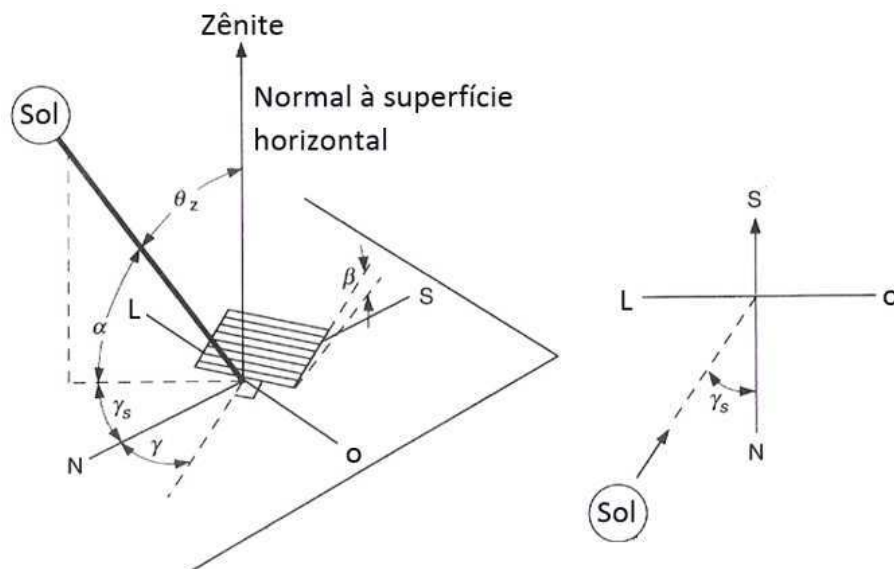
$$\theta_z = \arccos(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (2.4)$$

O ângulo de azimute solar  $\gamma_s$  é definido como o ângulo entre a projeção da direção da radiação solar direta sobre a horizontal e a linha norte-sul, neste estudo será utilizada a convenção de leste negativo e oeste positivo para  $\gamma_s$ . O ângulo de azimute solar pode ser calculado pela Equação 2.5 (Duffie e Beckman, 2006).

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \arccos \left( \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (2.5)$$

Outro ângulo frequentemente usado é o ângulo de elevação solar  $\alpha_s$  que é definido como o ângulo entre a horizontal e a direção da radiação direta, ou seja, é ângulo complementar de  $\theta_z$ , isto é,  $\alpha_s = 90^\circ - \theta_z$ .

O estudo dos efeitos da radiação solar sobre superfícies requer a definição do posicionamento desta superfície por meio dos ângulos de inclinação  $\beta$  e de azimute da superfície  $\gamma$ , definido como o ângulo entre a projeção da normal da superfície sobre a horizontal e a linha norte sul, com sul  $0^\circ$ , leste negativo e oeste positivo. Estes ângulos são ilustrados na Figura 2.1 (Duffie e Beckman, 2006).



**Figura 2.1** – Geometria da radiação solar direta (Duffie e Beckman, 2006).

O ângulo de incidência  $\theta$  é o ângulo entre a direção da radiação direta incidente na superfície e a normal à superfície e pode ser calculado pela Equação 2.6.

$$\begin{aligned}
\theta = & \text{acos}(\text{sen } \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta - \text{sen } \delta \text{ cos } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma \\
& + \text{cos } \delta \text{ cos } \phi \text{ cos } \beta \text{ cos } \omega \\
& + \text{cos } \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma \text{ cos } \omega \\
& + \text{cos } \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma \text{ sen } \omega )
\end{aligned}
\tag{2.6}$$

Em determinadas situações é desejado obter estes valores geométricos para cálculos baseados na média mensal. Para isto, são sugeridos os dias médios, que são os dias do mês com declinação igual a declinação média do respectivo mês. Os dias médios são apresentados na Tabela 2.1, sendo estes válidos para locais cujo valor absoluto da latitude seja menor ou igual a  $66,5^\circ$ , condição atendida para as sete cidades selecionadas.

**Tabela 2.1** – Dias médios recomendados para cada mês e seu valor em dia do ano, válido para valores absolutos de latitude  $|\phi| \leq 66,5^\circ$ .

Mês	Dia do Mês	$n$
Janeiro	17	17
Fevereiro	16	47
Março	16	75
Abril	15	105
Mai	15	135
Junho	11	162
Julho	17	198
Agosto	16	228
Setembro	15	258
Outubro	15	288
Novembro	14	318
Dezembro	10	344

Fonte: Duffie e Beckman (2006).

### 2.2.3. Radiação solar extraterrestre

O cálculo da radiação solar extraterrestre para uma superfície horizontal  $G_o$  a qualquer hora entre o nascer e o pôr do sol, localizada a uma latitude  $\phi$ , em um

determinado dia  $n$ , com declinação  $\delta$ , a um ângulo horário  $\omega$  pode ser feito por meio da Equação 2.7 (Duffie e Beckman, 2006).

$$G_o = G_{cs} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{ sen } \delta) \quad (2.7)$$

É comum o uso de valores integrados de radiação ao longo do dia ou por um intervalo de tempo, medidos em kWh/m<sup>2</sup> ou em MJ/m<sup>2</sup>. A integração da equação de  $G_o$  da hora inicial  $\omega_1$  até a hora final do intervalo  $\omega_2$  permite a obtenção destes valores. Para o cálculo da radiação solar horária extraterrestre incidente sobre uma superfície horizontal  $I_o$ , adotam-se valores de  $\omega_1$  e  $\omega_2$  que definam um intervalo de uma hora, i.e.  $\omega_2 - \omega_1 = 15^\circ$ , conforme a Equação 2.8 (Duffie e Beckman, 2006).

$$I_o = \frac{12 * 3600}{\pi} G_{cs} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \left[ \cos \phi \cos \delta \text{sen } (\omega_2 - \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \text{sen } \phi \text{ sen } \delta \right] \quad (2.8)$$

A Equação 2.8 também pode ser usada para diferentes intervalos de tempo, bastando o uso de valores apropriados para os limites de integração  $\omega_1$  e  $\omega_2$ . A integração da Equação 2.8 entre o horário de nascer e de pôr do sol ( $-\omega_s \leq \omega \leq \omega_s$ ) resulta na radiação solar extraterrestre diária em uma superfície horizontal  $H_o$ , conforme a Equação 2.9.

$$H_o = \frac{24 * 3600}{\pi} G_{cs} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \left( \cos \phi \cos \delta \text{sen } \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \text{sen } \phi \text{ sen } \delta \right) \quad (2.9)$$

em que,

$$\omega_s = \text{acos}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.10)$$

Os valores de radiação solar global extraterrestre horária  $I_o$  e diária  $H_o$  são geralmente usados como referência para os valores que chegam à superfície; quanto mais claro o dia, mais próximo o valor de radiação solar global em superfície horizontal  $G$  da radiação extraterrestre  $G_o$ .

Os índices de claridade são definidos como a fração de radiação incidente em uma

superfície horizontal sobre a radiação extraterrestre no respectivo intervalo de tempo. O índice de claridade diário  $K_T$  relaciona a radiação solar global diária incidente em superfície horizontal  $H$  com a radiação solar diária extraterrestre  $H_o$  e o índice de claridade horário  $k_T$  relaciona a radiação solar horária incidente em superfície horizontal  $I$  com a radiação solar horária extraterrestre  $I_o$  conforme as Equações 2.11 e 2.12, respectivamente.

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (2.11)$$

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (2.12)$$

#### 2.2.4. Radiação solar incidente sobre a superfície terrestre

O estudo de sistemas terrestres dependentes da radiação solar geralmente se baseia em medições da radiação solar realizadas em estações meteorológicas. Em algumas situações, é necessário o conhecimento da distribuição da radiação solar ao longo do dia, mas só estão, em geral, disponíveis valores totais diários  $H$  ou médias mensais  $\bar{H}$ . Nesse caso é necessária a estimativa da fração da radiação diária incidente durante uma determinada hora, com ângulo horário com valor médio  $\omega$ ,  $r_t = I/H$  que pode ser obtida pela Equação 2.13 (Duffie e Beckman, 2006).

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (2.13)$$

em que,

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.14)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.15)$$

Esta aproximação é adequada para uso em dias individuais, com melhores resultados para dias claros e com aumento da incerteza à medida que a radiação total diária diminui.

A maioria das medições de radiação solar disponíveis é realizada em superfícies horizontais, o que não corresponde à maioria das aplicações de energia solar. Para a obtenção dos valores de radiação para a inclinação desejada é necessária, primeiramente, a estimativa das parcelas direta e difusa da radiação solar incidente em superfície horizontal. É possível encontrar vários estudos e modelos desenvolvidos na literatura para a estimativa das parcelas da radiação solar baseados em diferentes abordagens, como

regressão linear, polinomial, logarítmica e uso de redes neurais artificiais (Erbs et al., 1982; Reindl et al., 1991; Oliveira et al., 2002; Ridley et al., 2010; Khorasanizadeh et al., 2014). De acordo com Torres et al. (2010), muitas publicações se concentraram no desenvolvimento de modelos polinomiais de diferentes graus relacionando a fração da radiação difusa  $I_{dif}$  sobre a radiação global  $k_{dif} = I_{dif}/I$  em função de  $k_t$ . A forma geral destas equações polinomiais é mostrada na Equação 2.16 (Torres et al., 2010).

$$k_{dif} = \begin{cases} a_1 + a_2 k_t & , \quad k_t \leq C_1 \\ a_3 + a_4 k_t + a_5 k_t^2 + a_6 k_t^3 + a_7 k_t^4 & , \quad C_1 < k_t < C_2 \\ a_8 & , \quad k_t \geq C_2 \end{cases} \quad (2.16)$$

em que os coeficientes  $a_1$  a  $a_8$  e as constantes  $C_1$  e  $C_2$  são determinados experimentalmente. O modelo de Erbs utiliza os valores de 1,0, -0,09, 0,9511, -0,1604, 4,388, -16,638, 12,336 e 0,165 para os coeficientes  $a_1$  a  $a_8$ , respectivamente, e 0,22 e 0,80 para as constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

De posse do valor de  $k_{dif}$ , é possível obter os valores da radiação horária difusa  $I_{dif} = k_{dif} I$ , e direta  $I_{dir} = I - I_{dif}$ . O segundo passo para a estimativa da radiação incidente em superfície inclinada  $I_{inc}$  com base no valor de radiação solar incidente sobre superfície horizontal  $I$  é a estimativa das suas parcelas direta  $I_{dir,inc}$  e difusa  $I_{dif,inc}$ . O cálculo da radiação direta é bastante simples, sendo necessário o cálculo da fração da radiação direta em superfície inclinada sobre a radiação direta em superfície horizontal  $R_{dir}$  por meio da Equação 2.17 (Duffie e Beckman, 2006).

$$R_{dir} = \frac{a}{b} \quad (2.17)$$

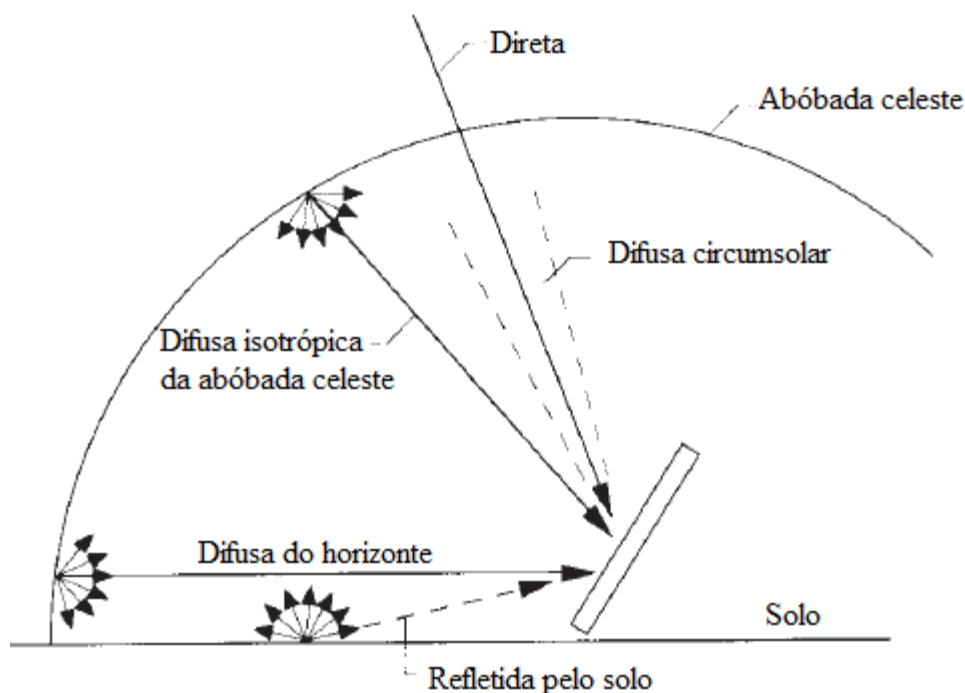
em que,

$$a = (\text{sen } \delta \text{ sen } \phi \text{ cos } \beta - \text{sen } \delta \text{ cos } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma) \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} + (\text{cos } \delta \text{ cos } \phi \text{ cos } \beta + \text{cos } \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma)(\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) - (\text{cos } \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma)(\text{cos } \omega_2 - \text{cos } \omega_1) \quad (2.18)$$

$$b = (\text{cos } \phi \text{ cos } \delta)(\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) + (\text{sen } \phi \text{ sen } \delta) \frac{(\omega_2 - \omega_1) \pi}{180} \quad (2.19)$$

A radiação difusa não apresenta uma direção, mas uma distribuição ao longo da abóbada celeste. Perez et al. (1988) propôs um modelo para tratamento desta distribuição por meio da divisão da radiação difusa em três parcelas: isotrópica, circunsolar e radiação

difusa devido ao clareamento do horizonte. A parcela isotrópica é a parcela distribuída uniformemente ao longo da abóbada celeste. A radiação difusa circumsolar ocorre devido à dispersão frontal da radiação e se concentra em torno do sol. E a radiação difusa devido ao clareamento do horizonte consiste na radiação que se concentra ao longo do horizonte. Esta divisão da radiação difusa é ilustrada na Figura 2.2.



**Figura 2.2** – Distribuição da radiação difusa dividida em suas três parcelas mais a radiação refletida pelo solo (Duffie e Beckman, 2006).

Além das radiações direta e difusa, uma superfície inclinada também recebe radiação refletida pelo solo, conforme pode ser visto na Figura 2.2 (Duffie e Beckman, 2006). O cálculo da radiação global horária incidente em uma superfície inclinada  $I_{inc}$  pode ser feita por meio da Equação 2.20,

$$I_{inc} = I_{dir} R_{dir} + I_{dif,iso} F_{c-s} + I_{dif,cs} R_{dir} + I_{dif,hz} F_{c-hz} + I\rho_{solo} F_{c-solo} \quad (2.20)$$

em que,

- $I_{dif,iso}$  = Radiação difusa horária isotrópica, J/m<sup>2</sup>;
- $F_{c-s}$  = Fator de forma do coletor (superfície) para o céu, adimensional;
- $I_{dif,cs}$  = Radiação difusa horária circumsolar, J/m<sup>2</sup>;
- $I_{dif,hz}$  = Radiação difusa horária devido ao clareamento do horizonte, J/m<sup>2</sup>;
- $F_{c-hz}$  = Fator de forma do coletor para o horizonte, adimensional;
- $\rho_{solo}$  = Refletividade do solo, adimensional; e

$F_{c-solo}$  = Fator de forma do coletor para o solo, adimensional.

A forma como se irá utilizar a Equação 2.20 depende do modelo utilizado de céu. Estes modelos diferem em grande parte, pela forma com que tratam a radiação difusa. Liu e Jordan (1963), desenvolveram um modelo que considera que toda a radiação difusa e toda a radiação refletida pelo solo são isotrópicas, chamado de modelo difuso isotrópico. Os fatores de forma geométricos para uma superfície com inclinação  $\beta$  em relação à visão do céu e do solo são dados pelas Equações 2.21 e 2.22, respectivamente (Duffie e Beckman, 2006).

$$F_{c-s} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.21)$$

$$F_{c-solo} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.22)$$

E a equação para o cálculo da radiação global para uma superfície inclinada  $I_{inc}$  é dada pela Equação 2.23.

$$I_{inc} = I_{dir} R_{dir} + I_{dif} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_{solo} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.23)$$

Os modelos que consideram, além da parcela isotrópica, as componentes difusas do horizonte e/ou circunsolar são denominados modelos anisotrópicos. Dentre os modelos anisotrópicos o modelo HDKR é um dos que apresenta melhor precisão nos resultados ao custo de um pequeno aumento da complexidade para solução em relação ao modelo isotrópico. O modelo HDKR leva em consideração todas as parcelas da radiação difusa ao adicionar um índice de anisotropia  $A_i = I_{dir}/I_o$ , que determina a porção de radiação difusa que será tratada como circunsolar e um fator de correção  $f = \sqrt{I_{dir}/I}$ , para que o modelo considere a nebulosidade. O modelo HDKR resulta na Equação 2.24 para a radiação solar global horária em uma superfície inclinada  $I_{inc}$ .

$$I_{inc} = (I_{dir} + I_{dif} A_i) R_{dir} + I_{dif}(1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \operatorname{sen}^3 \left( \frac{\beta}{3} \right) \right] + I \rho_{solo} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.24)$$

O modelo anisotrópico desenvolvido por Perez et al. (1990) é baseado em uma

análise mais detalhada dos componentes da radiação difusa, resultando em um modelo mais complexo do que os apresentados acima e geralmente referido como modelo de Perez. O cálculo da radiação global horária para uma superfície inclinada,  $I_{inc}$  por este modelo requer o cálculo de parâmetros que descrevem as condições do céu, o ângulo de zênite  $\theta_z$ , a claridade  $\varepsilon$ , e o brilho  $\Delta$ , sendo  $\varepsilon$  e  $\Delta$  calculados pelas Equações 2.25 e 2.26, respectivamente.

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_{dif} + I_{dir,n}}{I_{dif}} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3} \quad (2.25)$$

$$\Delta = m \frac{I_{dif}}{I_{o,n}} \quad (2.26)$$

em que,

$I_{dif}$  - Radiação solar difusa horária, J/m<sup>2</sup>;

$I_{dir,n}$  - Radiação solar direta horária sobre superfície normal aos raios solares, J/m<sup>2</sup>;

$$I_{dir,n} = I_{dir} / \cos \theta_z \quad (2.27)$$

$\theta_z$  - Ângulo de zênite, °;

$m$  - Razão da massa de ar atmosférico que a radiação solar direta atravessa sobre a massa que iria atravessar caso o Sol estivesse no zênite, adimensional e calculada por:

$$m = \frac{\exp(-0,0001184 A)}{\cos \theta_z + 0,5057 (96,080 - \theta_z)^{-1,634}} \quad (2.28)$$

$A$  - Altitude local, m; e

$I_{o,n}$  - Radiação solar horária extraterrestre incidente sobre superfície normal aos raios solares, J/m<sup>2</sup>.

Neste modelo são também utilizados coeficientes circunsolar  $F_1$  e de clareamento do horizonte  $F_2$  que são calculados com base em coeficientes  $f_{ij}$ , em que  $i$  varia de 1 a 2 e  $j$  varia de 1 a 3, que dependem do intervalo que contém o valor de  $\varepsilon$ , conforme Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Coeficientes de brilho do modelo de Perez em função da faixa do parâmetro de claridade,  $\varepsilon$ .

Faixa de $\varepsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
1,000 – 1,065	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
1,065 – 1,230	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
1,230 – 1,500	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
1,500 – 1,950	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	0,014
1,950 – 2,800	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
2,800 – 4,500	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
4,500 – 6,200	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
6,200 – $\infty$	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

Fonte: Duffie e Beckman (2006)

Os valores de  $F_1$  e  $F_2$  podem ser, então, calculados pelas Equações 2.29 e 2.30, respectivamente.

$$F_1 = \max \left[ 0, f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right] \quad (2.29)$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{23} \quad (2.30)$$

O modelo de Perez utiliza os termos  $a$  e  $b$  para tratar dos ângulos de inclinação do cone de radiação circumsolar, dados pelas Equações 2.31 e 2.32, respectivamente.

$$a = \max(0, \cos \theta) \quad (2.31)$$

$$b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z) \quad (2.32)$$

A radiação solar global horária incidente sobre superfície inclinada  $I_{inc}$  pode ser, então, calculada por meio da Equação 2.33.

$$I_{inc} = I_{dir} R_{dir} + I_{dif} (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{dif} F_1 \frac{a}{b} + I_{dif} F_2 \sin \beta + I \rho_{soto} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.33)$$

O modelo HDKR é geralmente mais indicado no caso de superfícies com ângulo

de azimute,  $\gamma \approx 180^\circ$  (no caso do hemisfério sul) ou  $0^\circ$  (no caso do hemisfério norte), o que é geralmente usado nos casos de superfícies fixas, sendo o modelo de Perez mais indicado nos demais casos. O valor da radiação solar total incidente em superfície inclinada  $H_{inc}$  pode ser, então, calculado por meio da soma dos valores de  $I_{inc}$  ao longo do dia.

### 2.3. Metodologia

As simulações foram realizadas para as cidades de Manaus, AM ( $3^\circ 6' S$ ,  $60^\circ 1' O$ ), Garanhuns, PE ( $8^\circ 53' S$ ,  $36^\circ 29' O$ ), Brasília, DF ( $15^\circ 46' S$ ,  $47^\circ 55' O$ ), Belo Horizonte, MG ( $19^\circ 48' S$ ,  $43^\circ 57' O$ ), Campo Grande, MS ( $20^\circ 26' S$ ,  $54^\circ 38' O$ ), Joaçaba, SC ( $27^\circ 10' S$ ,  $51^\circ 30' O$ ) e São Gabriel, RS ( $30^\circ 20' S$ ,  $54^\circ 20' O$ ), selecionadas com base na disponibilidade de dados e de forma a representar diferentes latitudes e altitudes no Brasil. Foram utilizados dados de média mensal da radiação solar global diária típica para cada um dos meses do ano, disponibilizados pelo INPE em parceria com o LABSOLAR, base oficial dos dados de radiação típica no Brasil como parte do programa Solar and Wind Energy Resource Assesment (SWERA). Os dados são disponibilizados para uma malha formada por células de  $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$  ao longo do território brasileiro (SWERA, 2015).

Os valores de radiação solar diária média mensal foram utilizados para a estimativa da distribuição horária da radiação utilizando a Equação 2.13 para cada mês considerando os dias médios de cada mês conforme a Tabela 2.1. Essa distribuição é feita considerando-se a radiação solar incidente simétrica em relação ao meio dia solar ( $\omega = 0^\circ$ ). Foram obtidas as posições do Sol ao longo do ano em relação a cada uma das localidades por meio das Equações 2.3 a 2.5. Foram então calculados os valores de radiação solar extraterrestre horária  $I_o$  e diária  $H_o$ , e o índice de claridade horária,  $k_t$ . Finalmente, foi estimada a componente difusa  $I_{dif}$  da radiação solar global horária  $I$  utilizando a Equação 2.16, com as constantes e coeficientes de acordo com o modelo de Erbs, e a componente direta  $I_{dir}$  subtraindo  $I_{dif}$  de  $I$ . De posse destes valores e assumindo-se uma refletividade do solo  $\rho_{solo} = 0,2$ , valor geralmente utilizado para superfícies sem cobertura de neve, só é necessária a definição dos ângulos de inclinação  $\beta$  e azimute  $\gamma$  para que seja possível a estimativa da radiação solar total anual incidente por meio do modelo de Perez. O modelo de Perez foi selecionado para as simulações por apresentar maior precisão para os casos em que  $\gamma$  se afasta da direção norte-sul.

Foram realizadas simulações considerando combinações de valores variando o ângulo de inclinação  $\beta$  de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , com incrementos de  $5^\circ$ , e para cada valor de  $\beta$  foram

usados valores de ângulo de azimute  $\gamma$  de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ , também com incrementos de  $5^\circ$ , para se obter o comportamento da radiação solar em função da inclinação e da orientação do sistema. Foi feito um estudo mais detalhado para a faixa de valores de inclinação e orientação com maior radiação solar anual incidente, para cada uma das cidades estudadas para obter os valores de  $\beta$  e  $\gamma$  que resultaram na máxima radiação solar incidente. Nesse caso, a radiação solar anual foi avaliada com incrementos nos valores de  $\beta$  e de  $\gamma$  de  $1^\circ$  ao invés de  $5^\circ$ . As simulações foram realizadas com base em código desenvolvido na linguagem Octave e apresentado no apêndice deste trabalho.

#### **2.4. Resultados e Discussão**

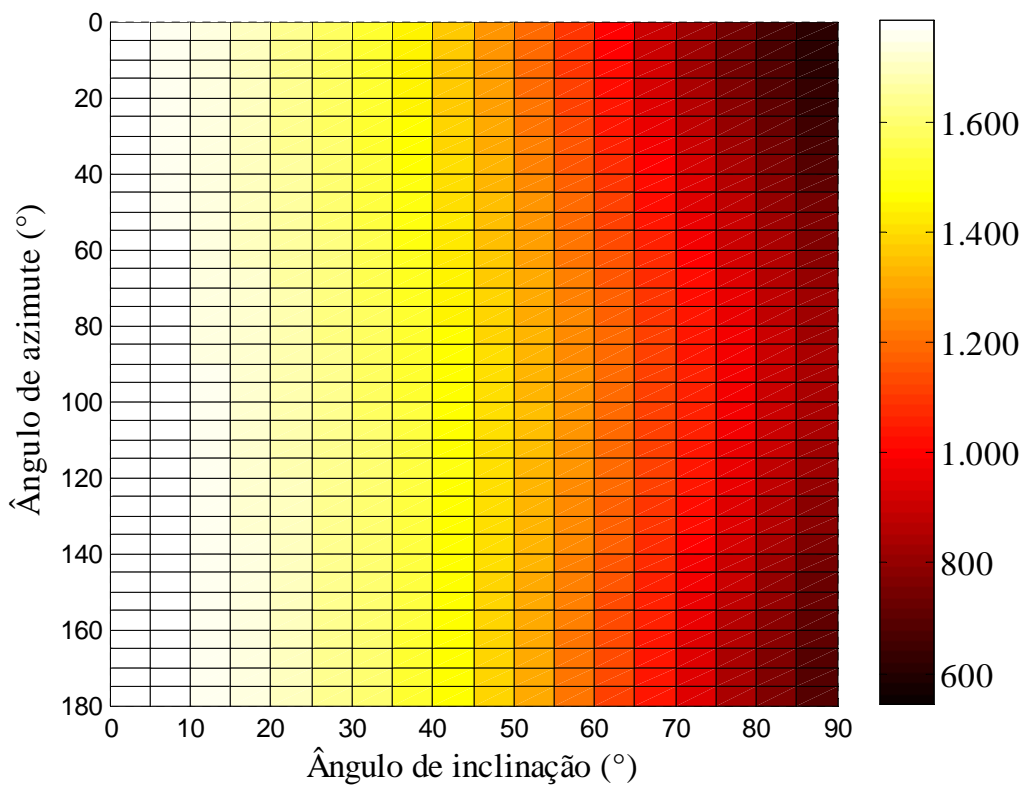
Inicialmente foram obtidos os valores de inclinação,  $\beta$ , e de azimute,  $\gamma$ , que maximizassem o valor de radiação solar total anual incidente sobre uma superfície com área de um metro quadrado para cada uma das cidades do estudo. A Tabela 2.3 apresenta os valores de  $\beta$  e  $\gamma$  que maximizaram a radiação solar incidente, a respectiva máxima radiação solar total anual incidente, radiação solar para uma superfície com inclinação igual a latitude e para uma superfície horizontal.

Obteve-se para todas as localidades estudadas que a orientação e inclinação que resultavam na máxima incidência de radiação solar foram de orientação em direção ao norte e valores de inclinação inferiores à latitude local. No entanto, para os casos estudados foi observada pequena variação entre o valor de radiação na superfície com o valor de inclinação no caso de máxima radiação e inclinação igual à latitude, a maior diferença encontrada foi de 0,5 %. O aumento da radiação incidente no caso de radiação máxima em relação à radiação em superfícies horizontais foi de 0 a 6,44 % à medida que a latitude variava de  $3^\circ$  a  $30^\circ$  S.

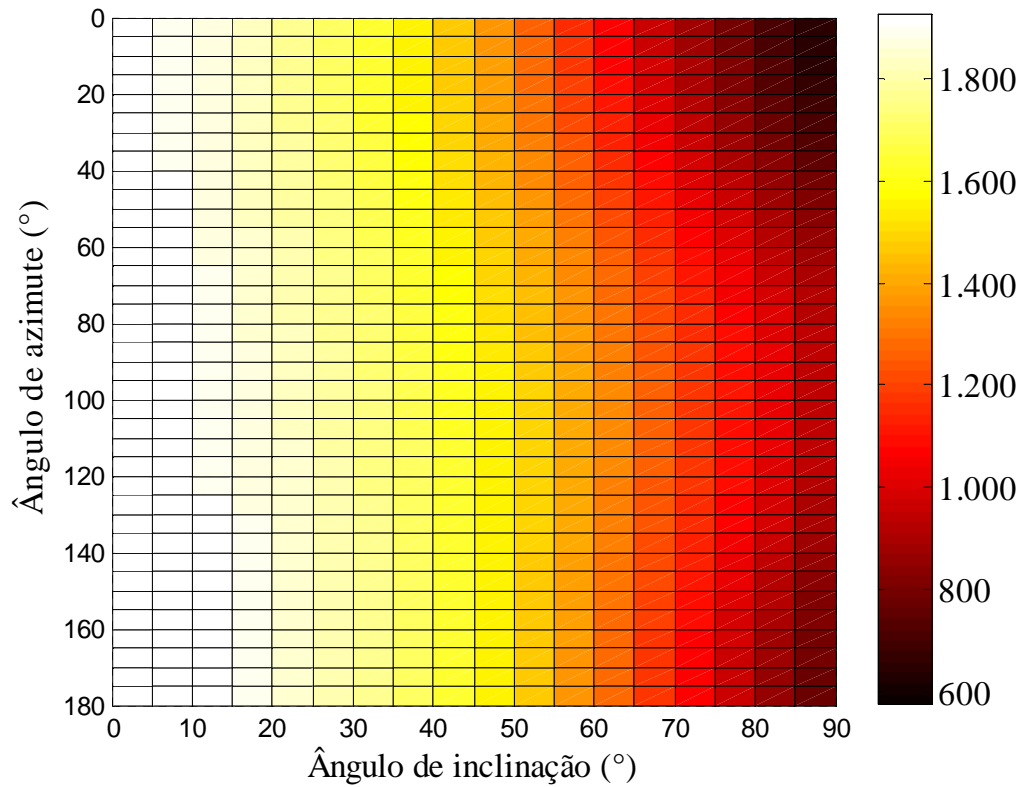
**Tabela 2.3** – Valores de inclinação,  $\beta$ , e orientação,  $\gamma$ , para o ponto com maior incidência de radiação solar total anual, respectiva radiação solar anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, radiação solar total anual para superfície com ângulo de inclinação igual à latitude,  $\beta = \phi$  e orientada em direção ao norte,  $\gamma = 180^\circ$ , radiação solar total anual para superfície horizontal e aumento da radiação solar incidente máxima em relação à superfície horizontal para diferentes localidades.

Cidade	Ângulo de inclinação no caso de radiação máxima, $\beta$	Ângulo de azimute no caso de radiação máxima, $\gamma$	Radiação solar incidente máxima encontrada	Radiação solar incidente para $\beta = \phi$ e $\gamma = 180^\circ$	Radiação solar incidente para superfície horizontal	Aumento na radiação solar no sistema com máxima incidência em relação a um sistema horizontal
	(°)	(°)	(kWh/m <sup>2</sup> /ano)	(kWh/m <sup>2</sup> /ano)	(kWh/m <sup>2</sup> /ano)	(%)
Manaus, AM (3° S, 34 m)	0	180	1.784,7	1.780,6	1.784,7	0,00
Garanhuns, PE (8° S, 869 m)	2	180	1.926,1	1.918,6	1.925,1	0,05
Brasília, DF (15° S, 1.115 m)	11	180	2.070,8	2.070,7	2.008,9	2,99
Belo Horizonte, MG (19° S, 937 m)	18	180	1.993,3	1.992,9	1.920,7	3,64
Campo Grande, MS (20° S, 544 m)	19	180	2.100,1	2.099,7	2.009,8	4,30
Joaçaba, SC (27° S, 525 m)	22	180	1.927,8	1.922,3	1.816,4	5,78
São Gabriel, RS (30° S, 120 m)	23	180	1.880,7	1.871,2	1.759,6	6,44

As Figuras 2.3 a 2.9 apresentam os valores de radiação solar anual para os valores de  $\beta$  e  $\gamma$  avaliados para as cidades estudadas. São mostrados somente os resultados para  $\gamma$  de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , pois devido à utilização da Equação 2.13, os resultados de  $0^\circ$  a  $-180^\circ$  são simétricos em relação à linha  $\gamma = 0^\circ$ .

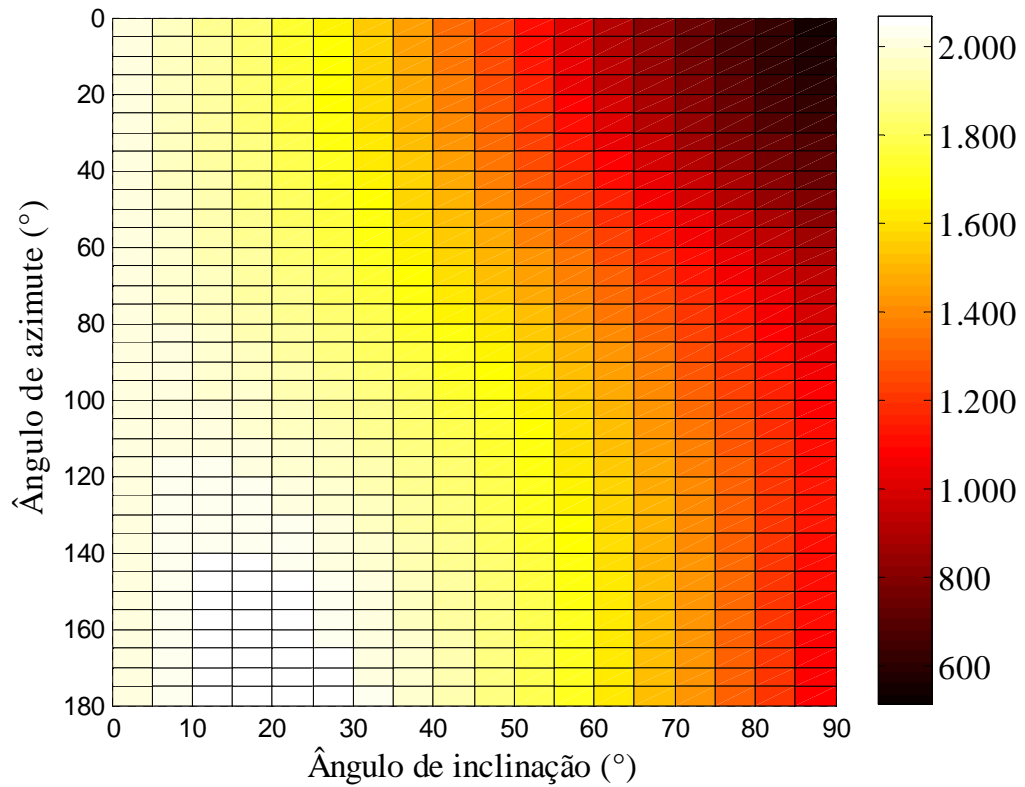


**Figura 2.3** – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Manaus, AM, 3,1°S.

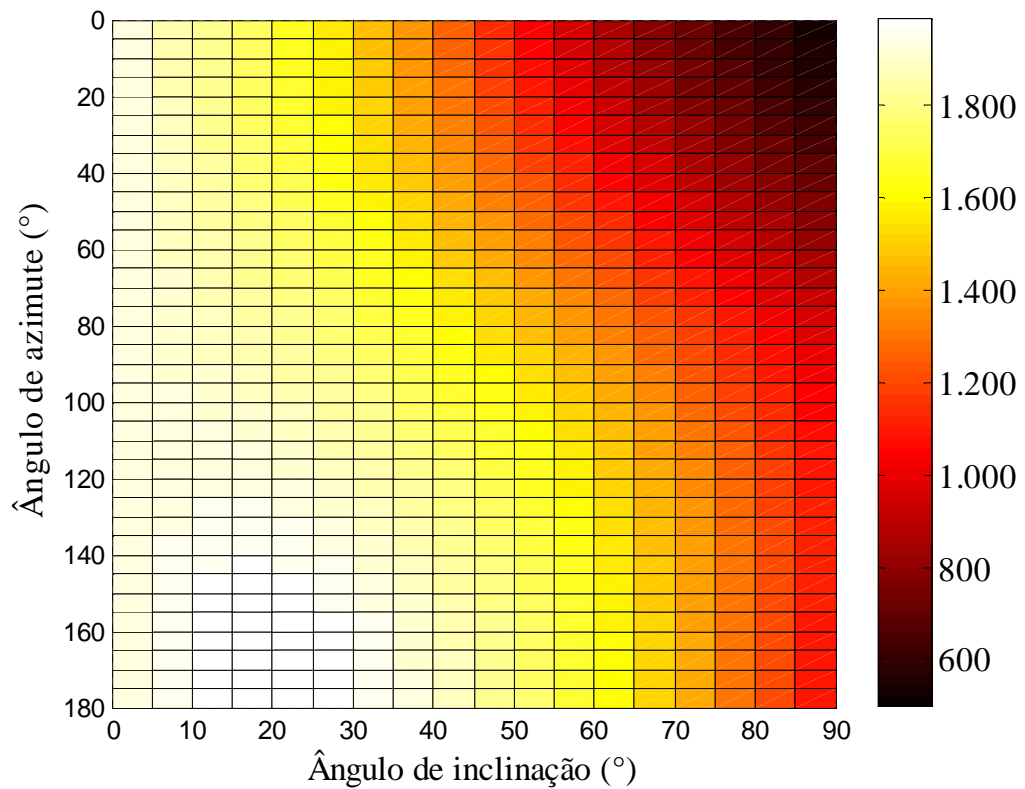


**Figura 2.4** – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Garanhuns, PE, 8,88°S.

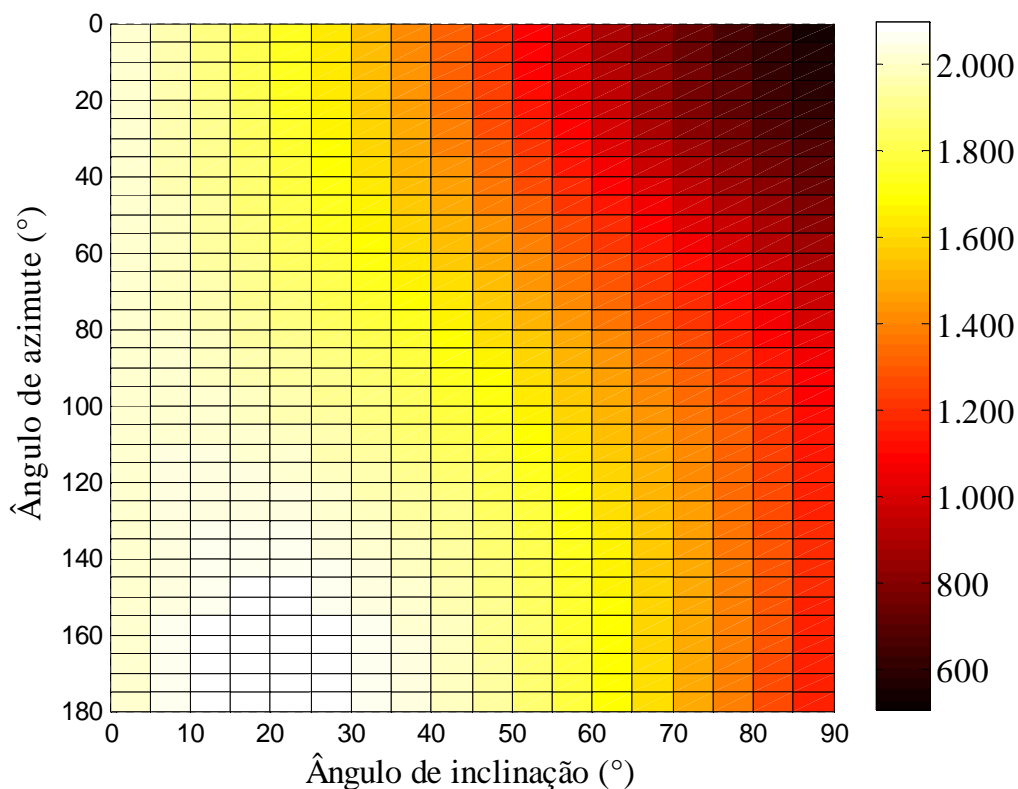
No caso das cidades de Manaus e Garanhuns, de baixa latitude, foram obtidos valores mais elevados de radiação para menores valores de inclinação da superfície. Foi observado que a radiação solar anual para sistemas com  $\beta < 11^\circ$  e  $\beta < 15^\circ$ , para Manaus e Garanhuns respectivamente, apresentou resultados acima de 98 % do caso com a máxima radiação solar incidente.



**Figura 2.5** – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Brasília, DF, 15,77°S.



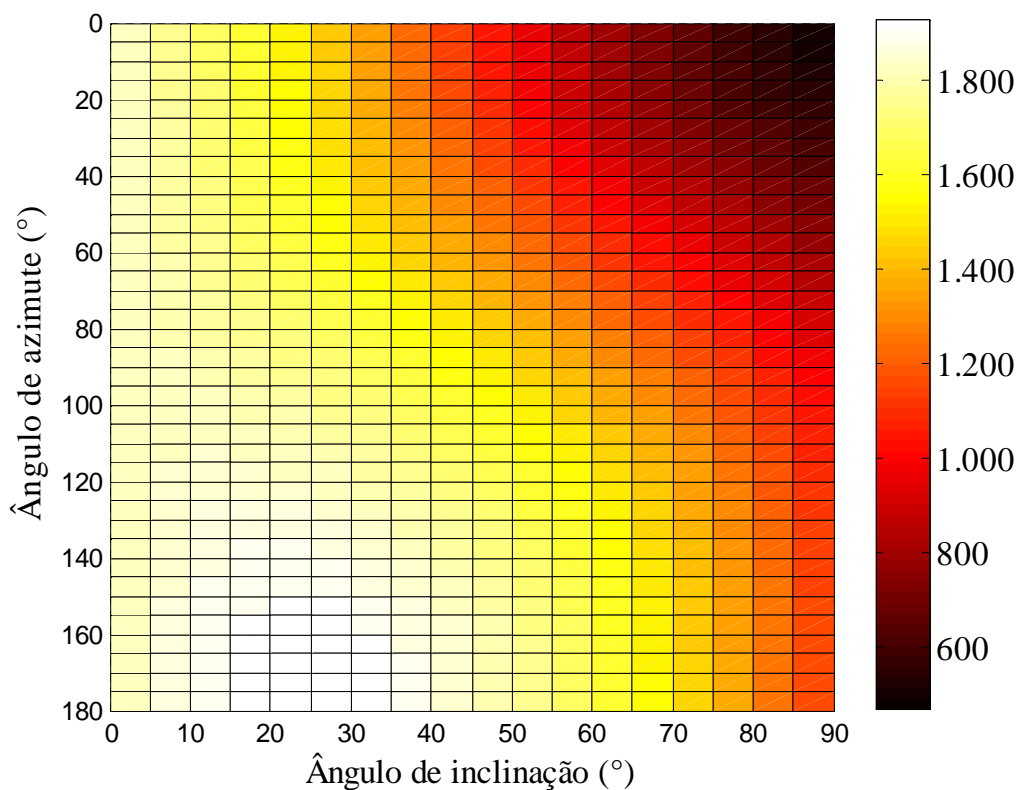
**Figura 2.6** – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Belo Horizonte, MG, 19,8°S.



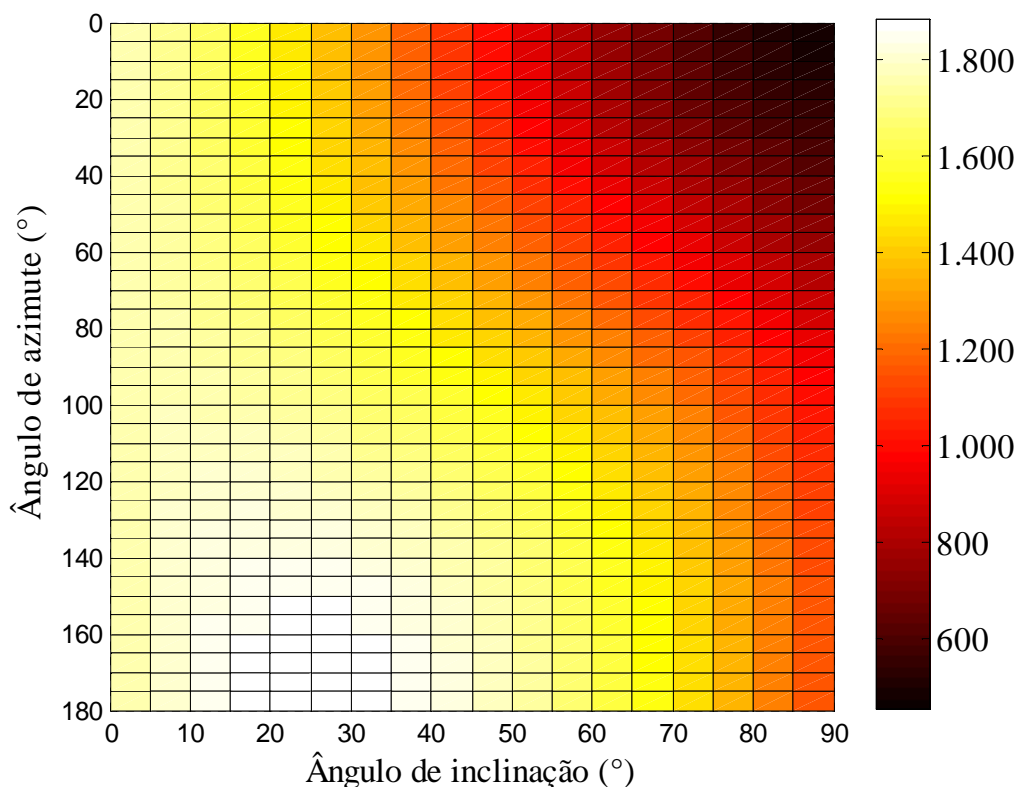
**Figura 2.7** – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Campo Grande, MS, 20,43°S.

As cidades de Brasília, Belo Horizonte e Campo Grande, com valores intermediários de latitude, apresentaram uma influência mais perceptível da orientação do sistema na radiação solar anual incidente. Neste caso também foram obtidas faixas de valores de inclinação e orientação amplas que resultavam em valores de radiação solar anual incidente superior a 98 % da máxima radiação solar encontrada para cada uma das respectivas cidades. Foram encontradas as seguintes faixas de valores de inclinação de sistema para sistemas orientados em direção ao norte ( $\gamma = 180^\circ$ ), que foi a orientação com máxima incidência de radiação encontrada:  $3^\circ \leq \beta \leq 28^\circ$ , para Brasília;  $5^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$  para Belo Horizonte; e  $6^\circ \leq \beta \leq 31^\circ$  para Campo Grande. Para valor fixo da inclinação no valor de caso de máxima radiação solar incidente foram encontradas as seguintes faixas de  $\gamma$  que resultaram em radiação solar anual incidente superior a 98 % da máxima radiação encontrada:  $125^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ , para Brasília;  $132^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  para Belo Horizonte; e  $136^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  para Campo Grande. Apesar da menor faixa de ângulos possíveis ainda há uma tolerância razoavelmente grande para desvios em relação aos valores de inclinação e orientação no caso de máxima radiação solar, especialmente

no caso de  $\gamma$ , em que desvios de até  $50^\circ$  em relação a orientação no caso de radiação máxima apresentam pouca variação da radiação solar incidente.



**Figura 2.8** – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de Joaçaba, SC, 27,17°S.



**Figura 2.9** – Radiação solar total anual incidente, kWh/m<sup>2</sup>, em função do ângulo de inclinação e de azimute da superfície para a cidade de São Gabriel, RS, 30,33°S.

As cidades mais distantes do Equador, Joaçaba e São Gabriel, apresentaram a maior influência dos ângulos  $\beta$  e  $\gamma$  sobre a radiação anual incidente, assim como maior aumento na radiação solar incidente em relação às superfícies horizontais. Foram encontradas as seguintes faixas de valores de inclinação para sistemas orientados em direção ao norte ( $\gamma = 180^\circ$ ), que foi a orientação ótima encontrada:  $9^\circ \leq \beta \leq 35^\circ$ , para Joaçaba; e  $11^\circ \leq \beta \leq 36^\circ$  para São Gabriel. Para valor fixo da inclinação no valor do caso de máxima radiação solar foram encontradas as seguintes faixas  $\gamma$  que resultaram em radiação solar anual incidente superior a 98 % da máxima radiação encontrada para as respectivas cidades:  $144^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ , para Joaçaba; e  $145^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  para São Gabriel. Neste caso a faixa de valores de  $\gamma$  também foi maior do que a de  $\beta$ , mas é menor do que as faixas encontradas para os outros casos avaliados.

Obteve-se portanto, para todas as cidades, valores de inclinação ótima de  $1^\circ$  a  $7^\circ$  inferiores aos valores da latitude local. Em todos os casos estudados, o valor da radiação solar anual incidente em superfícies com valores próximos ao da inclinação ótima apresentaram incidência de energia superior a 98 % da radiação solar máxima incidente para as respectivas cidades. Para todos os casos a diferença entre a maior e a menor inclinação que resultaram nesta incidência de energia foi de cerca de  $11^\circ$  e  $15^\circ$  para

Manaus e Garanhuns, respectivamente, e de 25° para os demais casos, sendo que em todos os casos o valor da latitude local pertencia a este conjunto de valores. Observa-se também que a medida que o local se distancia da linha do Equador o desvio máximo no valor de  $\gamma$  para que a incidência de radiação seja superior a 98 % da radiação máxima encontrada se torna menor, sendo indiferente para as superfícies com baixa latitude, Manaus e Garanhuns e de cerca de 35° para as cidades de Joaçaba e São Gabriel.

## 2.5. Conclusão

Neste estudo foram avaliados os valores de radiação anual incidente sobre superfícies com ângulo de inclinação variando de 0° a 90° e ângulos de azimute  $\gamma$  de -180° a 180° para as cidades de Manaus, AM, Garanhuns, PE, Brasília, DF, Belo Horizonte, MG, Campo Grande, MS, Joaçaba, SC e São Gabriel, RS, que possuem valores de latitude variando de 3° S a 30° S. Os valores de inclinação que resultaram nos maiores valores de radiação anual incidente foram cerca de 5° menores do que a latitude local, exceto para Belo Horizonte e Campo Grande, em que foram cerca de 1° menor que a latitude. Para todos os casos o valor de azimute para o caso de máxima radiação solar foi de 180°, i.e., superfície orientada ao norte, concordando com a literatura. Apesar dos valores da inclinação no ponto da máxima radiação encontrados terem sido diferentes da inclinação usualmente indicada, inclinação igual à latitude, a diferença no valor da radiação anual incidente entre estes dois casos foi de, no máximo, 0,5 %.

Foram também calculados os intervalos da inclinação e orientação em que a radiação anual incidente se manteve superior a 98 % da radiação máxima encontrada para as respectivas cidades. As cidades de Manaus e Garanhuns apresentaram faixas de ângulo de inclinação de 0° a 11° e de 0° a 15°, respectivamente. As cidades de Brasília, DF, Belo Horizonte, MG, Campo Grande, MS, apresentaram faixas maiores, de 3° a 28°, de 5° a 30° e de 6° a 30° respectivamente e para as cidades de Joaçaba e São Gabriel estes intervalos são de 9° a 35° e de 11° a 36°, respectivamente. Assim, mesmo que as superfícies não estejam nas inclinações ou azimutes que resultaram na máxima radiação incidente, pode-se obter mais de 98 % deste valor para amplas faixas de valores de inclinação e orientação.

## 2.6. Referências Bibliográficas

Bakirci, K., 2012. *General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 6149–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009>.

Duffie, J.A.; Beckman, W.A., 2006. *Solar engineering of thermal processes*, Wiley Interscience Publication. 3 ed..

Erbs, D.G.; Klein, S.A.; Duffie, J.A., 1982. *Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation*. Solar Energy 28, 293–302. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90302-4](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(82)90302-4) .

Incropera, F. P.; Dewitt, D.P.; Bergman, T.L.; Lavine, A.S.,2008. Fundamentos de transferência de calor e de massa, 6 ed., John Wiley & Sons, Inc.

Jafarkazemi, F.; Saadabadi, S.A., 2013. *Optimum tilt angle and orientation of solar surfaces in Abu Dhabi, UAE*. Renewable Energy 56. 44–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.036> .

Kamanga, B.; Mlatho, J.S.P.; Mikeka, C.; Kamunda, C., 2014. *optimum tilt angle for photovoltaic solar panels in Zomba District, Malawi*. Journal of Solar Energy 2014: 9. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/132950>.

Khahro, S.F., Tabbassum, K.; Talpur, S.; Alvi, M.B.; Liao, X.; Dong., L., 2015. *evaluation of solar energy resources by establishing empirical models for diffuse solar radiation on tilted surface and analysis for optimum tilt angle for a prospective location in southern region of Sindh , Pakistan*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems 64. 1073–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.001>.

Khorasanizadeh, H.; Mohammadi, K.; Mostafaeipour, A., 2014. *Establishing a diffuse solar radiation model for determining the optimum tilt angle of solar surfaces in Tabass, Iran*. Energy Conversion and Management 78, 805–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.048> .

Liu, B. Y.H.; Jordan, R.C., 1963. *The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors*. Solar Energy, 7, 53-74. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(63\)90006-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(63)90006-9) .

Oliveira, A.P.; Escobedo, J.F.; Machado, A.J.; Soares, J., 2002. *Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil*. Applied Energy 71, 59–73. [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(01\)00040-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(01)00040-X) .

Perez, R.; Stewart, R.; Seals, R.; Guertin, T., 1988. *The development and verification of the Perez diffuse radiation model*. Sandia National Laboratories Contractor Report,

SAND88-7030.

Perez, R.; Ineichen, P.; Seals, R.; Michalsky, J.; Stewart, R., 1990. *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*. Solar Energy, 44, 271-289. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H) .

Reindl, D.T.; Beckman, W.A.; Duffie, J.A., 1991. *Diffuse fraction correlations*. Solar Energy 45, 1–7. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90123-E](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(91)90123-E) .

Ridley, B.; Boland, J.; Lauret, P., 2010. *Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors*. Renewable Energy 35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.018> .

Solar and Wind Energy Resource Assesment, SWERA, 2015. *Brazil Global Horizontal Solar Radiation Model (40km) from INPE*, Disponível em: <http://en.openei.org/datasets/dataset/brazil-global-horizontal-solar-radiation-model-40km-from-inpe> .

Torres, J.L.; Blas, M.; García, A.; Francisco, A., 2010. *Comparative study of various models in estimating hourly diffuse solar irradiance*. Renewable Energy 35, 1325–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.025> .

Yadav, A.K.; Chandel, S.S., 2013. *Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 23, 503–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027> .

### **3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM RASTREAMENTO SEM RETROALIMENTAÇÃO**

#### **3.1. Introdução**

A geração de energia elétrica a partir de sistemas de energia solar fotovoltaica apresenta uma série de vantagens, tais como sua natureza renovável, longo ciclo de vida, baixo impacto ambiental durante a operação, baixa necessidade de manutenção e modularidade. O aproveitamento da energia solar fotovoltaica, em sistemas para consumidores individuais e usinas solares, vem ganhando com isso grande foco e relevância como opção de investimento e de ampliação da capacidade de geração de energia elétrica de vários países que tem como objetivo o desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa.

Um dos fatores de maior importância no desempenho de sistemas com base em energia solar é o ângulo de incidência da radiação sobre a superfície receptora, que pode ser um coletor solar térmico ou um módulo fotovoltaico, que depende do local, hora, dia do ano e condições climáticas locais (Lubitz, 2011). A geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos pode ser aumentada por meio da utilização de sistemas de rastreamento solar cuja função é manter o plano do módulo perpendicular à direção de incidência dos raios solares. Um exemplo de usina solar fotovoltaica com rastreamento de grande escala em operação é a usina da base aérea de Nellis, Nevada nos Estados Unidos, com capacidade de geração de 14,2 MWp. Esta usina é capaz de suprir um quarto de toda a energia requerida pela base aérea, e é responsável por uma economia anual devido ao consumo de energia da ordem de um milhão de dólares (Sunpower, 2015). A Espanha apresenta sistemas de rastreamento solar em uma parcela significativa de suas usinas fotovoltaicas. De acordo com Gómez-Gil et al. (2012) 24 % dos sistemas de energia solar fotovoltaica da Espanha utilizam rastreamento em um eixo e 13 % em dois eixos, com aumento na geração de cerca de 22 % e 25 %, respectivamente.

A utilização de sistemas de rastreamento solar, no entanto, também proporciona um aumento do custo de instalação, operação e manutenção do sistema. Também deve ser ressaltado que o rastreamento solar geralmente envolve gasto de energia elétrica para a movimentação dos módulos, portanto o potencial de aumento da energia gerada pelo sistema também deve ser maior que este consumo de energia.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de cinco tipos de algoritmos de rastreamento para sistemas com dois eixos e sem retroalimentação que foram comparados com sistema fixo, orientado ao norte e com inclinação igual a latitude local. Os algoritmos foram comparados por meio da média anual de reorientações diárias

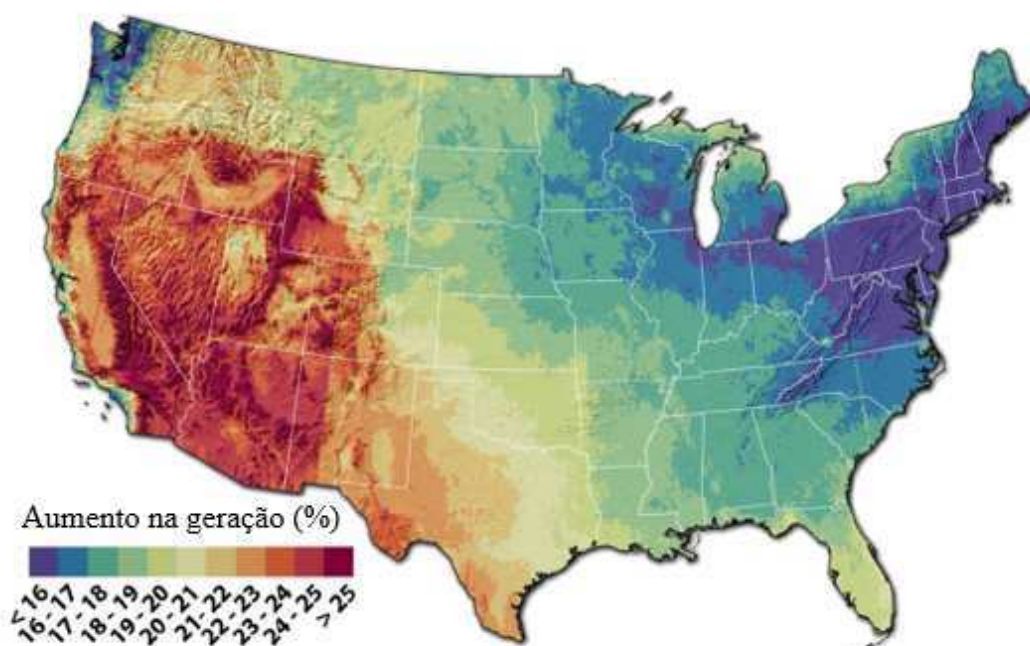
necessária para que a radiação solar anual incidente fosse superior a 95 % da energia no caso de rastreamento ideal, i. e. com superfície sempre perpendicular aos raios solares.

### **3.2. Rastreamento solar**

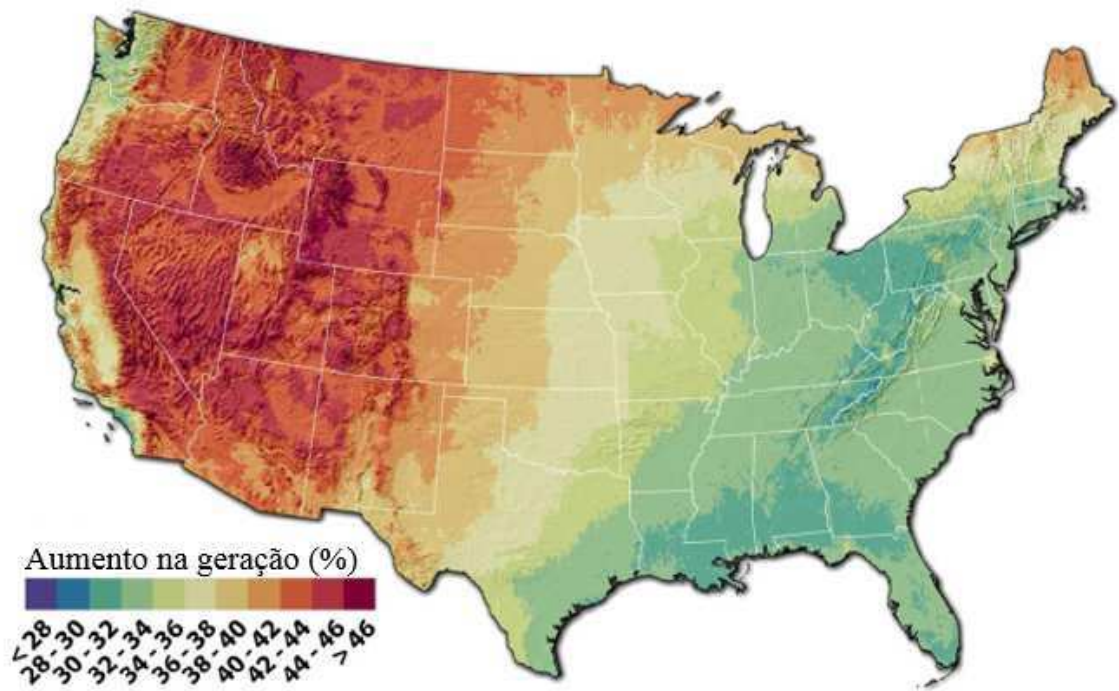
A quantidade de radiação solar incidente sobre uma superfície plana é maior à medida que o ângulo de incidência dos raios solares se aproxima de  $0^\circ$  (Mousazadeh et al., 2009). Portanto, o rastreamento solar ideal para a captação máxima de energia a partir de superfícies planas deve ser realizado de forma que os raios solares sempre estejam perpendiculares à superfície. Com este intuito foram desenvolvidos sistemas de rastreamento solar para movimentar os sistemas de energia solar térmica e/ou fotovoltaica. Os sistemas de rastreamento solar podem ser classificados de acordo com o número de eixos móveis (uniaxial ou biaxial), com o tipo de controle para a reorientação do sistema (com ou sem retroalimentação), e, no caso de sistemas com rastreamento biaxial, com a forma como os eixos de rotação são integrados ao sistema (Alexandru, 2013).

A seleção entre o uso de sistemas de rastreamento uniaxial ou biaxial depende da relação entre o aumento no custo do sistema devido à adição de um eixo de orientação e o aumento em relação ao sistema com um eixo. Maatallah et al. (2011) avaliaram o desempenho de sistemas de rastreamento uniaxial e biaxial em relação a sistemas fixos tradicionais para a cidade de Monastir, Tunísia ( $36^\circ$  N  $12^\circ$  L) obtendo aumentos de 10 % e 30 % para o solstício de verão para sistemas com rastreamento uniaxial e biaxial, respectivamente e de 15 % e 44 % no solstício de inverno. Koussa et al. (2011) realizaram experimento comparando sistemas com rastreamento solar em um e em dois eixos além de sistemas fixos com inclinação igual a latitude local para a região de Bouzareh, Algeria ( $36,8^\circ$  N  $3,0^\circ$  L) com dados de seis dias claros, sete dias com índices de claridade intermediários e cinco dias nublados e concluíram que o uso do rastreamento é vantajoso em dias claros, em dias parcialmente claros sua indicação é função do índice de claridade e em dias nublados o sistema com maior geração de energia foi o sistema fixo horizontal. Koussa et al. (2012) avaliaram os aumentos na geração de energia devido ao uso de sistemas de rastreamento com um e com dois eixos em relação a sistemas fixos tradicionais também para a região de Bouzareh obtendo aumentos da ordem de 33 % para sistemas de rastreamento em dois eixos e de 26 % para sistemas com um eixo. No trabalho de Mehrdash et al. (2013) foram comparadas quatro configurações de sistemas fotovoltaicos, sendo eles um sistema fixo horizontal, um fixo com inclinação igual à latitude, um sistema com rastreamento em um eixo e um sistema com rastreamento em

dois eixos para a cidade de Toronto, Canadá (43,7° N 79,4° O). Neste trabalho foram obtidos aumentos da ordem de 36 % da energia elétrica gerada em relação aos sistemas fixos quando foram utilizados os sistemas com rastreamento em dois eixos. Os sistemas com rastreamento em um eixo apresentaram um aumento em relação aos módulos inclinados fixos com valor cerca de 5 % menor que o aumento dos sistemas com rastreamento em dois eixos. Neste estudo obteve-se que, para dias nublados de inverno, a geração de energia elétrica pelos sistemas com rastreamento biaxial foi 4 % e 13 % menor que para sistemas fixos inclinados e horizontais respectivamente, indicando a inviabilidade de rastreamento em dias nublados, sendo esta conclusão aplicável também para os dias nublados de verão. O estudo de Drury et al. (2014) avaliou o aumento por sistemas de rastreamento solar em dois eixos e em um eixo em relação a sistemas fixos com inclinação igual a 25° para os EUA. Foram obtidos aumentos na geração de energia de 12 % a 25 % para sistemas de rastreamento com um eixo e de 30 %-45 % para sistemas com dois eixos. Os maiores aumentos na energia gerada ocorreram em regiões áridas e os menores em regiões com maior umidade, com maior frequência de dias nublados, conforme mostrado nas Figuras 3.1 e 3.2.



**Figura 3.1** – Aumento no desempenho de um sistema de rastreamento uniaxial em relação a um sistema fixo com inclinação de 25° (Drury et al., 2014).



**Figura 3.2** – Aumento no desempenho de um sistema com rastreamento biaxial em relação a um sistema fixo com inclinação de  $25^\circ$  (Drury et al., 2014).

A maioria dos autores pesquisados concorda que, em geral, as vantagens do rastreamento solar são reduzidas em dias nublados.

Vermaak (2014) realizou uma análise técnico-econômica para quatro tipos de sistemas fotovoltaicos (fixo, rastreamento uniaxial pelo ângulo de zênite, pelo ângulo de azimute e biaxial) sob três cenários (sistema de 1 kWp, de 1MWp e sistema instalado em uma área de 1 ha) para a região de Bloemfontein, África do Sul. Veermaak (2014) obteve aumentos da ordem de 33 % e de 37 %, em relação ao sistema fixo, para os sistemas com rastreamento uniaxial e biaxial, respectivamente. No entanto, para o caso de limite da área de um hectare, os sistemas com rastreamento uniaxial e biaxial só poderiam produzir entre 15,44 % e 22,28 %, respectivamente, da energia produzida pelo sistema fixo devido à sua maior demanda por área para se evitar o sombreamento. Por exemplo, no cenário do sistema de 1 MWp, enquanto o sistema fixo requer uma área de 1,07 ha, o sistema com rastreamento uniaxial requer 6,94 ha e o sistema biaxial 4,81 ha. Lazariou et al. (2015) avaliaram a geração de um sistema de energia solar fotovoltaica com rastreamento em um eixo com controle com retroalimentação utilizando dois fotosensores pelo período de um mês. Foram obtidos aumentos diários de 12 % a 20 % em relação a sistemas fixos com inclinação de  $30^\circ$ , sendo maior o aumento nos casos de dias claros e menor nos dias nublados. Já Ahmad et al. (2013a) avaliaram a relação entre energia gerada e consumida

por sistemas fotovoltaicos com rastreamento em dois eixos e controle sem retroalimentação obtendo um consumo de cerca de 5,89 % da energia total gerada em um experimento realizado na Malásia ( $6^{\circ}$  N  $100^{\circ}$  L) durante os meses de dezembro de 2011 e janeiro de 2012.

Outro ponto importante no desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar se refere à definição do sistema de controle, isto é, se será utilizado um sistema de controle sem retroalimentação ou sistema com retroalimentação, sendo que no primeiro são realizados cálculos teóricos e no segundo são utilizados sensores. Çinar et al. (2014) compararam dois algoritmos de controle, sendo um sem retroalimentação e outro com retroalimentação, para um sistema de rastreamento solar em dois eixos, para três tecnologias de células fotovoltaicas, instalados na região de Afyonkarahisar, Turquia ( $38^{\circ}$  N  $30^{\circ}$  L). O algoritmo sem retroalimentação utilizado foi avaliado para quatro diferentes intervalos de tempo entre reorientações do sistema, i. e. de uma a quatro horas. Já o sistema com retroalimentação utilizou sensores LDR com reorientações na direção com maior intensidade de luz, com intervalos de alguns segundos entre si. Neste trabalho, o sistema com controle com retroalimentação apresentou maior aumento na energia elétrica gerada, o que era esperado devido à maior frequência de reorientações do sistema, sendo necessário avaliar casos em que o número de buscas diárias sejam iguais dos sistemas sem retroalimentação.

A utilização de sistemas de rastreamento solar com controle com retroalimentação geralmente envolve a utilização de fotosensores que são comparados entre si para o posicionamento na direção de maior iluminação sendo encontrados diferentes números e arranjos dos sensores na literatura (Batayneh et al., 2013; Tina et al., 2012; Bentaher et al., 2014; Stamatescu et al., 2014). Lee, J.F. et al. (2013) avaliaram o aumento na geração de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos com rastreamento biaxial e dois pares de fotosensores obtendo aumentos de 24,91 % e de 82,12 % para dias nublados e para dias claros, respectivamente, em relação a um sistema fixo horizontal para sete cidades na Malásia. No trabalho de Rambhowan e Oree (2014) foi desenvolvido um sistema com rastreamento biaxial com o objetivo de redução do consumo de energia elétrica pelos sistemas de rastreamento e realizado um experimento em Maurícia ( $20,2^{\circ}$  S  $57,5^{\circ}$  L) para avaliar esta redução. Neste estudo foi obtido um aumento na geração de energia elétrica da ordem de 42 % em relação a sistemas fixos e uma redução de 1,6 % no consumo de energia de sistemas comerciais de rastreamento solar. Rambhowan e Oree (2014) também obtiveram que para ângulos de desvio para o rastreamento de  $8^{\circ}$  e  $22^{\circ}$  houve redução na geração de energia de 0,5 % e 1,8 % em relação a sistemas precisos de rastreamento.

No trabalho de Lee, C.D. et al. (2013) foi desenvolvido um sistema de controle com retroalimentação para rastreamento solar com base na utilização de processamento de imagem obtida por telescópio e uma webcam de alta resolução, resultando em uma precisão de rastreamento de  $0,04^\circ$ . Yilmaz et al. (2015) realizaram análise teórica e experimental para um sistema de rastreamento solar biaxial com retroalimentação utilizando sensor LDR e obtiveram, para condições de dia claro, um aumento na produção de energia de 34,02 % em relação ao sistema com inclinação fixa.

Os sistemas de rastreamento solar sem retroalimentação mais comuns geralmente utilizam fórmulas para cálculo da posição do Sol com base nos dados de hora e dia local. Sungur (2009) desenvolveu um sistema de rastreamento biaxial sem retroalimentação e o testou para a região de Konya, Turquia ( $37,9^\circ$  N  $32,5^\circ$  L). O desempenho do sistema com reorientações a cada hora de 6 horas às 19 horas foi avaliado experimentalmente em condições de dia claro, alcançando um aumento de 42,6 % em relação a um sistema fixo. Syafaruddin et al. (2014) desenvolveram um sistema de rastreamento biaxial sem retroalimentação utilizando um microcontrolador ATmega8535 obtendo um aumento de 8,7 % em relação ao sistema sem rastreamento para a cidade de Macassar, Indonésia ( $5,14^\circ$  S  $119,3^\circ$  L). Alexandru (2013) avaliou o desempenho anual de um sistema de rastreamento biaxial com controle sem retroalimentação obtendo um aumento de aproximadamente 35 % em relação a um sistema fixo. Ahmad et al. (2013b) desenvolveram um algoritmo de controle sem retroalimentação para um sistema de rastreamento biaxial em que corrigia a orientação do sistema assim que o Sol variava sua posição em  $1^\circ$  o que fazia com que o intervalo de tempo entre reorientações variasse de 20 segundos ao meio dia, até 35 minutos durante o período da manhã de setembro para Malásia ( $6^\circ$  N  $100^\circ$  L).

Estes resultados motivaram a realização da pesquisa descrita neste capítulo, para que se operasse sistemas de rastreamento solar sem retroalimentação de forma mais eficiente.

### **3.3. Metodologia**

Foram realizadas simulações da radiação solar incidente sobre o sistema de rastreamento em intervalos de  $0,1^\circ$  no valor do ângulo horário para um intervalo de um ano. Foram utilizados valores de radiação solar estimados por modelos de radiação solar de dia claro, conforme apresentado por Duffie e Beckman (2006), em que o valor da radiação incidente é uma função do dia do ano  $n$ , do ângulo horário  $\omega$ , da latitude  $\phi$  e da

altitude local  $A$ . Foi escolhido o uso de radiação de dia claro por possibilitar o trabalho em menores intervalos de tempo, já que os valores normalmente fornecidos por estações meteorológicas são fornecidos em intervalos de hora ou mesmo diários, o que limita o estudo de sistemas de rastreamento.

De posse dos valores de  $n$  e  $\omega$ , é possível calcular o valor do ângulo de zênite  $\theta_z$ , com o qual pode-se estimar o índice de transmissividade da atmosfera para radiação direta  $\tau_{dir}$  por meio das Equações 3.1 a 3.4 (Duffie e Beckman, 2006).

$$\tau_{dir} = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right) \quad (3.1)$$

em que,

$$a_0 = 0,4237 - 0,00821 \left(6 - \frac{A}{1000}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$a_1 = 0,5055 + 0,00595 \left(6,5 - \frac{A}{1000}\right)^2 \quad (3.3)$$

$$k = 0,2711 + 0,01858 \left(2,5 - \frac{A}{1000}\right)^2 \quad (3.4)$$

O valor da radiação direta incidente em superfície horizontal para dia claro  $G_{c,dir}$  pode ser estimado utilizando-se o índice de transmissividade da atmosfera para a radiação direta  $\tau_{dir}$  e a radiação solar extraterrestre incidente sobre superfície perpendicular aos raios solares  $G_{o,n}$ , que pode ser calculada por meio da Equação 2.1. Obtidos os valores de  $\tau_{dir}$  e  $G_{o,n}$  é possível o cálculo de  $G_{c,dir}$  utilizando a Equação 3.5 (Duffie e Beckman, 2006).

$$G_{c,dir} = G_{o,n} \tau_{dir} \cos \theta_z \quad (3.5)$$

O índice de transmissividade da atmosfera para a radiação difusa  $\tau_{dif}$  e a radiação solar difusa em superfície horizontal para dia claro  $G_{c,dif}$  podem ser então calculados por meio das Equações 3.6 e 3.7, respectivamente (Duffie e Beckman, 2006):

$$\tau_{dif} = 0,271 - 0,294 \tau_{dir} \quad (3.6)$$

$$G_{c,dif} = G_{o,n} \tau_{dif} \cos \theta_z \quad (3.7)$$

De posse dos valores de radiação solar direta e difusa para dia claro é possível

calcular a radiação solar global incidente em superfície horizontal em dia claro  $G_c = G_{c,dir} + G_{c,dif}$ . Como o modelo de radiação de céu claro retorna o valor para uma superfície horizontal é necessário a obtenção dos valores de radiação em superfície com inclinação  $\beta$  e orientação  $\gamma$ ,  $G_{c,inc}$ . Como neste caso o valor de  $\gamma$  pode variar bastante foi utilizado o modelo de Perez, conforme citado por Duffie e Beckman (2006).

Os algoritmos de rastreamento solar sem retroalimentação realizam a reorientação do sistema com base em um critério definido para cada algoritmo. Esta orientação tem de ser feita de forma que a inclinação e a orientação sejam mais próximas possíveis da orientação com máxima incidência de radiação solar, ou seja, dos valores do ângulo de zênite e do azimute solar, respectivamente.

Os algoritmos estudados foram função:

- (i) do ângulo horário,  $\omega$ . Este algoritmo realiza a reorientação do sistema a intervalos de variação do ângulo horário,  $d\omega$ . Por exemplo, no caso de  $d\omega = 15^\circ$  o sistema se reorienta em intervalos de uma hora. Este algoritmo foi utilizado como referência, por ser o mais comum no mercado;
- (ii) do ângulo de inclinação,  $\beta$ . Este algoritmo avalia a diferença  $d\beta$  entre o ângulo ideal para o ângulo de inclinação  $\beta^* = \theta_z$  e o ângulo de inclinação  $\beta$ , em um determinado instante do dia, e realiza as reorientações nos momentos em que  $d\beta$  ultrapasse o limite pré-determinado para esta diferença;
- (iii) do ângulo de azimute,  $\gamma$ . Este algoritmo, de forma semelhante ao algoritmo definido em (ii), avalia a diferença  $d\gamma$  entre o ângulo ideal para o ângulo de azimute,  $\gamma^* = \gamma_s$ , e o ângulo de azimute  $\gamma$  em um determinado instante do dia;
- (iv) do ângulo de incidência,  $\theta$ . Este algoritmo realiza o rastreamento com base no ângulo de incidência, utiliza como critério de reorientação a diferença  $d\theta$  entre o valor ideal para o ângulo de incidência  $\theta^* = 0^\circ$  e o ângulo de incidência  $\theta$  em determinado instante do dia, e
- (v) da composição dos ângulos  $\beta$  e  $\gamma$ . Os algoritmos de rastreamento com base em uma composição dos ângulos  $\beta$  e  $\gamma$  realiza a reorientação do sistema com base em um critério  $dE$ , desenvolvido neste trabalho, descrito pela Equação 3.10,

$$dE = \sqrt{C_1 (\gamma^* - \gamma)^2 + C_2 (\beta^* - \beta)^2} \quad (3.10)$$

em que  $C_1$  e  $C_2$  são constantes positivas e cuja soma é igual a 1,0.

O desempenho destes algoritmos foi avaliado para as cidades de Manaus, AM (3° 6' S, 60° 1' O, 34,36 m), Garanhuns, PE (8° 53' S, 36° 29' O, 869,21 m), Brasília, DF (15° 46' S, 47° 55' O, 1.115,25 m), Belo Horizonte, MG (19° 48' S, 43° 57' O, 937,53 m), Campo Grande, MS (20° 26' S, 54° 38' O, 544,51 m), Joaçaba, SC (27° 10' S, 51° 30' O, 525,205 m) e São Gabriel, RS (30° 20' S, 54° 20' O, 120,6 m).

A comparação entre os resultados obtidos a partir da implementação dos algoritmos foi feita considerando a radiação solar total anual incidente e o número de reorientações, já que quanto menor o número de reorientações menor o gasto de energia elétrica para movimentação do sistema e menor a manutenção. Os algoritmos com base em  $d\omega$ ,  $d\beta$ ,  $d\gamma$ ,  $d\theta$  e  $dE$  foram avaliados para cada uma destas cidades sendo realizadas simulações para cada um destes critérios com seu valor limite variando de 0,4° a 90°, em intervalos de 3°. No caso de  $dE$ , além do valor limite do critério, também foram variados os valores de  $C_1$  e de  $C_2$ , de 0,1 a 0,9, em intervalos de 0,2, totalizando cinco simulações deste algoritmo para cada cidade analisada. A simulação dos algoritmos foi desenvolvida através do software Octave e o código é apresentado no apêndice deste trabalho.

### 3.4. Resultados e Discussão

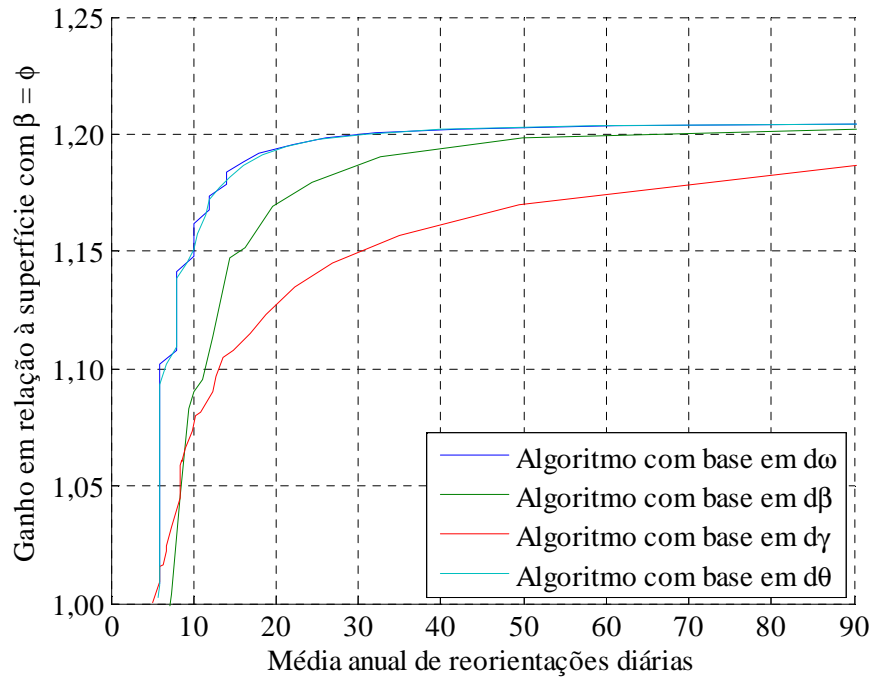
Foram realizadas simulações para determinar o potencial de aumento da radiação solar incidente sobre os sistemas com rastreamento biaxial, i. e., sistemas de rastreamento que sempre mantenham o ângulo de incidência da radiação solar na superfície absorvedora em 0°, para cada uma das cidades estudadas. A Tabela 3.1 apresenta o potencial de aumento da radiação incidente de um sistema com rastreamento biaxial ideal em relação a um sistema fixo com inclinação igual à latitude orientado em direção ao norte para cada uma das cidades estudadas.

Foi observado um potencial de aumento da radiação incidente de 40 % a 45 % em relação a sistemas fixos para as cidades estudadas, sendo o máximo observado para Brasília, DF e o mínimo para São Gabriel, RS. Foi observado ainda que o potencial de aumento da radiação incidente foi crescente de Manaus, AM, a Brasília, DF, e decrescente de Brasília, DF, até São Gabriel, RS.

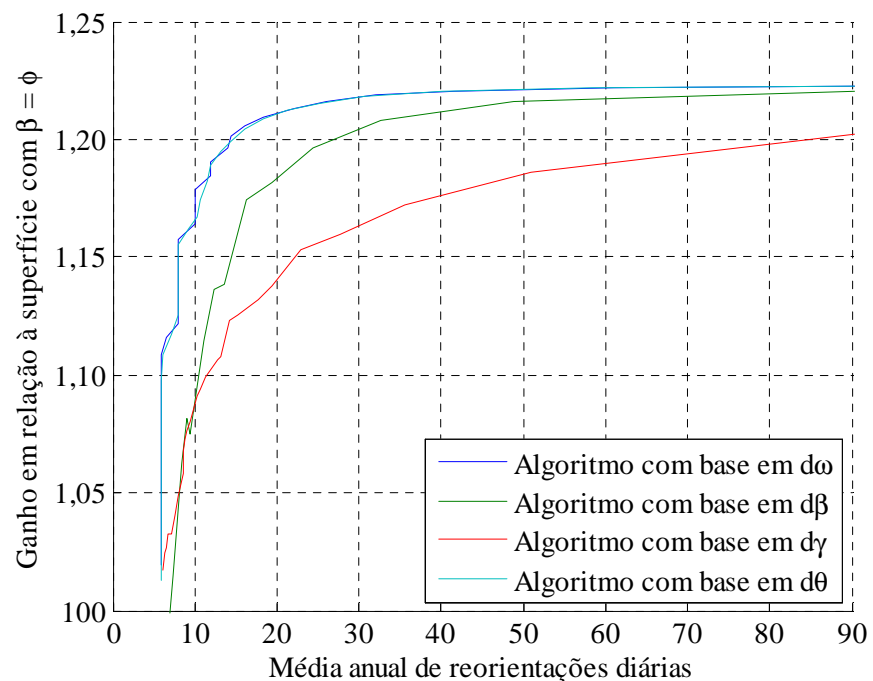
**Tabela 3.1** – Desempenho de sistema de rastreamento biaxial ideal, i.e. superfície sempre perpendicular aos raios solares, em relação a um sistema com inclinação igual à latitude e orientado em direção ao norte

Cidade	Radiação solar incidente sobre sistema fixo com inclinação igual a latitude (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	Radiação solar incidente sobre sistema com rastreamento biaxial ideal (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	Potencial de aumento da radiação incidente em relação a um sistema fixo (%)
Manaus, AM (3° S, 34,36 m)	2.456,37	3.462,64	41
Garanhuns, PE (8° S, 869,21 m)	2.655,28	3.839,85	45
Brasília, DF (15° S, 1.115,25 m)	2.691,24	3.905,56	45
Belo Horizonte, MG (19° S, 937,53 m)	2.644,23	3.813,54	44
Campo Grande, MS (20° S, 544,51 m)	2.554,22	3.639,52	43
Joaçaba, SC (27° S, 525,25 m)	2.511,03	3.563,08	42
São Gabriel, RS (30° S, 120,60)	2.373,75	3.312,56	40

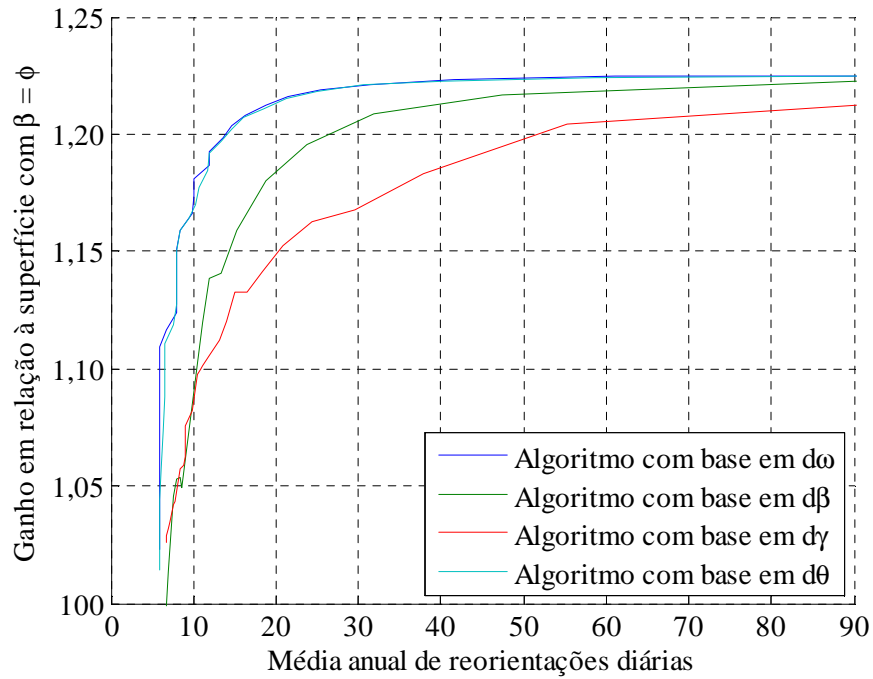
Então, foram realizadas as simulações para os algoritmos com base em  $d\omega$ ,  $d\beta$ ,  $dy$  e  $d\theta$  para cada localidade. Os resultados para cada uma das cidades avaliadas são apresentados nas Figuras 3.3 a 3.9. Os resultados estão apresentados até um limite de média anual de 90 reorientações diárias, já que para valores superiores a 90 a variação do ganho na radiação incidente era pouco significativa para a maioria dos casos.



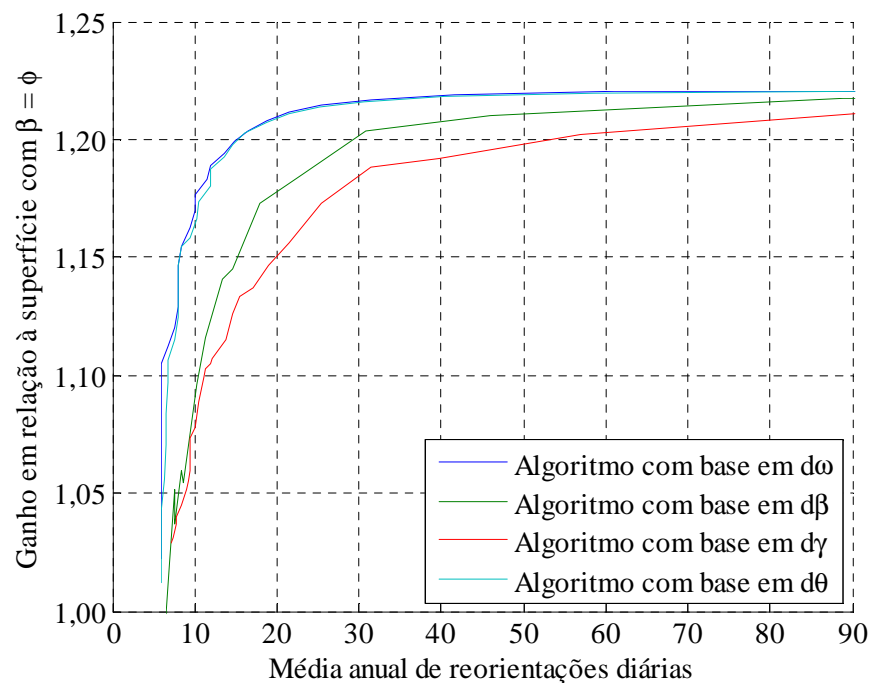
**Figura 3.3** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Manaus, AM ( $3^\circ$  S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .



**Figura 3.4** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Garanhuns, PE ( $8^\circ$  S), para os algoritmos de sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .

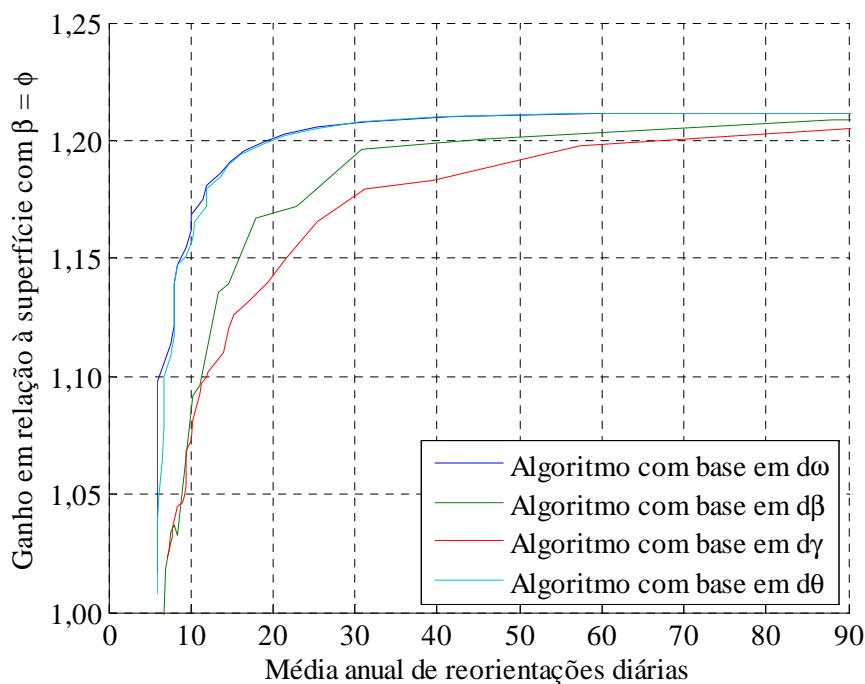


**Figura 3.5** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Brasília, DF (15° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .

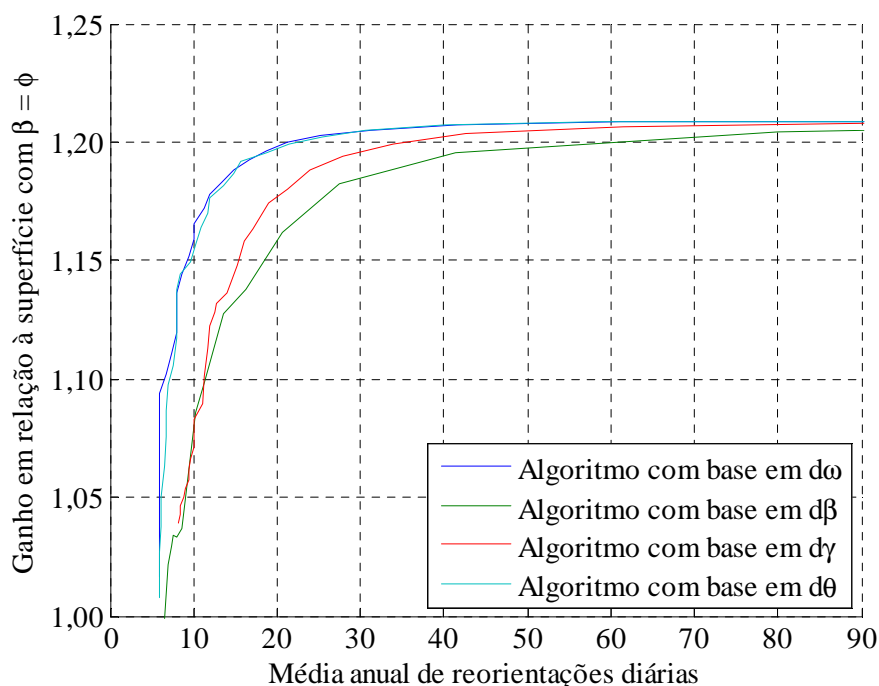


**Figura 3.6** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Belo Horizonte, MG (19° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .

incidência,  $d\theta$ .

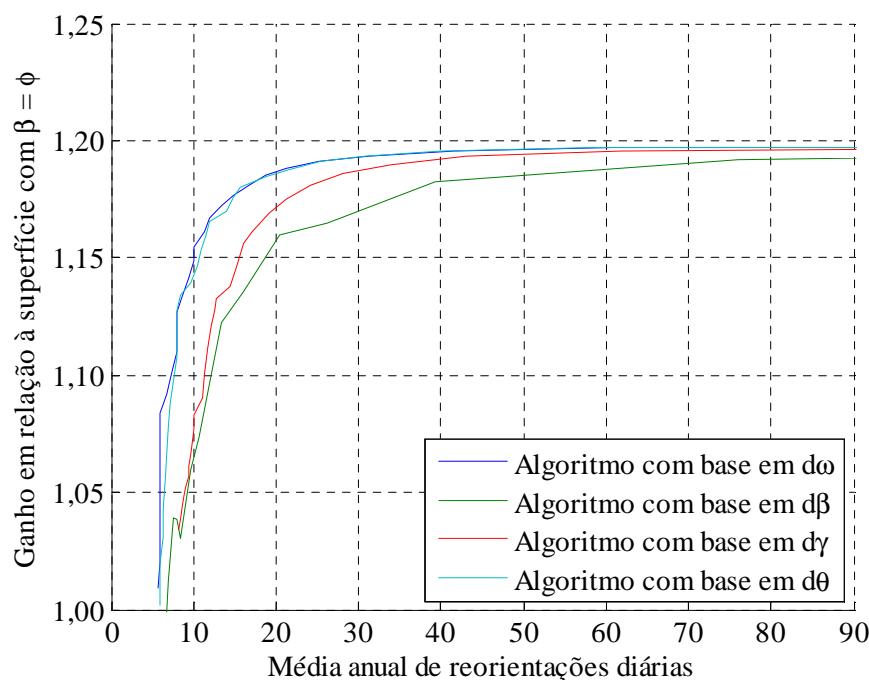


**Figura 3.7** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Campo Grande, MS (20° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .



**Figura 3.8** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Joaçaba, SC (27° S), para os

algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .



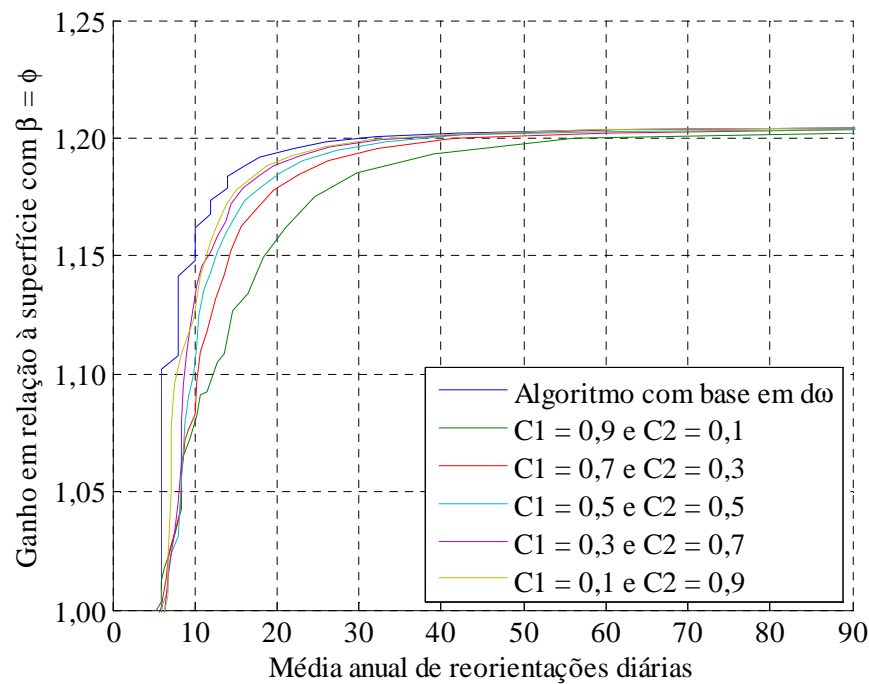
**Figura 3.9** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de São Gabriel, RS (30° S), para os algoritmos de reorientação sem retroalimentação, com base nos critérios de: ângulo horário,  $d\omega$ , inclinação,  $d\beta$ , azimute,  $d\gamma$ , e ângulo de incidência,  $d\theta$ .

Os algoritmos com base em  $d\omega$  e com base em  $d\theta$  apresentaram os melhores desempenhos dentre os algoritmos estudados, sendo que a diferença entre todos os algoritmos foi menor para os maiores valores de latitude. Para todos os casos estudados os algoritmos com base em  $d\omega$  e com base em  $d\theta$  obtiveram desempenho acima de 95 % do valor de radiação anual incidente máximo encontrado para as respectivas cidades com média anual de aproximadamente 12 reorientações diárias.

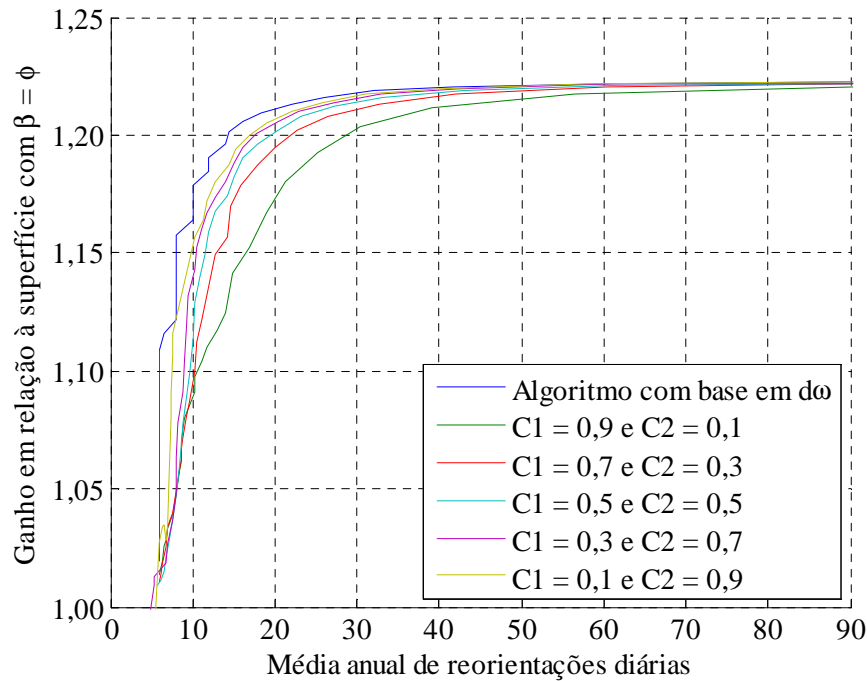
Os algoritmos com base em  $d\beta$  e  $d\gamma$  apresentaram os piores desempenhos dentre os algoritmos avaliados. O primeiro apresentou melhor desempenho para as cidades próximas do Equador e, à medida que a localidade estudada apresentava maior latitude, o algoritmo com base em  $d\gamma$  se aproximou dos resultados do algoritmo com base em  $d\beta$  e apresentou melhores resultados para as cidades de Joaçaba e São Gabriel. Para a cidade de Manaus, por exemplo, o algoritmo com base em  $d\beta$  apresentou um aumento de 33 % (em torno de 95% do aumento máximo) para uma média anual de 18 reorientações enquanto o algoritmo com base em  $d\gamma$  somente alcança este valor a partir de 55

reorientações diárias, e conseqüentemente requer um maior consumo de energia. Já para o caso da cidade de São Gabriel enquanto o algoritmo com base em  $d\beta$  apresenta este mesmo aumento para uma média de 25 reorientações diárias, o algoritmo com base em  $d\gamma$  apresenta o mesmo desempenho com uma média anual de cerca de 17 reorientações.

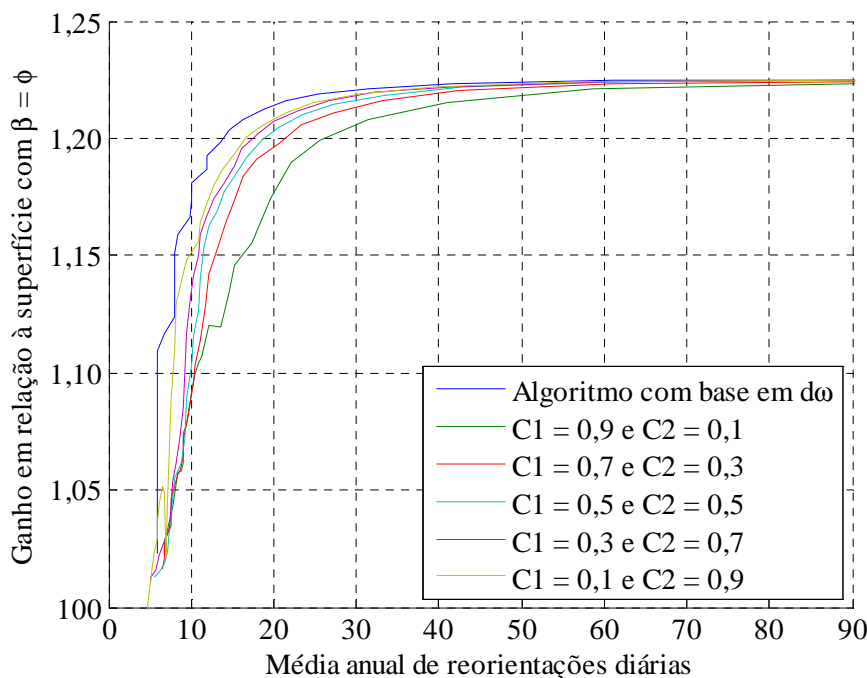
As Figuras 3.10 a 3.16 apresentam os resultados obtidos para as variações do algoritmo com base em  $dE$  e o resultado para o algoritmo com base em  $d\omega$ , para servir como referência. Novamente os gráficos foram limitados até a média anual de 90 reorientações diárias.



**Figura 3.10** – Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Manaus, AM ( $3^\circ$  S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

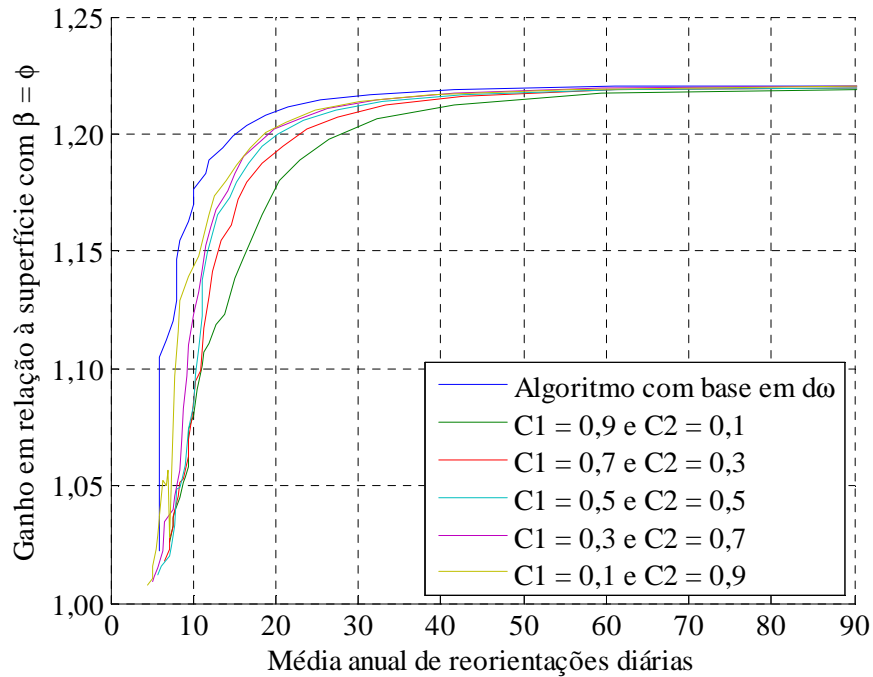


**Figura 3.11** - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Garanhuns, PE ( $8^\circ$  S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

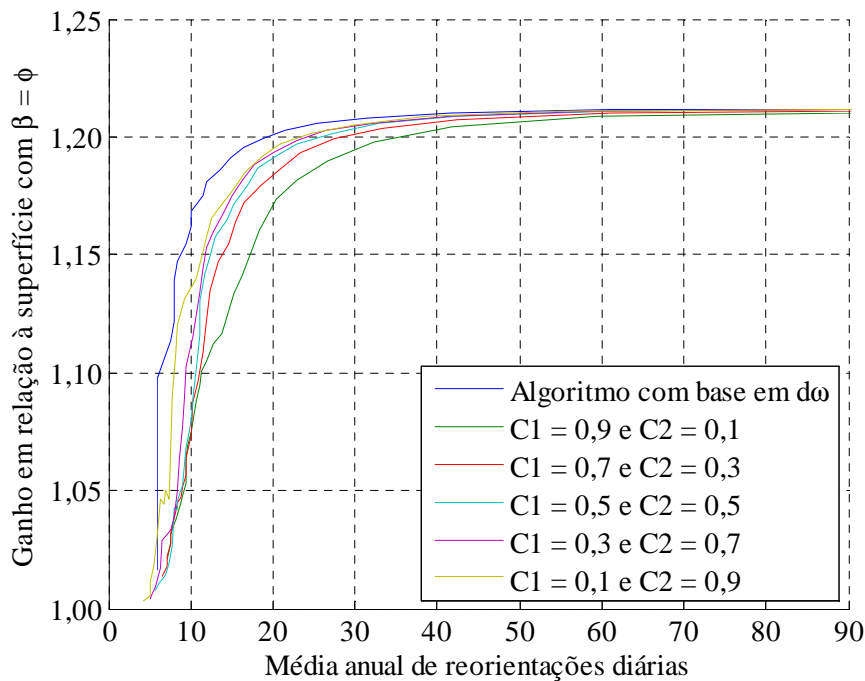


**Figura 3.12** - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Brasília, DF ( $15^\circ$  S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores

das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

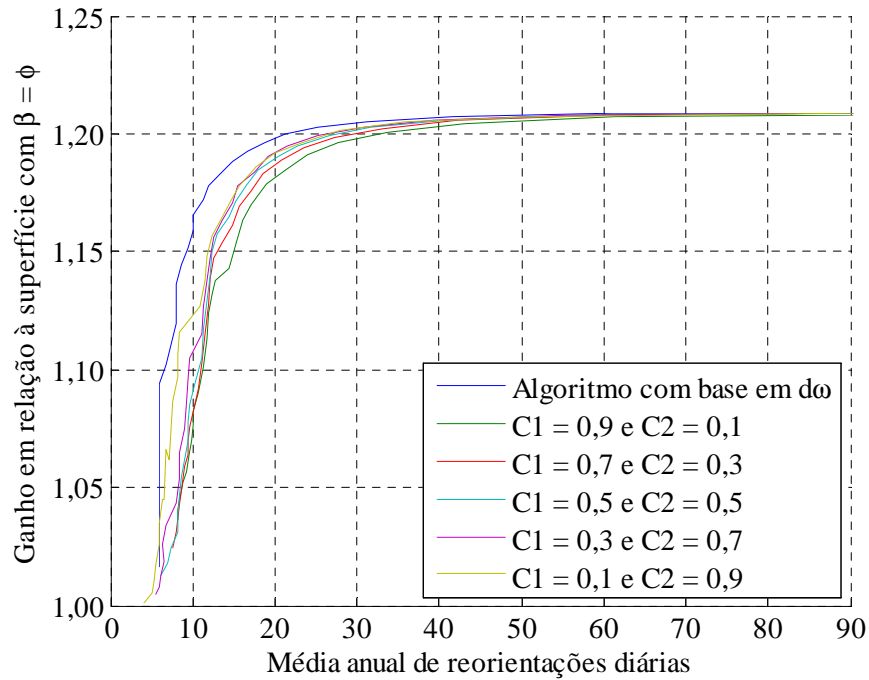


**Figura 3.13** – Desempenho o anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Belo Horizonte, MG (19° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

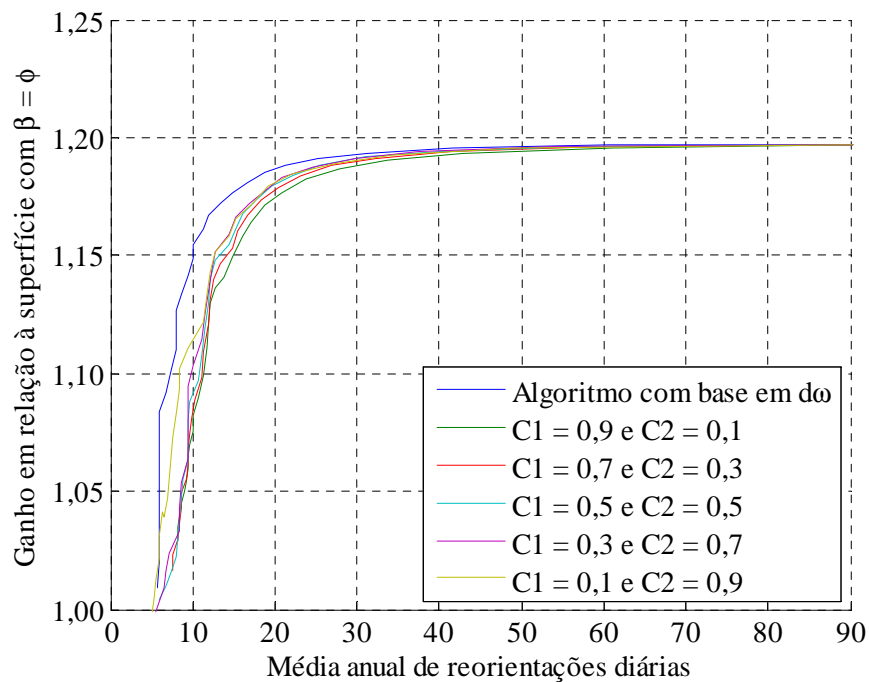


**Figura 3.14** - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Campo Grande, MS (20° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$

e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .



**Figura 3.15** - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de reorientações diárias para a cidade de Joaçaba, SC (27° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .



**Figura 3.16** - Desempenho anual na radiação incidente em relação à superfície com inclinação,  $\beta$ , igual à latitude local,  $\phi$ , em função da média anual de

reorientações diárias para a cidade de São Gabriel, RS (30° S), para os algoritmos de reorientação com base no critério de ângulo horário  $d\omega$  e para quatro variações do algoritmo com base em  $dE$ , variando os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

Os algoritmos com base em  $dE$  também apresentaram desempenhos inferiores aos dos algoritmos com base em  $d\omega$  e  $d\theta$ , mas superiores aos algoritmos com base em  $d\beta$  e  $d\gamma$  para as sete cidades estudadas. Foi observado também que a utilização de maiores valores de  $C_2$ , ou seja pesos para a inclinação da superfície e menores valores de  $C_1$ , ou seja pesos para o azimute, resultaram nos maiores aumentos no valor da radiação solar incidente, mas que a partir de determinado valor médio de reorientações diárias a diferença entre os algoritmos se tornou desprezível. Para as localidades com menor valor de latitude foi observada uma maior discrepância entre os algoritmos com base em  $dE$ . Enquanto a média de reorientações diárias para alcançar o desempenho de 1,35 para Manaus para a melhor combinação das constantes  $C_1$  e  $C_2$  ( $C_1 = 0,1$  e  $C_2 = 0,9$ ) foi de 15, a média de reorientações diárias para o pior caso foi de 25 reorientações, como mostrado na Figura 3.10. Já para a cidade de São Gabriel os valores médios de reorientações diárias para o melhor e pior caso são de 17 e 20 reorientações, respectivamente.

### 3.5. Conclusões

A utilização de sistemas para rastreamento solar apresenta-se como uma das opções para o aumento da radiação solar incidente na superfície absorvedora, por exemplo módulos fotovoltaicos. Os sistemas de rastreamento solar apresentam como desvantagem o custo inicial de instalação e o custo de manutenção do sistema mais elevado. Neste estudo foram avaliados algoritmos de controle sem retroalimentação de sistemas de rastreamento solar biaxial. Os algoritmos foram avaliados por meio da simulação da radiação solar global anual incidente sobre o painel fotovoltaico e do número médio anual de reorientações diárias para cada algoritmo. Estes estudos foram realizados para sete cidades brasileiras localizadas em regiões com latitudes diversas. Os valores de radiação foram obtidos utilizando um modelo que considera condições de céu claro para todo o ano, o que resulta em valores mais elevados em relação aos que são encontrados na prática. Apesar desta limitação os resultados podem representar um limite superior para os valores de radiação.

Foi estimado um potencial de aumento de até 45 % na energia incidente sobre a superfície em relação a sistemas fixos com inclinação igual à latitude e orientadas ao

norte. O algoritmo de rastreamento com base no ângulo horário e o algoritmo com base no ângulo de incidência apresentaram os melhores desempenhos para todas as cidades avaliadas. O algoritmo baseado no ângulo horário foi o mais indicado para todas as cidades devido a sua maior simplicidade de implementação. Os algoritmos com base somente no ângulo de inclinação ou azimute apresentaram os piores desempenhos, requerendo cerca de 60 reorientações diárias para alcançar cerca de 95 % do desempenho máximo no caso de Manaus, que é cerca de 5 vezes maior que o número de reorientações diárias dos sistemas com base no ângulo horário, por exemplo. Foi observado um melhor desempenho dos sistemas com base no ângulo de inclinação para cidades mais próximas do Equador, enquanto os algoritmos com base no ângulo de azimute apresentaram melhores resultados para as cidades mais distantes do Equador. Foi observado também que a diferença entre os algoritmos foi mais significativa para os locais com menores valores de latitude.

Foram analisadas cinco variações do algoritmo com base na composição dos ângulos de inclinação e azimute. Foi observado que, para todas as cidades, a composição de pesos para o azimute e para a inclinação de 0,1 e 0,9, respectivamente, resultou em um número menor de reorientações diárias para a obtenção dos mesmos desempenhos dos outros casos. Novamente foi observada uma menor discrepância entre os algoritmos à medida que eram estudadas cidades com maior valor de latitude. Os algoritmos com base nesta composição apresentaram desempenho intermediário, i.e., melhores que os algoritmos com base na inclinação ou no azimute, mas com menor desempenho que os algoritmos com base somente no ângulo horário ou no ângulo de incidência.

### **3.6. Referências Bibliográficas**

Ahmad, S.; Shafie, S.; Ab Kadir, M.Z.A.; Ahmad, N.S., 2013. *On the effectiveness of time and date-based sun positioning solar collector in tropical climate: A case study in Northern Peninsular Malaysia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, 635–642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.044> .

Ahmad, S.; Shafie, S.; Ab Kadir, M.Z.A., 2013. *Power feasibility of a low power consumption solar tracker*. Procedia Environmental Sciences, 17, 494–502. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.064> .

Alexandru, C., 2013. *A novel open-loop tracking strategy for photovoltaic systems*. The Scientific World Journal, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/205396> .

Barker, L.; Neber, M.; Lee, H., 2013. *Design of a low-profile two-axis solar tracker*. Solar Energy, 97, 569–576. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.014> .

Batayneh, W.; Owais, A.; Nairoukh, M., 2013. *An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar PV system*. Automation in Construction, 29, 100–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.006> .

Bentaher, H.; Kaich, H.; Ayadi, N.; Hmouda, M.B.; Maalej, A.; Lemmer, U., 2014. *A simple tracking system to monitor solar PV panels*. Energy Conversion and Management, 78, 872–875. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.042> .

Çinar, S.M.; Hocaoglu, F.O.; Orhun, M., 2014. *A remotely accessible solar tracker system design*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 6, 033143. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4885099> .

Drury, E.; Lopez, A.; Denholm, P.; Margolis, R., 2014. *Relative performance of tracking versus fixed tilt photovoltaic systems in the USA*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 22, 1302–1315. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2373> .

Duffie, J.A.; Beckman, W.A., 2006. *Solar engineering of thermal processes*, Third edit., John Wiley & Sons, Inc.

Gómez-Gil, F.J.; Wang, X.; Barnett, A., 2012. *Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 306–313. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.156> .

Koussa, M.; Cheknane, A.; Hadji, S.; Haddadi, M.; Noureddine, S., 2011. *Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions*. Applied Energy, 88, 1756–1771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.002> .

Koussa, M.; Haddadi, M.; Saheb, D.; Malek, A.; Hedji, S., 2012. *Sun tracking mechanism effects on flat plate photovoltaic system performances for different step time and main parameters affecting the obtained gains: Case of North Africa and Mediterranean site*. Energy Procedia, 18, 817–838. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.097> .

Lazariou, G.; Longo, M.; Roscia, M.; Pagano, M., 2015. *Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption*. Energy Conversion and Management, 92, 143–148. Available at:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.046> .

Lee, C.D.; Huang, H.-C.; Yeh, H.Y., 2013. *The development of sun-tracking system using image processing*. *Sensors*, 13, 5448–5459. <http://dx.doi.org/10.3390/s130505448> .

Lee, J.F.; Rahim, N.A.; Al-Turki, Y.A., 2013. *Performance of dual-axis solar tracker versus static solar system by segmented clearness index in Malaysia*. *International Journal of Photoenergy*, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/820714> .

Lubitz, W.D., 2011. *Effect of manual tilt adjustments on incident irradiance on fixed and tracking solar panels*. *Applied Energy*, 88, 1710–1719. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.008> .

Maatallah, T.; El Alimi, S.; Nassrallah, S.B., 2011. *Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4053–4066. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.037> .

Mehrtash, M.; Rouse, D.R.; Quesada, G., 2013. *Effects of surroundings snow coverage and solar tracking on photovoltaic systems operating in Canada*. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, 053119. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4822051> .

Mousazadeh, H.; Keyhani, A.; Javadi, A.; Mobli, H.; Abrinia, K.; Sharifi, A., 2009. *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1800–1818, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022> .

Rambhawan, Y.; Oree, V., 2014. *Improving the dual-axis solar tracking system efficiency via drive power consumption optimization*. *Applied Solar Energy*, 50, 74–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022> .

Stamatescu, I.; Făgărășan, I.; Stamatescu, G.; Arghira, N.; Iliescu, S.S., 2014. *Design and implementation of a solar-tracking algorithm*. *Procedia Engineering*, 69, 500–507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.018> .

Sungur, C., 2009. *Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey*. *Renewable Energy*, 34, 1119–1125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.020> .

Sunpower, 2015, *Going Solar Saves Nellis Air Force Base Over \$1 Million a Year on*

*Energy Costs*, Sunpower Corporation. Disponível em: <http://us.sunpower.com/commercial-solar/case-studies/nellis-air-force-base/> . Acessado em: 28 de Julho de 2015.

Syafaruddin, R.; Amir, A.S.; Miyauchi, H., 2014. *Microcontroller ATmega8535 based solar tracker design for PV system applications in equator region*. *International Journal of Control and Automation*, 7, 217–234. <http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2014.7.4.19> .

Tina, G.M.; Arcidiacono, F.; Gagliano, A., 2012. *Intelligent sun-tracking system based on multiple photodiode sensors for maximisation of photovoltaic energy production*. *Mathematics and Computers in Simulation*, 91, 16–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matcom.2012.07.020> .

Vermaak, H.J., 2014. *Techno-economic analysis of solar tracking systems in South Africa*. *Energy Procedia*, 61, 2435–2438. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.018> .

Yilmaz, S.; Ozcalik, H.R.; Dogmus, O.; Dincer, F.; Akgol, O.; Karaaslan, M., 2015. *Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 997–1005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.090> .

#### 4. CONCLUSÕES GERAIS

Neste estudo foram realizadas simulações para o estudo dos efeitos da inclinação e orientação do sistema sobre a radiação solar anual incidente em uma superfície e também foi avaliado o uso de sistemas de rastreamento solar em dois eixos com sistema de controle sem retroalimentação. Ambos os estudos foram realizados para as cidades de Manaus, AM (3°6' S, 60°1' Oeste - 34,36 m), Garanhuns, PE (8°53' Sul, 36°29' Oeste – 869,21 m), Brasília, DF (15°46' Sul, 47°55' Oeste – 1.115,25 m), Belo Horizonte, MG (19°48' Sul, 43°57' Oeste – 937,53 m), Campo Grande, MS (20°26' Sul, 54°38' Oeste – 544,51 m), Joaçaba, SC (27°10' Sul, 51°30' Oeste – 525,25 m) e São Gabriel, RS (30°20' Sul, 54°20' Oeste – 120,60 m), selecionadas com base na disponibilidade de dados e de forma a representar diferentes latitudes e altitudes no Brasil.

O estudo da inclinação e orientação do sistema foi realizado com base em valores típicos de média mensal da radiação solar global diária em superfície horizontal. Estes valores foram decompostos para a obtenção da distribuição da radiação ao longo do dia e a seguir foram usados em modelos empíricos para a estimativa da radiação em superfícies com valores de inclinação variando de 0° a 90° e ângulo de azimute variando de -180° a 180°. Obteve-se para todas as cidades uma faixa de valores de inclinação e orientação do sistema que mantinha a radiação incidente acima de 98 % da configuração do sistema com máxima radiação solar incidente. Para todas as cidades, o valor de inclinação sugerido para projeto, i.e. inclinação igual à latitude, estava contida nesta faixa, mas em nenhuma das cidades era o ponto de máxima radiação solar anual. Considerando a utilização da orientação do ponto de máxima radiação solar incidente, o ângulo de incidência podia ser variado de 0° a 11° para Manaus e de 0° a 15° para Garanhuns. Os intervalos para as demais cidades apresentou uma maior amplitude, sendo que a diferença entre a inclinação mínima e máxima se manteve em torno de 25°, que é quase um terço de todo o intervalo possível para a inclinação. Já no caso do ângulo de azimute, foi obtido para todas as cidades que o valor indicado, i.e. orientação em direção ao norte ( $\gamma = 180^\circ$ ), é o valor que apresentou a máxima radiação solar incidente. Além disso, para as cidades de Manaus e Garanhuns, considerando fixo o valor da inclinação no valor com máxima radiação incidente para a respectiva cidade, o valor da orientação foi indiferente para a radiação solar, ou seja, para estes casos  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ . Ainda em relação ao ângulo de azimute foi observado que à medida que o valor da latitude aumentava o intervalo de valores de  $\gamma$  que mantinham o valor da radiação incidente acima dos 98 % da radiação máxima foi reduzido, sendo que para São Gabriel este intervalo foi  $\gamma = 180^\circ \pm 35^\circ$ . Observa-se, portanto que, apesar da indicação de inclinação igual à latitude e a orientação

em direção ao norte para as cidades avaliadas ser apropriada, há uma tolerância para desvios dos valores ideais sem que haja uma redução significativa na radiação solar anual incidente sobre o sistema.

A avaliação dos sistemas em dois eixos com controle sem retroalimentação consistiu na simulação de sistema de rastreamento utilizando cinco tipos de algoritmo de controle. O primeiro com base no intervalo entre valores de ângulo horário,  $d\omega$ , o segundo com base na diferença entre o ângulo de incidência e seu valor ideal  $d\theta$ , o terceiro com base na diferença entre o ângulo de inclinação e no seu valor ideal  $d\beta$ , o quarto com base na diferença entre o ângulo de azimute e seu valor ideal,  $d\gamma$  e o ultimo algoritmo com base em uma combinação linear das duas diferenças anteriores,  $dE$ . Neste estudo foram utilizados valores estimados de radiação solar global em superfície horizontal obtidos a partir de um modelo de radiação de céu claro, o que permitiu a utilização de intervalos de ângulo horário de  $0,1^\circ$ , possibilitando o estudo do rastreamento com maior número de reorientações diárias. Os desempenhos dos algoritmos foram comparados por meio das médias anuais de reorientações diárias requeridas para que a radiação incidente sobre a superfície fosse superior a 95 % da radiação solar no caso de rastreamento ideal, i.e., superfície sempre perpendicular aos raios solares. Foram avaliados os desempenhos pela utilização de sistema de rastreamento solar no caso ideal, em que a superfície é sempre perpendicular os raios solares, obtendo aumentos na radiação solar anual incidente da ordem de 40 % a 45 % em relação a superfície com inclinação igual à latitude. Os maiores aumentos foram encontrados para as cidades com valor médio de latitude, Brasília, Belo Horizonte e Campo Grande. Então, foram avaliados os algoritmos com base em  $d\omega$ ,  $d\theta$ ,  $d\beta$  e  $d\gamma$  variando os parâmetros dos algoritmos e para cada parâmetro foi obtida a radiação solar anual incidente sobre a superfície absorvedora. Foi obtido um melhor desempenho dos algoritmos com base em  $d\omega$  e  $d\theta$  para todas as cidades, alcançando 95 % da radiação máxima com uma média anual de cerca de 12 reorientações diárias. Vale ressaltar que, com exceção do algoritmo com base no ângulo horário, as reorientações não ocorrem em intervalos fixos de tempo.

O algoritmo com base no ângulo de inclinação,  $d\beta$ , apresentou melhor desempenho para as cidades com menor latitude. A medida que o local era mais distante do Equador a diferença entre o seu desempenho e o do algoritmo com base no ângulo do azimute,  $d\gamma$ , reduziu, e para as cidades de Joaçaba e São Gabriel o algoritmo com base em  $d\gamma$  apresentou melhor resultado. O algoritmo com base na composição dos ângulos de inclinação e do azimute,  $dE$  foi avaliado para diferentes pesos para estes ângulos. A combinação de pesos que resultou em melhor desempenho foi de 0,1 e 0,9 para azimute

e inclinação, respectivamente, mas o desempenho ainda foi inferior aos resultados obtidos para os algoritmos com base em  $d\omega$  e  $d\theta$ . Foi observado ainda que a discrepância entre todos os algoritmos analisados foi menor para as cidades com menor valor de latitude.

#### **4.1. Sugestões de trabalhos futuros**

- i. Avaliação dos algoritmos para uma maior quantidade de localidades brasileiras;
- ii. Estudo de algoritmo de rastreamento sem retroalimentação que seja função do ângulo horário adiantado no período da manhã e atrasado no período da tarde;
- iii. Avaliação do dimensionamento e algoritmos de rastreamento em função de tipos e valores de tarifa de energia elétrica;
- iv. Avaliação da utilização de sistemas com inclinação anual, semianual, sazonal e mensal; e
- v. Validação experimental dos resultados numéricos obtidos neste estudo.

# Apêndice: Rotina em Octave

## ROTINA PRINCIPAL

```
clc;clear;

rastr = 0; % O sistema possui sistema de rastreamento em dois eixos
  mods_Rastr = {'ideal'};
  %mods_Rastr = {'fix_int', 'lim_erro_beta', 'lim_erro_gamma',
'lim_erro_incid', 'prop_Aur', 'prop_Aur_2'};
  %legend_Rastr = {'Algoritmo com base em d\omega', 'Algoritmo com
base em d\beta', 'Algoritmo com base em d\gamma', 'Algoritmo com base em
d\theta'};%,'Algoritmo ', 'prop Aur 2'};
  crit_max = 90; % Valor máximo para o critério utilizado
  crit_min = 0.2; % Valor mínimo para o critério utilizado
  crit_inc = 3; % Valor do incremento para o critério utilizado
  C1 = 0.9:-0.2:0.1;
  C2 = 0.1:0.2:0.9;
  legend_Rastr_Aur = {'Algoritmo com base em d\omega', 'C1 = 0,9 e C2
= 0,1', 'C1 = 0,7 e C2 = 0,3', 'C1 = 0,5 e C2 = 0,5', 'C1 = 0,3 e C2 =
0,7', 'C1 = 0,1 e C2 = 0,9'};
  d_omega = 0.1; % Incremento nos valores do ângulo da hora
solar, [o].

if ~rastr % Parâmetros de entrada para otimização da inclinação e
orientação
  beta_max = 90;
  beta_min = 0;
  beta_inc = 5;
  gamma_max = 0;
  gamma_min = 180;
  gamma_inc = -5;
end

cid = 7; % Definição da cidade onde sera feita a simulacao

% VALORES PARA CADA CIDADE, NA ORDEM DE LATITUDE
cidades = {'Manaus - AM', 'Garanhuns - PE', 'Brasilia - DF', 'Belo
Horizonte - MG', 'Campo Grande - MS', 'Joacaba - SC', 'Sao Gabriel -
RS'};
lat_cid = [-3.10 -8.88 -15.77 -19.80 -20.43 -27.17 -30.33];
altit_cid = [34.36 869.21 1115.25 937.53 544.51 525.25 120.6];

% Valor de radiação solar diária incidente em superfície horizontal
% fornecido pelo SWERA em parceria com o INPE, valores em MJ/m2
H_cid = [16.82 16.32 16.68 17.60 16.85 15.08 16.74 19.87
20.23 18.78 20.45 17.14
21.19 20.03 20.84 20.45 17.07 12.72 13.45 17.48
18.69 22.04 24.37 21.23
21.94 20.71 19.76 20.04 17.69 14.33 17.37 21.15
23.26 24.44 20.84 18.50
23.98 21.11 20.66 18.72 15.82 13.59 14.55 18.76
18.60 23.63 17.57 22.57
22.75 21.30 19.60 20.86 16.52 14.69 14.13 18.19
19.89 23.11 25.95 23.59
22.44 19.66 19.72 17.32 13.41 11.14 11.06 15.40
16.36 20.78 24.75 25.27
23.81 21.28 19.53 14.41 12.04 9.23 9.84 14.53
17.54 18.26 24.59 25.60];
```

```

% ENTRADAS DO PROGRAMA

% CONSTANTES
rho_g = 0.2;      % Refletividade do solo
G_sc = 1367; % Constante solar

% Dias do ano já convertidos para número total
n = [17 47 75 105 135 162 198 228 258 288 318 344]; % Dias médios de
cada mês
n_dias_mes = [31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31]; % Número de dias
do respectivo mês

% Latitude local [°]
lat = lat_cid(cid);
altit = altit_cid(cid);

% Radiação solar diária global
H = H_cid(cid,:);

% GEOMETRIA DA RADIAÇÃO SOLAR

% Ângulos diários da orientação do sol
[delta omega_s] = Geom_Solar_Dia(lat, n); % delta = Declinação solar
% omega_s = ângulo de por do sol

%----- Cálculos para a situação selecionada -----%

if ~rastr
    omega_1 = floor(-max(omega_s)/15)*15 : 15 :
floor(max(omega_s)/15)*15;
    omega_2 = ceil(-max(omega_s)/15)*15 : 15 :
ceil(max(omega_s)/15)*15;
    omega = (omega_1 + omega_2)/2;

    % Cálculo dos ângulos de elevação solar e de azimute do sol
    [theta_z alpha_s gamma_s] = Geom_Solar_Hora(lat, n, omega, delta);

    % RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

    % Radiação solar diária global no topo da atmosfera
    H_o = Rad_Ext_Dia(lat, n, delta, omega_s);
    % Radiação solar horária global no topo da atmosfera
    I_o = Rad_Ext_Hor(lat, n, omega_1, omega_2, delta, omega_s);

    % CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DIRETA E DIFUSA EM SUPERFÍCIE
    % HORIZONTAL

    % Cálculo da radiação solar global horária a partir da radiação
solar global diária
    [I_r_t] = Rad_I_de_H(H, lat, n, omega, delta, omega_s);
    % Índice de claridade
    k_t = I./I_o;
    k_t(isnan(k_t)) = 0; % Retira os valores não válidos da matriz
    k_t(isinf(k_t)) = 0;
    % Estimativa das frações difusa e direta da radiação solar horária
global
    [I_b I_d] = frac_I(I, k_t);

    n_dados = 0;
    m_dados = 0;

```

```

for beta_sup = beta_min:beta_inc:beta_max
    n_dados = n_dados + 1;
    for gamma_sup = gamma_min:gamma_inc:gamma_max
        m_dados = m_dados + 1;

        % CÁLCULO DA RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIE COM ORIENTAÇÃO ARBITRÁRIA

        % Razão entre a radiação direta incidente sobre superfície
        inclinada e sobre uma superfície horizontal
        R_b = fator_Geom_Rb(lat, n, beta_sup, gamma_sup, omega_1,
        omega_2, omega_s, delta);
        % Radiação em superfície arbitrária de acordo com o modelo
        de Perez et al
        I_t_perez = Rad_Inc(I, I_b, I_d, I_o, R_b, beta_sup,
        rho_g, 'Perez', n, altit, theta_z, gamma_s, gamma_sup);

        H_t_perez = sum(I_t_perez,2);

        Z_dados(n_dados, m_dados) =
        sum(H_t_perez.*n_dias_mes')./3.6;
        end
        m_dados = 0;
    end
else

    clima = 1; % Atmosfera padrão

    omega_1 = floor(-max(omega_s)/15)*15 : d_omega :
    floor(max(omega_s)/15)*15;
    omega_2 = ceil(-max(omega_s)/15)*15 : d_omega :
    ceil(max(omega_s)/15)*15;
    omega = (omega_1 + omega_2)/2;

    % Cálculo dos ângulos de elevação solar e de azimute do sol
    [theta_z alpha_s gamma_s] = Geom_Solar_Hora(lat, n, omega, delta);

    % RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

    % Radiação solar diária global no topo da atmosfera
    H_o = Rad_Ext_Dia(lat, n, delta, omega_s);
    % Radiação solar global no topo da atmosfera
    B = 2*pi/360*(n-1)*360/365; % Variavel auxiliar

    % CALCULO RADIACAO DE DIA CLARO PARA SUPERFICIE HORIZONTAL

    % Radiacao extraterrestre em superficie perpendicular a radiacao,
    % conforme Duffie e Beckman (2006) e Iqbal (1983)
    G_on = G_sc*(1.000110 + 0.034221*cos(B) + 0.001280*sin(B)...
    + 0.000719*cos(2*B) + 0.000077*sin(2*B));
    % Radiação solar extraterrestre em superficie horizontal
    G_o = cosd(theta_z).*(G_on'*ones(1,size(theta_z,2)));
    % Cálculo da radiação solar global, direta e difusa em superfície
    % horizontal
    [G_h G_b G_d] = Rad_Dia_Claro(theta_z, altit/1000, clima, G_on); %
    Cálculo da radiação total horizontal e parcelas direta e difusa em dia
    claro
    % Dados da superfície
    beta_sup = abs(lat);
    gamma_sup = (lat<0)*180;

    % CÁLCULO DA RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIE COM ORIENTAÇÃO ARBITRÁRIA

```

```

% Razão entre a radiação direta incidente sobre superfície
inclinada e % sobre uma superfície horizontal
R_b = fator_Geom_Rb(lat, n, beta_sup, gamma_sup, omega_1, omega_2,
omega_s, delta);
% Radiação em superfície arbitrária de acordo com o modelo de
Perez et al
G_t_perez = Rad_Inc_Dia_Claro(G_h, G_b, G_d, G_o, R_b, beta_sup,
rho_g, 'Perez', n, altit, theta_z, gamma_s, gamma_sup);

% Algoritmos de rastreamento de tempo fixo, limite de erro beta,
% gamma, ang de incidencia, proposto pelo Aurelio e variação da
% proposta do Aurélio

ganho_Rastr = zeros(length(mods_Rastr), floor((crit_max-
crit_min)/crit_inc)+1);
n_reord_m = zeros(length(mods_Rastr), floor((crit_max-
crit_min)/crit_inc)+1);

for j = 1:length(mods_Rastr)
    i = 1;
    for crit = crit_min:crit_inc:crit_max
        [G_t_r beta_sup gamma_sup n_reor_gamma n_reor_beta] =
Rad_Inc_Rast_Dia_Claro(G_h, G_b, G_d, G_o, R_b, rho_g, theta_z,
alpha_s, gamma_s, omega, omega_1, omega_2, omega_s, lat, n, altit,
delta, mods_Rastr{j}, 'inc_Hora', crit);
        % Cálculo do ganho no valor da radiação solar anual em
        % relação ao sistema com inclinação igual a latitude
        ganho_Rastr(j,i) = sum(
sum(G_t_r*3600*d_omega./15,2).*n_dias_mes' )./sum(
sum(G_t_perez*3600*d_omega./15,2).*n_dias_mes' );
        % Cálculo do número médio de reorientações diárias
        n_reord_m(j,i) = sum(n_reor_gamma +
n_reor_beta)/length(n);
        i = i + 1;
    end
end

% Estudo de diferentes algoritmos de rastreamento com diferentes
% pesos para gamma e beta com base no critério do Aurélio

ganho_Rastr_Aur_2 = zeros(length(C1), floor((crit_max-
crit_min)/crit_inc)+1);
n_reord_m_Aur_2 = zeros(length(C1), floor((crit_max-
crit_min)/crit_inc)+1);

for j = 1:length(C1)
    i = 1;
    for crit = crit_min:crit_inc:crit_max
        [G_t_r beta_sup gamma_sup n_reor_gamma n_reor_beta] =
Rad_Inc_Rast_Dia_Claro(G_h, G_b, G_d, G_o, R_b, rho_g, theta_z,
alpha_s, gamma_s, omega, omega_1, omega_2, omega_s, lat, n, altit,
delta, 'prop_Aur_2', 'inc_Hora', crit, C1(j), C2(j));
        ganho_Rastr_Aur_2(j,i) = sum(
sum(G_t_r*3600./(d_omega*15),2).*n_dias_mes' )./sum(
sum(G_t_perez*3600./(d_omega*15),2).*n_dias_mes' );
        n_reord_m_Aur_2(j,i) = sum(n_reor_gamma +
n_reor_beta)/length(n);
        i = i + 1;
    end
end
end

```

```

end

%----- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS -----%
if ~rastr

    % Abre uma nova figura gerando uma superfície com valores de
    orientação
    % e inclinação no plano x-y e com o valor de radiação no eixo z
    (armazenados em Z_dados)
    figure; hold on; grid on;

    surf(gamma_min:gamma_inc:gamma_max,beta_min:beta_inc:beta_max,eta*Z_da
    dos);
    colormap('hot');
    colorbar;
    xlabel('Ângulo de azimute (°)');
    ylabel('Ângulo de inclinação (°)');
    view([90 90]); % ajuste da orientação da superfície para que se
    veja o plano x-y (inclinação - orientação)
    axis([gamma_max gamma_min beta_min beta_max]); % Delimita a área
    do gráfico

elseif rastr
    figure;
    hold all;
    grid on;

    for j = 1:length(mods_Rastr)
        plot(n_reord_m(j,:), ganho_Rastr(j,:));
    end

    axis([0 90 1 1.5]);
    legend(legend_Rastr{1:length(mods_Rastr)},'Location',
    'SouthEast');
    xlabel('Média anual de reorientações diárias');
    ylabel('Ganho em relação à superfície com \beta = \phi');

    figure;
    hold all;
    grid on;

    plot(n_reord_m(1,:), ganho_Rastr(1,:));

    for j = 1:length(C1)
        plot(n_reord_m_Aur_2(j,:),ganho_Rastr_Aur_2(j,:));
    end

    axis([0 90 1 1.5]);
    legend(legend_Rastr_Aur{1:length(C1)},'Location', 'SouthEast');
    xlabel('Média anual de reorientações diárias');
    ylabel('Ganho em relação à superfície com \beta = \phi');
end

```

## **FUNÇÕES:**

```

function [delta omega_s] = Geom_Solar_Dia(lat, n, varargin)

%===== Ângulos da geometria solar no dia =====%
% Entradas: n          - dia do ano                      %
%              lat     - latitude local [°]              %
%              varargin - Modelo para calculo da declinacao, 'Cooper' %

```

```

%                               ou 'Spencer'                               %
% Saídas: delta   - Declinação solar [°]                               %
%               omega_s - Ângulo da hora solar para o por-do-sol, [°] %
% Obs.: Não indicado para latitudes com módulo superior a 66.5°      %
%=====
if (~isempty(varargin) && strcmpi(varargin{1}, 'Cooper'))
    % Cálculo da declinação solar utilizando a fórmula de Cooper(1969)
    % equação com menor precisão
    delta = 23.45*sind(360*(284+n)/365);
else
    % Variável auxiliar
    B = (n - 1)*360/365;
    % Declinação solar
    delta = 180/pi* ( 0.006918 - 0.399912*cosd(B) +
0.070257*sind(B)...
                    - 0.006758*cosd(2*B) + 0.000907*sind(2*B) ...
                    - 0.002679*cosd(3*B) + 0.00148*sind(3*B) );
end
% Ângulo horário de por-do-sol - Duffie e Beckman (2006)
omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta));
function [theta_z alpha_s gamma_s] = Geom_Solar_Hora(lat, n, omega,
varargin)

%===== Ângulos de elevação e de azimute =====%
% Entradas: lat   - latitude local [°]                               %
%            n    - dia do ano                                       %
%            omega - Hora solar [°]                                   %
%            delta - declinação solar [°](opcional)                 %
% Saída: alpha_s - ângulo elevação solar [MJ/m²]                   %
%            gamma_s - ângulo de azimute solar [MJ/m²]             %
%=====
if size(varargin,2) < 1
    B = (n - 1)*360/365; % Variável auxiliar
    delta = 180/pi* ( 0.006918 - 0.399912*cosd(B) +
0.070257*sind(B)...
                    - 0.006758*cosd(2*B) + 0.000907*sind(2*B) ...
                    - 0.002679*cosd(3*B) + 0.00148*sind(3*B) ); %
Declinação solar
elseif size(varargin,2) < 2
    delta = varargin{1};
end
n_horas = size(omega,2);
theta_z = acosd( cosd(lat)*cosd(delta)*cosd(omega)...
                + sind(lat)*sind(delta)*ones(1,n_horas) );
alpha_s = 90 - theta_z;
gamma_s = ( ones(length(n),1)*sign(omega)).*...
          abs(acosd( (cosd(theta_z)*sind(lat) -
sind(delta)*ones(1,n_horas))./ ...
                (sind(theta_z)*cosd(lat)) ));

function H_o = Rad_Ext_Dia(lat, n, varargin)

%===== Radiação Solar Diária no topo da atmosfera =====%
% Entradas: n    - dia do ano                                       %
%            lat  - latitude local [°]                               %
%            delta - declinação solar [°]                           %
%            omega_s - hora solar do por-do-sol [°]                 %
%            G_sc  - constante solar [W/m²]                         %
% Saída: H_o - Radiação solar diária no topo da atmosfera [MJ/m²] %
%=====
if size(varargin,2) < 1
    G_sc = 1367; % Constante solar [W/m²]
    B = (n - 1)*360/365; % Variável auxiliar

```

```

        delta = 180/pi* (006918 - 0.399912*cosd(B) + 0.070257*sind(B)...
                    - 0.006758*cosd(2*B) + 0.000907*sind(2*B) ...
                    - 0.002679*cosd(3*B) + 0.00148*sind(3*B) );
% Declinação solar
    omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta)); % Ângulo horário de por-
do-sol
elseif size(varargin,2) < 2
    G_sc = 1367;
    delta = varargin{1};
    omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta));
elseif size(varargin,2) < 3
    G_sc = 1367;
    delta = varargin{1};
    omega_s = varargin{2};
elseif size(varargin,2) < 4
    G_sc = varargin{3};
    delta = varargin{1};
    omega_s = varargin{2};
end
H_o = 24*3600/pi*G_sc*(1+ 0.033*cosd(360*n/365)).*...
        (cosd(lat)*cosd(delta).*sind(omega_s)+...
        pi*omega_s/180*sind(lat).*sind(delta))/1e6;
function I_o = Rad_Ext_Hor(lat, n, omega_1, omega_2, varargin)

%===== Radiação Solar Horária no topo da atmosfera =====%
% Entradas: n          - dia do ano                                %
%               lat     - latitude local [°]                    %
%               omega_1  - início do intervalo de hora solar [°] %
%               omega_2  - fim do intervalo de hora solar [°]   %
%               delta    - declinação solar [°]                  %
%                       (opcional)                             %
%               omega_s  - hora solar do por-do-sol [°] (opcional) %
%               G_sc     - constante solar [W/m²]                %
%                       (opcional)                             %
% Saída: I_o - Radiação solar horária no topo da atmosfera [MJ/m²] %
%=====
if size(varargin,2) < 1
    G_sc = 1367;
% Constante solar [W/m²]
    B = (n - 1)*360/365;
% Variável auxiliar
    delta = 180/pi* ( 0.006918 - 0.399912*cosd(B) +
0.070257*sind(B)...
                    - 0.006758*cosd(2*B) + 0.000907*sind(2*B) ...
                    - 0.002679*cosd(3*B) + 0.00148*sind(3*B) );
% Declinação solar
    omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta));
% Ângulo horário de por-do-sol
elseif size(varargin,2) < 2
    G_sc = 1367;
    delta = varargin{1};
    omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta));
elseif size(varargin,2) < 3
    G_sc = 1367;
    delta = varargin{1};
    omega_s = varargin{2};
elseif size(varargin,2) < 4
    G_sc = varargin{3};
    delta = varargin{1};
    omega_s = varargin{2};
end
n_horas = length(omega_1);
% Se omega_1 e omega_2 estão dentro do intervalo de -omega_s a omega_s
I_o = ((ones(length(n),1)*omega_2 > -omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 > -omega_s'*ones(1,n_horas)) &

```

```

(ones(length(n),1)*omega_2 < omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...
    12*3600/pi*G_sc*...
    (cosd(lat))*((1 +
0.033*cosd(360/365*n)).*cosd(delta))'*(sind(omega_2) -
sind(omega_1))...
    +pi/180*sind(lat))*((1 +
0.033*cosd(360/365*n)).*sind(delta))'*(omega_2 - omega_1))./1e6);
% Se omega_2 > -omega_s e omega_1 < -omega_s
I_o = I_o + (ones(length(n),1)*omega_2 > -omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < -omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...
    12*3600/pi*G_sc*...
    (cosd(lat))*((1 +
0.033*cosd(360/365*n)).*cosd(delta))'*(ones(1,n_horas).*(sind(ones(leng
th(n),1)*omega_2) - sind(-omega_s'*ones(1,n_horas))))...
    +pi/180*sind(lat))*((1 +
0.033*cosd(360/365*n)).*sind(delta))'*(ones(1,n_horas).*(ones(length(n)
,1)*omega_2 - (-omega_s)'*ones(1,n_horas)))./1e6);
% Se omega_1 < omega_s e omega_2 > omega_s
I_o = I_o + (ones(length(n),1)*omega_2 > omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...
    12*3600/pi*G_sc*...
    (cosd(lat))*((1 +
0.033*cosd(360/365*n)).*cosd(delta))'*(ones(1,n_horas).*(sind(omega_s'*
ones(1,n_horas)) - sind(ones(length(n),1)*omega_1))...
    +pi/180*sind(lat))*((1 +
0.033*cosd(360/365*n)).*sind(delta))'*(ones(1,n_horas).*(omega_s'*ones(
1,n_horas) - ones(length(n),1)*omega_1))./1e6);
I_o(I_o < 0) = 0;
function [I r_t] = Rad_I_de_H(H, lat, n, omega, varargin)

%===== Radiação Solar Horária Global a partir de H =====%
% Entradas: H          - Radiação solar diária global [MJ/m²]          %
%               lat    - latitude local [°]                          %
%               n      - dia do ano                                    %
%               omega  - Hora solar [°]                               %
%               delta  - declinação solar [°](opcional)              %
%               omega_s - hora solar do por-do-sol [°] (opcional)    %
% Saída: I - Radiação solar horária global [MJ/m²]                   %
%=====

if size(varargin,2) < 1
    B = (n - 1)*360/365; % Variável auxiliar
    delta = 180/pi* ( 0.006918 - 0.399912*cosd(B) +
0.070257*sind(B)...
        - 0.006758*cosd(2*B) + 0.000907*sind(2*B) ...
        - 0.002679*cosd(3*B) + 0.00148*sind(3*B) );%

Declinação solar
    omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta)); % Ângulo horário de por-
do-sol
elseif size(varargin,2) < 2
    delta = varargin{1};
    omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta));
elseif size(varargin,2) < 3
    omega_s = varargin{2};
end
n_horas = size(omega,2);
% Cálculo dos coeficientes a e b para a equação de r_t = I/H
a = 0.409 + 0.5016*sind(omega_s - 60);
b = 0.6609 - 0.4767*sind(omega_s - 60);
r_t =
pi/24*(a'*ones(1,n_horas)+b'*cosd(omega)).*(ones(length(n),1)*cosd(ome
ga) - cosd(omega_s))*ones(1,n_horas))./...

```

```

                                (sind(omega_s)'*ones(1,n_horas) -
pi*(omega_s/180.*cosd(omega_s))'*ones(1,n_horas));
r_t(r_t < 0) = 0
I = r_t.*(H'*ones(1,n_horas));
function [I_b I_d] = frac_I(I, k_t)

%===== Radiação Solar Horária Difusa e direta =====%
% Entradas: I      - Radiação solar horária global [MJ/m²]           %
%              k_t - Índice de claridade                             %
% Saída: I_b - Radiação solar horária direta [MJ/m²]                %
%           I_d - Radiação solar horária difusa [MJ/m²]             %
%===== %
% % Cálculo da radiação solar horária difusa
      k_d = (k_t <= 0.22).*(1 - 0.09*k_t)...
            + (k_t > 0.22 & k_t <= 0.8).*(0.9511 - 0.1604*k_t + 4.388*
k_t.^2 ...
                                                    - 16.638* k_t.^3 +
12.336*k_t.^4)...
            + (k_t > 0.8).*0.165;

      I_d = k_d.*I;
% Radiação solar horária direta
I_b = I - I_d;
function R_b = fator_Geom_Rb(lat, n, beta_sup, gamma_sup, omega_1,
omega_2, varargin)

%===== Fator geométrico R_b =====%
% Entradas: lat      - latitude local [°]                             %
%              n      - dia do ano                                     %
%              beta_sup - Inclinação da superfície [°]                %
%              gamma_sup - Orientação da superfície [°]              %
%              omega_1 - hora solar de inicio do intervalo [°]        %
%              omega_2 - hora solar de termino do intervalo [°]      %
%              omega_s - hora solar de por-do-sol [°] (opcional)     %
%              delta   - declinação solar [°] (opcional)             %
% Saída: R_b - Fator geométrico, adimensional, R_b = I_b_t/I_b      %
%===== %
if size(varargin,2) < 1
    B = (n - 1)*360/365; % Variável auxiliar
    delta = 180/pi* ( 0.006918 - 0.399912*cosd(B) +
0.070257*sind(B)...
                - 0.006758*cosd(2*B) + 0.000907*sind(2*B) ...
                - 0.002679*cosd(3*B) + 0.00148*sind(3*B) );%
Declinação solar
    omega_s = acosd(-tand(lat)*tand(delta)); % Ângulo horário de por-
do-sol
elseif size(varargin,2) < 2
    omega_s = varargin{1};
    B = (n - 1)*360/365;
    delta = 180/pi* ( 0.006918 - 0.399912*cosd(B) +
0.070257*sind(B)...
                - 0.006758*cosd(2*B) + 0.000907*sind(2*B) ...
                - 0.002679*cosd(3*B) + 0.00148*sind(3*B) );%
elseif size(varargin,2) < 3
    omega_s = varargin{1};
    delta = varargin{2};
end
n_horas = size(omega_1,2);
a = zeros(length(n),n_horas);
b = zeros(length(n),n_horas);
% Se omega_1 e omega_2 estão dentro do intervalo de -omega_s a omega_s
a = a + ((ones(length(n),1)*omega_2 > -omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 >= -omega_s'*ones(1,n_horas)) &

```

```

(ones(length(n),1)*omega_2 <= omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...
    (sind(delta)')*ones(1,n_horas)*sind(lat).*cosd(beta_sup)...
-
sind(delta)')*ones(1,n_horas)*cosd(lat).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_sup
)).*(ones(length(n),1)*(omega_2 - omega_1))*pi/180 ...
    +(cosd(delta)')*ones(1,n_horas)*cosd(lat).*cosd(beta_sup)...
+
cosd(delta)')*ones(1,n_horas)*sind(lat).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_sup
)).*(ones(length(n),1)*(sind(omega_2) - sind(omega_1)))...
-
(cosd(delta)')*ones(1,n_horas).*sind(beta_sup).*sind(gamma_sup)).*(ones
(length(n),1)*(cosd(omega_2) - cosd(omega_1)));
b = b + ((ones(length(n),1)*omega_2 >= -omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 > -omega_s'*ones(1,n_horas)) &
(ones(length(n),1)*omega_2 < omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < omega_s'*ones(1,n_horas))).*(...
(cosd(lat)*cosd(delta)')*ones(1,n_horas)).*(ones(length(n),1)*(sind(omeg
a_2) - sind(omega_1)))...
+
sind(lat)*sind(delta)')*ones(1,n_horas).*(ones(length(n),1)*(omega_2 -
omega_1))*pi/180);
% Se omega_2 > -omega_s e omega_1 < -omega_s
a = a + (ones(length(n),1)*omega_2 > -omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 <= -omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...
    (sind(delta)')*ones(1,n_horas)*sind(lat).*cosd(beta_sup)...
-
sind(delta)')*ones(1,n_horas)*cosd(lat).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_sup
)).*(ones(length(n),1)*omega_2 - (-omega_s')*ones(1,n_horas))*pi/180
...
    +(cosd(delta)')*ones(1,n_horas)*cosd(lat).*cosd(beta_sup)...
+
cosd(delta)')*ones(1,n_horas)*sind(lat).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_sup
)).*(sind(ones(length(n),1)*omega_2) - sind(-
omega_s'*ones(1,n_horas)))...
-
(cosd(delta)')*ones(1,n_horas).*sind(beta_sup).*sind(gamma_sup)).*(cosd
(ones(length(n),1)*omega_2) - cosd(-omega_s'*ones(1,n_horas)));
b = b + (ones(length(n),1)*omega_2 > -omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < -omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...
(cosd(lat)*cosd(delta)')*ones(1,n_horas)).*(sind(ones(length(n),1)*omeg
a_2) - sind(-omega_s'*ones(1,n_horas)))...
+
sind(lat)*sind(delta)')*ones(1,n_horas).*(ones(length(n),1)*omega_2 -
(-omega_s')*ones(1,n_horas))*pi/180);
% Se omega_1 <= omega_s e omega_2 >= omega_s
a = a + (ones(length(n),1)*omega_2 > omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...
    (sind(delta)')*ones(1,n_horas)*sind(lat).*cosd(beta_sup)...
-
sind(delta)')*ones(1,n_horas)*cosd(lat).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_sup
)).*(omega_s'*ones(1,n_horas) - ones(length(n),1)*omega_1)*pi/180 ...
    +(cosd(delta)')*ones(1,n_horas)*cosd(lat).*cosd(beta_sup)...
+
cosd(delta)')*ones(1,n_horas)*sind(lat).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_sup
)).*(sind(omega_s'*ones(1,n_horas)) -
sind(ones(length(n),1)*omega_1))...
-
(cosd(delta)')*ones(1,n_horas).*sind(beta_sup).*sind(gamma_sup)).*(cosd
(omega_s'*ones(1,n_horas)) - cosd(ones(length(n),1)*omega_1)));

```

```

b = b + (ones(length(n),1)*omega_2 >= omega_s'*ones(1,n_horas) &
ones(length(n),1)*omega_1 < omega_s'*ones(1,n_horas)).*(...

(cosd(lat)*cosd(delta)')*ones(1,n_horas)).*(sind(omega_s'*ones(1,n_hora
s)) - sind(ones(length(n),1)*omega_1))...
+
sind(lat)*sind(delta)')*ones(1,n_horas).*(omega_s'*ones(1,n_horas) -
ones(length(n),1)*omega_1)*pi/180);
R_b = (a./b);
R_b(b == 0) = 0;
R_b(R_b < 0) = 0;
function I_t = Rad_Inc(I, I_b, I_d, I_o, R_b, beta_sup, rho_g, mod,
varargin)

%==== Radiação Solar Horária Global em superfície inclinada =====%
% Entradas: I - Radiação solar horária global em sup. horizontal
%           I_b - Radiação solar horária direta
%           I_d - Radiação solar horária difusa
%           I_o - Radiação solar horária extraterrestre
%           R_b - Razão da radiação direta em sup incl. em rel
a sup. hor. %
%           beta_sup - Ângulo de inclinação da superfície [°]
%           rho_g - Albedo do solo
%           mod - Modelo de radiação em sup. inc. ('HDKR' ou
'Perez')
%           varargin{1} - para Perez -> dia do ano
%           varargin{2} - para Perez -> Altitude local
%           varargin{3} - para Perez -> Ângulo de zênite
%           +
%           varargin{4} - para Peraz -> Ângulo de incidência
%           ou
%           varargin{4} - para Perez -> Ângulo de azimute solar
%           varargin{5} - para Perez -> Ângulo de azimute da
superficie
% Saída: I_t - Radiação solar horária global em superfície inclnada
[MJ/m²]
%=====%
G_sc = 1367; % Constante solar
if strcmpi(mod, 'HDKR')
    % Modelo HDKR - não aconselhavel para gamma (ângulo de azimute da
    % superfície) distante de 0° para o hem. norte ou 180° para o
    % hemisfério sul.
    f = sqrt(I_b./I);
    A_i = I_b./I_o;
    I_t = max( ( I_b + I_d.*A_i ).*R_b ...
                + I_d.*( 1 - A_i ).*((1 + cosd(beta_sup) )/2).* ...
                (1 + f.*sind(beta_sup/2).^3) ...
                + I*rho_g.*(1-cosd(beta_sup))/2,0 );
elseif strcmpi(mod, 'Perez')
    % Modelo de Perez et al (1990) - Mais preciso mas mais complexo e
    % necessita de um número maior de variaveis de entrada.
    n_horas = size(I,2);
    if size(varargin,2) < 5
        n = varargin{1};
        altit = varargin{2};
        theta_z = varargin{3};
        theta = varargin{4};
        %n_dias = length(n);
    elseif size(varargin,2) < 6
        n = varargin{1};
        altit = varargin{2};
        theta_z = varargin{3};
        gamma_s = varargin{4};

```

```

        gamma_sup = varargin{5};
        theta = acosd( cosd(theta_z).*cosd(beta_sup) ...
            + sind(theta_z).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_s -
gamma_sup) );
    end
    theta = real(theta
%altit = varargin{2};
a = max(cosd(theta),0);
b = max(cosd(theta_z),cosd(85));
I_bn = I_b./cosd(theta_z);
% Parâmetro de claridade
eps_c = ((I_d + I_bn)./I_d + 5.535e-6*theta_z.^6)./(1+ 5.535e-
6*theta_z.^3);
% Massa de ar
m = (theta_z < 70).* 1./cosd(theta_z)+...
    (theta_z >= 70).* (exp(-0.0001184*altit)./ ...
        ( cosd(theta_z) + 0.5057*(96.080 -
theta_z).^-1.634 ));

% Cálculo da rad extraterrestre incidente em plano normal aos
raios
% solares
B = (n-1) '*360/365*ones(1,n_horas);
I_on = 3600*G_sc/1e6*(1.000110 + 0.034221*cosd(B) +
0.001280*sind(B)+...
    0.000719*cosd(2*B) + 0.000077*sind(2*B));
% Parâmetro de brilho - DELTA
DELTA = m.*I_d./I_on;
% Coeficientes de claridade de acordo com o valor de epsilon
f = [-0.008    0.588   -0.062  -0.060   0.072   -0.022
      0.130    0.683   -0.151  -0.019   0.066   -0.029
      0.330    0.487   -0.221   0.055  -0.064   -0.026
      0.568    0.187   -0.295   0.109  -0.152    0.014
      0.873   -0.392   -0.362   0.226  -0.462    0.001
      1.132   -1.237   -0.412   0.288  -0.823    0.056
      1.060   -1.600   -0.359   0.264  -1.127    0.131
      0.678   -0.327   -0.250   0.156  -1.377    0.251];
% Coeficientes de claridade F_1 e F_2
F_1 = (eps_c >= 1.000 & eps_c < 1.065).*max(0, (f(1,1) +
f(1,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(1,3) ))...
    +(eps_c >= 1.065 & eps_c < 1.230).*max(0, (f(2,1) +
f(2,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(2,3) ))...
    +(eps_c >= 1.230 & eps_c < 1.500).*max(0, (f(3,1) +
f(3,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(3,3) ))...
    +(eps_c >= 1.500 & eps_c < 1.950).*max(0, (f(4,1) +
f(4,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(4,3) ))...
    +(eps_c >= 1.950 & eps_c < 2.800).*max(0, (f(5,1) +
f(5,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(5,3) ))...
    +(eps_c >= 2.800 & eps_c < 4.500).*max(0, (f(6,1) +
f(6,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(6,3) ))...
    +(eps_c >= 4.500 & eps_c < 6.200).*max(0, (f(7,1) +
f(7,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(7,3) ))...
    +(eps_c >= 6.2).*max(0, (f(8,1) + f(8,2)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(8,3) ));
F_2 = (eps_c >= 1.000 & eps_c < 1.065).* (f(1,4) + f(1,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(1,6))...
    +(eps_c >= 1.065 & eps_c < 1.230).* (f(2,4) + f(2,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(2,6))...
    +(eps_c >= 1.230 & eps_c < 1.500).* (f(3,4) + f(3,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(3,6))...
    +(eps_c >= 1.500 & eps_c < 1.950).* (f(4,4) + f(4,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(4,6))...

```

```

        +(eps_c >= 1.950 & eps_c < 2.800).*(f(5,4) + f(5,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(5,6))...
        +(eps_c >= 2.800 & eps_c < 4.500).*(f(6,4) + f(6,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(6,6))...
        +(eps_c >= 4.500 & eps_c < 6.200).*(f(7,4) + f(7,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(7,6))...
        +(eps_c >= 6.2).*(f(8,4) + f(8,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(8,6));
    % Cálculo da radiação spobre a superfície
    I_t = I_b.*R_b + I_d.*(1 - F_1).*(1+cosd(beta_sup))/2 +
I_d.*F_1.*a./b...
        + I_d.*F_2.*sind(beta_sup) + I*rho_g.*(1-cosd(beta_sup))/2;
else % Modelo padrão - modelo HDKR
    f = sqrt(I_b./I);
    A_i = I_b./I_o;
    I_t = max( ( I_b + I_d.*A_i ).*R_b ...
        + I_d.*( 1 - A_i ).*((1 + cosd(beta_sup) )/2).* ...
            (1 + f.*sind(beta_sup/2).^3) ...
        + I*rho_g.*(1-cosd(beta_sup))/2,0 );
end
function [G_h G_b G_d] = Rad_Dia_Claro(theta_z, A, clima, G_on)

%===== Função para estimativa da radiação em um dia claro =====%
% Entradas:
%     Theta_z = Ângulo de zênite [°]
%     A       = Altitude [km]
%     clima   = Classifica o clima da regioao:
%             1 - Atmosfera padrão
%             2 - Clima tropical
%             3 - Verao de latitude media
%             4 - Verao sub artico
%             5 - Inverno de latitude media
%     G_on    = Radiação solar extraterrestre em sup. normal a
radiação %
% Saídas:
%     G_h     = Radiação solar global em sup. horizontal
%     G_b     = Radiação solar difusa em sup. horizontal
%     G_d     = Radiação solar direta em sup. horizontal
%=====  

% Parametros para calculo da radiacao em dia claro, modelo apresentado
por
% Hottel (1976), conforme citado por Duffie e Beckman (2006) e por
Rabl (1985).
coeff = [ 1.00 1.00 1.00 1.00           % Atmosfera padrão
          0.95 0.92 0.98 1.02         % Clima tropical
          0.97 0.96 0.98 1.02         % verao de latitude
media
          0.99 0.98 0.99 1.01         % verao sub artico
          1.03 1.04 1.01 1.00 ];      % inverno de latitude
media

a_o_star = 0.4237 - 0.00821*(6 - A)^2;
a_1_star = 0.5055 + 0.00595*(6.5 - A)^2;
k_star = 0.2711 + 0.01858*(2.5 - A)^2;
a_o = coeff(clima,1)*a_o_star;          % Calculo dos
coeficientes da equacao
a_1 = coeff(clima,3)*a_1_star;
k = coeff(clima,4)*k_star;
altit = A*1000;
m =(theta_z < 70).* 1./cosd(theta_z)+...
    (theta_z >= 70).* (exp(-0.0001184*altit)./ ...
        ( cosd(theta_z) + 0.5057*(96.080 - theta_z).^-
1.634 ));
                                % massa de ar

```

```

tal_b = (theta_z < 90).*(a_o + a_1 * exp( - k ./ cosd(theta_z) ) ); %
Transmissividade da radiacao direta
G_b = max((G_on'*ones(1,size(theta_z,2))).*cosd(theta_z).*tal_b,0);
% Radiacao direta em superficie horizontal
tal_d = (theta_z < 90).*(0.2710 - 0.2939*tal_b); %
Transmissividade da radiacao difusa
G_d = max((G_on'*ones(1,size(theta_z,2))).*cosd(theta_z).*tal_d,0);
% Radiacao difusa em sup horizontal
if (G_d == 0 | G_b == 0)
    G_h = 0;
else
    G_h = G_d + G_b; % Radiacao solar global em
sup. horizontal
end
function G_t = Rad_Inc_Dia_Claro(G, G_b, G_d, G_o, R_b, beta_sup,
rho_g, mod, varargin)

%==== Radiação Solar Horária Global em superfície inclinada ====
% Entradas: I- Radiação solar horária global em sup. horizontal
%           I_b           - Radiação solar horária direta
%           I_d           - Radiação solar horária difusa
%           I_o           - Radiação solar horária extraterrestre
%           R_b           - Razão da radiação direta em sup incl. em rel
a sup. hor. %
%           beta_sup     - Ângulo de inclinação da superfície [°]
%           rho_g        - Albedo do solo
%           mod           - Modelo de radiação em sup. inc. ('HDKR' ou
'Perez')
%           %
%           varargin{1} - para Perez -> dia do ano
%           varargin{2} - para Perez -> Altitude local
%           varargin{3} - para Perez -> Ângulo de zênite
%           +
%           varargin{4} - para Peraz -> Ângulo de incidência
%           ou
%           varargin{4} - para Perez -> Ângulo de azimute solar
%           varargin{5} - para Perez -> Ângulo de azimute da
superficie
% Saída: I_t - Radiação solar horária global em superfície inclnada
[MJ/m²] %
%=====
G_sc = 1367; % Constante solar
if strcmpi(mod, 'HDKR')
    % Modelo HDKR - não aconselhavel para gamma (ângulo de azimute da
% superficie) distante de 0° para o hem. norte ou 180° para o
% hemisfério sul.
    f = sqrt(G_b./G_o);
    A_i = G_b./G_o;
    G_t = max( ( G_b + G_d.*A_i ).*R_b ...
              + G_d.*( 1 - A_i ).*((1 + cosd(beta_sup) )/2).* ...
              (1 + f.*sind(beta_sup/2).^3) ...
              + G*rho_g.*(1-cosd(beta_sup))/2,0 );
elseif strcmpi(mod, 'Perez')
    % Modelo de Perez et al (1990) - Mais preciso mas mais complexo e
% necessita de um número maior de variaveis de entrada.
    n_horas = size(G,2);
    if size(varargin,2) < 5
        n = varargin{1};
        altit = varargin{2};
        theta_z = varargin{3};
        theta = varargin{4};
    elseif size(varargin,2) < 6
        n = varargin{1};

```

```

        altit = varargin{2};
        theta_z = varargin{3};
        gamma_s = varargin{4};
        gamma_sup = varargin{5};
        theta = acosd( cosd(theta_z).*cosd(beta_sup) ...
            + sind(theta_z).*sind(beta_sup).*cosd(gamma_s -
gamma_sup) );
    end
    theta = real(theta);
    a = max(cosd(theta),0);
    b = max(cosd(theta_z),cosd(85));
    G_bn = G_b./cosd(theta_z);
    % Parâmetro de claridade
    eps_c = ((G_d + G_bn)./G_d + 5.535e-6*theta_z.^6)./(1+ 5.535e-
6*theta_z.^3);
    % Massa de ar
    m = (theta_z < 70).* 1./cosd(theta_z)+...
        (theta_z >= 70).* (exp(-0.0001184*altit)./ ...
            ( cosd(theta_z) + 0.5057*(96.080 -
theta_z).^-1.634 ));
    % Cálculo da rad extraterrestre incidente em plano normal aos
raios solares
    B = (n-1)'*360/365*ones(1,n_horas);
    G_on = G_sc*(1.000110 + 0.034221*cosd(B) + 0.001280*sind(B)+...
        0.000719*cosd(2*B) + 0.000077*sind(2*B));
    % Parâmetro de brilho - DELTA
    DELTA = m.*G_d./G_on;
    % Coeficientes de claridade de acordo com o valor de epsilon
    f = [-0.008    0.588   -0.062  -0.060   0.072   -0.022
         0.130    0.683   -0.151  -0.019   0.066   -0.029
         0.330    0.487   -0.221   0.055  -0.064   -0.026
         0.568    0.187   -0.295   0.109  -0.152    0.014
         0.873   -0.392   -0.362   0.226  -0.462    0.001
         1.132   -1.237   -0.412   0.288  -0.823    0.056
         1.060   -1.600   -0.359   0.264  -1.127    0.131
         0.678   -0.327   -0.250   0.156  -1.377    0.251];
    % Coeficientes de claridade F_1 e F_2
    F_1 = (eps_c >= 1.000 & eps_c < 1.065).*max(0, (f(1,1) +
f(1,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(1,3) ))...
        +(eps_c >= 1.065 & eps_c < 1.230).*max(0, (f(2,1) +
f(2,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(2,3) ))...
        +(eps_c >= 1.230 & eps_c < 1.500).*max(0, (f(3,1) +
f(3,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(3,3) ))...
        +(eps_c >= 1.500 & eps_c < 1.950).*max(0, (f(4,1) +
f(4,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(4,3) ))...
        +(eps_c >= 1.950 & eps_c < 2.800).*max(0, (f(5,1) +
f(5,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(5,3) ))...
        +(eps_c >= 2.800 & eps_c < 4.500).*max(0, (f(6,1) +
f(6,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(6,3) ))...
        +(eps_c >= 4.500 & eps_c < 6.200).*max(0, (f(7,1) +
f(7,2)*DELTA + pi*theta_z./180*f(7,3) ))...
        +(eps_c >= 6.2).*max(0, (f(8,1) + f(8,2)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(8,3) ));
    F_2 = (eps_c >= 1.000 & eps_c < 1.065).*(f(1,4) + f(1,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(1,6))...
        +(eps_c >= 1.065 & eps_c < 1.230).*(f(2,4) + f(2,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(2,6))...
        +(eps_c >= 1.230 & eps_c < 1.500).*(f(3,4) + f(3,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(3,6))...
        +(eps_c >= 1.500 & eps_c < 1.950).*(f(4,4) + f(4,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(4,6))...
        +(eps_c >= 1.950 & eps_c < 2.800).*(f(5,4) + f(5,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(5,6))...

```

```

+(eps_c >= 2.800 & eps_c < 4.500).*(f(6,4) + f(6,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(6,6))...
+(eps_c >= 4.500 & eps_c < 6.200).*(f(7,4) + f(7,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(7,6))...
+(eps_c >= 6.2).*(f(8,4) + f(8,5)*DELTA +
pi*theta_z./180*f(8,6));
% Cálculo da radiação spobre a superfície
G_t = G_b.*R_b + G_d.*(1 - F_1).*(1+cosd(beta_sup))/2 +
G_d.*F_1.*a./b...
+ G_d.*F_2.*sind(beta_sup) + G*rho_g.*(1-cosd(beta_sup))/2;
else % Modelo padrão - modelo HDKR
f = sqrt(G_b./G);
A_i = G_b./G_o;
G_t = max( ( G_b + G_d.*A_i ).*R_b ...
+ G_d.*( 1 - A_i ).*((1 + cosd(beta_sup) )/2).* ...
(1 + f.*sind(beta_sup/2).^3) ...
+ G*rho_g.*(1-cosd(beta_sup))/2,0 );
End
function [G_t beta_sup gamma_sup n_reor_gamma n_reor_beta] =
Rad_Inc_Rast_Dia_Claro(G, G_b, G_d, G_o, R_b, rho_g, theta_z, alpha_s,
gamma_s, omega, omega_1, omega_2, omega_s, lat, n, altit, delta,
varargin)

%= Radiação Solar Horária Global em sistema solar com rastreamento =%
% Entradas: G - Radiação solar global em sup. horizontal
% G_b - Radiação solar direta
% G_d - Radiação solar difusa
% G_o - Radiação solar extraterrestre
% R_b - Razão da radiação direta em sup incl. em rel
a sup. hor. %
% rho_g - Albedo do solo
% theta_z - Ângulo de zênite [°]
% alpha_s - Ângulo de elevação solar [°]
% gamma_s - Ângulo de azimute solar [°]
% omega - Ângulo horário da metade da hora [°]
% omega_1 - Ângulo horário do início da hora [°]
% omega_2 - Ângulo horário do término da hora [°]
% omega_s - Ângulo horário de pôr-do-sol [°]
% lat - Latitude local [°]
% n - Dia do ano
% altit - Altitude local [m]
% delta - Angulo de declinacao solar [°]
% varargin{1} - Seleção do critério de reorientação:
% 'fix_Int' = intervalos fixos de tempo. %
% 'lim_Erro_Beta' = Limite fixos para erro em %
% relação a inclinação ideal.
% 'lim_Erro_Gamma' = Limite fixos para erro em %
% relação a orientacao ideal.
% varargin{2} - Determina se a frequência com que a
inclinação será atualizada: %
% 'inc_Hor' = Variação ao longo do dia. %
% 'inc_Dia' = Variação só no início do dia. %
% varargin{3} - Caso ('fix_int') = dT - intervalo de tempo
entre reorientações do sistema. %
% Caso('lim_Erro_Beta') = dErroBeta - Valor
maximo de erro em rel a posicao otima%
% Caso('lim_Erro_Gamma') = dErroGamma - Valor
maximo de erro%
% Caso('lim_Erro_Incid') = dErroIncid
% Caso('prop_Aur') = dErroAur
% Caso('prop_Aur_2') = dErroAur2
% C1
% C2

```

```

% em rel a
posicao otima%
% Saída: G_t - Radiação solar global em superfície inclnada [MJ/m²]
% beta_sup - Angulo de inclinacao para cada hora de cada dia
dos dados de entrada para o algoritmo de rastreamento selecionado
% gamma_sup - Angulo de azimute da superficie para cada hora de
cada dia dos %
% dados de entrada para o algoritmo de rastreamento
selecionado %
%=====
% registro do número de dias e de horas nos vetores
n_dias = size(alpha_s,1);
n_h = size(alpha_s,2);
% Inicialização das matrizes com as orientações do sistema para cada
dia e
% hora
beta_sup = zeros(n_dias,n_h);
gamma_sup = zeros(n_dias,n_h);
n_reor_beta = ones(1,n_dias); % seta o número de reorientações diárias
do angulo de inclinação
n_reor_gamma = ones(1,n_dias); % seta o número de reorientações
diárias do angulo de azimute

if strcmpi(varargin{1},'fix_Int') % Selação do caso com intervalo
fixo
    dT = varargin{3}; % Valor em ângulo horário do intervalo entre
reorientações
    if strcmpi(varargin{2},'inc_Dia') % Seleção da alteração da
inclinação da superfície apenas uma vez por dia
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            beta_sup(i,:) = theta_z(i,ceil(size(theta_z,2)/2)); %
Define o valor da inclinação diária como a ótima para o meio dia solar
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os indices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            gamma_sup(i,:) = gamma_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*gamma_s(i,j_old); % Define a orientação do sistema até o
omega inicial do rastreamento
            for j = ind(1):length(omega) % Para cada hora após a hora
inicial do rastreamento
                if (omega(j) - omega_old >= dT) % Se o intervalo que
passou for maior que o definido pelo usuário:
                    j_old = j; % Atualiza o valor de
j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                    omega_old = omega(j); % Atualiza o valor de
angulo horario de referência.
                    n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                end
                gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
            end
        end
    elseif strcmpi(varargin{2},'inc_Hora') % Seleção da alteração da
inclinação da superfície ao longo do dia
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:

```

```

        ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os indices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
        j_old = max(ind(1)-1,1);           % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
        omega_old = omega(j_old);         % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
        beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
        gamma_sup(i,:) = gamma_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*gamma_s(i,j_old); % Define a orientação do sistema até o
omega inicial do rastreamento
        for j = ind(1):length(omega) % Para cada hora após a hora
inicial do rastreamento
            if (omega(j) - omega_old >= dT) % Se o intervalo que
passou for maior que o definido pelo usuário:
                j_old = j;                % Atualiza o valor de
j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                omega_old = omega(j);    % Atualiza o valor de
ângulo horario de referência.
                n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                n_reor_beta(i) = n_reor_beta(i) + 1; % Atualiza o
número de reorientações do ângulo de azimute
            end
            gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
            beta_sup(i,j) = theta_z(i,j_old);
        end
    end
end
elseif strcmpi(varargin{1},'lim_Erro_Beta') % Rastreamento com base
no erro do angulo de inclinacao
    dErroBeta = varargin{3}; % Limite máximo do erro do angulo de
inclinacao
    if strcmpi(varargin{2},'inc_Dia')
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os indices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1);           % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old);         % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
            gamma_sup(i,:) = (lat<0)*180; % Define a orientação do
sistema até o omega inicial do rastreamento
            for j = ind(1):length(omega)
                if ( abs(theta_z(i,j) - theta_z(i,j_old)) >= dErroBeta
) % Se o erro for maior que o definido pelo usuário
                    j_old = j;                % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                    n_reor_beta(i) = n_reor_beta(i) + 1; % Atualiza o
número de reorientações do ângulo de azimute
                end
                beta_sup(i,j) = abs(theta_z(i,j_old));
            end
        end
    end
end

```

```

elseif strcmpi(varargin{2}, 'inc_Hora')
    for i = 1:n_dias % Para cada dia:
        ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os indices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
        j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
        omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
        beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
        gamma_sup(i,:) = gamma_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*gamma_s(i,j_old); % Define a orientação do sistema até o
omega inicial do rastreamento
        for j = ind(1):length(omega)
            if ( abs(theta_z(i,j) - theta_z(i,j_old)) >= dErroBeta
) % Se o erro for maior que o definido pelo usuário
                j_old = j; % Atualiza o valor
de j_old (utilizado
para definir qual será a orientação do sistema)
                n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                n_reor_beta(i) = n_reor_beta(i) + 1; % Atualiza o
número de reorientações do ângulo de azimute
            end
            gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
            beta_sup(i,j) = abs(theta_z(i,j_old));
        end
    end
end
elseif strcmpi(varargin{1}, 'lim_Erro_Gamma') % Rastreamento com base
no erro do angulo de azimute da superficie
    dErroGamma = varargin{3}; % Limite máximo do erro do angulo de
inclinacao
    if strcmpi(varargin{2}, 'inc_Dia')
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            beta_sup(i,:) = theta_z(i,ceil(size(theta_z,2)/2)); %
Define o valor da inclinação diária como a ótima para o meio dia solar
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os indices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
            gamma_sup(i,:) = (omega <= omega_old).*gamma_s(i,j_old);
% Define a orientação do sistema até o omega inicial do rastreamento
            for j = ind(1):length(omega)
                if ( abs(gamma_s(i,j) - gamma_s(i,j_old)) >=
dErroGamma ) % Se o erro for maior que o definido pelo usuário
                    j_old = j; % Atualiza o valor
de j_old (utilizado
para definir qual será a orientação do sistema)
                    n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                end
                gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    elseif strcmpi(varargin{2}, 'inc_Hora')
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os índices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
            gamma_sup(i,:) = gamma_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*gamma_s(i,j_old); % Define a orientação do sistema até o
omega inicial do rastreamento
            for j = ind(1):length(omega)
                if ( abs(gamma_s(i,j) - gamma_s(i,j_old)) >=
dErroGamma ) % Se o erro for maior que o definido pelo usuário
                    j_old = j; % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                    n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                    n_reor_beta(i) = n_reor_beta(i) + 1; % Atualiza o
número de reorientações do ângulo de azimute
                end
                gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
                beta_sup(i,j) = abs(theta_z(i,j_old));
            end
        end
    end
elseif strcmpi(varargin{1}, 'lim_Erro_Incid')
    dErroIncid = varargin{3}; % Limite máximo do erro de acordo com
o critério proposto pelo Aurélio
    if strcmpi(varargin{2}, 'inc_Dia')
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            beta_sup(i,:) = theta_z(i,ceil(size(theta_z,2)/2)); %
Define o valor da inclinação diária como a ótima para o meio dia solar
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os índices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
            gamma_sup(i,:) = (omega <= omega_old).*gamma_s(i,j_old);
% Define a orientação do sistema até o omega inicial do rastreamento
            theta = acosd(
cosd(theta_z(i,j_old)).*cosd(beta_sup(i,j_old)) ...
+
sind(theta_z(i,j_old)).*sind(beta_sup(i,j_old)).*cosd(gamma_s(i,j_old)
- gamma_sup(i,j_old)) );

            for j = ind(1):length(omega)
                if ( theta >= dErroIncid ) % Se o erro for maior que
o definido pelo usuário

```

```

        j_old = j; % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
        n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
    end
    gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
    theta = acosd( cosd(theta_z(i,j)).*cosd(beta_sup(i,j))
...
        +
sind(theta_z(i,j)).*sind(beta_sup(i,j)).*cosd(gamma_s(i,j) -
gamma_sup(i,j)) );
    end
    end
    elseif strcmpi(varargin{2},'inc_Hora')
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os índices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
            gamma_sup(i,:) = gamma_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*gamma_s(i,j_old); % Define a orientação do sistema até o
omega inicial do rastreamento
            theta = acosd(
cosd(theta_z(i,j_old)).*cosd(beta_sup(i,j_old)) ...
        +
sind(theta_z(i,j_old)).*sind(beta_sup(i,j_old)).*cosd(gamma_s(i,j_old)
- gamma_sup(i,j_old)) );
            for j = ind(1):length(omega)
                if ( theta >= dErroIncid ) % Se o erro for maior que
o definido pelo usuário
                    j_old = j; % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                    n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                    n_reor_beta(i) = n_reor_beta(i) + 1; % Atualiza o
número de reorientações do ângulo de azimute
                end
                gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
                beta_sup(i,j) = abs(theta_z(i,j_old));
                theta = acosd( cosd(theta_z(i,j)).*cosd(beta_sup(i,j))
...
                    +
sind(theta_z(i,j)).*sind(beta_sup(i,j)).*cosd(gamma_s(i,j) -
gamma_sup(i,j)) );
                end
            end
        end
    elseif strcmpi(varargin{1},'prop_Aur')
        dErroAur = varargin{3}; % Limite máximo do erro de acordo com o
critério proposto pelo Aurélio
        if strcmpi(varargin{2},'inc_Dia')
            for i = 1:n_dias % Para cada dia:
                beta_sup(i,:) = theta_z(i,ceil(size(theta_z,2)/2)); %
Define o valor da inclinação diária como a ótima para o meio dia solar

```

```

        ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os indices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
        j_old = max(ind(1)-1,1);          % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
        omega_old = omega(j_old);        % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
        beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
        gamma_sup(i,:) = (omega <= omega_old).*gamma_s(i,j_old);
% Define a orientação do sistema até o omega inicial do rastreamento
        for j = ind(1):length(omega)
            if ( sqrt( (gamma_s(i,j) - gamma_s(i,j_old)).^2 +
(theta_z(i,j) - theta_z(i,j_old)).^2 ) >= dErroAur ) % Se o erro for
maior que o definido pelo usuário
                j_old = j;                % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
            end
            gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
        end
    end
elseif strcmpi(varargin{2},'inc_Hora')
    for i = 1:n_dias % Para cada dia:
        ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os indices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
        j_old = max(ind(1)-1,1);          % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
        omega_old = omega(j_old);        % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
        beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
        gamma_sup(i,:) = gamma_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*gamma_s(i,j_old); % Define a orientação do sistema até o
omega inicial do rastreamento
        for j = ind(1):length(omega)
            if ( sqrt( (gamma_s(i,j) - gamma_s(i,j_old)).^2 +
(theta_z(i,j) - theta_z(i,j_old)).^2 ) >= dErroAur ) % Se o erro for
maior que o definido pelo usuário
                j_old = j;                % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                n_reor_beta(i) = n_reor_beta(i) + 1; % Atualiza o
número de reorientações do ângulo de azimute
            end
            gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
            beta_sup(i,j) = abs(theta_z(i,j_old));
        end
    end
end
elseif strcmpi(varargin{1},'prop_Aur_2')
    dErroAur = varargin{3}; % Limite máximo do erro de acordo com o
critério proposto pelo Aurélio
    if size(varargin,2) > 3

```

```

        C1 = varargin{4};
        C2 = varargin{5};
    else
        C1 = 0.5;
        C2 = 0.5;
    end
    if strcmpi(varargin{2}, 'inc_Dia')
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            beta_sup(i,:) = theta_z(i,ceil(size(theta_z,2)/2)); %
Define o valor da inclinação diária como a ótima para o meio dia solar
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os índices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
            gamma_sup(i,:) = (omega <= omega_old).*gamma_s(i,j_old);
% Define a orientação do sistema até o omega inicial do rastreamento
            for j = ind(1):length(omega)
                if ( sqrt( C1*(gamma_s(i,j) - gamma_s(i,j_old)).^2 +
C2*(theta_z(i,j) - theta_z(i,j_old)).^2 ) >= dErroAur ) % Se o erro
for maior que o definido pelo usuário
                    j_old = j; % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                    n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                end
                gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
            end
        end
    elseif strcmpi(varargin{2}, 'inc_Hora')
        for i = 1:n_dias % Para cada dia:
            ind = find(omega > -omega_s(i) & omega < omega_s(i)); %
Encontra os índices para os quais o valor de omega está entre o nascer
e o por-do-sol
            j_old = max(ind(1)-1,1); % Variável auxiliar para
definir o ponto inicial dos cálculos como o índice da hora logo antes
do nascer do sol
            omega_old = omega(j_old); % Define o omega inicial
como referência para o cálculo da passagem do tempo até a próxima
reorientação
            beta_sup(i,:) = beta_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*theta_z(i,j_old);
            gamma_sup(i,:) = gamma_sup(i,:) + (omega <=
omega_old).*gamma_s(i,j_old); % Define a orientação do sistema até o
omega inicial do rastreamento

            for j = ind(1):length(omega)
                if ( sqrt( C1*(gamma_s(i,j) - gamma_s(i,j_old)).^2 +
C2*(theta_z(i,j) - theta_z(i,j_old)).^2 ) >= dErroAur ) % Se o erro
for maior que o definido pelo usuário
                    j_old = j; % Atualiza o valor
de j_old (utilizado para definir qual será a orientação do sistema)
                    n_reor_gamma(i) = n_reor_gamma(i) + 1; % Atualiza
o número de reorientações do ângulo de azimute
                    n_reor_beta(i) = n_reor_beta(i) + 1; % Atualiza o
número de reorientações do ângulo de azimute
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
        gamma_sup(i,j) = gamma_s(i,j_old); % Atualiza a
orientação do sistema
        beta_sup(i,j) = abs(theta_z(i,j_old));
    end
end
end
elseif strcmpi(varargin{1},'ideal') % Rastreamento ideal (sempre
perpendicular aos raios solares)
    if strcmpi(varargin{2},'inc_Dia')
        for i = 1:n_dias
            beta_sup(i,:) = theta_z(i,ceil(size(theta_z,2)/2));
        end
        gamma_sup = gamma_s;
        n_reor_gamma = n_h*n_reor_gamma; % Atualiza o número de
reorientações do ângulo de azimute
    elseif strcmpi(varargin{2},'inc_Hora')
        beta_sup = theta_z;
        gamma_sup = gamma_s;
        n_reor_gamma = n_h*n_reor_gamma; % Atualiza o número de
reorientações do ângulo de azimute
        n_reor_beta = n_h*n_reor_beta; % Atualiza o número de
reorientações do ângulo de inclinação
    end
end
end

```

```

% Razão entre a radiação direta incidente sobre superfície inclinada e
% sobre uma superfície horizontal
R_b_r = fator_Geom_Rb(lat, n, beta_sup, gamma_sup, omega_1, omega_2,
omega_s, delta);
R_b_r(R_b_r<0)=0;

```

```

G_t = Rad_Inc_Dia_Claro(G, G_b, G_d, G_o, R_b_r, beta_sup, rho_g,
'Perez', n, altit, theta_z, gamma_s, gamma_sup);

```