



SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL PARA ECONOMIA DE ENERGIA  
E CONFORTO LUMÍNICO EM EDIFICAÇÕES

Léa T.A. de Carvalho  
FAU/ UFRJ .  
Ed. Reitoria - sala 438  
Cidade Universitária. RJ

Leopoldo E. G. Bastos  
COPPE/UFRJ  
Caixa Postal 68503  
21.945. RJ

Neste trabalho é apresentado um programa que fornece níveis externos e internos de radiação solar e lumínica. além do ganho de calor de origem solar incidente em uma edificação. Pretende-se que esta seja uma ferramenta valiosa na fase inicial do projeto arquitetônico, determinando-se a distribuição da luz natural no interior da edificação. Deste modo será possível estabelecer os níveis de iluminação artificial necessários para se atingir o iluminamento apropriado. e a distribuição espacial mais adequada dos ambientes, conforme a tarefa desempenhada. contribuindo assim para economia de energia e conforto do usuário.

In this paper a computer code is presented which determines the building internal and external levels of solar and daylight radiation, as well as the heat load due to solar radiation. The code was devised as a tool for use by architects in the early design phase. to perform the distribution of natural lighting in an interior. The results allow the required artificial lighting levels to be determined in order to achieve the best illuminance and the optimum ambient space distribution according to the tasks. and finally leading to both energy conservation and user comfort.

## 1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da luz natural em interiores pode ser um meio eficiente para economia de energia elétrica e de melhoria da qualidade da espaço interno da edificação.

Pode-se observar em todos os grandes centros brasileiros a existência de edifícios totalmente envidraçados, que mesmo assim mantêm sua iluminação artificial interna acesa durante todo o dia.

Estas edificações têm um alto consumo de energia para climatização e para iluminação do ambiente interno. devido a grande quantidade de vidros. o que chega a ser um contra-senso. O conforto térmico do usuário é conseguido à custa de um enorme consumo de energia elétrica com aparelhos de ar-condicionado. (Além disto. para se obter conforto lumínico é necessária. neste tipo de ambiente envidraçado, se excluir a radiação direta incidente no ambiente, através de cortinas, evitando-se assim o ofuscamento da usuário.

A falta de medições sistemáticas da radiação e iluminamento solares externas dificulta a análise do comportamento de um edifício face à carga térmica E ao iluminamento de origem solar. Acrescente-se a isto o fato dos modelos de cálculo serem extensas requerendo muitos dados que estão fora do alcance da maior parte dos arquitetos.

Por tudo isto, a maior parte dos profissionais é obrigada a deixar de lado uma análise prévia do seu projeto e partir para a construção na base da tentativa e erro.

Procurando-se minimizar este problema foi criado um programa computacional que, a partir de dados de entrada simples (dia e mês que se

deseja estudar ) fornece, para qualquer orientação, o iluminamento solar interno e a carga térmica incidente sobre uma sala de escritórios para um determinado sitio.

Com isto espera-se poder prover aos arquitetos de informações confiáveis de modo a capacitá-lo ao estudo da iluminação natural conjugada à radiação solar, possibilitando assim a criação de melhores ambientes de trabalho.

## 2. O PROGRAMA

O modelo proposto é capaz de simular a radiação e o iluminamento externos sobre planos com inclinação e orientação quaisquer, sob duas condições de céu : claro, médio (parcialmente claro) e encoberto, em qualquer época do ano.

Para isto. os dados de entrada requeridos são:

- dia e mês em que se pretende realizar a simulação.
- inclinação do plano receptor externo (janela) variando de 0° (horizontal) até 90° (vertical).
- orientação do plano receptor externo. se sua inclinação for maior que 0°, variando da seguinte forma: Norte (180°), sul (0°), Leste (-90°). Oeste (90°) ou quaisquer valores intermediários.

A partir destes dados de entrada, o programa terá como dados de saída as seguintes variáveis, em valores horários a partir do nascer até o pôr-do-sol :

- altura e azimute solares,

- radiação e iluminamento solares sobre o plano externo,
- iluminamento interno sobre o plano de trabalho para céu claro e encoberto,
- carga térmica incidente sobre os vidros, sobre as paredes e no total (vidros e paredes),

Os resultados são apresentados sob a forma de médias mensais. Estas são obtidas utilizando-se o dia médio de cada mês como a data a ser entrada no início do programa [1].

O programa, na sua forma atual, gera resultados somente para a cidade do Rio de Janeiro. Modificando-se, porém, os parâmetros do sítio (latitude, longitude, altitude e albedo) e os climáticos (referentes ao estado de turvação da atmosfera) no corpo do programa, podem-se obter saídas de dados para qualquer sítio brasileiro. Devido às restrições do modelo utilizado para o cálculo de níveis de iluminamento interno, modelo dos Lumens para Iluminação Natural [2]. Os resultados são gerados para uma sala cujas características são apresentadas na figura a seguir :

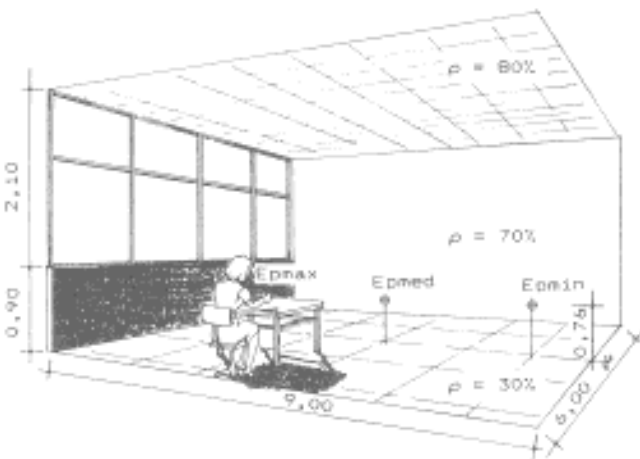


Figura 1 - sala típica

onde  $\rho$  são as refletâncias

$E_p$  max. é um ponto localizado a 1,5 m da janela, no eixo da sala, sobre o plano de trabalho,

$E_p$  med. é um ponto localizado a 4,5 m da janela, no eixo da sala, sobre o plano de trabalho,

$E_p$  min. é um ponto localizado a 7,5 m da janela, no eixo da sala, sobre o plano de trabalho.

As dimensões e refletâncias da sala foram escolhidas como representativas de um escritório típico. Porém, respeitando-se as limitações dos modelos, poderão ser modificadas para simular-se salas com outras dimensões ou com a existência de beirais, por exemplo.

## 2.1 Determinação dos níveis de iluminamento

Para a simulação dos níveis de radiação e iluminamento externos e iluminamento interno foram utilizados respectivamente os métodos : de Dogniaux [1] e dos Lumens para Iluminação Lateral, do IES (Illuminating Engineering Society) [2].

O modelo de Dogniaux [1] permite o cálculo da radiação e iluminamento solar global, direto, difuso e refletido, sobre planos exteriores com orientação a inclinação quaisquer.

Através deste modelo, podem-se obter resultados instantâneos ou médias mensais sob três condições de céu: *claro*, *parcialmente claro* e *encoberto*. sendo que as componentes *direta*, *difusa* e *refletida* da radiação solar são calculadas separadamente. O iluminamento solar global é obtido através da aplicação da eficácia luminosa da radiação solar à radiação solar global para cada tipo de céu.

O Método dos Lumens [2] utiliza a nível de iluminamento externa sobre o plano das janelas ( $E_i$ ) para se chegar aos níveis internos sobre o plano de trabalho ( $E_p$ ). Este nível externo, livre de obstruções, é reduzido por uma série de fatores tais como:

- a área útil da janela ( $A_w$ );
- o fator de perda de luz ( $K_m$ ), que engloba a fator de transmissão do vidro, o fator de manutenção e a existência de elementos de sombreamento interno;

- o coeficiente de utilização ( $K_u$ ), que leva em conta a geometria da sala em estudo, bem como as refletâncias de suas superfícies.

A partir da resolução sequencial dos dois métodos pode ser analisado o comportamento de uma edificação frente à radiação solar luminosa ao longo do ano.

Neste artigo serão estudados os seguintes casos:

1. Janeiro - Fachada Sul - céu claro
2. Julho - Fachada Sul - céu claro

As figuras 2 e 3 ilustram os níveis de iluminamento obtidos através do modelo. Estes são apresentados sob a forma de curvas Lima para cada hora do dia relacionando : a distância da fonte luminosa (janela) ao nível de intensidade do iluminamento sobre o plano de trabalho e ao nível mínimo de iluminamento requerido pela Norma Brasileira [4].

As horas foram escolhidas a partir das 8:30 h (hora local) horário em que, usualmente, os escritórios já estão ocupados. até às 17:30 h, quando começam a serem desocupados. Foram considerados intervalos de 3,00 h.

## 2.2 Determinação da carga térmica

Uma vez calculados os níveis de iluminamento, conforme descrito no item 2.1, procede-se ao cálculo da carga térmica. Para tal foi adotado o modelo proposto por Koenigsberger [3].

Trata-se de um modelo matemático para cálculo

da transmissão de calor em regime periódico \* o cálculo é feito em duas partes: a primeira considera a carga média diária; na segunda parte o desvio com relação à média é encontrado, considerando-se a inércia térmica da parede externa.

Como neste trabalho o objetivo foi determinar somente a contribuição da radiação solar e da temperatura externa para a carga térmica do ambiente, o modelo foi simplificado não considerando-se as trocas de calor provocadas pelos ganhos internos, pela ventilação ou pela evaporação.

As tabelas 1 e 2 mostram os resultados referentes à taxa de transferência de calor gerada para os casos abordados, em valores instantâneos para cada hora. São apresentados valores da carga por metro quadrado de vidros e de paredes em separado e total, bem como a carga total considerando-se toda a parede externa de vidro (curtain-wall). Não estão sendo considerados em nenhum dos dois casos, elementos de proteção contra o 501.

### 2.3 Limitações do programa

Pelo método de Dogniaux [1] é possível também a geração de níveis de radiação solar para céu médio (parcialmente claros). O método dos Lumens [2] porém, não prevê esta possibilidade.

Deste modo, o programa possibilita somente a análise de condições extremas de céu. isto é. claro e encoberto, gerando níveis de radiação solar máximos e mínimos. Acredita-se; porém. que com algum bom senso, os resultados possam, ser extrapolados para condições médias de céu.

No modelo dos Lumens foram considerados vidros claros. Para a análise de outros tipos de vidro seriam necessárias algumas modificações de dados no corpo do programa referentes ao coeficiente de transmissão do vidro.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fachada sul, escolhida para análise. tem características muito peculiares, na latitude do Rio de Janeiro (22.9°sul). Em Janeiro, época de maior insolação, ela recebe radiação direta durante a maior parte da manhã e da tarde. Já em Julho, a mesma fachada só recebe radiação difusa, não recebendo a direta em nenhum momento do dia \* Trata-se portanto de uma fachada crítica por só receber radiação direta no verão. época de maiores temperaturas externas.

Observa-se pela figura 2 que a fachada sul, no mês de Janeiro, apresenta um iluminamento natural que, nas primeiras horas da manhã. se aproxima bastante do recomendado pela norma [4]. Pode-se perceber que, à medida que se afasta da janela. a iluminamento cai rapidamente mas mesmo assim ainda chega a um mínima de 200 lux às 17:30 h, horário previsto para o começo da desocupação da sala. Pela tabela 1, nota-se que o ganho de calor é considerável principalmente nas horas de maior ocupação.

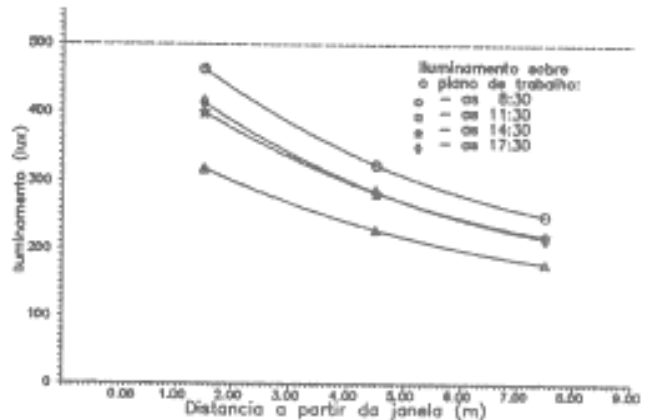


Figura 2 - iluminamento interior - Janeiro - Sul

CARGAS TÉRMICAS DO NASCER AO PÔR-DO-SOL JANEIRO-CÉU CLARO-SUL						
HORA	/M2 VIDROS	/M2 PAREDES	VIDRO 6x2,16	PEITOR, 6x0,96	TOTAL VIDR+PEIT	TOTAL C.WALL
5.23	41.06	17.99	517.32	97.17	614.49	739.03
6.30	231.31	17.91	2916.52	96.70	3011.22	4163.60
7.30	284.01	17.86	3578.48	96.46	3674.94	5112.11
8.30	282.25	17.86	3556.31	96.46	3652.77	5080.44
9.30	247.05	18.10	3112.84	97.76	3210.61	4446.92
10.30	127.89	19.70	1611.44	106.40	1717.84	2302.06
11.30	125.91	20.37	1586.44	109.99	1696.43	2266.34
12.30	129.09	20.71	1626.48	111.84	1738.32	2323.54
13.30	137.77	20.95	1735.96	113.12	1849.07	2479.94
14.30	260.72	21.20	3285.06	114.50	3399.56	4692.96
15.30	300.81	21.45	3790.21	115.02	3905.03	5414.59
16.30	307.69	21.74	3976.94	117.41	3994.35	5538.49
17.30	262.08	21.99	3302.24	118.73	3420.97	4717.49
18.30	100.02	22.20	1260.26	119.85	1380.11	1800.37

Tabela 1 - cargas térmicas - Janeiro

Em Julho. figura 3, os níveis de iluminação natural são consideravelmente mais baixos, mas mesmo assim só chegam a níveis insignificantes na hora do pôr-do-sol. O ganho de calor não é excessivo, pelo contrário, pode ser bem vindo nos dias mais frios.

Assim sendo, deve-se buscar soluções Arquitetônicas visando a atender da melhor forma aos dois casos.

A adição de um beiral ou brise horizontal a esta fachada seria uma boa solução pois reduziria a carga térmica no verão, Sem comprometer o conforto térmico no inverno quando o sol está mais baixo, tabelas 3 e 4.

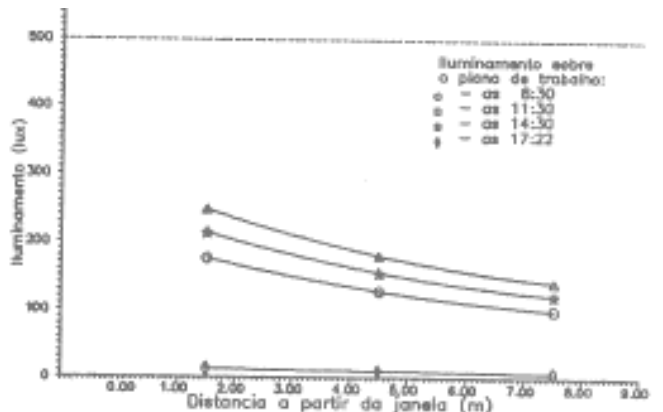


Figura 3 - iluminamento interior - Julho - Sul

CARGAS TÉRMICAS DO NASCER AO POR-DO-SOL JULHO-DEU CLARO-SUL							
HORA	/M2	/M2	VIDRO	PEITOR.	TOTAL	TOTAL	
	VIDROS	PARÊSES	b=2.1m	b=0.9m	VIDR+PEIT	C.WALL	
4.30	-18.65	1.55	-235.04	8.36	-226.68	-335.77	
7.30	12.20	1.50	153.78	8.12	161.91	219.69	
8.30	37.07	1.50	467.04	8.12	475.17	667.21	
9.30	55.90	1.44	704.34	8.83	713.18	1006.20	
10.30	69.88	1.94	880.43	10.47	890.90	1257.76	
11.30	79.39	2.62	1000.34	14.16	1014.50	1429.06	
12.30	85.04	3.36	1071.67	18.15	1089.83	1930.67	
13.30	84.51	4.12	1064.89	22.24	1087.13	1521.27	
14.30	78.93	4.79	994.56	25.87	1020.44	1420.81	
15.30	65.98	5.34	826.31	28.85	855.16	1180.44	
16.30	43.14	5.78	543.62	31.21	574.83	776.60	
17.22	12.14	5.93	152.92	32.01	184.93	218.45	

Tabela 2 - cargas térmicas - Julho

RIO DE JANEIRO - RJ							
latitude = -22.91 graus				longitude = 43.25 graus			
DATA = 17 01 92							
Nascer do sol = 5.25 horas							
Por do sol = 18.37 horas							
Declinação solar = -20.89 graus							
Inclinação do plano receptor = 90							
Orientação = Norte(180), Sul(0), Leste(90), Oeste(270) => 0							
HORA	RADIACAO SOLAR TOTAL - W/M2			ILUMINAMENTO SOLAR TOTAL - LUX			
	Claro	Medio	Encoberto	Claro	Medio	Encoberto	
5.25	31.94	6.07	0.00	3373.61	594.32	0.00	
	Altura Solar = 0.59 graus			Azimute = -86.95 graus			
6.30	252.01	113.94	26.63	26957.82	12479.89	3337.00	
	Altura Solar = 33.93 graus			Azimute = -72.90 graus			
7.30	309.31	174.05	54.35	33067.25	18886.17	6032.48	
	Altura Solar = 27.29 graus			Azimute = -77.43 graus			
8.30	301.21	291.60	82.27	32220.25	21823.96	10372.30	
	Altura Solar = 40.87 graus			Azimute = -81.94 graus			
9.30	268.91	212.38	107.28	28765.73	22476.38	13525.61	
	Altura Solar = 54.69 graus			Azimute = -85.78 graus			
10.30	232.99	211.63	126.77	24921.39	22893.33	15920.71	
	Altura Solar = 68.41 graus			Azimute = -90.91 graus			
11.30	218.99	207.33	136.73	23184.94	22428.08	17239.12	
	Altura Solar = 82.14 graus			Azimute = -103.31 graus			
12.30	213.89	206.13	137.20	22874.30	22296.01	17298.40	
	Altura Solar = 83.37 graus			Azimute = 106.43 graus			
13.30	232.01	212.03	127.63	24810.72	22934.78	16091.67	
	Altura Solar = 69.67 graus			Azimute = 91.92 graus			
14.30	265.34	232.67	109.33	28182.49	23807.17	13784.42	
	Altura Solar = 53.88 graus			Azimute = 86.19 graus			
15.30	298.91	293.20	84.73	31974.01	21993.76	10685.33	
	Altura Solar = 42.14 graus			Azimute = 81.97 graus			
16.30	310.36	177.57	56.97	33198.92	19261.79	7182.47	
	Altura Solar = 28.54 graus			Azimute = 77.83 graus			
17.30	262.06	121.56	29.11	28032.76	13294.05	3669.74	
	Altura Solar = 13.16 graus			Azimute = 73.34 graus			
18.30	77.44	21.32	5.00	8283.30	2416.02	478.66	
	Altura Solar = 2.11 graus			Azimute = 69.17 graus			

Tabela 3 - saída de dados do programa - Radiação - Janeiro

No aspecto lumínico, pode ser inferido Delas figuras 2 e 3 que a iluminação artificial poderia ser distribuída pelo ambiente de forma que fosse possível ser acionada gradualmente só atingindo iluminamento máximo no fim do dia ou quando não mais houvesse a contribuição da luz natural. A luz artificial seria usada somente como um complemento da natural, de modo a se atingir os 500 lux ou qualquer outro nível estabelecido pela norma conforme a atividade. Deste modo, evitando-se que a sala ficasse totalmente acesa durante o dia sem necessidade, o que acontece em grande parte dos edifícios comerciais atualmente. Com a adoção destas duas medidas simples, seria possível obter-se ambientes mais confortáveis Para a usuário, com uma enorme economia de energia. Esta seria conseguida da

seguinte maneira : a) pela redução da carga térmica de origem solar com a adoção de um elemento de sombreamento, b) pela redução da carga térmica interna gerada pela excesso de luz artificial, e c) pela menor gasta de energia elétrica com iluminação artificial.

Analisando-se agora, o casa de um edifício totalmente envidraçado (curtain-wall). Pode-se perceber pelas tabelas 1 e 2 que a carga térmica incidente no inverno ou no verão chega a ser 40% maior do que a que incide em um edifício tradicional com peitoril de alvenaria e janelas em vidro.

No que se refere à iluminação natural, o uso Do curtain-wall não traz ganhos significativos.

A luz que entra pela área envidraçada abaixo da altura das mesas não traz uma contribuição considerável ao seu iluminamento. Como a maior parte dos materiais de revestimento de Piso tem uma refletância muito baixa, da ordem de 30% para madeiras e tons cinzas ou marrons, a radiação luminosa que chega ao piso abaixo do plano de trabalho se refletirá muito pouco. Quando a fizer será em direção às paredes ao teto ou para baixo das mesas, perdendo um pouco da sua capacidade de iluminar à cada nova reflexão. Deste modo, esta luz terá uma parcela muito pequena a contribuir Para o iluminamento total do plano de trabalho. Pode-se concluir então, que o envidraçamento total não traz benefícios nem no sentido da economia de energia nem para o conforto do usuário.

RIO DE JANEIRO - RJ							
latitude = -22.91 graus				longitude = 43.25 graus			
DATA = 17 07 92							
Nascer do sol = 6.30 horas							
Por do sol = 17.22 horas							
Declinação solar = 21.29 graus							
Inclinação do plano receptor = 90							
Orientação = Norte(180), Sul(0), Leste(90), Oeste(270) => 0							
HORA	RADIACAO SOLAR TOTAL - W/M2			ILUMINAMENTO SOLAR TOTAL - LUX			
	Claro	Medio	Encoberto	Claro	Medio	Encoberto	
4.30	10.77	1.76	0.45	1192.00	199.69	56.13	
	Altura Solar = 0.27 graus			Azimute = -113.34 graus			
7.30	76.32	36.22	19.51	8142.30	3935.94	2459.94	
	Altura Solar = 11.04 graus			Azimute = -118.95 graus			
8.30	121.45	73.67	41.77	12991.16	7963.96	5266.93	
	Altura Solar = 22.64 graus			Azimute = -127.11 graus			
9.30	148.16	104.26	61.81	15898.39	11239.46	7792.73	
	Altura Solar = 32.89 graus			Azimute = -137.91 graus			
10.30	163.73	126.02	76.94	17514.60	13575.11	9700.40	
	Altura Solar = 40.00 graus			Azimute = -152.31 graus			
11.30	170.60	137.06	85.01	18297.75	14758.50	10718.12	
	Altura Solar = 45.29 graus			Azimute = -170.47 graus			
12.30	170.54	136.82	84.83	18242.52	14732.97	10695.70	
	Altura Solar = 45.15 graus			Azimute = 169.65 graus			
13.30	163.26	125.31	76.43	17463.82	13497.03	9636.49	
	Altura Solar = 40.52 graus			Azimute = 131.62 graus			
14.30	147.28	103.13	61.04	15734.78	11118.79	7696.64	
	Altura Solar = 32.46 graus			Azimute = 137.39 graus			
15.30	120.00	72.22	40.86	12836.43	7888.89	5151.99	
	Altura Solar = 22.17 graus			Azimute = 126.72 graus			
16.30	73.57	34.52	18.57	7869.80	3774.25	2340.76	
	Altura Solar = 10.93 graus			Azimute = 118.65 graus			
17.22	9.31	1.13	0.00	996.39	127.83	0.00	
	Altura Solar = 0.27 graus			Azimute = 113.09 graus			

Tabela 4 - saída de dados do programa - Radiação - Julho

#### 4. CONCLUSÃO

Através da utilização deste programa Pode-se fazer uma análise dos níveis lumínicos internos de uma edificação, verificar-se a necessidade de se implementar uma distribuição de tarefas setorizada e, principalmente, determinar qual a real necessidade da luz artificial e de que maneira ela deve ser distribuída pelos ambientes.

Pode-se calcular ainda, através dos níveis de radiação solar. a carga térmica incidente sobre a edificação estabelecendo-se uma relação luz - calor, o que é fundamental em locais com clima similar ao do Rio de Janeiro.

Deste modo este modelo se torna uma ferramenta valiosa para os arquitetos durante o projeto contribuindo para a execução de uma edificação que contribua para a economia de energia sem perder de vista o conforto lumínico e térmico do usuário.

#### 5. REFERÊNCIAS .

1. DOGNIAUX. R. Programme General de Calcul des rclairements Solaires Energetiques et Lumineux des Surfaces Orientées et Inclinéés. Ciels Clairs, Couverts et Variables. Bruxelles, Institut Royal Météorologique de Belgique. 1965. p. 10 - 3,5.
2. ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. IES Lighting Handbook. New York, 1991. p. 7-5 9-93.
3. KOENIGSBERGER, O.H.. INGERSOLL, T.G., MAYHEW, A., SZOKOLAY, S.V. Manual of Tropical Housing and Building. London, Longman Group Limited, 1990. p. 74 - 99.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. Iluminância de Interiores: NOR 5413. 1983.
5. CARVALHO, L. Simulação e Análise da Iluminação Natural em Interiores. Dissertação de Mestrado, UFRJ, 1992.

#### 6. APÊNDICE,

Estrutura do Programa.

O programa é estruturado conforme a seqüência a seguir.

A. Entrada de Dados.

A.1 Leitura da data (dia, mês e ano).

A.2 Cálculo e impressão das horas do nascer e por do sol e declinação solar.

A.3 Leitura da inclinação do plano.

A.3.1 Se inclinação > 0, então "Plano Inclinado".

A.3.1.1 Leitura da orientação.

A.3.2 Se inclinação = 0, então "Plano Horizontal " .

B. Cálculos - Aplicação do Método de Dogniaux.

B.1 Radiação solar direta sobre o plano horizontal (céu claro, encoberto e variável).

B.2 Radiação Global.

B.2.1 Se "Plano Horizontal" então

B.2.1.1 Radiação Solar Difusa (céu clara, encoberto e variável).

B.2.1.2 Radiação Global (céu claro, encoberto e variável).

B.2.2 Se "Plano Inclinado" então

B.2.2.1 Radiação Direta (céu claro e variável).

B.2.2.2 Radiação Solar Difusa (céu claro, encoberto e variável).

B.2.2.3 Radiação Solar Refletida (céu claro, encoberto e variável).

B.2.2.4 Radiação Global céu claro, encoberto e variável).

B.2.2.5 Iluminamento Externo (céu claro, encoberto e variável).

B.3 Se Hora <= Por do sol então retorne a B.1

C. Cálculos - Aplicação do Método dos Lumens.

C.1 Iluminamento interno (máximo, médio e mínimo, céu claro e encoberto).

D. Saída de Dados.

As seguintes variáveis são apresentadas hora a hora.

D.1 Radiação e Iluminamento sobre o Plano vertical externo.

D.2 Azimute e altura solar.

D.3 Iluminamento interno sobre o plano de trabalho.

D.4 Carga térmica.

D.5 Opção de estudo de novos casos.