

ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM PLANOS INCLINADOS NO RIO DE JANEIRO PARTE 1: SITUAÇÃO DE VERÃO

Castanheira, R. G. (1); Costa, C. E. S (2)

(1) Professor Adjunto, M.Sc., UFRuralRJ/IT/DAU

Antiga Rodovia Rio-São Paulo, Km 47 Seropédica, RJ – CEP 23890-000

email: rgc@ufrj.br

(2) Professor Adjunto, D.Sc., UFRuralRJ/IT/DAU

Antiga Rodovia Rio-São Paulo, Km 47, Seropédica, RJ – CEP 23890-000

e-mail: educosta@ufrj.br

RESUMO

Os elevados níveis de radiação solar incidentes no Rio de Janeiro têm grande influência nos valores da carga térmica nos edifícios, o que além de acarretar desconforto térmico aos ocupantes, pode causar aumentos consideráveis no consumo de energia elétrica em sistemas artificiais de climatização. O objetivo principal deste trabalho foi o de estudar as variações na intensidade da radiação solar incidente nas superfícies planas inclinadas no Rio de Janeiro e aplicar os resultados obtidos em fachadas, telhados e edifícios. Os cálculos partiram dos valores para a radiação solar diária média mensal incidente no plano horizontal, da inclinação e da orientação das superfícies. O produto final deste trabalho é um conjunto de ferramentas, constituído por tabelas, gráficos e programas simuladores, que visam auxiliar os Arquitetos e os Engenheiros na concepção de projetos de edifícios que tenham uma boa resposta em relação à radiação solar e ainda sejam eficientes em termos de consumo de energia elétrica. O trabalho consistiu na montagem de um modelo matemático para simular os valores da radiação solar incidente em planos inclinados. Após o desenvolvimento do referido modelo, este foi codificado na linguagem *Object Pascal*, dando origem a um conjunto de programas simuladores para os valores da radiação solar incidente em superfícies planas inclinadas, para o ambiente Windows. Utilizando as ferramentas computacionais desenvolvidas e impondo variações nos valores da inclinação e da orientação das superfícies planas em intervalos regulares, realizou-se um conjunto de simulações para os valores da radiação solar incidente em superfícies planas inclinadas genéricas, cujos resultados são apresentados em tabelas e gráficos

ABSTRACT

The high levels of incident solar radiation in Rio de Janeiro are of great influence on the values of thermal load on buildings, something that is also uncomfortable for those who live or work there, besides causing considerable increase in the use of electricity in artificial systems of refrigeration. The objective of this research was to study the variations in the intensity of incident solar radiation on tilted surfaces in Rio de Janeiro. The results should be applied on walls, roofs and buildings. The calculations had their origin in monthly average daily radiation on a horizontal surface, the inclination and orientation of surfaces. The final result of this work is a set of devices made of tables, charts and simulators that aim to become of some help to Architects and Engineers in the conception of buildings that would answer adequately to the question of solar radiation and would be economic in terms of electricity. The experiment consisted on the elaboration of a mathematical model to simulate the values of the solar radiation incident on tilted surfaces. After developing the model it was codified in Object Pascal (Delphi), originating a set of simulator softwares that simulate the values of the incident radiation on tilted surfaces for Windows environment. Using the developed software and suggesting

variations in regular intervals for the values of inclination and orientation of plain surfaces, a set of simulations was made. The results of the simulations for the values of incident solar radiation on tilted surfaces are shown in tables and charts

1. INTRODUÇÃO

A cada segundo, a Terra recebe do Sol uma quantidade de energia equivalente a 47 bilhões de kilowatts-hora. Em termos de ordem de grandeza, esta quantidade de energia seria suficiente para suprir as necessidades energéticas anuais da humanidade em apenas 20 ou 30 minutos, o que mostra a necessidade de se conhecer bem os mecanismos que influenciam os valores da intensidade da radiação solar incidente nas superfícies planas, para que dela possamos nos beneficiar ou proteger.

Na maioria dos casos relativos às construções, a intensidade e a direção da radiação solar incidente têm uma grande influência sobre o valor da carga térmica nos edifícios, causando desconforto aos ocupantes ou aumentando o consumo de energia elétrica em sistemas artificiais de climatização. Nos climas tropicais, como o do Rio de Janeiro, a radiação solar é uma variável climática fundamental nos estudos que envolvem conforto ambiental e eficiência energética.

A intensidade da radiação solar incidente nas superfícies varia em função de uma série de fatores, entre eles, o dia do ano, a hora do dia, a latitude, a altitude, a nebulosidade, a inclinação e a orientação da superfície plana receptora.

O estudo da intensidade da radiação solar incidente nas superfícies planas mostra que, através das variações nos valores da orientação e da inclinação, pode-se minimizar ou maximizar os valores da radiação solar incidente sobre estas superfícies, conforme as necessidades envolvidas nos diversos tipos de projetos. Por exemplo, é possível minimizar a quantidade de energia solar que incide sobre um edifício no verão, melhorando as condições de conforto no seu interior, ou ainda, maximizar a quantidade de energia solar que incide sobre a superfície de um coletor solar, aumentando sua eficiência.

O objetivo principal deste trabalho foi o de estudar, no Rio de Janeiro, as variações da intensidade da radiação solar incidente nas superfícies planas, levando-se em conta, a orientação e a inclinação. A partir dos resultados obtidos, elaborar um conjunto de ferramentas, tais como: programas simuladores, tabelas e gráficos, que permitam aos engenheiros e arquitetos, determinar os valores da intensidade da radiação solar que incide nas superfícies planas inclinadas envolvidas em seus projetos, partindo de informações, tais como, a orientação, a inclinação e os valores da intensidade da radiação solar diária média mensal, medida ou estimada no plano horizontal.

As informações apresentadas neste trabalho têm as seguintes aplicações: na arquitetura, auxiliando na concepção de edifícios que sejam eficientes em termos de consumo de energia elétrica e ainda proporcionem condições satisfatórias de conforto térmico e lumínico aos seus usuários; em projetos de coletores solares, onde a inclinação e a orientação devem ser as ideais otimizando, assim, a relação custo/benefício dos equipamentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para viabilizar a pesquisa, foi utilizado um programa computacional, desenvolvido, no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFRuralRJ em linguagem Pascal, no ambiente Delphi que permite o cálculo da radiação solar média diária mensal incidente em superfícies planas inclinadas, partindo de informações, tais como: a orientação e a inclinação dos planos estudados, os valores da radiação solar média diária mensal incidente no plano horizontal a partir de valores fornecidos por CORBELLA (1995). Tal programa, denominado de Radiação, utiliza em seu algoritmo o modelo matemático proposto em DUFFIE e BECKMAN (1980), cuja equações são apresentadas a seguir e, a simbologia, no item 5 deste trabalho:

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \bar{H}_D \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \bar{H}_D \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00653 \cdot (\omega_p - 90^\circ) - [0,505 + 0,00455 \cdot (\omega_p - 90^\circ)] \cdot \cos(115 \cdot \bar{K}_T - 103) \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$\omega_p = \cos^{-1}(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta) \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}[360^\circ \cdot (\frac{284 + n}{365})] \quad [\text{Eq. 04}]$$

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad [\text{Eq. 05}]$$

$$\bar{H}_0 = \frac{24}{\pi} \cdot 1,353 \cdot [1 + 0,033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot n}{365})] \cdot (\frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_p}{360} \cdot \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \omega_p) \quad [\text{Eq. 06}]$$

O referido algoritmo utiliza, ainda, para o cálculo do fator de radiação direta médio mensal, um método de integração numérica desenvolvido por CASTANHEIRA (2001), conforme o demonstrado na Equação 7. Torna-se necessário esclarecer que a notação \int_{Sol} indica que a integral deve ser avaliada nos períodos em que o plano estiver submetido à radiação solar direta.

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_{bT}}{\bar{H}_b} = \frac{\int_{\text{Sol}} \cos \theta \cdot dt}{\int_{\text{Sol}} \cos \theta_z \cdot dt} = \frac{\int_{\text{Sol}} \cos \theta \cdot d\omega}{\int_{\text{Sol}} \cos \theta_z \cdot d\omega} \quad [\text{Eq. 07}]$$

$$\cos \theta = A + B \cdot \cos \omega + C \cdot \text{sen} \omega \quad [\text{Eq. 08}]$$

$$A = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \beta - \text{sen} \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \quad [\text{Eq. 09}]$$

$$B = \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta + \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \quad [\text{Eq. 10}]$$

$$C = \cos \delta \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma \quad [\text{Eq. 11}]$$

$$\omega = (t - 12) \times 15^\circ \quad [\text{Eq. 12}]$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

Denominou-se verão, o trimestre composto pelos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Simularam-se, através do programa Radiação, referido anteriormente, os valores da radiação média diária mensal em superfícies planas cujas inclinações variaram de 0° a 90° em intervalos regulares de 5° com as orientações variado 0° (norte) até 180° (sul). É necessário ressaltar que, ao se utilizar as tabelas e gráficos para orientações representadas por ângulos azimutes situados entre 180° e 360°, deve-se utilizar um valor equivalente para a orientação, calculado pela equação 13:

$$\text{Orientação equivalente} = 360^\circ - \text{orientação} \quad [\text{Eq.13}]$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores calculados no Programa Radiação, foram transferidos para o aplicativo Microsoft Excel onde foram elaboradas as Tabelas e os Gráficos .

**Tabela 1 – Valores para radiação solar
(kWh/m².verão)**

Orientação Inclinação	NE/NO										L/O					SE/SO					S	
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°		
0°	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509	509		
5°	504	504	504	505	506	506	507	507	508	508	508	509	510	510	510	510	510	510	510	510		
10°	498	498	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	508	509	509	509	509	510	510		
15°	489	489	490	491	493	495	497	499	500	501	502	503	504	504	505	505	506	506	506	506		
20°	477	478	480	482	485	487	490	492	494	496	497	498	498	499	499	499	500	500	500	500		
25°	464	465	467	471	474	478	482	485	487	489	490	491	491	491	490	490	491	491	492	492		
30°	449	450	453	457	462	467	472	476	479	481	482	482	482	481	480	479	480	481	481	481		
35°	432	433	437	443	449	455	461	465	469	471	473	472	471	469	467	466	467	467	467	468		
40°	412	414	419	426	434	441	448	454	458	461	462	461	459	456	453	451	451	452	452	452		
45°	392	394	400	408	417	426	434	441	446	449	450	448	445	441	437	434	433	434	434	434		
50°	370	372	379	389	400	410	420	427	433	436	437	435	431	426	419	414	413	414	414	414		
55°	346	349	358	369	382	393	404	412	418	422	422	420	416	409	401	394	392	392	392	393		
60°	322	326	335	348	362	375	387	397	403	407	408	405	400	392	382	373	368	369	369	369		
65°	297	301	312	327	342	357	370	380	387	391	392	389	383	374	363	351	344	344	344	344		
70°	272	276	289	305	322	338	352	363	371	375	376	373	366	356	343	329	319	317	317	318		
75°	246	251	265	283	302	319	334	345	354	358	359	356	349	338	324	308	294	290	290	290		
80°	221	227	242	262	282	300	315	327	336	341	342	339	331	320	306	288	271	263	262	262		
85°	198	204	220	241	262	280	297	309	318	323	324	321	314	303	288	270	251	239	237	237		
90°	178	183	199	221	243	262	278	291	300	306	307	304	296	285	271	253	233	219	214	214		

**Tabela 2 – Valores relativos ao plano
horizontal para radiação solar (%)**

Orientação Inclinação	NE/NO										L/O					SE/SO					S	
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°		
0°	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
5°	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99		
10°	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98		
15°	96	96	96	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97		
20°	94	94	94	95	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96		
25°	91	91	92	93	93	94	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95		
30°	88	88	89	90	91	92	93	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94		
35°	85	85	86	87	88	89	91	92	92	93	93	93	93	92	92	92	92	92	92	92		
40°	81	81	82	84	85	87	88	89	90	91	91	91	90	90	89	89	89	89	89	89		
45°	77	77	79	80	82	84	85	87	88	88	88	88	88	87	86	85	85	85	85	85		
50°	73	73	75	77	79	81	82	84	85	86	86	86	85	84	82	82	81	81	81	81		
55°	68	69	70	73	75	77	79	81	82	83	83	83	82	80	79	77	77	77	77	77		
60°	63	64	66	69	71	74	76	78	79	80	80	80	79	77	75	73	72	72	72	73		
65°	58	59	61	64	67	70	73	75	76	77	77	77	75	74	71	69	68	68	68	68		
70°	53	54	57	60	63	66	69	71	73	74	74	73	72	70	67	65	63	62	62	62		
75°	48	49	52	56	59	63	66	68	70	70	71	70	69	66	64	61	58	57	57	57		
80°	44	45	48	51	55	59	62	64	66	67	67	67	65	63	60	57	53	52	51	51		
85°	39	40	43	47	51	55	58	61	63	64	64	63	62	59	57	53	49	47	47	47		
90°	35	36	39	44	48	51	55	57	59	60	60	60	58	56	53	50	46	43	42	42		

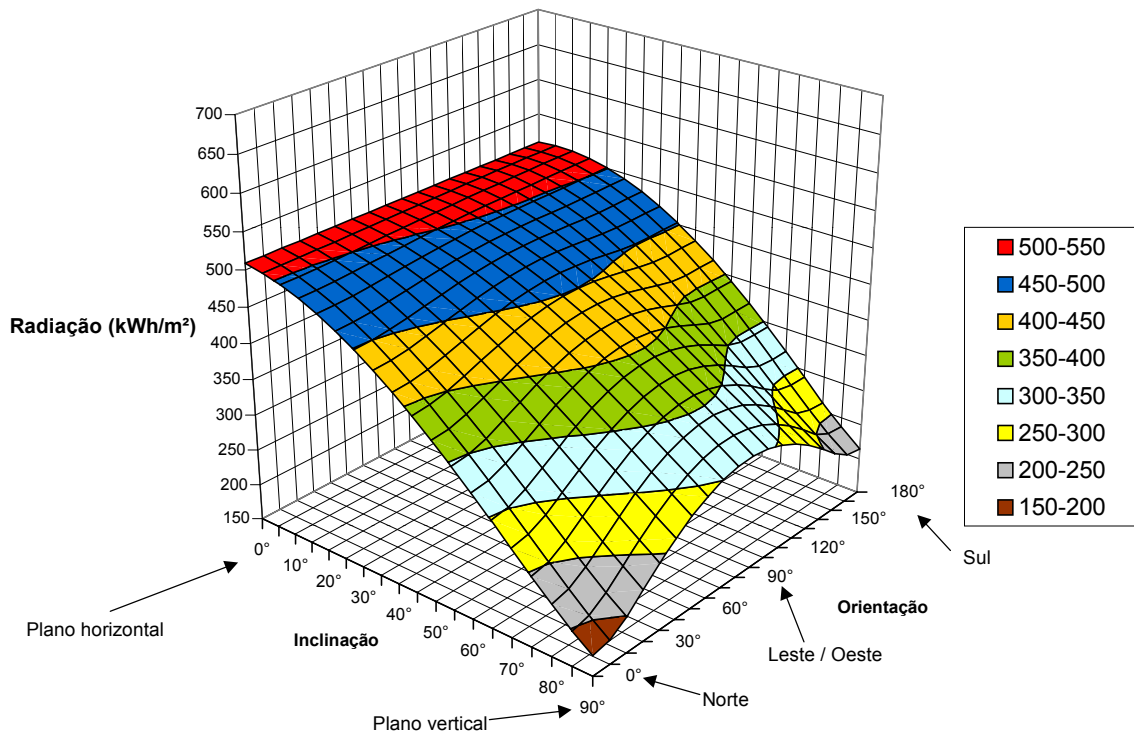


Figura 1 – Gráfico de superfície para a variação da radiação solar incidente

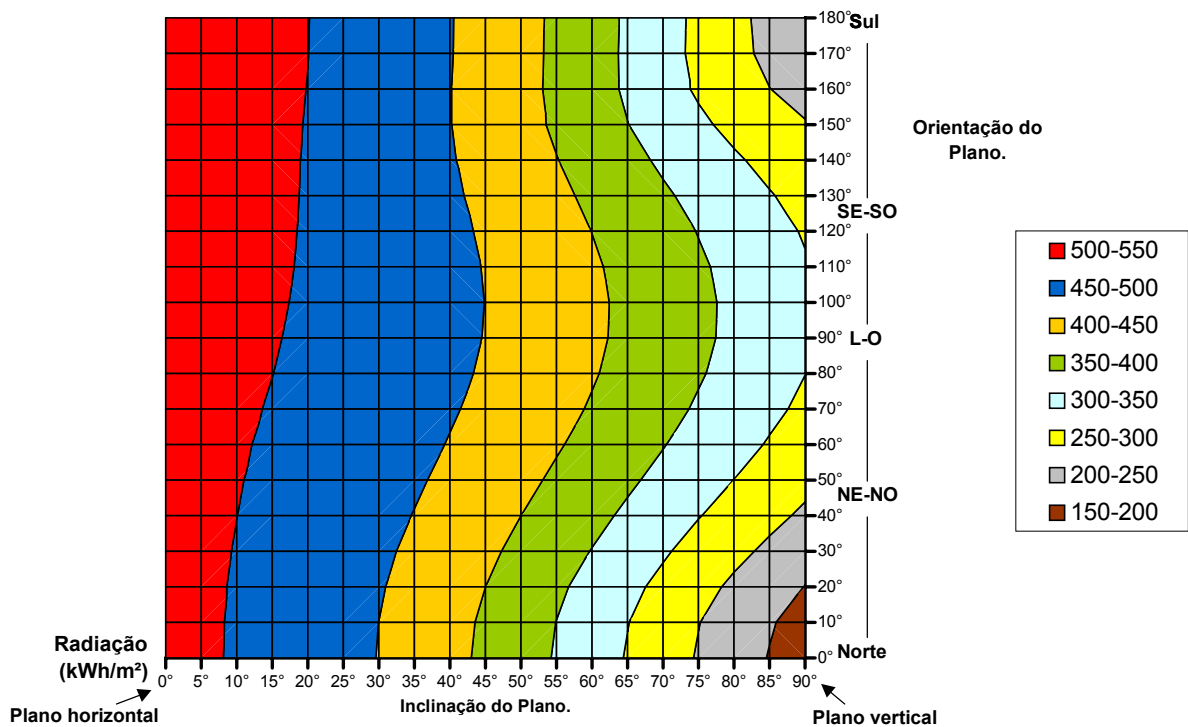


Figura 2 – Mapa topográfico para a variação da radiação solar incidente

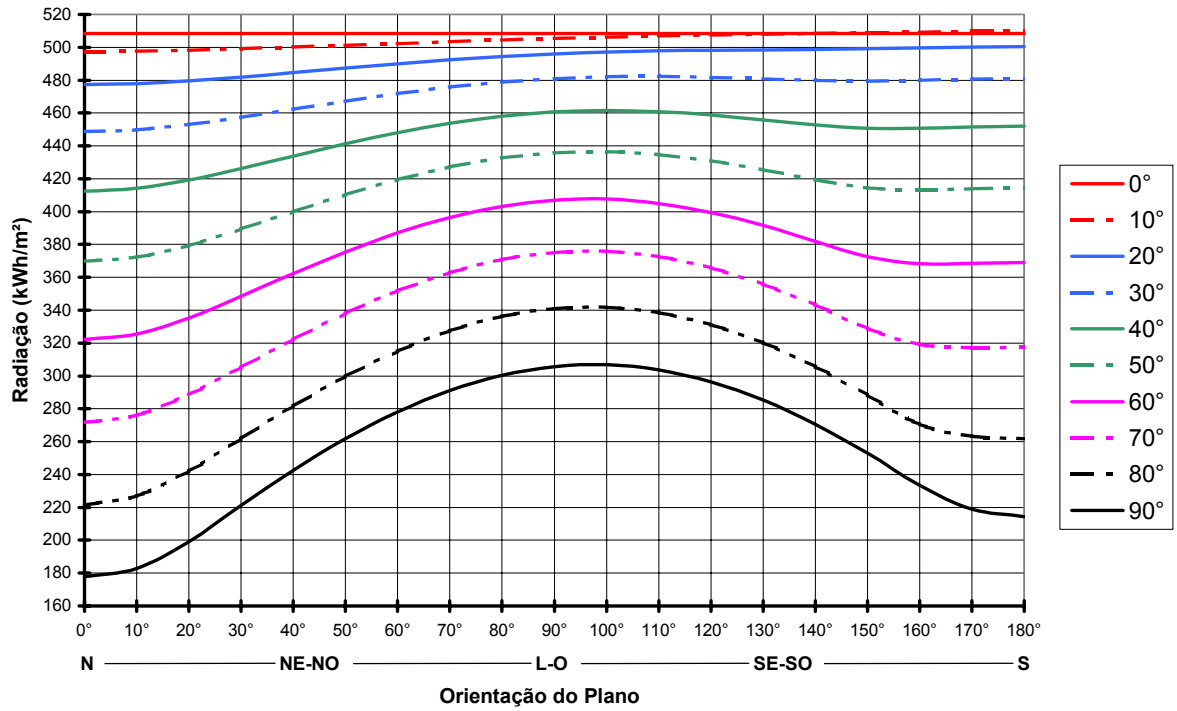


Figura 3 – Isolinhas de inclinação constante

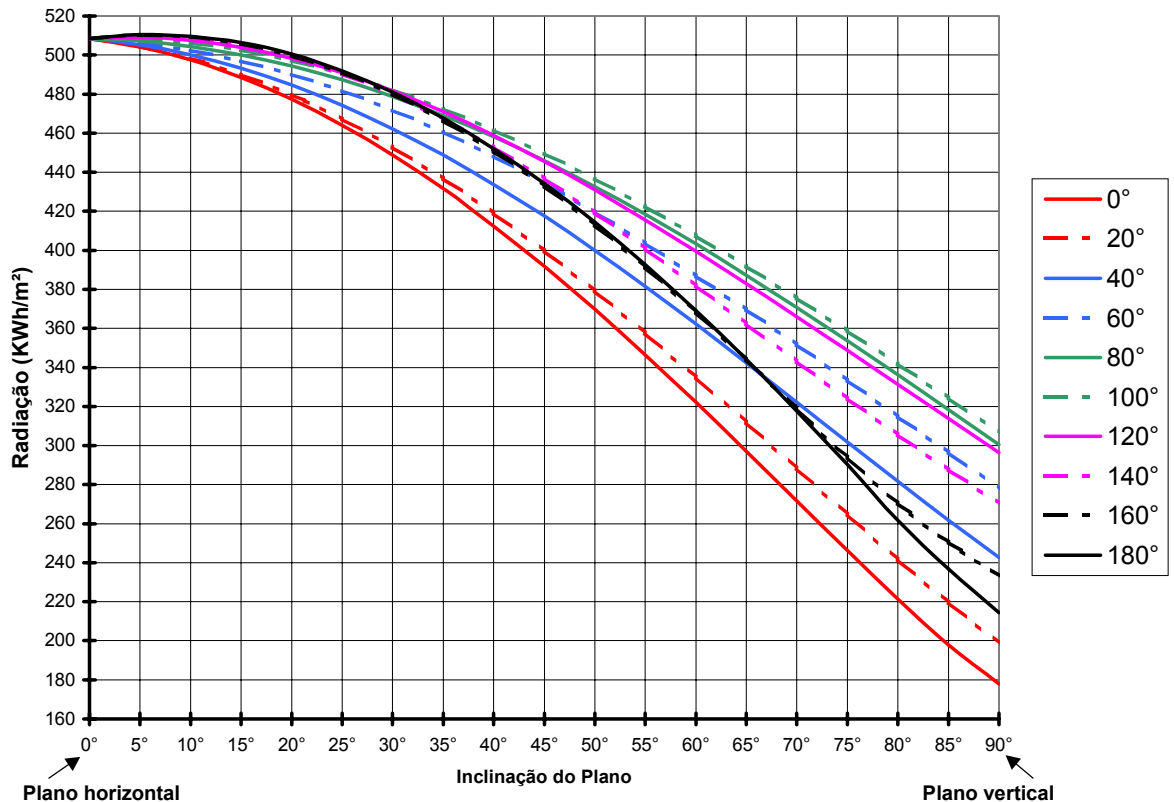


Figura 4 – Isolinhas de orientação constante

Observando-se a Figura 1, verifica-se que no período de verão, considerado o mais crítico em termos de condições de conforto térmico, uma redução nos níveis de radiação incidente na medida que aumenta a inclinação das superfícies, especialmente para aquelas orientadas para norte e sul.

Em termos de superfícies verticais (fachadas), observa-se na mesma Figura, que os níveis máximos de radiação incidente ocorrem naquelas orientadas para o leste ou oeste, enquanto que os níveis mínimos ocorrem nas superfícies orientadas para o norte. Torna-se importante destacar os níveis consideráveis de radiação que incidem nas superfícies orientadas para o sul.

Analisando-se a influência da orientação sobre a intensidade da radiação solar incidente, verifica-se que esta aumenta simultaneamente com a inclinação, ou seja, para superfícies com inclinações relativamente baixas (telhados), a orientação não exerce influência considerável sobre os valores da radiação e que o inverso ocorre nas superfícies verticais (fachadas).

4. CONCLUSÕES

Em termos de orientação, conclui-se que é necessário que os projetistas tenham cuidados especiais com as superfícies de inclinação elevada. O estudo permitiu concluir, também, que as superfícies de menor inclinação recebem maiores valores de radiação solar incidente.

5. SIMBOLOGIA

\bar{H}_T - radiação total média diária mensal incidente no plano genérico (kWh/m².dia).

\bar{H} - radiação total média diária mensal incidente no plano horizontal (kWh/m².dia).

\bar{H}_D - radiação difusa média diária mensal incidente no plano horizontal (kWh/m².dia).

\bar{R}_b - fator de radiação direta médio mensal.

β - ângulo de inclinação do plano estudado (°).

ρ - albedo do solo.

ω_p - ângulo horário correspondente ao poente (°).

\bar{K}_T - coeficiente de transparência médio diário mensal.

ϕ - latitude do local do estudo (°).

δ - declinação no dia do estudo (°).

n - número de dias transcorridos entre 1º de janeiro e o dia médio do mês do estudo.

\bar{H}_0 - radiação incidente no plano horizontal fora da atmosfera, no dia médio (kWh/m².dia).

\bar{H}_{bT} - radiação direta média incidente no plano genérico no dia médio (kWh/m².dia).

\bar{H}_b - radiação direta média incidente no plano horizontal no dia médio (kWh/m².dia).

θ - ângulo formado entre o raio solar e a direção normal ao plano genérico (°).

γ - azimute do plano genérico (°).

ω - ângulo horário (°).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTANHEIRA, R.G. (2001). Radiação solar incidente em planos inclinados, fachadas e telhados no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 153p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Rio de Janeiro
- CORBELLA, O.D. (1995). Dados consolidados de energia solar global diária em plano horizontal para a cidade do Rio de Janeiro, Brasil. In: CADERNOS DE GEOCIÊNCIAS DO IBGE, Rio de Janeiro, n.16, p. 131-168.
- DUFFIE, J.A e BECKMAN, W.A. (1980). *Solar engineering of thermal processes*. New York; John Wiley & Sons. 184p.