



## GANHO SOLAR MÉDIO EM ABERTURAS ENVIDRAÇADAS ATRAVÉS DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

**Renato G. Castanheira (1); Oscar D. Corbella (2)<sup>1</sup>**

(1) PROARQ-UFRJ/UFRRJ – Rua Domingos do Couto, 71 – Campo Grande – CEP: 23080-190.

Rio de Janeiro – Brasil - ☎ (55)(21) 34-02-14-39 – e-mail: [rgcastanheira@uol.com.br](mailto:rgcastanheira@uol.com.br)

(2) PROARQ-PROURB/UFRJ – Av. Brig. Trompowsky, s/n. CEP: 21944-590 - Rio de Janeiro –

Brasil - ☎(55)(21) 25-98-19-92 – e-mail: [ocorbella@terra.com.br](mailto:ocorbella@terra.com.br)

### RESUMO

As fachadas e as janelas de vidro, ao permitirem a entrada da luz natural, melhoram as condições de conforto visual, mas também podem ser responsáveis por situações de desconforto térmico e grande consumo de energia elétrica nos sistemas artificiais de climatização. Neste trabalho apresenta-se uma ferramenta computacional desenvolvida para analisar o comportamento do “Ganho Solar” nas janelas e fachadas envidraçadas dos edifícios. Após sua utilização em diversas simulações, constatou-se a sua utilidade nos estudos envolvendo o comportamento das superfícies envidraçadas em relação à incidência da radiação solar.

### ABSTRACT

The facades and the glass windows, allow the entrance of natural light, so they improve the conditions of visual comfort but they can also be responsible for situations of thermal discomfort and great consumption of electric power in the artificial systems of climatization. A computational tool was developed to analyze the behavior of the “Solar Gain” in the windows and glazed facades of the buildings and is presented in this paper. After the use of this tool in several simulations, its usefulness was verified in cases involving the behavior of glazed surfaces in relation to the incidence of solar radiation.

### 1. INTRODUÇÃO

É freqüente considerar-se dividida em duas partes a contribuição da presença de janelas nos cálculos envolvendo a carga térmica. A primeira parte considera a condução através do vidro, resultante da diferença de temperatura existente entre o interior e o exterior. A segunda parte é atribuída à radiação solar, sendo tratada por *Ganho Solar (GS)*. Esta fração da carga térmica tenta descrever de uma forma simples a parcela da radiação solar incidente que será transformada em energia térmica dentro do edifício. O *Ganho Solar (GS)* desconsidera o balanço de radiação infravermelha (onda longa) envolvido no processo, tanto no exterior quanto no interior, considerando somente a parte ótica transmitida e absorvida pelo vidro.

Para compensar as discrepâncias ocorrentes na comparação com um balanço térmico mais completo, se atribui um coeficiente de correção à absorção, determinado por medições experimentais que

---

<sup>1</sup> Pesquisador do CNPq.

consideram somente a incidência do Sol sobre o vidro, sem considerar as diferenças de temperatura existentes entre o exterior e o interior.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta computacional, denominada *FSM*, apresentada neste artigo, que permite aos projetistas analisar de forma simples e um pouco mais criteriosa o comportamento das superfícies envidraçadas com orientações e inclinações genéricas, em relação à radiação solar, avaliando o comportamento das propriedades óticas dos vidros utilizados e do Ganho Solar nestas superfícies. Espera-se que este novo trabalho possa auxiliar nos estudos envolvendo a parcela da carga térmica proveniente das janelas e superfícies envidraçadas, propiciando melhores condições de conforto térmico e economia de energia com projetos de edifícios energeticamente mais eficientes.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Ganho Solar (*GS*) e Fator Solar (*FS*) para aberturas envidraçadas

O esquema para a formulação do cálculo é apresentado na figura 1. Tem-se:

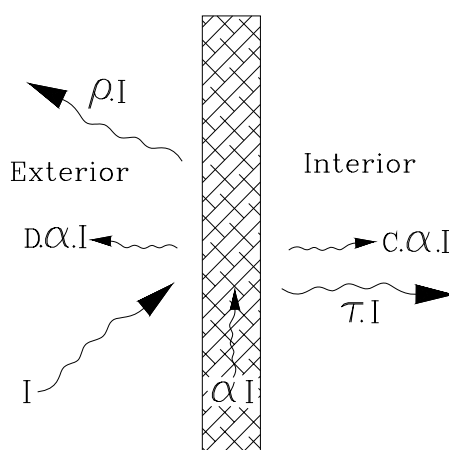


Figura 1. Esquema da interação entre a radiação solar incidente e uma superfície de vidro

Onde:

$I$  – radiação solar incidente na superfície de vidro,

$\rho I$  – radiação solar refletida pela superfície de vidro para o exterior,

$\tau I$  – radiação solar que é transmitida através da superfície de vidro para o interior,

$\alpha I$  – radiação solar que é absorvida pela superfície de vidro,

$D.\alpha I$  – fração da radiação absorvida dissipada pela superfície de vidro para o exterior,

$C.\alpha I$  – fração da radiação absorvida dissipada pela superfície de vidro para o interior.

O Ganho Solar (*GS*) é definido como a quantidade de energia solar que chega ao interior através da superfície de vidro, desconsiderando-se qualquer diferença de temperatura existente entre as faces exterior e interior do plano de vidro. Pode ser expresso através da equação 1:

$$GS = (\tau + C.\alpha).I \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde ( $\alpha$ ) e ( $\tau$ ) são a absortância e transmitância do vidro.

O Fator Solar do vidro ( $FS$ ), escrito segundo a equação 2, representa a razão existente entre a quantidade de energia solar que chega ao interior e a quantidade de energia solar incidente na superfície envidraçada,<sup>1</sup>

$$FS = (\tau + C.\alpha) = \frac{GS}{I} \quad [\text{Eq. 02}]$$

O coeficiente ( $C$ ), neste trabalho, é estimado através do conhecimento dos valores das propriedades óticas do vidro estudado ( $\tau$ ) e ( $\alpha$ ) e do valor do Fator Solar ( $FS$ ), obtido através da literatura para vidros claros em condições de incidência normal (ASHRAE, 2001; AFG, 2004).

## 2.2 Valores Médios do Ganho Solar ( $GS_m$ ) e do Fator Solar ( $FS_m$ )

É importante considerar que a absorvância ( $\alpha$ ) e a transmitância ( $\tau$ ), variam em função:

- do índice de refração e do coeficiente de extinção, que são propriedades do vidro. Para os vidros mais comuns, estes valores podem ser considerados independentes do comprimento de onda, dentro do espectro da radiação solar (DUFFIE e BECKMAN, 1980; KEPPELER, 1979),
- do ângulo de incidência do raio solar ( $\theta$ ) que varia com o tempo, ou seja, o ângulo definido entre o raio solar e a direção normal à superfície do plano envidraçado. Como consequência tem-se:

$$\alpha = f(\theta) \text{ e } \theta = f(t), \text{ então: } \alpha = f(t) \text{ e } \tau = f(\theta) \text{ e } \theta = f(t), \text{ então: } \tau = f(t)$$

Para um determinado instante o valor do Fator Solar ( $FS$ ) pode ser estimado pela equação 3.

$$FS = \tau(t) + C.\alpha(t) \quad [\text{Eq. 03}]$$

No mesmo instante, o valor do Ganho Solar ( $GS$ ) é determinado através da equação 4:

$$GS = [\tau(t) + C.\alpha(t)].I(t) \quad [\text{Eq. 04}]$$

Para calcular o Fator Solar Médio Diário ( $FS_m$ ) para uma superfície de vidro, define-se:

$$FS_m = \tau_m + C.\alpha_m \quad [\text{Eq. 05}]$$

O Ganho Solar Médio Diário ( $GS_m$ ) pode ser determinado segundo a equação 6:

$$GS_m = [\tau_m + C.\alpha_m].I_{dia-total} \quad [\text{Eq. 06}]$$

Nas expressões citadas,  $\alpha_m$  e  $\tau_m$  representam a absorvância e a transmitância médias para a superfície envidraçada, considerando um período diário.

Para o cálculo destes parâmetros, adota-se o procedimento descrito a seguir.

---

<sup>1</sup> Segundo CROSET (1976), o coeficiente  $C$  apresentado nas equações 1 e 2 pode ser estimado através da equação  $C \cong Rse.U$ , onde  $Rse$  e  $U$  representam a resistência térmica superficial na face externa e a condutância térmica global na superfície de vidro.

Sejam respectivamente:

$\tau_{dir} - \tau_{dif} - \tau_{ref} \Rightarrow$  as transmitâncias óticas para radiação solar incidente direta, difusa e refletida,

$\alpha_{dir} - \alpha_{dif} - \alpha_{ref} \Rightarrow$  as absortâncias do vidro para a radiação solar incidente direta, difusa e refletida,

$I_{total} - I_{dir} - I_{dif} - I_{ref} - I_{transm} - I_{absorv} \Rightarrow$  os valores horários da radiação solar incidente total, direta, difusa, refletida, transmitida e absorvida,

$I_{dia-total} - I_{dia-transm} - I_{dia-absorv} \Rightarrow$  os valores diários da radiação solar incidente, total incidente, total transmitida e total absorvida.

A radiação solar horária total incidente no plano de vidro pode ser calculada através da equação 7.

$$I_{total} = I_{dir} + I_{dif} + I_{ref} \quad [\text{Eq. 07}]$$

O valor para a radiação solar horária total transmitida pelo plano de vidro é calculado por:

$$I_{transm} = \tau_{dir} \cdot I_{dir} + \tau_{dif} \cdot I_{dif} + \tau_{ref} \cdot I_{ref} \quad [\text{Eq. 08}]$$

O valor da radiação solar total incidente no plano de vidro ao longo de um dia é calculado por:

$$I_{dia-total} = \sum_{Dia} I_{total} \quad [\text{Eq. 9}]$$

O valor da radiação solar total transmitida através do plano de vidro ao longo do dia do estudo é calculado através da equação 10.

$$I_{dia-transm} = \sum_{Dia} I_{transm} \quad [\text{Eq. 10}]$$

Calcula-se a transmitância média do plano de vidro no dia do estudo ( $\tau_m$ ) através da equação 11.

$$\tau_m = \frac{\sum_{Dia} I_{transm}}{\sum_{Dia} I_{total}} \quad [\text{Eq. 11}]$$

O valor para a radiação solar horária total absorvida pelo plano de vidro é calculado por:

$$I_{absorv} = \alpha_{dir} \cdot I_{dir} + \alpha_{dif} \cdot I_{dif} + \alpha_{ref} \cdot I_{ref} \quad [\text{Eq. 12}]$$

O valor da radiação solar total absorvida pelo plano de vidro durante o dia do estudo é calculado por:

$$I_{dia-absorv} = \sum_{Dia} I_{absorv} \quad [\text{Eq. 13}]$$

Calcula-se a absorvância média do plano de vidro no dia do estudo ( $\alpha_m$ ), utilizando a equação 14.

$$\alpha_m = \frac{\sum_{Dia} I_{absorv}}{\sum_{Dia} I_{total}} \quad [\text{Eq. 14}]$$

Através das equações 5 e 6 são calculados os valores médios para o *Fator Solar* e para o *Ganho Solar*, considerando o dia do estudo.

### 2.3 Radiação Solar Horária Incidente Direta ( $I_{dir}$ ), Difusa ( $I_{dif}$ ) e Refletida ( $I_{ref}$ )

Os valores para a radiação solar horária incidente na superfície de vidro analisada são estimados a partir dos valores da radiação média diária mensal incidente no plano horizontal, que poderão ser obtidos, para o Rio de Janeiro, em CORBELLA (1995) ou em CRESESB (2004) ou NASA (2004), para outras localidades.

A distribuição em valores horários da radiação média diária mensal incidente no plano horizontal é realizada segundo modelo matemático, que tem como base equações desenvolvidas por *Collares-Pereira e Rabl*, baseadas nos estudos estatísticos realizados por *Hottel, Whillier, Liu e Jordan*. O modelo adotado considera, ao longo de cada mês, uma transparência média diária mensal para a atmosfera calculada no dia médio<sup>1</sup> do mês do estudo.

A estimativa da parcela de radiação difusa média diária mensal contida no valor da radiação total incidente no plano horizontal é estimada através de uma equação proposta por *Collares-Pereira e Rabl* (em DUFFIE e BECKMAN, 1980).

As transformações dos valores horários obtidos para a radiação solar incidente no plano horizontal para os planos genéricos são realizadas através do método proposto por *Liu e Jordan* para o cálculo da radiação solar incidente em planos inclinados (em DUFFIE e BECKMAN, 1980).

### 2.4 Ângulo de incidência ( $\theta$ )

Os valores horários para o ângulo de incidência da radiação solar ( $\theta$ ), nos planos analisados, são obtidos através da equação de *Bendford e Block* (em DUFFIE e BECKMAN, 1980).

### 2.5 Valores horários para $\alpha(t)$ e $\tau(t)$ .

Os valores das propriedades óticas do vidro considerado foram calculados a partir do ângulo de incidência, do índice de refração, do coeficiente de extinção e da espessura. O modelo matemático adotado é baseado nas equações propostas por *Fresnel* para a reflexão, por *Snell* para o cálculo da relação entre os ângulos de incidência e de refração, por *Bouguer* para a caracterização do *coeficiente de extinção* e por *Brandemuehl e Beckman* para os cálculos envolvendo a radiação difusa e a refletida. O modelo adotado considera que os valores das propriedades óticas do vidro estudado não sofram variações significativas dentro do espectro da radiação solar (DUFFIE e BECKMAN, 1980; KEPPELER, 1979; CORBELLA e KEPPELER, 1980).

---

<sup>1</sup> Dia do mês no qual o valor da radiação extraterrestre se aproxima mais do valor da radiação extraterrestre média diária mensal.

### 3. O PROGRAMA *FSM*

O programa *FSM* foi codificado em Object Pascal, no ambiente Delphi, para o sistema operacional Windows 95 e versões posteriores. Apresenta uma única tela, mostrada na figura 2, onde são inseridos os dados necessários para os cálculos e também são apresentados os resultados.

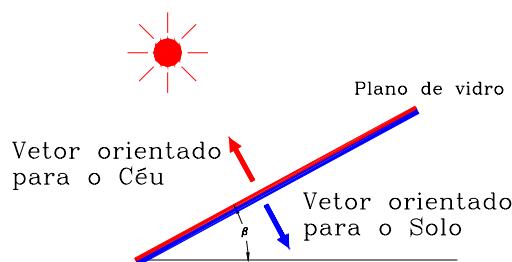
Devem ser inseridos os seguintes dados:

- a latitude do local do estudo,
- o dia do estudo (o valor sugerido pelo programa corresponde ao dia médio do mês do estudo),
- o mês do estudo,
- a inclinação do plano de vidro,

Figura 2. Tela inicial do programa *FSM*

- a orientação (azimute) do plano de vidro ( $0^\circ = N$ ,  $90^\circ = L$ ,  $180^\circ = S$ ,  $270^\circ = O$ ),
- o valor da radiação solar média diária mensal incidente no plano horizontal. O programa sugere valores para o Rio de Janeiro (latitude =  $22,91^\circ S$ ), segundo CORBELLA (1995),
- o valor do albedo do solo,
- o coeficiente de extinção para o vidro (dado do fabricante),
- a espessura do vidro,
- o coeficiente  $C$ . O valor sugerido pelo programa foi estimado através dos valores das propriedades óticas do vidro incolor do tipo float, calculados no programa *RadVidro* (desenvolvido em 2002) e os valores do Fator Solar obtidos em AFG (2004) ou ASHRAE (2001), considerando incidência normal para a radiação solar. Este valor (default) pode ser substituído pelo usuário, conforme necessário.

Para as superfícies envidraçadas não verticais, os parâmetros *Céu* e *Solo* indicam o sentido do vetor perpendicular à superfície, que define a face exposta ao Sol (figura 3). A opção *Céu* considera o vetor dirigido para a abóbada celeste, enquanto a opção *Solo*, o considera dirigido para o chão.



**Figura 3. Face exposta ao Sol**

O programa retorna as seguintes informações:

- a hora solar (coluna Hora),
- a radiação solar direta horária (coluna  $I_{dir}$ ),
- a radiação solar difusa horária (coluna  $I_{dif}$ ),
- a radiação solar refletida horária (coluna  $I_{ref}$ ),
- a radiação solar total horária (coluna  $I_{total}$ ),
- o ângulo de incidência horário (coluna  $\theta$ ),
- a transmitância do vidro à radiação solar direta (coluna  $\tau_{dir}$ ),
- a transmitância do vidro à radiação solar difusa (coluna  $\tau_{dif}$ ),
- a transmitância do vidro à radiação solar refletida (coluna  $\tau_{ref}$ ),
- a radiação solar direta horária transmitida (coluna  $I\tau_{dir}$ ),
- a radiação solar difusa horária transmitida (coluna  $I\tau_{dif}$ ),
- a radiação solar refletida horária transmitida (coluna  $I\tau_{ref}$ ),
- a absortância do vidro à radiação solar direta (coluna  $\alpha_{dir}$ ),
- a absortância do vidro à radiação solar difusa (coluna  $\alpha_{dif}$ ),
- a absortância do vidro à radiação solar refletida (coluna  $\alpha_{ref}$ ),
- a radiação solar direta horária absorvida (coluna  $I\alpha_{dir}$ ),
- a radiação solar difusa horária absorvida (coluna  $I\alpha_{dif}$ ),
- a radiação solar refletida horária absorvida (coluna  $I\alpha_{ref}$ ),
- o total diário de radiação solar incidente no plano (seção: Valores diários – caixa: Incidente),
- o total diário de radiação solar absorvida no plano (seção: Valores diários – caixa: Absorvida),
- o total diário de radiação solar transmitida no plano (seção: Valores diários – caixa: Transmitida),
- o total diário do Ganho Solar Médio (seção: Valores diários – caixa: GSM),
- o valor da transmitância média ( $\tau_m$ ) (seção: Valores médios – caixa:  $\tau$ ),
- o valor da absortância média ( $\tau_m$ ) (seção: Valores médios – caixa:  $\alpha$ ),
- o valor da transparência média da atmosfera (seção: Valores médios – caixa: kt),
- o valor do Fator Solar Médio (seção: Valores médios – caixa: FSM).

#### 4. UTILIZANDO O PROGRAMA FSM

Para ilustrar o funcionamento da ferramenta desenvolvida foi realizado um estudo comparativo, no período de novembro a março (considerado mais quente), do comportamento em relação à radiação solar de três janelas (fachadas) envidraçadas no Rio de Janeiro. As janelas (fachadas) estão orientadas para o norte, para o sul e para leste ou oeste. As janelas (fachadas) utilizam um vidro incolor do tipo float com 3 mm de espessura, índice de refração igual a 1,526 e coeficiente de extinção igual a  $32 \text{ m}^{-1}$ .

A figura 4 mostra a tela do programa FSM para a janela sul no mês de fevereiro

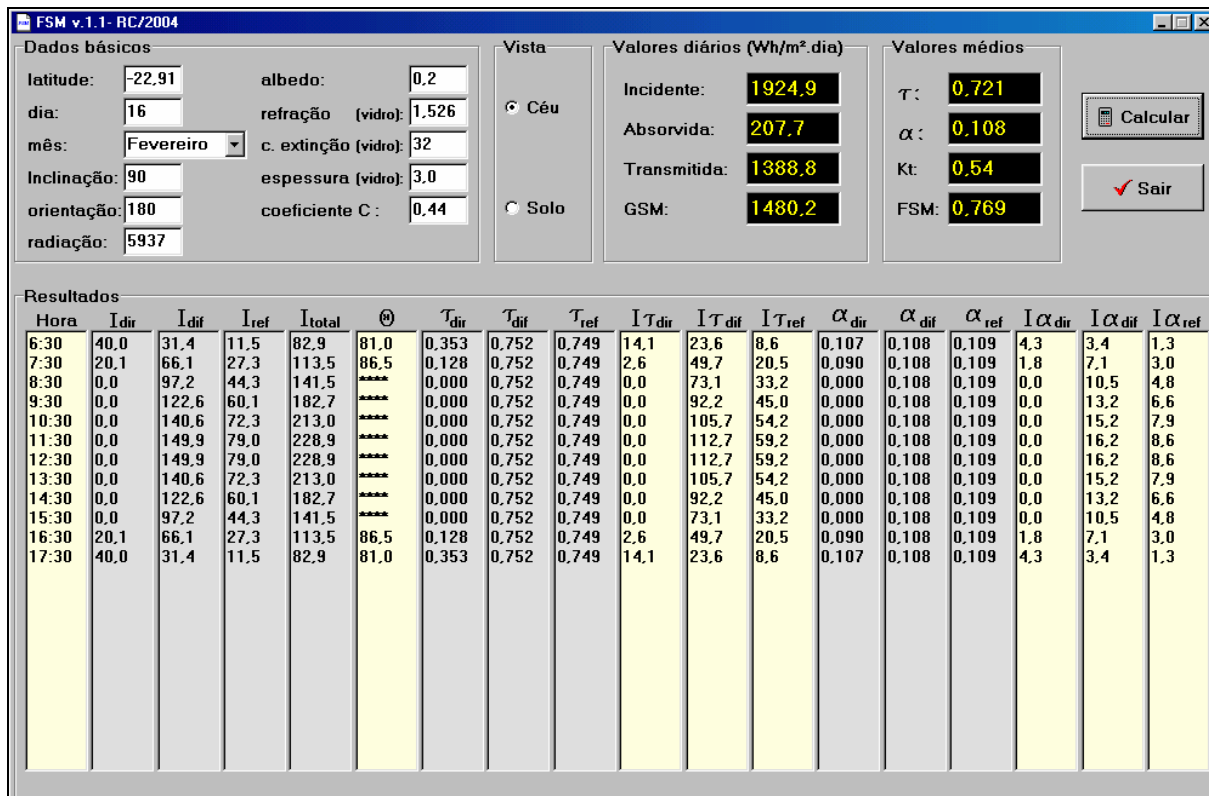


Figura 4. Tela com resultados obtidos no programa FSM

Utilizando os resultados obtidos no programa FSM foi elaborada a tabela 1 no Microsoft Excel:

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos com o programa FSM

Mês	Radiação solar incidente (Wh/m <sup>2</sup> .dia)			Fator Solar Médio			Ganho Solar Médio (Wh/m <sup>2</sup> .dia)		
	N	S	L/O	N	S	L/O	N	S	L/O
novembro	1887,4	2123,4	2960,4	0,77	0,75	0,81	1452,5	1600,4	2384,7
dezembro	1836,1	2304,3	2861,4	0,80	0,74	0,80	1466,7	1708,4	2384,7
janeiro	1916,4	2335,6	3148,4	0,79	0,74	0,81	1506,5	1738,4	2536,3
fevereiro	2217,2	1924,9	3156,5	0,72	0,77	0,81	1588,3	1480,2	2541,7
março	2702,8	1585,8	2930,2	0,72	0,80	0,81	1943,5	1266,6	2362,9

Com os dados da tabela 1 foram elaborados os gráficos mostrados nas figuras 5, 6 e 7.



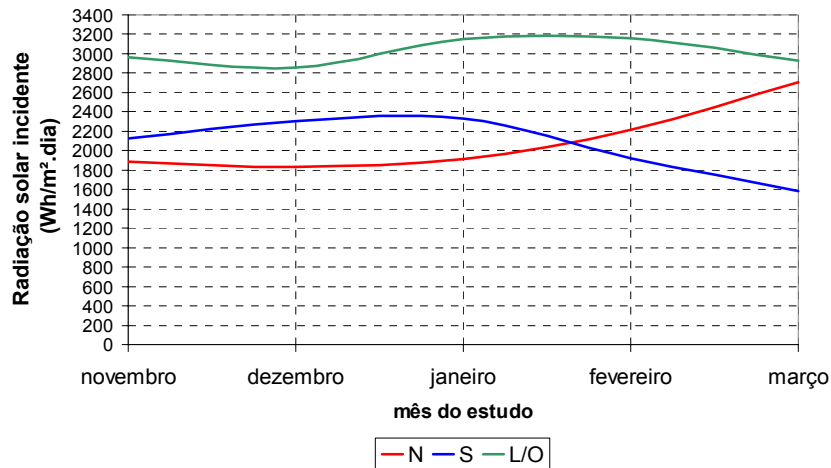


Figura 5. Evolução mensal para a radiação solar incidente

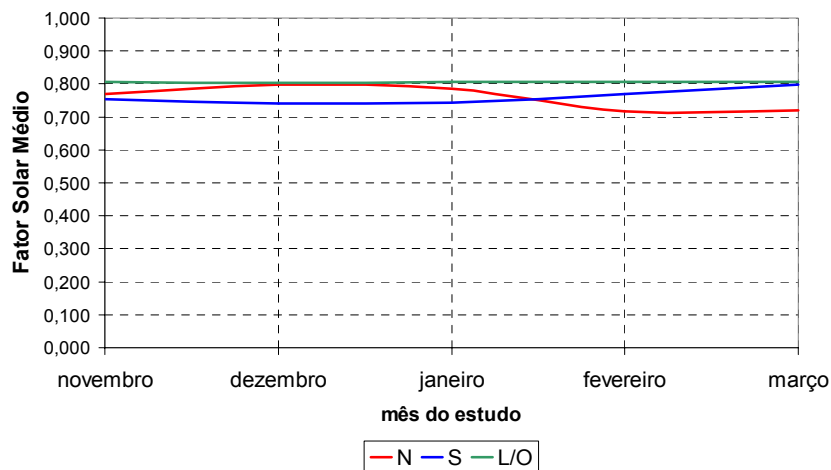


Figura 6. Evolução mensal para o Fator Solar Médio

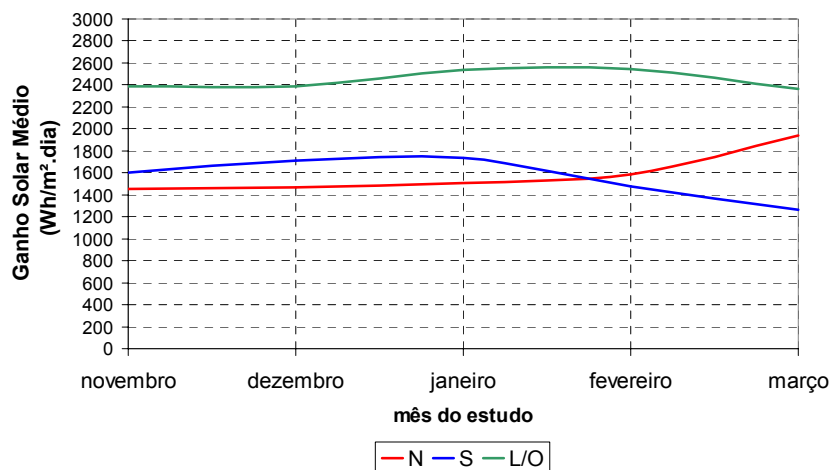


Figura 7. Evolução mensal para o Ganho Solar

Com base nos resultados obtidos, observou-se que:

- os valores do Fator Solar Médio do vidro oscilam entre 0,70 (70%) e 0,81 (81%), caracterizando, para as janelas (fachadas) orientadas para o norte e para o sul, uma variação discreta ao longo do período estudado. Para as janelas orientadas para o leste ou o oeste, o Fator Solar é praticamente constante e um pouco maior do que o registrado para as janelas norte e sul,

- os valores do Fator Solar para um vidro float incolor de 3 mm (1/8”), obtidos na literatura, são aproximadamente iguais a 0,87 (AFG, 2004; ASHRAE, 2001). É importante ressaltar que freqüentemente estes são valores máximos pois são medidos no instante em que ocorre incidência direta da radiação solar normal à superfície do vidro. Este valores são utilizados para os cálculos do Ganho Solar destinados aos projetos de sistemas artificiais para resfriamento no Rio de Janeiro, pois favorecem a margem de segurança requerida,
- durante o período estudado, os valores obtidos para a radiação solar incidente e para o Ganho Solar nas janelas orientadas para leste ou oeste são bem maiores do que os valores registrados para as janelas orientadas para o norte e para o sul (CASTANHEIRA, 2001),
- durante grande parte do período analisado, os valores obtidos para a radiação solar incidente e para o Ganho Solar nas janelas (fachadas) orientadas para o sul foram superiores aos registrados nas janelas (fachadas) orientadas para o norte, indicando que estas janelas (fachadas) não podem ser negligenciadas neste período, em termos de radiação solar incidente, confirmando os resultados obtidos em estudos anteriores (CORBELLA e CASTANHEIRA, 2001).

## 5. CONCLUSÕES FINAIS

Após todos os estudos realizados, concluiu-se que a ferramenta desenvolvida é de uso simples e poderá ser útil nas análises envolvendo superfícies planas envidraçadas expostas à radiação solar.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFG - Monolithic Float Performance Data. Disponível em: <<http://www.afgglass.com>>. Acesso em: 5 de novembro de 2004.

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. New York: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Enginneers, 2001. 897p.

CASTANHEIRA, R.G. **Radiação Solar Incidente em Planos Inclinados, Fachadas e Telhados no Rio de Janeiro**, 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ.

CORBELLA, O.D. Dados Consolidados de Energia Solar Global Diária em Plano Horizontal, para a cidade do Rio de Janeiro. **Cadernos de Geociências do IBGE**, Rio de Janeiro, n.16, p. 131-168, out. /dez. 1995.

CORBELLA, O.D. e CASTANHEIRA, R.G. Sobre a necessidade de proteção da radiação solar incidente nas fachadas sul, para edifícios situados entre as latitudes 10 ° e 35 °. In: VI ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, São Pedro. **Anais...** São Pedro: ANTAC: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2001, CD.

CORBELLA, O.D. e KEPPELER, R. O. Propriedades e Efeitos da Interação da Radiação com Materiais Semitransparentes e Translúcidos. In: COLOQUIO LATINO-AMERICANO DE FÍSICA DE SUPERFÍCIES, 1980. **Anais...** Niterói: UFF, Universidade Federal Fluminense - RJ.

CRESESB. Disponível em: < [www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm](http://www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm)>. Acesso em 30/06/2004.

CROSET, M. **Humedad y Temperatura em los Edificios**: Condensaciones y confort térmico de verano y de invierno. Barcelona: Editores técnicos asociados, s.a., 1976. 247 p.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A.. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 761p.

KEPPELER, R.O. **Caracterização de Materiais de Cobertura para Coletores Solares**, 1978. 163 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - PPGEMM/UFRGS, Porto Alegre - RS.

NASA-EARTH SCIENCE ENTERPRISE PROGRAM. Surface meteorology and solar data set. Disponível em: <<http://shire.larc.nasa.gov/sse>>. Acesso em 30/062004.