

## CONSUMO DE ENERGIA NO CONDICIONAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES: UM MÉTODO DE AVALIAÇÃO

**Maurício Roriz**

Arquiteto. Docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos  
Rodovia Washington Luís, Km 235 - CEP 13.565-905 - São Carlos, SP - Brasil.  
Fax (016) 260.8259 - Fone (016) 260.8260 - e-mail: [m.roriz@zaz.com.br](mailto:m.roriz@zaz.com.br)

### RESUMO

O presente artigo apresenta um método simplificado de avaliação de projetos arquitetônicos, quanto ao conforto térmico e ao consumo necessário de eletricidade para refrigeração ou aquecimento dos ambientes. Para facilitar o entendimento do método, sua apresentação teórica é acompanhada de exemplo de aplicação, relativo à uma edificação submetida ao clima da cidade de Brasília.

### ABSTRACT

This paper presents a simplified evaluation method of architectural projects, particularly with regard to the thermal comfort and the necessary energy consumption for cooling or heating the spaces. In order to facilitate its understanding, the theoretical presentation of the method is accompanied by an application example.

### 1. INTRODUÇÃO

O setor energético brasileiro sofre a mais grave crise de sua história e corre o risco de entrar em colapso. A energia disponível é insuficiente para atender à demanda. Tal perspectiva impõe, à toda a sociedade, um esforço conjugado na busca de formas mais racionais de produção e de consumo de energia. Nesse sentido, a indústria da construção civil, historicamente desatenta em relação à questão energética, apresenta importante potencial de contribuição. Uma arquitetura adequada ao clima poderá proporcionar mais conforto ambiental e, ao mesmo tempo, consumir menos energia.

O procedimento para previsão do consumo de energia aqui adotado é baseado em algoritmo desenvolvido por Szokolay [1987] e não considera a inércia térmica das construções. Para sistemas construtivos com maior massa térmica e situados em clima de grande oscilação de temperatura, os valores calculados poderão ser maiores que os reais pois, nesse caso, os próprios materiais da edificação absorvem os picos da oscilação, reduzindo a necessidade de refrigeração ou calefação. Uma discussão sobre este método foi apresentada por Roriz [1993].

### 2. CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA LOCAL

No exemplo de aplicação são comparadas duas variações sobre um mesmo projeto básico de uma edificação simples, com 80 m<sup>2</sup> de área de piso (10 x 8 m) e 3 m de pé-direito. As condições climáticas consideradas são típicas de um dia de março na cidade de Brasília:

**Tabela 1 - Localização e Dados Climáticos**

Local: Brasília (DF)		Latitude: 15° 47' Sul		Dia considerado: 15 de março	
Temp. Média Mensal: 22,3 °C		Temp. Média Máximas: 27,1 °C		Temp. Média Mínimas: 17,5 °C	
Radiação Solar sobre as superfícies (W/m <sup>2</sup> ) - Irradiância Média sobre 24 horas					
Cobertura	Norte	Leste	Sul	Oeste	
328	85	134	23	134	

### 2.1. Variação horária da temperatura do ar

Grande parte das cidades brasileiras não tem disponíveis os valores horários da temperatura externa do ar (TE). O procedimento apresentado a seguir, permite estimar estes valores em função das médias mensais de temperaturas máximas e mínimas, mais facilmente obtidas. Para um dia médio, a temperatura do ar exterior correspondente ao momento h será:

$$TE_h = TE_{min} + Kt_h (TE_{max} - TE_{min}) \quad (01)$$

Sendo:  $TE_h$  = Temperatura do ar exterior no momento h (°C)

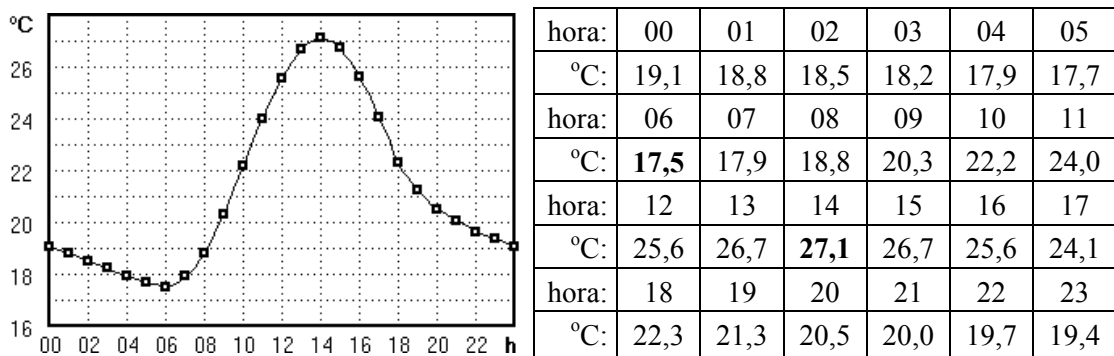
$TE_{max}$  e  $TE_{min}$  = Médias mensais das temperaturas máximas e mínimas (°C)

$Kt_h$  = Fator (entre 0 e 1) utilizado no cálculo da temperatura exterior no momento h:

**Tabela 2 - Valores horários do fator  $Kt$ , correspondentes a um dia climático médio**

hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Kt:	0,16	0,14	0,10	0,08	0,04	0,02	<b>0,00</b>	0,04	0,14	0,29	0,49	0,68
hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Kt:	0,84	0,95	<b>1,00</b>	0,96	0,84	0,68	0,50	0,39	0,31	0,26	0,22	0,20

Aplicando-se este cálculo em relação aos dados da tabela 1, obtém-se o seguinte resultado:

**Figura 1: Valores horários estimados da temperatura do ar exterior – Brasília, mês de março**

## 3. ANÁLISE DO EDIFÍCIO E DE SUA OCUPAÇÃO

### 3.1. Taxa de trocas térmicas por ventilação (qv)

Sejam: N = taxa de ventilação, em número de volumes de ar substituídos por hora (vol./h)

V = volume do ambiente (m<sup>3</sup>)

$CE_{ar}$  = 1000 J/kg.°C (calor específico do ar)

$DE_{ar}$  = 1,2 kg/m<sup>3</sup> (densidade do ar)

A taxa de trocas térmicas por ventilação será:

$$qv = CE_{ar} \cdot DE_{ar} \cdot V \cdot N / 3600 = 1200 \cdot V \cdot N / 3600 = 0,33 \cdot V \cdot N \text{ (W/}^\circ\text{C)} \quad (02)$$

Portanto, para o ambiente considerado, com volume de 240 m<sup>3</sup> e ventilação de 5 vol./hora:

$$qv = 0,33 \times 5 \times 240 = 396 \text{ (W/}^\circ\text{C)}$$

### 3.2. Taxa de produção interna de calor (Qi)

**Tabela 3 – Produção interna de calor (exemplo)**

Além dos efeitos do calor exterior, as edificações são submetidas também a fontes internas, devidas a equipamentos, pessoas, etc..

Neste exemplo (tabela 3), a taxa média ao longo de um dia seria:

$$Qi = 13980 \text{ Wh} / 24 \text{ h} = 582,5 \text{ W}$$

Fonte	Número	Calor (W)	Tempo (h)	Total (Wh)
Pessoas	1	140	18	2520
	3	115	12	4140
Lâmpadas	4	60	5	1200
Fogão	1	2200	2	4400
Geladeira	1	60	12	720
Diversos	-	120	10	1200
<b>Total dia:</b>				<b>13980</b>

### 3.3. Características da Edificação

As características construtivas da edificação são dadas nas tabelas 4 e 5, cujas variáveis são:

- Orientação da superfície, em graus, a contar do Norte Verdadeiro, no sentido horário.
- Área do componente construtivo (m<sup>2</sup>).

**Tabela 4 - Características das vedações externas do Projeto 1 (original)**

Superfícies	a orient.	b m <sup>2</sup>	c U	d m <sup>2</sup> .U	e FS	f α	g Rse	h Imed	i Qs (W)
Piso		80	1,1	88,0					
Parede Norte	360	26	1,6	41,6		0,6	0,06	85	127,3
Vidro Norte	360	4	5,4	21,6	0,76			85	258,4
Parede Leste	90	22	1,6	35,2		0,6	0,06	134	169,8
Vidro Leste	90	2	5,4	10,8	0,76			134	203,7
Parede Sul	180	28	1,6	44,8		0,6	0,06	23	37,1
Vidro Sul	180	2	5,4	10,8	0,76			23	35,0
Parede Oeste	270	22	1,6	35,2		0,6	0,06	134	169,8
Porta Oeste	270	2	2,6	5,2		0,9	0,06	134	37,6
Cobertura		80	2,4	192,0		0,8	0,04	328	2015,2
V = 240 m <sup>3</sup>			qc =	485,2				Qs =	3053,9
N = 5 vol./hora			qv =	396,0				Qi =	582,5
			q = qc+qv =	881,2	W/°C			Qsi = Qs+Qi =	3636,4

c) Transmitância térmica do componente construtivo (“U”, em W/m<sup>2</sup>.°C), definida como o inverso de sua resistência térmica e calculada pela seguinte expressão:

$$U = 1/ R_t = (R_{si} + \sum (R_i) + R_{se}) \quad (03)$$

Sendo: R<sub>si</sub> e R<sub>se</sub> = resistências superficiais, externa e interna (“efeito de película”)

R<sub>t</sub> = resistência térmica total do componente construtivo

∑ (R<sub>i</sub>) = soma das resistências térmicas das camadas que constituem o componente

d) Taxa de trocas térmicas por condução, produto da área pela transmitância, em W/°C.

e) Fator de ganho solar do vidro (depende do tipo de proteção contra a radiação solar).

f) Absortância à radiação solar (α), que depende da cor da face externa do componente.

g) Resistência Superficial Externa (Rse), devida ao “efeito de película”.

h) Irradiância média sobre 24 horas (ver tabela 1) - Depende da latitude, orientação e inclinação da superfície. Corresponde à radiação solar que atinge a edificação. No Brasil, poucas estações climatológicas medem esta variável. Seu valor pode ser estimado.

i) Taxa de ganho solar (W), calculada pelos seguintes produtos:

$$\text{Superfícies opacas (produto d.f.g.h)} \quad Q_s = \text{área} \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} \cdot \text{Imed} \quad (04)$$

$$\text{Superfícies transparentes (produto b.e.h)} \quad Q_s = \text{área} \cdot FS \cdot \text{Imed} \quad (05)$$

qc = taxa de trocas térmicas por condução: soma dos valores da coluna **d** (área x transmitância). Será positiva quando a temperatura externa for maior que a interna

qv = taxa de trocas térmicas pela ventilação, calculada pela equação 02:  $q_v = 0,33 \cdot V \cdot N$  (W/°C)

Qs = taxa de ganhos térmicos pela radiação solar.

Qi = taxa média do calor produzido internamente (ver 3.2: pessoas, lâmpadas, máquinas, etc.), sempre positiva (ganho). No verão, além de seu consumo direto, os equipamentos elétricos provocarão também um aumento no consumo da energia necessária à refrigeração do ambiente.

**Tabela 5 - Características das vedações externas do Projeto 2**

Superfícies	a orient.	b m <sup>2</sup>	c U	d m <sup>2</sup> .U	e FS	f $\alpha$	g Rse	h Imed	i Qs (W)
Piso		80	1,1	88,0					
Parede Norte	360	26	1,0	26,0		0,3	0,06	47	22,0
Vidro Norte	360	4	5,4	21,6	0,45			47	84,6
Parede Leste	90	22	1,0	22,0		0,3	0,06	129	51,1
Vidro Leste	90	2	5,4	10,8	0,45			129	116,1
Parede Sul	180	28	1,0	28,0		0,3	0,06	33	16,6
Vidro Sul	180	2	5,4	10,8	0,45			33	29,7
Parede Oeste	270	22	1,0	22,0		0,3	0,06	129	51,1
Porta Oeste	270	2	2,6	5,2		0,9	0,06	129	36,2
Cobertura		80	1,0	80,0		0,4	0,04	316	404,5
V = 240 m <sup>3</sup>			qc =	314,6				Qs =	811,9
N = 3 vol./hora			qv =	237,6				Qi =	582,5
			q = qc+qv =	552,2	W/°C			Qsi = Qs+Qi =	1394,4

A tabela 5 apresenta os resultados de algumas melhorias aplicadas sobre o projeto original:

- maior isolamento térmico em paredes e coberturas. (menor transmitância “U”)
- cor externa mais clara (menor absorvância “ $\alpha$ ”)
- sombreamento das superfícies envidraçadas (Fator de Calor Solar, FS = 0,45)
- menor taxa de ventilação (N = 3 vol./hora). Observe-se que, no caso estudado, a redução da taxa de ventilação diminui o consumo de energia dos aparelhos de refrigeração do ar. Entretanto, em regiões de clima quente e úmido, edificações sem refrigeração mecânica devem ser bem ventiladas para proporcionarem conforto

#### 4. TEMPERATURA DE NEUTRALIDADE TÉRMICA (TN)

A sensação de conforto térmico depende do efeito conjugado de inúmeros fatores:

##### Fatores Ambientais:

- Temperatura do ar, também denominada “Temperatura de Bulbo Seco” (TBS)
- Temperaturas superficiais e geometria do ambiente definem a “Temp. Radiante Média” (TRS)
- Umidade do ar: umidades mais altas dificultam as perdas térmicas devidas à evaporação do suor, provocando, assim, a sensação de mais calor. A relação entre a temperatura e a umidade do ar define a chamada “Temperatura de Bulbo Úmido” (TBU)
- Velocidade do ar: como a temperatura do ar é normalmente menor que a da pele, velocidades maiores retiram mais calor do corpo, por convecção, produzindo a sensação de mais frio.

### Fatores Individuais:

- Taxa metabólica, conseqüência da intensidade da atividade física desenvolvida. Um adulto em repouso produz em torno de 140 W de calor. Atividades mais intensas podem ultrapassar os 500 W. Para que a temperatura interna do corpo seja mantida constante (homeotermia), este calor deve ser absorvido pelo ambiente. Quando o fluxo dessa absorção é menor que o necessário, a pessoa sentirá mais calor. Se for maior, haverá a sensação de frio.
- Nível de isolamento térmico das roupas.
- Aclimação: adaptação fisiológica ao clima local.

“**Temperatura de Neutralidade Térmica**” ( $T_n$ ) é definida como a média entre as temperaturas do ar sob as quais a maioria das pessoas não sente calor ou frio. Pesquisas já demonstraram que, devido à aclimação e aos hábitos culturais (roupas, alimentação, etc.) esta preferência varia entre climas distintos e pode ser relacionada com a Temperatura Média Exterior (TMExt). A equação 06 é válida com a condição de que  $T_n$  esteja no intervalo entre 18,5 e 28,5 °C:

$$T_n = 17,6 + 0,31 \times TMExt \quad (06)$$

Dependendo do grau de precisão desejado, a média exterior pode ser tomada como anual (TMA) ou mensal (TMM). Em torno da Temperatura Neutra é definida uma faixa de tolerância:

- para  $TMExt = TMA$ , a tolerância é de 2,00 °C em torno do valor calculado de  $T_n$
- para  $TMExt = TMM$ , a tolerância é de 1,75 °C em torno do valor calculado de  $T_n$

Assim, no caso do exemplo, considerando a média mensal da temperatura do ar exterior:

$$T_n = 17,6 + (0,31 \times 22,3) = 24,5 \pm 1,75 \text{ °C}$$

O intervalo admissível da Temperatura Neutra fica, portanto, entre 22,8 e 26,3 °C. Estes valores se aplicam à indivíduos em atividade sedentária e trajando roupas leves. Para atividades mais intensas o valor de  $T_n$  deve ser corrigido, conforme os seguintes critérios:

Atividade	Taxa Metabólica	Correção
Trabalho leve	210 W	$T_n - 2,0 \text{ °C}$
Trabalho médio	300 W	$T_n - 4,5 \text{ °C}$
Trabalho pesado	400 W	$T_n - 7,0 \text{ °C}$

#### 4.1. Grau-Dia e Grau-Hora de Necessidade de Refrigeração ou Aquecimento

Grau-Dia (GD) de Refrigeração é o excesso acumulado da temperatura exterior acima de um valor estabelecido como “Temperatura de Base” ( $T_b$ ), ao longo de um período mensal ou anual. Trata-se, portanto, de um número indicativo do rigor climático e pode ser usado para verão ou inverno. No caso do inverno, quantificará o *déficit* acumulado de temperatura abaixo de  $T_b$ , indicando, portanto, a necessidade de aquecimento. Este número é calculado em relação às médias mensais (TMM) ou anuais (TMA) da temperatura exterior:

$$GD(\text{ano}) = \text{soma das diferenças diárias ao longo dos 365 dias do ano} = \sum (TMA - T_b) \quad (07)$$

$$GD(\text{mes}) = \text{soma das diferenças diárias ao longo dos dias do mês} = \sum (TMM - T_b) \quad (08)$$

De maneira análoga, Graus-Hora (GH) é um número que pode ser estimado como  $GH = GD \times 24$ , mas resultados mais precisos serão obtidos tomando os valores horários das diferenças entre a temperatura do ar exterior e a temperatura de base, ao longo de todo o período considerado (dia, mês ou ano):

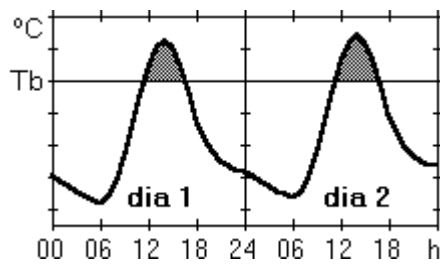
$$GH = \text{soma das diferenças horárias ao longo de todo o período considerado} = \sum (T_h - T_b) \quad (09)$$

sendo:  $h$  = hora (variando da primeira até a última do período)

$T_h$  = Temperatura do ar exterior no momento  $h$

Assim, supondo-se uma  $T_b$  de 20 °C, se, durante 3 horas, a temperatura do ar exterior permanecer em 21,5 °C, haverá um acúmulo de:  $GH = 3 \text{ h} \cdot (21,5 - 20) \text{ °C} = 4,5 \text{ °Ch}$

Pode-se estimar, graficamente, o número total de Graus-Hora de necessidade de refrigeração, em um dia típico de determinado mês. Conforme a figura 2, marca-se a Temperatura de Base ( $T_b$ ) sobre a curva de variação horária da temperatura externa. As abcissas são horas e as ordenadas temperaturas. Portanto, a soma das áreas acima da Temperatura de Base ( $T_b$ ) representa o total de Graus-Hora de necessidade de refrigeração no período considerado (2 dias, no caso da figura 2).



**Figura 2: Graus-Hora de Refrigeração**

Conhecendo-se o número mensal ou anual de Graus-Hora (GH) de um clima específico, é possível estimar a energia para refrigeração, ou aquecimento, necessária ao conforto térmico dos ambientes. Nesse caso, GH depende do clima, enquanto a Taxa de Trocas Térmicas (ver tabelas 4 e 5: “ $q$ ”, em  $W/°C$ ) é um parâmetro definido pelo sistema construtivo e pela arquitetura da edificação. A energia para refrigeração (ERf), necessária para retirar do ambiente todo o calor excedente, será o produto entre estes dois valores:

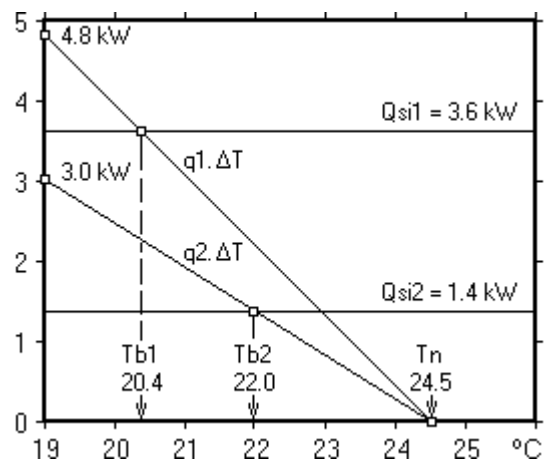
$$ERf = GH \cdot q \quad (°Ch \times W/°C = Wh) \quad (10)$$

Valores usuais (Szokolay, 1987) de  $T_b$  são 18 °C para inverno e 26 °C para verão. Como já foi mencionado, na situação de inverno se considera o *déficit* acumulado de temperatura:

$$GH = \sum (18 - T_h) \quad \text{soma das diferenças horárias ao longo de todo o período considerado}$$

## 5. ANÁLISE DO BALANÇO TÉRMICO (PERDAS E GANHOS) - MÉTODO GRÁFICO

Em tese, para qualquer ambiente interno, sempre haverá um nível de temperatura externa (TE) para o qual, sem energia adicional (eletricidade, gás, etc.), a temperatura interna (TI) corresponda à de neutralidade térmica ( $T_n$ ). Isto ocorre quando, mantida a temperatura interna desejada ( $TI = T_n$ ), a soma dos ganhos de calor (sol + ocupação) seja igual à soma das perdas (condução + ventilação) e, portanto, a carga necessária de refrigeração (ou de aquecimento) seja zero. A Temperatura de Base ( $T_b$ ) é definida como a temperatura externa que corresponda a esta situação. Assim, sempre que TE for maior  $T_b$  haverá necessidade de refrigeração.



**Figura 3: Gráfico do Balanço Térmico**

Esta Temperatura de Base pode ser determinada através de um gráfico (figura 3), no qual as abcissas representem as temperaturas do ar e as ordenadas correspondam a Fluxos Térmicos, em kW.

Os ganhos térmicos devidos ao sol e à ocupação ( $Q_{si} = Q_s + Q_i$ ) não dependem da temperatura externa, sendo representados por uma reta horizontal.

O produto entre a Taxa de Trocas Térmicas ( $q$ ) e a diferença entre as temperaturas interna e externa ( $\Delta T = TE - TI$ ) indica um fluxo térmico correspondente a estas variáveis e é representado por uma linha inclinada ( $q \cdot \Delta T$ ).

Se a soma das perdas de calor for igual à soma dos ganhos, não haverá consumo, ou seja:

$$\text{se } q \cdot \Delta T = Q_{si}, \text{ então: } ERf = 0 \quad \text{e, portanto: } \Delta T = Q_{si}/q \quad \text{e } T_b = T_n - \Delta T \quad (11)$$

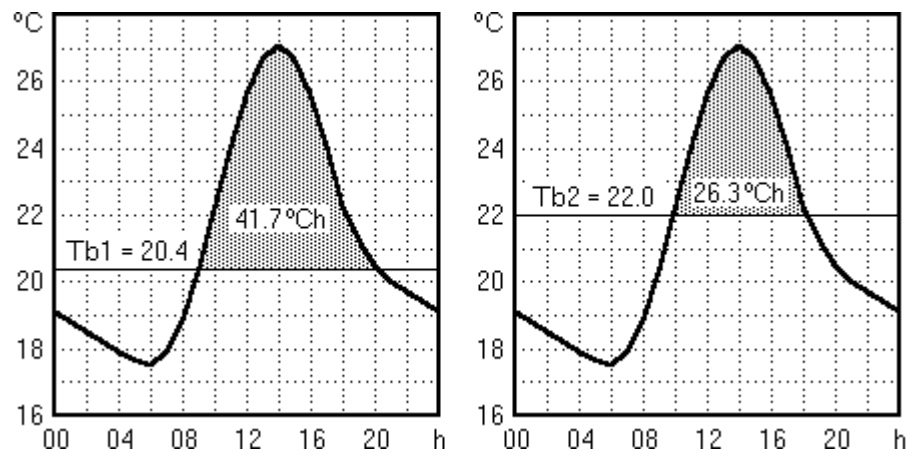
Para qualquer valor de TE maior que Tb, a carga necessária de refrigeração (ERf) será a distância (tomada verticalmente) entre as duas linhas:

$$ERf = (q \cdot \Delta T) - Q_{si} \quad (12)$$

A figura 3 representa as situações dos dois projetos do exemplo (tabelas 4 e 5). Em uma região de clima quente o interesse do projetista será reduzir os ganhos térmicos. Este resultado pode ser obtido através de duas maneiras complementares:

- Rebaixando a reta horizontal ( $Q_{si}$ ), ou seja, reduzindo os ganhos solares e a produção interna de calor. No caso do exemplo esta redução foi de 1,6 kW ( $22,0 - 20,4 = 1,6$ ).
- Diminuindo a inclinação da reta “ $q \cdot \Delta T$ ”. Para reduzir a taxa  $q$  será necessário melhor isolamento térmico (menor transmitância  $U$ ), menores áreas externas ou menor taxa de ventilação. O valor de  $\Delta T$  também pode ser reduzido aceitando-se maiores temperaturas internas, o que provocaria redução também no nível de conforto.

## 6. CONSUMO DE ENERGIA PARA O CONDICIONAMENTO DO AMBIENTE



**Figura 4: Graus-hora de calor acumulado em um dia (comparação entre os dois projetos)**

A figura 4 apresenta, para cada um dos projetos, os totais de calor acumulado ao longo das horas de um único dia e indica uma diferença de 15,4 °Ch/dia entre ambos ( $41,7 - 26,3$  °Ch).

Nesse caso, para retirar o calor excedente, os seguintes consumos mensais de energia seriam necessários:

a) Cálculo GH (mês):

Projeto 1:  $41,7$  °Ch/dia x 31 dias =  $1292,7$  °Ch/mês

Projeto 2:  $26,3$  °Ch/dia x 31 dias =  $815,3$  °Ch/mês

b) Cálculo do consumo de energia para refrigeração (equação 10:  $ERf = GH \cdot q$ )

ERf1:  $1292,7$  °Ch/mês x  $881,2$  W/°C =  $1139$  KWh

ERf2:  $815,3$  °Ch/mês x  $552,2$  W/°C =  $450$  KWh

Supondo-se uma tarifa de R\$ 0,20 por KWh, somente os equipamentos de ar condicionado provocariam os seguintes custos no mês considerado:

Projeto 1:  $1139$  KWh x  $0,25$  R\$/KWh = R\$ 227,80 (100%)

Projeto 2:	450 KWh x 0,25 R\$/KWh =	R\$ 90,00	(40%)
Diferença:	689 KWh x 0,25 R\$/KWh =	R\$ 137,80	(60%)

Tratando-se de um ambiente de apenas 80 m<sup>2</sup>, estes números, embora aproximados, indicam o grande potencial de economia (ou o risco de desperdício) que um projeto pode acarretar. Esta economia não se refere apenas à conta mensal do consumidor, representa também menores investimentos públicos em usinas e redes de transmissão, menos impactos ambientais, etc.

Cálculos mais rigorosos deverão levar em conta os efeitos da “inércia térmica” da construção, ou seja: paredes e coberturas com maiores inércias provocam duas importantes conseqüências no processo de trocas térmicas:

- a) Amortecimento: uma parcela do calor é utilizada para aquecer os elementos da construção. Assim, as temperaturas internas terão amplitudes (diferenças entre máximas e mínimas) menores que a externa.
- b) Retardamento: o fluxo de calor levará algum tempo para atravessar paredes e cobertura. As máximas e mínimas internas ocorrerão, portanto, com certo atraso em relação às externas.

Por estas razões, os picos de TE poderão ser absorvidos pela inércia, o que significará menores consumos de energia para o condicionamento ambiental. Entretanto, para edifícios "leves" ou para climas com pequenas amplitudes térmicas (com variações diárias menores que 10 °C), o modelo apresentado poderá ser um importante instrumento de análise de alternativas de projeto.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- RORIZ, M. (1993) "Conforto Térmico e Economia de Energia em Edificações: Um Método Simplificado de Avaliação". Revista Sinopses, número 19, pp. 21,29. Junho de 1993. FAU/USP. São Paulo, SP.
- SZOKOLAY, S. V. (1987) "Thermal Design of Buildings". RAIA Education Division. Camberra.