

INCIDÊNCIA MÍNIMA DE ENERGIA SOLAR NOS EDIFÍCIOS PRISMÁTICOS (PARALELEPÍPEDOS)

Renato G. Castanheira (1); Oscar D. Corbella (2)

(1) UFRRJ - IT- DAU – Rua Domingos do Couto, 71 – Campo Grande – RJ

☎ (55)(21) 34-02-14-39 – e-mail: rgcastanheira@uol.com.br

(2) PROARQ-PROURB/UFRJ – Av. Pedro Calmon, 550. CEP: 21941-590 - Rio de Janeiro-RJ

☎ (55)(21) 25-98-19-90 – e-mail: oscar.corbella@gmail.com - Pesquisador do CNPq

RESUMO

Com o objetivo de reduzir a carga térmica de resfriamento devido à energia solar incidente nos edifícios, foram pesquisadas relações proporcionais entre as dimensões dos edifícios prismáticos (paralelepípedos) para um edifício *ideal*, ou seja, aquele que capta a menor quantidade de energia solar possível. Para tal, foi elaborado um modelo matemático que fornece os valores destas relações e as dimensões destes edifícios. O método proposto foi avaliado numericamente através de um exemplo com dados climáticos do Rio de Janeiro, no mês de fevereiro. Os resultados obtidos, para as condições analisadas mostraram que as relações proporcionais são importantes, quando o objetivo é minimizar a quantidade de energia solar incidente em um edifício.

Palavras-chave: energia solar, eficiência energética.

ABSTRACT

Aiming to reduce the cooling thermal load due to the incident solar energy in the buildings, it were researched proportional relationships among the size of the prismatic buildings (parallelepipeds) for an ideal building, i.e. the one that captures the least amount possible of solar energy. For such, it was elaborated a mathematical model that supplies the values of these relationships and the dimensions of these buildings. The proposed method was evaluated through a numerical example with the climate data of Rio de Janeiro, in February. The results, for the conditions tested showed that the proportional relationships are important, when the objective is to minimize the amount of solar energy incident on a building.

Keywords: solar radiation, energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

É inegável, na situação mundial atual, a necessidade de se otimizar o consumo de energia elétrica, seja por questões técnicas de geração, econômicas e ecológicas. A economia de energia deve ser uma meta a ser perseguida em qualquer atividade desenvolvida.

Dados baseados no Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2009), relativos aos anos de 2006 e 2007, mostram que, do total de energia elétrica disponível no Brasil, aproximadamente 32% foram consumidos nos edifícios residenciais, comerciais e públicos, o que mostra a enorme responsabilidade dos arquitetos e engenheiros na produção de edifícios mais eficientes, em termos de consumo de energia.

Nas regiões tropicais quentes, a parcela da carga térmica de resfriamento relativa à energia solar incidente nas superfícies do envelope dos edifícios é, em muitos casos, a maior responsável por situações de desconforto térmico e incremento nos gastos de energia elétrica nos sistemas de ventilação e ar condicionado, fato que ilustra a importância de tornar os edifícios mais eficientes em relação à energia solar incidente em suas superfícies externas.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é elaborar um método para minimizar a quantidade de energia solar incidente nas superfícies externas dos edifícios prismáticos (paralelepípedos), através da adoção de relações proporcionais ideais entre o comprimento, a largura e a altura do edifício. O edifício que recebe a mínima quantidade de energia solar em seu envelope é denominado *edifício ideal*.

3. MODELO MATEMÁTICO

Em todos os estudos realizados, o volume do edifício foi considerado constante e a largura da base foi adotada como referência. A figura 1 mostra as dimensões do edifício estudado.

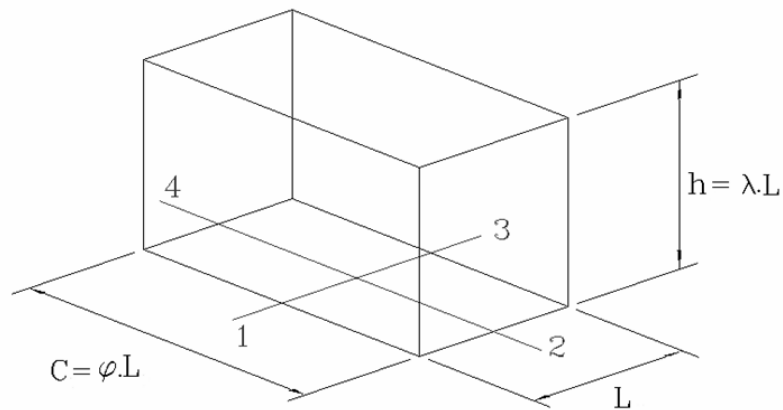


Figura 1 Dimensões do edifício prismático (paralelepípedo)

Para a relação existente entre o comprimento e a largura da base do edifício (φ), tem-se:

$$\varphi = \frac{C}{L} \Rightarrow C = \varphi.L \quad [1]$$

Para a relação existente entre a altura do edifício e a largura da base (λ), tem-se:

$$\lambda = \frac{h}{L} \Rightarrow h = \lambda.L \quad [2]$$

As fachadas do edifício estão orientadas segundo as direções 1, 2, 3 e 4, conforme mostra a figura 1 e recebem ao longo do dia, por unidade de área, quantidades de radiação solar incidente iguais a H_1 , H_2 , H_3 e H_4 . A quantidade de radiação solar incidente por unidade de área, na cobertura (plano horizontal) é igual a \bar{H} .

O valor total da energia solar diária incidente nas fachadas (H_{FACH}) pode ser calculado através da equação 3.

$$H_{FACH} = L.h.[\varphi.(H_1 + H_3) + (H_2 + H_4)] \quad [3]$$

O termo entre colchetes (S_{RF}), na equação 3, pode ser representado através da equação 4.

$$S_{RF} = \varphi.(H_1 + H_3) + (H_2 + H_4) \quad [4]$$

Substituindo a equação 4, na equação 3, obtém-se o total da energia solar diária incidente nas fachadas.

$$H_{FACH} = S_{RF}.L.h \quad [5]$$

A quantidade de energia solar diária incidente na cobertura do edifício (H_{COB}) pode ser calculada pela equação 6.

$$H_{COB} = \varphi.L^2.\bar{H} \quad [6]$$

A quantidade de energia solar diária (H_{ENV}) que incide no envelope do edifício ao longo do dia pode ser calculada através da equação 7.

$$H_{ENV} = S_{RF}.L.h + \varphi.L^2.\bar{H} \quad [7]$$

A equação 8 fornece o volume (V_{ENV}) contido no envelope, considerado constante no estudo.

$$V_{ENV} = \varphi.L^2.h \quad [8]$$

Explicitando o valor da altura do edifício (h) na equação 8 e substituindo na equação 7.

$$H_{ENV} = \frac{S_{RF}.V_{ENV}}{\varphi.L} + \varphi.\bar{H}.L^2 \quad [9]$$

Calculando a primeira derivada da equação 9 em relação a L .

$$\frac{dH_{ENV}}{dL} = \frac{-S_{RF}.V_{ENV}}{\varphi.L^2} + 2.\varphi.\bar{H}.L \quad [10]$$

Calculando a segunda derivada da equação 9 em relação a L .

$$\frac{d^2H_{ENV}}{dL^2} = \frac{2.S_{RF}.V_{ENV}}{\varphi.L^3} + 2.\varphi.\bar{H} \Rightarrow (L > 0 \Rightarrow \frac{d^2H_{ENV}}{dL^2} > 0 \Rightarrow \text{mínimo}) \quad [11]$$

Anulando a equação 10, obtém-se:

$$2.\varphi.\bar{H}.L = \frac{S_{RF}.V_{ENV}}{\varphi.L^2} \quad [12]$$

Substituindo a equação 8 na equação 12, obtém-se a relação λ_{MIN} , para o edifício ideal.

$$\lambda_{MIN} = \frac{h}{L} = \frac{2\varphi.\bar{H}}{S_{RF}} \quad [13]$$

O valor de λ_{MIN} varia em função da relação proporcional entre o comprimento e a largura da base, da orientação do edifício, do local, do período do ano e do albedo do entorno.

Substituindo a equação 13 na equação 8, obtém-se equação 14 que fornece a largura da base para o edifício *ideal* (L_{MIN}).

$$L_{MIN} = \sqrt[3]{\frac{V_{ENV}}{\varphi.\lambda_{MIN}}} \quad [14]$$

Combinando-se as equações 14 e 2, obtém-se a equação 15, que fornece o valor da altura para o edifício *ideal* (h_{MIN}).

$$h_{MIN} = \sqrt[3]{\frac{\lambda_{MIN}^2.V_{ENV}}{\varphi}} \quad [15]$$

É importante ressaltar que, para considerar a influência da orientação do edifício, na energia solar mínima incidente, os eixos genéricos 1-3 e 2-4, mostrados na figura 1, devem estar orientados segundo as direções norte-sul e leste-oeste. Este posicionamento representa a orientação ideal, ou seja, a posição em que o edifício recebe a menor quantidade de energia incidente no envelope (CASTANHEIRA, 2001).

A tabela 1 apresenta valores calculados pelo programa *RadSOL* (CASTANHEIRA, 2007) para a radiação solar média diária mensal incidente (irradiância) nas fachadas do edifício para a posição considerada anteriormente, no dia médio (típico) para o mês fevereiro, no Rio de Janeiro. Estes valores são utilizados no cálculo de S_{RF} .

Tabela 1 Valores para radiação solar média diária mensal

Radiação solar incidente (kWh/m ² .dia)	
Plano horizontal	5.94 (Corbella, 1995)
Fachadas	
Norte	2,17
Sul	2,11
Leste	3,59
Oeste	3,59

4. AVALIAÇÃO NUMÉRICA

Com o objetivo de avaliar numericamente as proporções e as dimensões do edifício *ideal*, foram estudadas três séries de edifícios, considerando as seguintes condições gerais:

- orientação das fachadas: norte, sul, leste e oeste;
- cobertura: horizontal;
- Rio de Janeiro;
- dia do estudo: 16 de fevereiro (dia médio ou típico);
- o termo S_{RF} foi calculado com valores de H_1 , H_2 , H_3 e H_4 , obtidos na tabela 1;
- todos os edifícios estudados têm o volume constante e igual a 75000 m³.
- a energia solar incidente diária foi calculada com a ferramenta *RadV* (CASTANHEIRA, 2007);
- o albedo do entorno foi considerado igual a 20% .

4.1. Edifícios ideais

A primeira série estudada é constituída por uma seqüência de edifícios *ideais*. Para cada valor considerado da relação φ , tem-se um edifício *ideal*. Nesta série, o verdadeiro edifício *ideal* é aquele que recebe a menor quantidade de energia entre todos os edifícios *ideais* da série analisada.

Tabela 2 Edifícios ideais – parâmetros geométricos

φ	λ	L (m)	C (m)	h (m)	Área da cobertura (m ²)	Área das fachadas (m ²)	Área do envelope (m ²)
1:1	1,04	41,67	41,67	43,20	1736,3	7199,7	8935,9
1,5:1	1,31	33,67	50,50	44,11	1700,2	7425,7	9125,9
1,7:1	1,40	31,61	53,73	44,16	1698,4	7537,2	9235,6
2:1	1,51	29,18	58,36	44,05	1702,8	7711,2	9413,9
3:1	1,78	24,13	72,38	42,95	1746,2	8289,7	10036,0
4:1	1,96	21,24	84,98	41,54	1805,3	8825,9	10631,2
5:1	2,08	19,33	96,63	40,16	1867,3	9314,3	11181,6
6:1	2,17	17,93	107,57	38,89	1928,5	9761,2	11689,7

Tabela 3 Edifícios ideais – Energia solar incidente em 16/02

φ	Cobertura (kWh)	Fachadas (kWh)	Envelope (kWh)
1:1	10313,5	20716,1	31029,6
1,5:1	10099,0	20266,1	30365,1
1,7:1	10088,6	20241,2	30329,8
2:1	10114,5	20288,8	30403,3
3:1	10372,5	20788,6	31161,1
4:1	10723,4	21476,2	32199,6
5:1	11091,8	22208,7	33300,5
6:1	11455,4	22932,0	34387,4

4.2. Edifícios baixos

A segunda série de edifícios é constituída por uma seqüência de edifícios *baixos*. Foram considerados edifícios *baixos*, aqueles com uma altura constante e igual a 10 m (três pavimentos).

Tabela 4 Edifícios baixos (h=10m) – parâmetros geométricos

φ	L (m)	C (m)	Área da cobertura (m ²)	Área das fachadas (m ²)	Área do envelope (m ²)
1:1	86,6	86,6	7500,0	1732,1	9232,1
1,5:1	70,7	106,1	7500,0	2121,3	9621,3
1,7:1	66,4	112,9	7500,0	2258,3	9758,3
2:1	61,2	122,5	7500,0	2449,5	9949,5
3:1	50,0	150,0	7500,0	3000,0	10500,0
4:1	43,3	173,2	7500,0	3464,1	10964,1
5:1	38,7	193,6	7500,0	3873,0	11373,0
6:1	35,4	212,1	7500,0	4242,6	11742,6

Tabela 5 Edifícios baixos – Energia solar incidente em 16/02

φ	Cobertura (kWh)	Fachadas (kWh)	Envelope (kWh)
1:1	44550,0	9966,0	54516,0
1,5:1	44550,0	9649,4	54199,4
1,7:1	44550,0	9629,8	54179,8
2:1	44550,0	9665,9	54215,9
3:1	44550,0	10030,3	54580,3
4:1	44550,0	10538,3	55088,3
5:1	44550,0	11081,9	55631,9
6:1	44550,0	11628,4	56178,4

4.3 Edifícios esbeltos

A terceira série estudada é um conjunto de paralelepípedos com uma altura constante e igual a 90 m (30 pavimentos). Estes edifícios são tratados por *esbeltos*.

Tabela 6 Edifícios esbeltos (h=90m) – parâmetros geométricos

φ	L (m)	C (m)	Área da cobertura (m ²)	Área das fachadas (m ²)	Área do envelope (m ²)
1:1	28,9	28,9	833,3	5196,2	6029,5
1,5:1	23,6	35,4	833,3	6364,0	7197,3
1,7:1	22,1	37,6	833,3	6775,0	7608,3
2:1	20,4	40,8	833,3	7348,5	8181,8
3:1	16,7	50,0	833,3	9000,0	9833,3
4:1	14,4	57,7	833,3	10392,3	11225,6
5:1	12,9	64,5	833,3	11618,9	12452,3
6:1	11,8	70,7	833,3	12727,9	13561,3

Tabela 7 Edifícios esbeltos – Energia solar incidente em 16/02

φ	Cobertura (kWh)	Fachadas (kWh)	Envelope (kWh)
1:1	4950,0	29901,3	34851,3
1,5:1	4950,0	28984,4	33934,4
1,7:1	4950,0	28854,9	33804,9
2:1	4950,0	28994,2	33944,2
3:1	4950,0	30093,0	35043,0
4:1	4950,0	31614,0	36564,0
5:1	4950,0	33245,6	38195,6
6:1	4950,0	34887,4	39837,4

4.4 Incrementos relativos aos edifícios ideais

Para os edifícios *baixos* e *esbeltos*, a tabela 8 apresenta, para cada relação φ , o incremento na energia solar incidente, relativo ao edifício *ideal* correspondente.

Tabela 8 Incrementos na energia solar incidente, relativos ao edifício ideal

φ	Edifícios baixos (h=10m)	Edifícios esbeltos (h=90m)
1:1	+75,7%	+12,3%
1,5:1	+78,5%	+11,8%
1,7:1	+78,6%	+11,5%
2:1	+78,3%	+11,6%
3:1	+75,2%	+12,5%
4:1	+71,1%	+13,6%
5:1	+67,1%	+14,7%
6:1	+63,4%	+15,8%

4.5 Análise da carga térmica de resfriamento

Foram estimados no programa *EnergyPlus*, os valores da carga térmica de resfriamento para os edifícios *ideais*, *baixos* e *esbeltos* analisados, considerando uma relação proporcional entre o comprimento e a largura da base igual a 1,7:1. Os edifícios analisados são paralelepípedos, cujas superfícies são construídas com uma camada de 0,10 m de concreto (cor média). Não foram considerados os ganhos internos de calor, tais como, ocupantes, iluminação, equipamentos, ventilação e infiltração. As simulações foram realizadas para o Rio de Janeiro, no dia 16 de fevereiro.

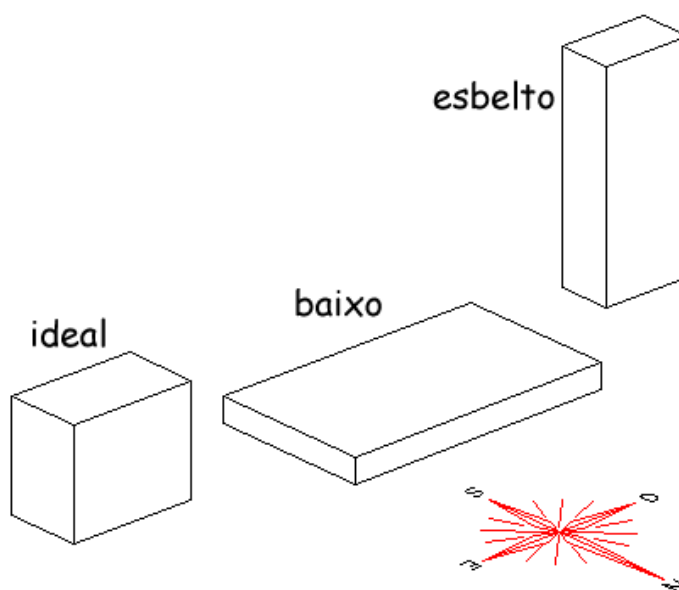
Figura 2 Proporções dos edifícios analisados — volume igual a 75000 m³

Tabela 9 Carga térmica de resfriamento – 16/02

Hora	Carga térmica (W) Edifício ideal	Carga térmica (W) Edifício baixo	Carga térmica (W) Edifício esbelto
01:00	55774.4	110989.5	61032.3
02:00	43042.9	87808.5	46461.1
03:00	32462.6	67876.2	34463.5
04:00	23816.7	51153.3	24670.9
05:00	16466.2	37393.9	16638.0
06:00	10299.5	23776.5	10386.5
07:00	7260.4	14478.7	7766.1
08:00	12048.4	17192.1	14097.8
09:00	26618.5	31558.6	33046.1
10:00	47531.9	59778.8	58731.2
11:00	71870.8	98725.0	87188.6
12:00	101773.6	151481.4	121081.8
13:00	135226.7	211984.4	158873.8
14:00	163032.7	265501.2	189735.8
15:00	181644.5	299883.6	211010.4
16:00	191841.8	318346.7	222993.4
17:00	203559.9	337809.9	236965.2
18:00	205310.3	341057.8	239259.5
19:00	186901.7	315714.6	216994.7
20:00	159293.3	277136.9	183421.7
21:00	132769.7	238252.2	151417.1
22:00	109196.3	201512.0	123358.3
23:00	88562.0	167705.5	99089.1
24:00	70902.2	137618.2	78513.6

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico da figura 3, elaborado com base nas tabelas 3, 5 e 7, mostra a evolução da energia solar incidente nos edifícios *ideais*, *baixos* e *esbeltos* analisados, em função da relação existente entre o comprimento e a largura da base retangular.

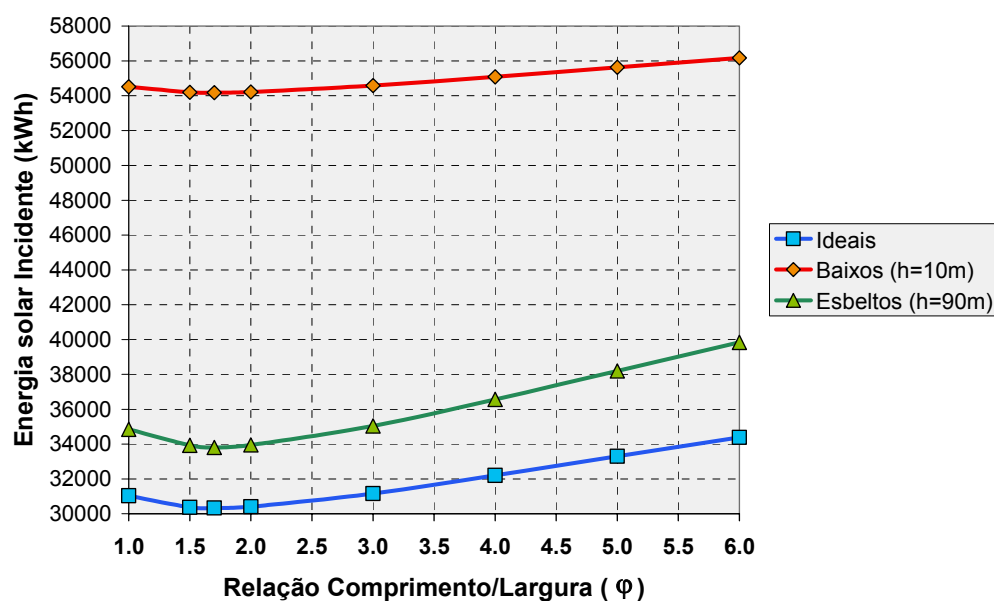


Figura 3 Energia solar incidente nos edifícios prismáticos em função da relação comprimento/largura da base

O gráfico da figura 4, elaborado a partir das tabelas 2 e 3, mostra o comportamento da energia solar incidente nos edifícios *ideais* analisados, em função da relação existente entre a altura do edifício e a largura da base retangular.

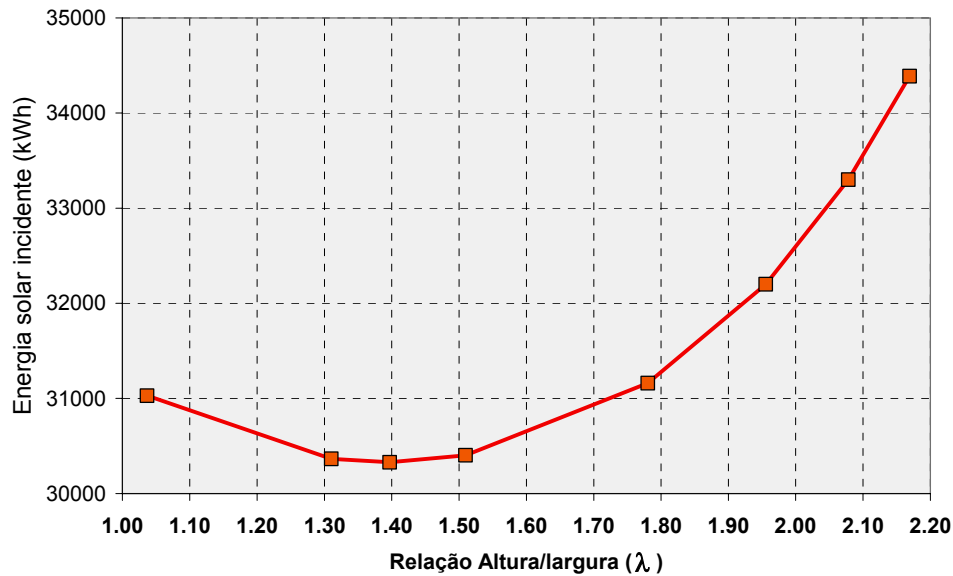


Figura 4 Evolução da energia solar incidente em função da relação altura/largura da base nos edifícios ideais

Os gráficos das figuras 3 e 4 mostram que um edifício com as maiores fachadas orientadas para o norte e o sul, com as relações $\varphi \cong 1,7:1$ e $\lambda_{MIN} \cong 1,4:1$, representa o edifício *ideal*, nas condições analisadas. Este edifício poderá representar um parâmetro de referência para os projetistas, mas é importante ressaltar que o valor da relação λ_{MIN} para o edifício *ideal* não é constante, varia em função da relação existente entre o comprimento e a largura da base, da orientação do edifício, da localidade, do período do ano e do albedo do entorno.

A figura 5 mostra o edifício ideal para as condições analisadas

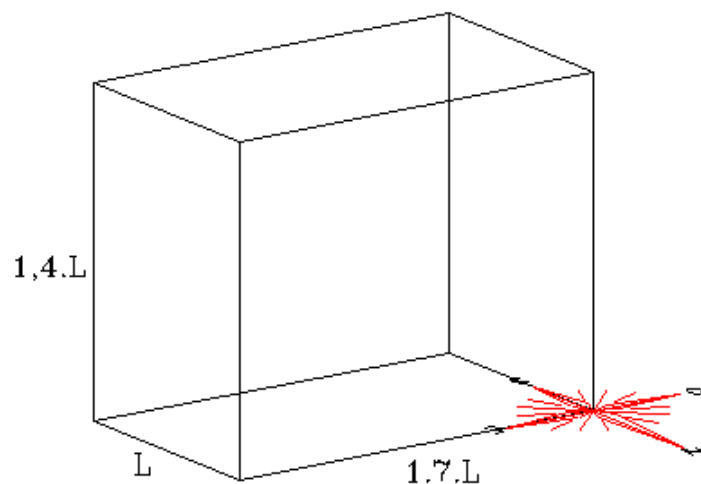


Figura 5 Representação do edifício prismático ideal

Observa-se que os resultados obtidos estão próximos aos apresentados em Olgyay (1998), para as regiões tropicais úmidas dos Estados Unidos (Flórida - Lat. $\cong 25^\circ$ N).

Nos casos em que é necessário utilizar orientações específicas para o edifício e valores previamente definidos para a relação φ , seja por questões relativas à estética, à ventilação, à acústica ou até mesmo para privilegiar uma determinada vista, os projetistas podem considerar um edifício *ideal* para estas condições e estimar suas dimensões através das equações 13, 14 e 15. Este edifício representa o edifício que recebe a menor quantidade de energia solar nestas condições.

O gráfico apresentado na figura 6 foi elaborado com valores obtidos na tabela 8 e mostra os incrementos percentuais nos valores da energia solar incidente nos edifícios *baixos* e *esbeltos* analisados. Os incrementos mostrados são relativos ao edifício *ideal* correspondente para cada valor da relação φ .

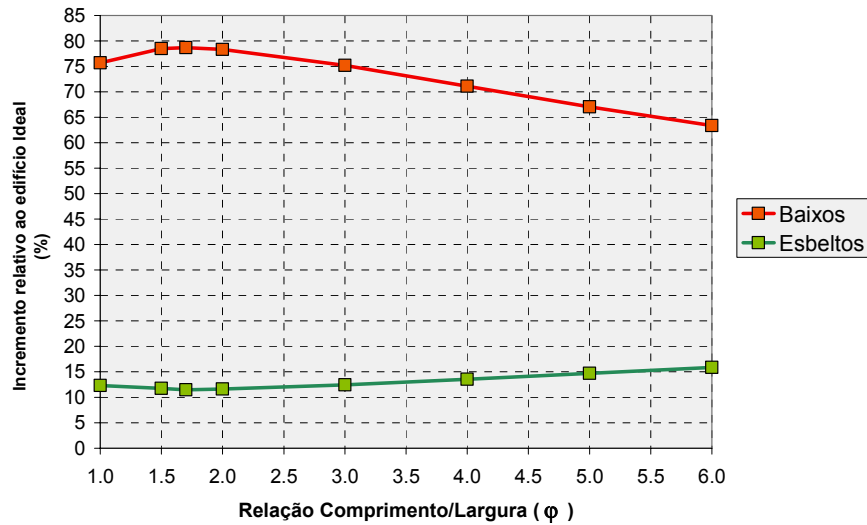


Figura 6 Incrementos na energia incidente nos edifícios baixos e esbeltos

Observa-se uma importante influência da relação λ no comportamento dos edifícios prismáticos de base retangular quando se trata da energia solar incidente. Os edifícios prismáticos *baixos*, onde as coberturas são maiores e os valores de λ são menores, recebem quantidades de energia solar significativamente maiores em seus envelopes, quando comparados com os edifícios *esbeltos*, onde as coberturas são menores e os valores de λ são maiores.

O gráfico da figura 7, elaborado a partir da tabela 9 mostra o comportamento diário da carga térmica de resfriamento, em 16 de fevereiro.

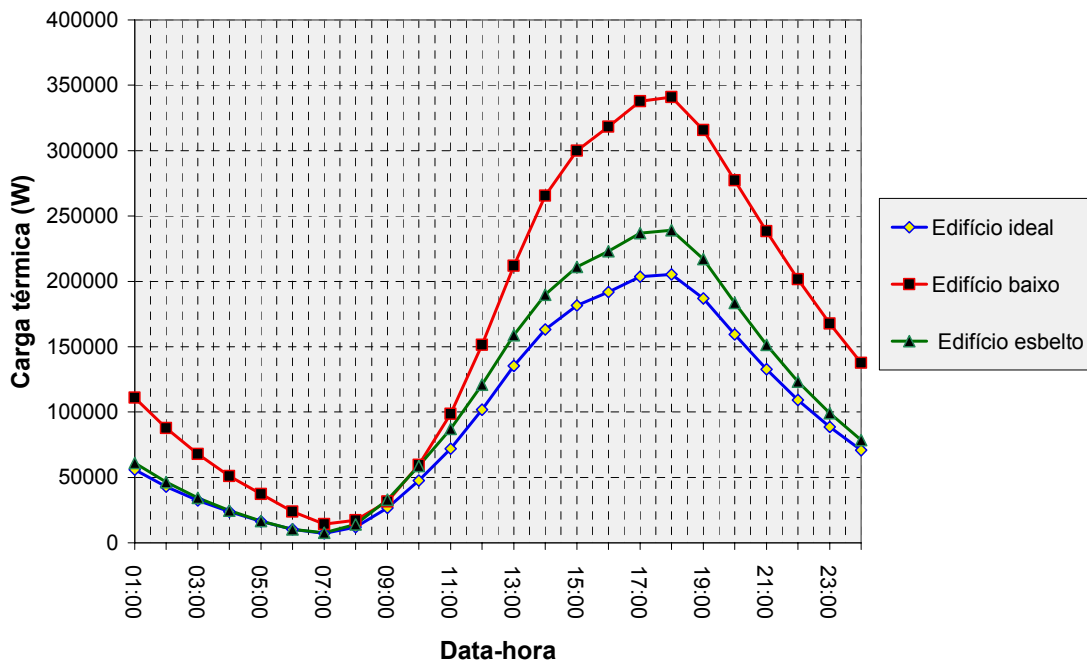


Figura 7 Carga térmica de resfriamento

Observa-se uma significativa influência das relações proporcionais na carga térmica. Os valores máximos para a carga térmica ocorrem às 18:00 h para os três edifícios analisados. Neste instante, a carga térmica no edifício *baixo* é cerca de 66% maior do que no edifício *ideal*, enquanto a carga térmica no edifício *esbelto* é cerca de 17% maior do que no edifício *ideal*, mas é importante ressaltar que, na medida em que os ganhos internos de calor no edifício aumentarem, estas diferenças tendem a diminuir.

6. CONCLUSÕES FINAIS

Após a execução de todas as fases do trabalho, foi possível elaborar as considerações apresentadas a seguir, para as condições analisadas:

- os resultados numéricos, apesar de obtidos para o verão do Rio de Janeiro, indicam que, mesmo os arquitetos e os engenheiros de outras regiões, em outros períodos do ano, deverão ser cuidadosos com as proporções da geometria do envelope, pois, quando o objetivo for minimizar a energia solar incidente nos edifícios prismáticos (paralelepípedos), elas poderão ser mais importantes do que orientação do edifício;
- a determinação do edifício *ideal* representa um parâmetro interessante de projeto, pois limita os estudos e a pesquisa para a redução da energia solar incidente no edifício, mas é importante não confundir o processo de minimizar a energia solar incidente no envelope de um edifício nos períodos quentes, com a melhoria das condições de conforto térmico e a redução no consumo de energia, pois estes estudos envolvem outras variáveis e fenômenos a serem considerados e analisados;
- a construção de edifício altos para minimizar a energia solar incidente no envelope, reduzindo a área da cobertura, não é uma regra geral;

Finalmente, sugere-se estudar as relações proporcionais para outras formas de edifícios e caracterizar os edifícios *ideais* para outras regiões e outros períodos do ano.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 01/05/2009.

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

CASTANHEIRA, R.G. Simulação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios em Ambiente CAD. 2007. 165f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CORBELLA, O. D. Dados Consolidados de Energia Solar Global Diária em Plano Horizontal para a Cidade de Rio de Janeiro. CADERNOS DE GEOCIÊNCIAS, Rio de Janeiro, v. 16, p. 131-168, 1995.

OLGYAY, V. *Arquitectura y Clima: Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 1998. 203 f.