

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA EM UMA
EDIFICAÇÃO ATRAVÉS DO PROGRAMA NBSLD**

**Elaborado por:
Alexandre Chimenti Alves**

**Orientador
Arlindo Tribess**

**SÃO PAULO
1999**

as

new 184

Alexandre Chimenti Alves

**CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA EM UMA
EDIFICAÇÃO ATRAVÉS DO PROGRAMA NBSLD**

**Trabalho de formatura
apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de
Graduação em Engenharia.**

Orientador: Arlindo Tribess

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

São Paulo

1999

AGRADECIMENTOS

Ao Eng. Fulvio Vittorino do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), por ter me auxiliado na execução dos programas;

Ao Prof. Arlindo Tribess, pela paciência e orientação que me proporcionou.

Aos meus pais pelo grande apoio que
me deram para a execução deste trabalho

Sumário

1. Introdução	3
2. Carga Térmica	4
3. Programas de Simulação	5
4. O Método dos Fatores de Resposta Térmica	6
5. Etapas para o Cálculo de Cargas Térmicas	9
6. Condição Climática	12
7. Caracterização da Edificação e da sua Ocupação	14
8. Comparação de Resultados: NBSLD e BLAST	14
9. Exemplo de Aplicação utilizando NBSLD	23
10. Conclusões e Comentários Finais	34
Referências Bibliográficas	35
Anexo A	37
Anexo B	40

RESUMO

Um projeto adequado de uma edificação deve proporcionar condições internas favoráveis de um modo econômico, proporcionando um ambiente interno seguro e confortável, independente das condições externas. Em regiões de clima quente em que há a necessidade de utilização de sistema de ar condicionado, a avaliação correta da carga térmica constitui-se uma etapa importante para que se tenha um projeto adequado. Neste trabalho são realizados cálculos de carga térmica utilizando o programa computacional NBSLD. Resultados obtidos são comparados com os do programa BLAST.

ABSTRACT

An adequate building project must provide inside conditions suitable to an economic way, providing a safety and comfortable environment. In regions where the weather is hot and the utilization of an air-conditioned system is necessary, a correct evaluation of the cooling load consists of an important step to have an adequate project. In this work cooling load evaluations are done using the computer program NBSLD. Results are compared to the program BLAST one's.

1. Introdução

A escassez de energia elétrica é um problema que estará cada vez mais presente na realidade brasileira. Estudos mostram que, se medidas mais efetivas para conter a demanda de energia não forem tomadas, o país enfrentará uma grave crise no setor elétrico. Entre os maiores consumidores não-industriais de energia elétrica encontram-se os sistemas de ar condicionado central, utilizados em prédios comerciais, "shopping centers" etc., para produzir condições satisfatórias de conforto térmico aos seus ocupantes (Lomardo, 1989). E neste caso, a simples incorporação de equipamentos e componentes de alta eficiência a um sistema de condicionamento de ar não garante uma operação eficiente do mesmo (Jabardo, 1989).

Dentre as diversas iniciativas a serem tomadas no sentido de atuar na solução destes problemas encontra-se a determinação da carga térmica real em ambientes condicionados. Para esta avaliação alguns métodos simplificados já foram utilizados, porém cada vez mais o uso de técnicas mais sofisticadas está sendo difundido. Neste sentido, diversos algoritmos computacionais vêm sendo empregados, com modelos cada vez mais complexos, com intuito de permitir uma avaliação mais exata da carga térmica, em função do grande número de parâmetros envolvidos nesta avaliação.

Um projeto adequado de uma edificação deve proporcionar condições internas favoráveis de um modo econômico, proporcionando um ambiente interno seguro e confortável, independente das condições externas.

No Brasil, devido à ocorrência de verão rigoroso (com temperaturas de bulbo seco acima de 30 °C) em mais de 85% do território nacional, condições de conforto térmico o dia inteiro só são possíveis de serem atingidas com o uso de ar condicionado (Akutsu, 1998).

No processo de cálculo em um projeto de uma instalação de ar condicionado, a determinação das cargas térmicas de resfriamento representa o primeiro e mais importante passo, uma vez que os demais elementos desta atividade, como seleção de "chillers", dimensionamento de dutos, distribuição de ar, etc., deverão ser desenvolvidos visando o suprimento da carga térmica. Desta forma, a sua determinação se reveste de um caráter de extrema responsabilidade para o projetista ao longo de seu serviço. O dimensionamento incorreto da carga térmica pode acarretar consequências sérias como desconforto térmico

dos ocupantes, seleção inadequada dos equipamentos de refrigeração e aumento no consumo de energia.

Neste trabalho foram realizados cálculos de carga térmica utilizando o programa computacional NBSLD. Resultados foram comparados com aqueles obtidos através do programa BLAST.

2. Carga Térmica

A carga térmica é geralmente classificada em dois tipos:

- ◆ Carga térmica do ambiente que representa a quantidade de calor a ser trocada pelo ar insuflado pelo equipamento de condicionamento de ar, para manter a temperatura do ambiente nas condições desejadas. Ela pode ser subdividida em calor que entra no ambiente através dos elementos de vedação da envoltória e em calor gerado no interior do ambiente.
- ◆ Carga térmica do equipamento que é a quantidade de calor processada no equipamento de ar condicionado para se obter o ar insuflado na sala nas condições especificadas de temperatura e umidade. Ela pode ser subdividida em carga associada a vazamentos, carga devido à ventiladores e outros componentes e carga associada à entrada de ar de renovação.

As cargas térmicas do ambiente e do equipamento são ainda divididas em:

- ◆ Carga térmica sensível que é a quantidade de calor que deverá ser trocada com o ar para se atingir uma temperatura pré-definida;
- ◆ Carga térmica latente que corresponde ao calor de evaporação da água e é igual ao produto da vazão de água pela entalpia de evaporação.

3. Programas de Simulação

3.1 O Programa NBSLD

O programa NBSLD (National Bureau of Standards Load Determination) destina-se fundamentalmente ao cálculo das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento necessárias para manter as condições térmicas pré-fixadas de um ambiente ou dos valores das temperaturas superficiais e do ar interior do mesmo quando este não é condicionado artificialmente. Estas opções são discriminadas no programa através das variáveis ITHST e ITK, compreendendo quatro modalidades em função do par de valores fixado, conforme mostrado no anexo A.

Com relação aos dados climáticos o programa permite três opções, discriminadas pelo índice RUNTYP, conforme mostrado no anexo B.

Em linhas gerais, o modelo em que se baseia o programa é o dos fatores de resposta térmica (Kusuda, 1969) para o cálculo da quantidade de calor transmitido por condução através dos elementos opacos das edificações e do balanço de energia no ambiente para computar as trocas de calor por convecção e radiação nos ambientes.

Uma característica de ordem prática do programa é a maneira como ele está composto, com sub-rotinas que podem ser utilizadas isoladamente do sistema global, permitindo obter resultados intermediários de grande utilidade e que não se restringem apenas ao estudo do comportamento térmico de edificações. Na Figura 1, mostrada em anexo, é apresentado um diagrama indicando o inter-relacionamento entre as sub-rotinas. O detalhamento de cada sub-rotina pode ser verificado em Akutsu, 1983.

De modo geral, qualquer que seja a opção de processamento, o programa apresenta as seguintes características:

- I) O modelo em que se baseia o programa é essencialmente uni-compartimental, não sendo consideradas as trocas mútuas de calor entre diferentes ambientes numa edificação.
- II) O modelo de cálculo referente às trocas de calor no espaço ático restringe-se às coberturas planas.

- III) Não são considerados os efeitos da absorção da radiação solar na temperatura de vidros e janelas.
- IV) Com relação à pisos em contato direto com o solo, são considerados apenas os fluxos de calor na direção perpendicular ao piso, desprezando-se as componentes na direção dos seu plano, que podem ser significativas nas bordas.

3.2 O Programa BLAST

O programa BLAST (Building Load Analysis and System Thermodynamics), Pedersen (1993), constitui-se juntamente com o programa DOE-2, em um dos dois primeiros programas de domínio público nos Estados Unidos para simulação do uso de energia em sistemas de condicionamento térmico de edificações. Neste aspecto, assemelha-se ao programa DOE-2, porém com menos recursos, o que é compensado pelas melhores possibilidades de cálculos relativas à resposta térmica da edificação, em moldes semelhantes ao programa NBSLD.

O programa pode ser usado para avaliar o desempenho térmico de edificações de praticamente qualquer tamanho, mostrando-se interessante quando do projeto de novas instalações.

A exemplo do NBSLD, o BLAST também utiliza os fatores de resposta térmica e balanço de calor, razão pela qual constitui-se em programa adequado para verificação da utilização correta do programa NBSLD, através da comparação de resultados de simulações em situações análogas.

4. O Método dos Fatores de Resposta Térmica

O estudo da transferência de calor por condução em regime transitório sempre representou um problema de difícil solução analítica, a não ser para algumas geometrias simples e condições de contorno bem definidas.

Com a grande difusão dos computadores, ganharam destaque nesta área, alguns métodos numéricos que exigem a realização de grande número de cálculos e iterações. Entre estes métodos pode-se destacar o Método dos Elementos Finitos, o Método das

Diferença Finitas e o Método dos Fatores de Resposta Térmica, sendo que este último apresenta algumas vantagens em relação aos anteriores, principalmente quando aplicado aos elementos de uma edificação como por exemplo paredes e telhados.

As principais vantagens apresentadas pelo Método dos Fatores de Resposta Térmica são:

- boa precisão;
- um único cálculo para cada elemento estudado, resultando em um tempo de processamento relativamente baixo.

Quanto às desvantagens, pode-se citar o fato de que o Método dos Fatores de Resposta Térmica possibilita apenas a realização de cálculos com fluxos de calor unidimensionais.

Este método utiliza o princípio da superposição que admite que a resposta térmica global de um elemento, num dado instante, é a soma das respostas causadas por vários pulsos individuais de temperatura nos instantes anteriores, ou seja, a simulação de uma condição de contorno transitória de temperaturas é feita considerando-se uma sequência de pulsos consecutivos, e a resposta do elemento será obtida pela soma dos fluxos de calor, causados pelos pulsos, individualmente.

A caracterização dinâmica de qualquer sistema físico pode ser feita através da relação entre uma função de excitação e a resposta do sistema frente a ela. Dentro do método dos fatores de resposta térmica, as funções temporais que correspondem às funções de excitação do sistema, são representadas por séries de pulsos triangulares na forma de séries temporais.

Uma série temporal é uma série de números ou quantidades representando os valores de uma função a sucessivos intervalos de tempo de mesma dimensão. No método dos fatores de resposta térmica, cada termo numa série temporal corresponde à magnitude de um pulso triangular (altura de um triângulo isósceles, Kusuda (1969) demonstrou na época, em que não se tinha as velocidades de processamento que se tem hoje, que este formato para o pulso apresentava um tempo de processamento menor que se o mesmo fosse retangular) cuja base tem dimensão igual ao dobro do intervalo de tempo fixado e está centrada no instante em questão (veja Figura 2). A precisão da representação dependerá, portanto, da dimensão deste intervalo de tempo. Para a resolução de

problemas voltados à determinação da resposta térmica de edificações, costuma-se adotar o valor de Δ igual a 1 hora.

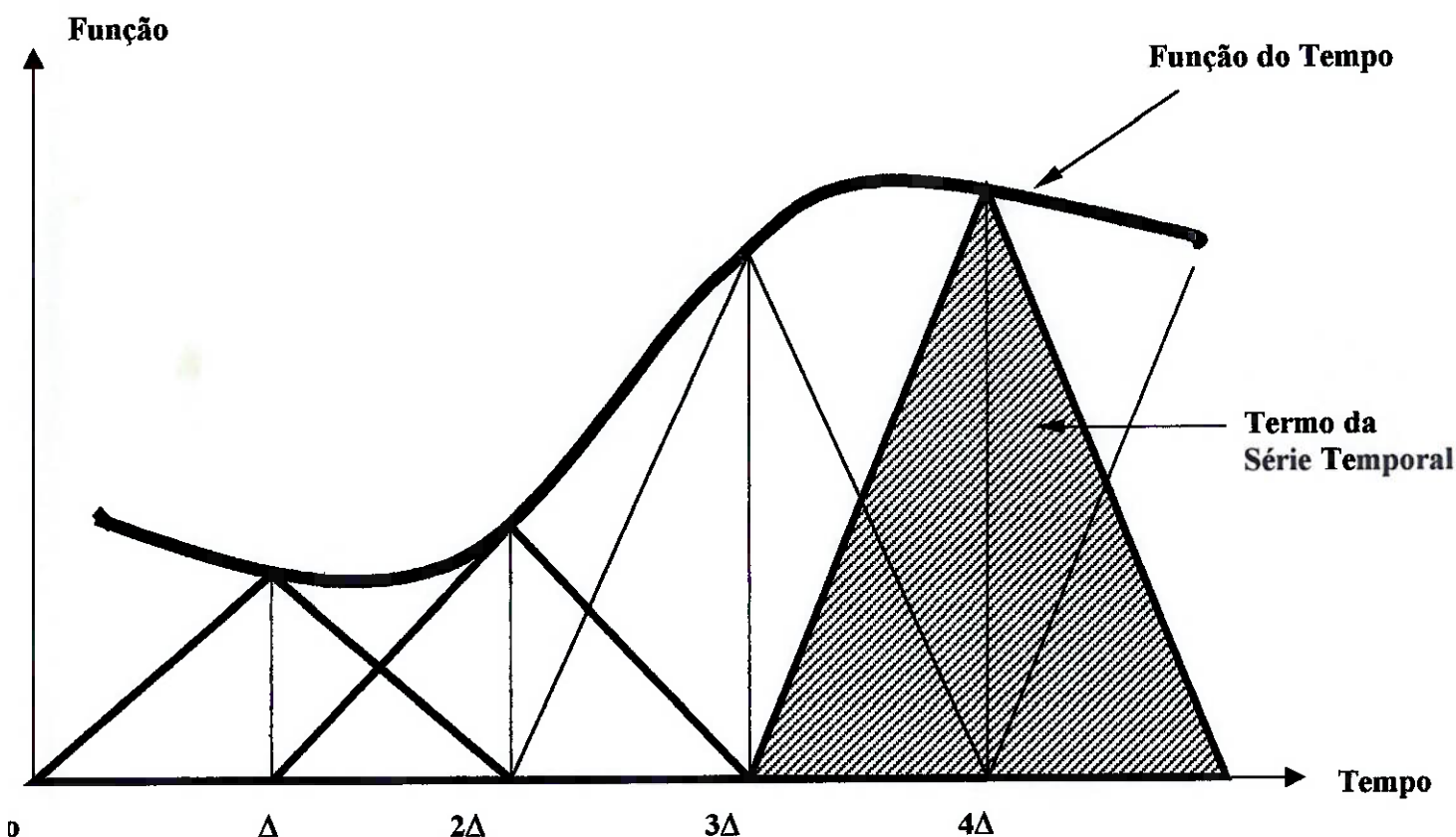


Figura 2- Representação de uma função contínua na forma de uma série temporal

A resposta do sistema a cada pulso é calculada isoladamente e a seguir composta para se obter a resposta total, em qualquer instante, de acordo com o princípio da superposição. Deve-se salientar contudo, que este princípio pode ser aplicado somente se o sistema for representado por equações lineares e invariantes. Linearidade implica que a magnitude da resposta está linearmente relacionada com a magnitude da excitação e invariabilidade significa que excitações iguais aplicadas em diferentes instantes produzem sempre respostas iguais.

Por outro lado, é importante lembrar que a resposta de um sistema linear, invariável, a um pulso triangular não unitário é diretamente proporcional à resposta do sistema a um

pulso triangular unitário de mesma base. Esta propriedade é útil na medida em que, uma vez determinada a resposta de um sistema a um pulso unitário, é imediata a obtenção da resposta do sistema à série de pulsos, não necessariamente unitários, que representam a função de excitação do sistema. A série temporal que representa a função resposta do sistema a um pulso unitário denomina-se fatores de resposta do sistema.

O programa NBSLD utiliza o método do balanço da energia térmica e permite calcular, hora a hora, a temperatura superficial, a temperatura e umidade relativa do ar e a carga térmica de condicionamento de ambientes, considerando condições dinâmicas da edificação ao clima.

5. Etapas para o Cálculo de Cargas Térmicas

Quando a edificação é condicionada artificialmente, a demanda de cargas térmicas para o condicionamento de ar dos ambientes é o indicador do desempenho térmico da edificação. Quanto menores estas cargas térmicas, melhor o desempenho térmico da edificação.

Os níveis de exigência são definidos quando se estabelecem as exigências humanas de conforto térmico e as condições típicas de exposição ao clima.

Fazem parte desse processo de avaliação, isto é, do cálculo das cargas térmicas, as seguintes etapas:

- a) caracterização das exigências humanas de conforto térmico;
- b) caracterização das condições típicas de exposição ao clima;
- c) caracterização da edificação e da sua ocupação;
- d) determinação do comportamento térmico da edificação;

5.1 Conforto Térmico

As exigências humanas de conforto térmico são caracterizadas por valores ou intervalos de valores inter-relacionados, das seguintes variáveis: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar; temperatura radiante média do ambiente. Tais valores são fixados em função das características do ocupante, dadas pela sua taxa metabólica e pelo

índice de resistência térmica da sua vestimenta e devem representar condições satisfatórias de conforto térmico.

A Norma brasileira NBR 6401 (ABNT, 1978) apresenta faixas de valores recomendados de temperatura e de umidade relativa do ar para ambientes condicionados. As Normas ANSI/ASHRAE 55-92 (ASHRAE,1995) e ISO 7730 (ISO,1984) apresentam os critérios para avaliação das condições de conforto térmico de ambientes com condições térmicas moderadas, levando em conta todos os parâmetros de conforto citados. Estas duas últimas normas estabelecem que as condições ambientais internas de um recinto devem ser tais que pelo menos 80% dos seus ocupantes expressem satisfação em relação ao ambiente térmico. A título ilustrativo, são apresentados na Tabela 2 os intervalos de valores para a temperatura do ar interior, em função dos valores apresentados pelos demais parâmetros de conforto, para algumas situações típicas no verão, tendo em vista as condições climáticas do Brasil (ver Tabela 3).

Para as condições de verão, os valores limites de temperatura do ar interior correspondentes à zona de conforto variam significativamente em função da umidade relativa e da velocidade do ar. Como no Brasil a umidade relativa do ar pode variar bastante de uma região para outra, e o aumento da velocidade do ar é um recurso importante para a melhoria das condições de conforto no verão, seja por meio da ventilação natural dos ambientes, seja por ventilação forçada, os limites de conforto para a temperatura do ar são apresentados em uma tabela que contempla algumas situações típicas em escritórios, variando-se a umidade relativa de 20% a 80% (ver Tabela 1)

Os valores fixados para os demais parâmetros de conforto são:

- $RT_{\text{roupa}} = 0,35 \text{ CLO}$: roupas leves de verão, típicas de habitações.
- $RT_{\text{roupa}} = 0,50 \text{ CLO}$: roupas leves de verão, típicas de escritório.
- $V_{\text{ar}} = 0,05 \text{ m/s}$: baixa circulação de ar.
- $V_{\text{ar}} = 0,25 \text{ m/s}$: circulação de ar moderada em escritórios (velocidade máxima permitida pela Norma NBR 6401)
- $V_{\text{ar}} = 0,8 \text{ m/s}$: circulação de ar moderada em habitações e máxima recomendada para escritórios (velocidade limite para a não ocorrência de levantamento de papéis – Norma

ASHRAE 55-92). Quando há incidência de ventos da ordem de 3 m/s esta condição pode ser obtida naturalmente.

- $V_{ar} = 1,5 \text{ m/s}$: boa circulação de ar, possível de ser garantida com ventiladores/circuladores de ar
- Taxa Metabólica = 70 W/m^2 : pessoa exercendo atividade moderada

Tabela 1- Limite máximo das temperaturas internas(em $^{\circ}\text{C}$) para atendimento das exigências das Normas ISO 7730 e ANSI/ASHRAE 55-92, em condições de verão.(AKUTSU, 1998)

Condição	Habitação - $RT_{\text{roupa}} = 0,35 \text{ CLO}$			Escritório - $RT_{\text{roupa}} = 0,50 \text{ CLO}$		
UR/ V_{ar}	0,05 m/s	0,8 m/s	1,5 m/s	0,05 m/s	0,25 m/s	0,8 m/s
20 %	28,7	30,4	30,8	28,2	29,0	29,8
40 %	28,2	30,0	30,4	27,6	28,5	29,3
60 %	27,7	29,6	30,0	27,0	28,0	28,8
80 %	27,3	29,2	29,7	26,5	27,5	28,4

Legenda: RT_{roupa} = Resistência Térmica da roupa dos ocupantes;
 UR = Umidade Relativa do ar ambiente (%);
 V_{ar} = Velocidade do ar no interior do recinto (m/s)

5.2 Caracterização das condições de exposição ao clima

As condições de exposição da edificação ao clima são caracterizadas pelos valores horários da temperatura, da umidade relativa do ar e da radiação solar global, bem como pela velocidade média do vento predominante, nos dias típicos de projeto para o período de verão e para o período de inverno. Estes conjuntos de valores são expressos em função de suas frequências de ocorrência que representam níveis de exigência na avaliação.

O método utilizado para a definição dos dias típicos de projeto, apresentado a seguir, corresponde a uma implementação do trabalho realizado por AKUTSU e SATO(1987).

A caracterização das condições climáticas passa pela seguintes etapa:

1. **Escolha do posto meteorológico** – Idealmente, a caracterização climática deve ser feita tomando-se os dados meteorológicos do local considerado. Caso contrário, o posto escolhido deve apresentar semelhanças quanto a topografia, cobertura vegetal dos arredores e presença de “ilhas de calor”.
2. **Definição dos períodos de análise** – Como regra geral, recomenda-se um período entre 10 e 15 anos de registro de dados. Caso contrário, períodos menores podem ser adotados desde que seja possível identificar se cada ano do período adotado é atípico ou não.
3. **Determinação dos dias típicos de verão e de inverno** –
 - Verão – determinar os valores da máxima Temperatura de Bulbo Seco ($TBS_{m\acute{a}x}$) para os níveis de frequência acumulada estabelecidos. Ou seja, se a frequência $n=10\%$, então apenas 10% dos valores de temperatura no período podem ser iguais ou maiores que o valor $TBS_{m\acute{a}x}$ adotado.
 - Inverno – determinar os valores da mínima Temperatura de Bulbo Seco ($TBS_{m\acute{i}n}$) para os níveis de frequência acumulada estabelecidos. Ou seja, se a frequência $n=10\%$, então apenas 10% dos valores de temperatura no período podem ser iguais ou menores que o valor $TBS_{m\acute{i}n}$ adotado.

6. Condição Climática

A localidade adotada nesse estudo corresponde à cidade de São Paulo, cujas condições climáticas no verão e no inverno foram caracterizadas por dados horários da temperatura de bulbo seco do ar, da umidade relativa do ar e da radiação solar global

incidente em superfície horizontal correspondentes a um “dia típico de verão” e um dia “típico de inverno”. Esses dias típicos representam dias com frequência de 10%, ou seja, para o verão, 10% dos dias do período de verão apresentam temperatura máxima diária maior que a do “dia típico de verão”, e para o inverno, 10% dos dias do período de inverno apresentam temperatura mínima diária menor que a do “dia típico de inverno”. Estes valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados climáticos referentes ao dia típico de verão e de inverno para São Paulo.

HORA	VERÃO			INVERNO		
	TBS(°C)	UR(%)	RS(Wh/m ²)	TBS(°C)	UR(%)	RS(Wh/m ²)
1	21,7	80	0	11,4	82	0
2	21,2	83	0	11,0	85	0
3	20,6	86	0	10,5	87	0
4	20,4	87	0	10,3	88	0
5	19,5	92	0	9,6	92	0
6	19,0	95	21	9,2	95	0
7	19,9	90	181	9,9	91	30
8	22,0	79	365	11,6	81	245
9	24,3	68	529	13,4	72	461
10	26,3	60	656	15,0	65	630
11	28,2	54	736	16,5	59	738
12	29,5	50	764	17,5	56	775
13	30,0	49	736	17,9	54	738
14	31,2	46	656	18,8	51	630
15	31,4	45	529	19,0	51	461
16	30,9	47	365	18,6	52	245
17	30,4	48	181	18,2	53	30
18	29,5	50	21	17,5	56	0
19	25,7	62	0	14,5	67	0
20	24,5	67	0	13,5	72	0
21	23,5	72	0	12,7	75	0
22	22,3	77	0	11,8	80	0
23	22,7	75	0	12,1	78	0
24	22,1	78	0	11,7	81	0

Legenda: TBS - Temperatura de Bulbo Seco;
 UR - Umidade Relativa;
 RS - Radiação Solar Global incidente em plano horizontal.

7. Caracterização da Edificação e da sua Ocupação

Identificam-se os ambientes e efetua-se o levantamento de informações relativas à:

- Condições de ocupação: período de ocupação; número de ocupantes; taxas de liberação de energia térmica e de vapor de água de equipamentos e processos presentes no recinto;
- Materiais, componentes e elementos: capacidade térmica específica, massa específica e condutividade térmica dos materiais; transmitância, absorptância e refletância à radiação solar, emissividade, resistência térmica dos espaços de ar, forma, dimensões e orientação dos elementos e componentes. Estes dados, necessários para a determinação da resposta térmica de edificações, são em geral apresentados em manuais e publicações de instituições de pesquisa que fazem ensaios para a sua medição.

8. Comparação de Resultados: NBSLD e BLAST

8.1 Comparação com programa BLAST

8.1.1 Descrição da edificação e sua ocupação

- Geometria: A edificação consiste num escritório localizado de um andar padrão de um edifício. Ela possui 4 janelas e não foram consideradas na simulação as portas (para os programa BLAST isso não faz diferença). O escritório possui pé-direito de 2,8 m e as outras dimensões bem como as áreas envidraçadas estão mostrados na Figura 3.

- **Materiais:** Cada parede, bem como o teto e o piso, é composta por apenas uma camada de concreto maciço. A tabela 3 ilustra as propriedades físicas das paredes e do vidro.
- **Ocupação:** No escritório trabalham 100 pessoas, das 8 às 18 h. A potência elétrica total máxima vale 20 W/m^2 (lâmpadas fluorescentes de teto) e a potência total máxima liberada por equipamentos vale 10 W/m^2 (100 microcomputadores).

Tabela 3 – Propriedades dos materiais

Superfície:	Material	Espessura [mm]	Calor Específico [J/kg.°C]	Condutividade Térmica [W/(m ² .°C)]	Densidade [kg/m ³]	ABS	Trans
Parede/piso/teto	Concreto maciço	140	750	1,50	2250	0,90	-
Janela	Vidro	5	790	0,81	2500	-	0,85

8.1.2 Descrição do ambiente externo

- ♦ Localidade: cidade de São Paulo (latitude: 47,25 e longitude -23,5);
- ♦ Dia: Típico de verão (21 de Fevereiro);
- ♦ Temperatura máxima externa: $31,4^\circ \text{C}$;
- ♦ Amplitude máxima diária da temperatura: 11°C ;
- ♦ Umidade relativa: 65% (Média);
- ♦ Total diário de radiação solar global: 5180 W/m^2 ;
- ♦ Temperatura média do solo no verão: 25°C .

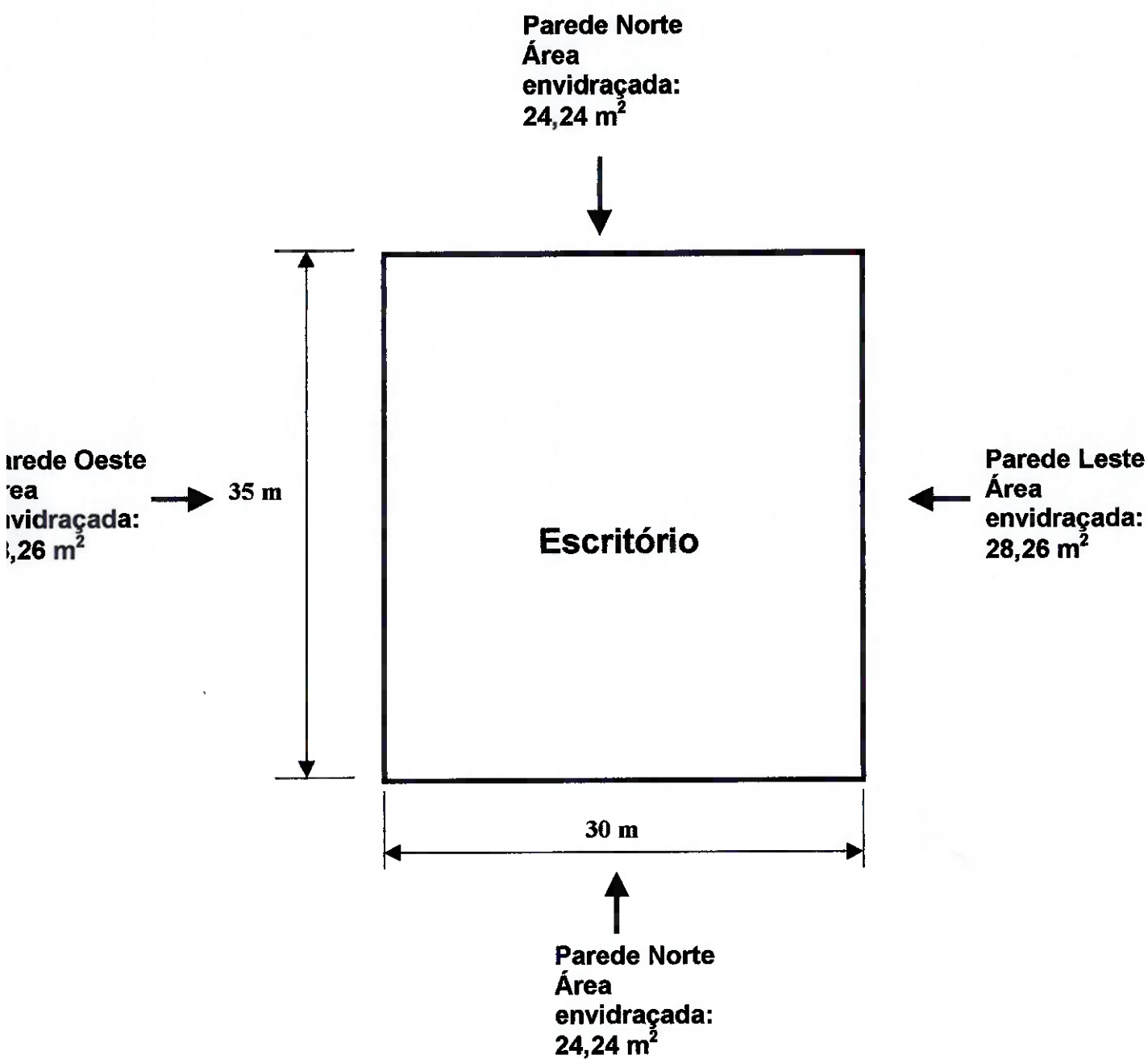


Figura 3 – Dimensões principais do escritório

8.1.3 Parâmetros internos de controle:

- ♦ Temperatura do ar interior: 22°C , 24°C , 26°C e 28°C .
- ♦ Temperatura mínima: 18°C ;

- ◆ Umidade relativa do ar interno: 65% (Constante);
- ◆ Velocidade máxima do ar interno: 0,14 m/s;

8.1.4 Resultados

8.1.4.1 Temperatura Interna de 20 °C

O gráfico dos valores horários da carga térmica utilizando-se o programa BLAST e o programa NBSLD é mostrado a seguir:

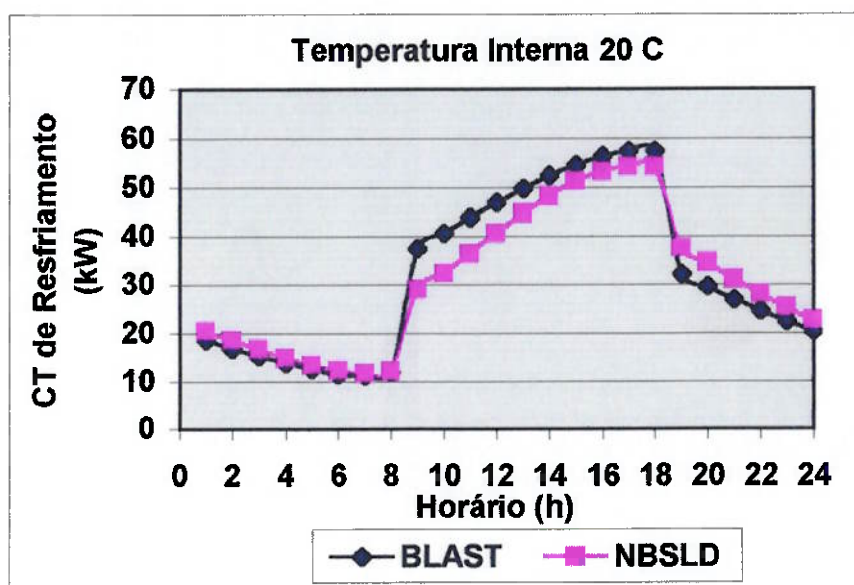


Figura 4 – Carga Térmica para temperatura interna 20 °C

Análise dos Resultados

Da Figura 4, os perfis de carga térmica são qualitativamente iguais, observando-se apenas que entre 8 e 17 h os valores horários de carga térmica encontrados com o programa BLAST são ligeiramente maiores que aqueles encontrados com o programa NBSLD. A descontinuidade nas duas curvas que ocorre às 8 e às 17 h é devido

respectivamente ao início e ao final do período de trabalho no escritório, onde a carga térmica cresce rapidamente devido à presença de pessoas e ao funcionamento dos computadores e iluminação artificial.

8.1.4.2 Temperatura Interna de 22 °C

O gráfico dos valores horários da carga térmica utilizando-se o programa BLAST e o programa NBSLD é mostrado a seguir:

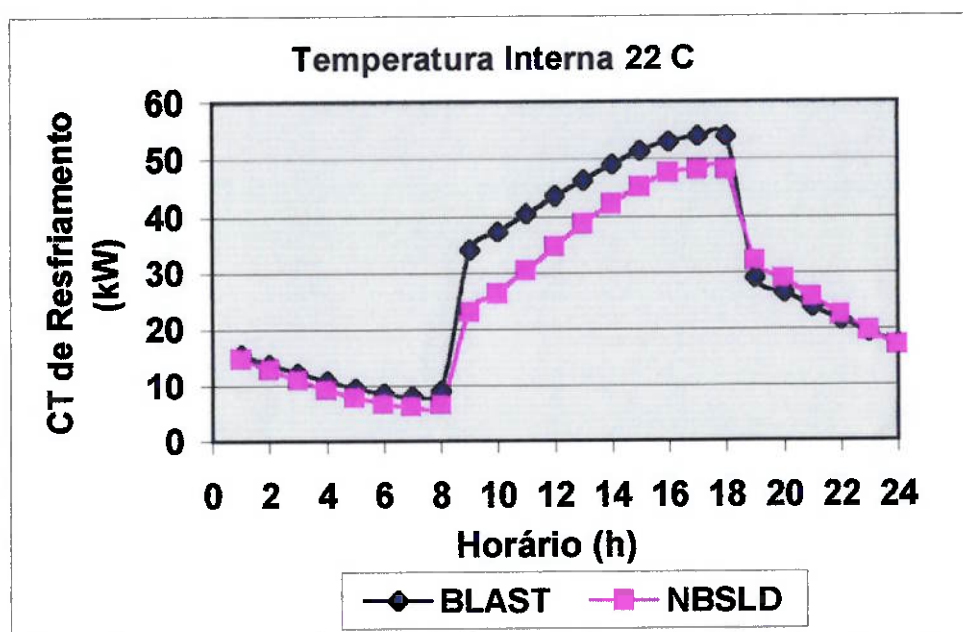


Figura 5 – Carga Térmica para temperatura interna 22 °C

Análise dos Resultados

Conforme pode-se observar no gráfico da Figura 5, a curva de carga térmica do programa NBSLD fica mais afastada da curva do programa BLAST, evidenciando um aumento da diferença de valores de carga térmica encontrados por cada um dos programas.

8.1.4.3 Temperatura Interna de 24 °C

O gráfico dos valores horários da carga térmica utilizando-se o programa BLAST e o programa NBSLD é mostrado a seguir:

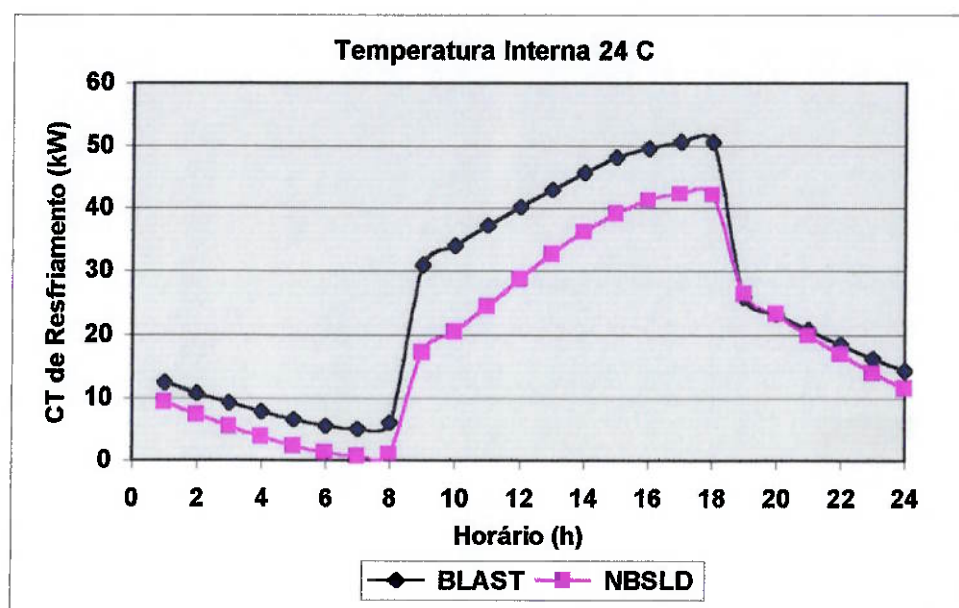


Figura 6 – Carga Térmica para temperatura interna 24 °C

Análise dos Resultados

Pode-se notar pela Figura 6 que houve novo aumento na diferença de resultados entre os programas. A diferença de resultados, que antes era significativa apenas durante o período de trabalho (das 8 às 17 h), agora aparece nos demais intervalos.

8.1.4.4 Temperatura Interna de 26 °C

O gráfico dos valores horários da carga térmica utilizando-se o programa BLAST e o programa NBSLD é mostrado a seguir:

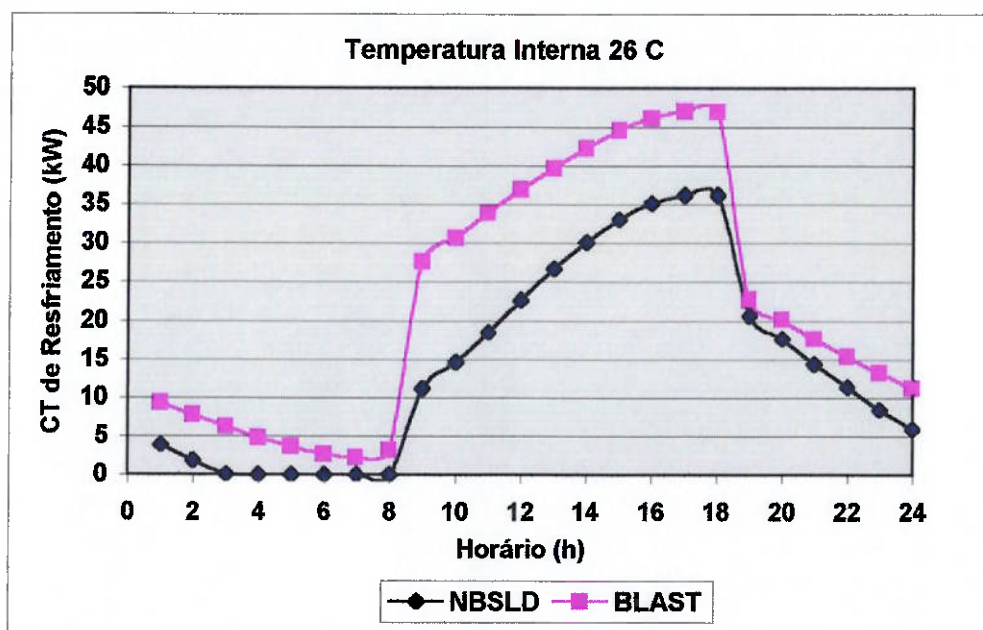


Figura 7 – Carga Térmica para temperatura interna 26 °C

Análise dos Resultados

O resultado, como ilustrado pela Figura 7, é igual ao caso anterior, apenas havendo um novo aumento nas diferenças de resultados entre os programas.

8.1.5 Cargas térmicas máximas e diferença de resultados

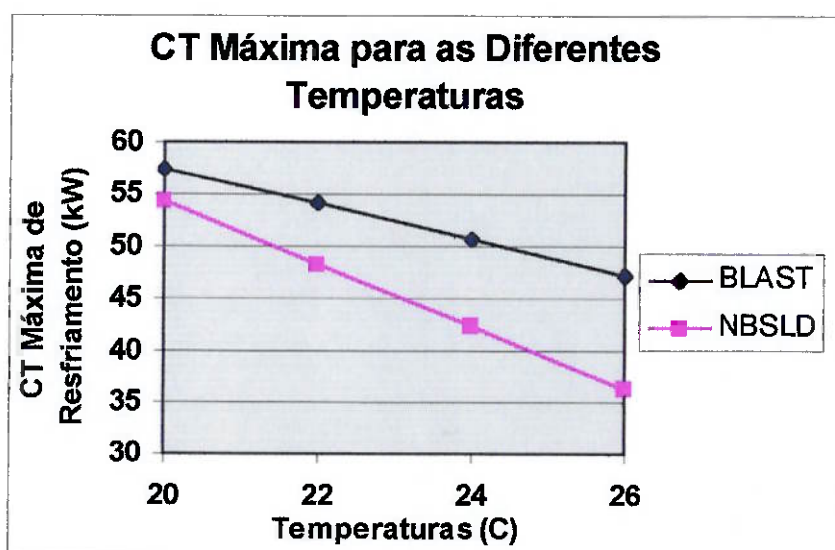


Figura 8 – Cargas Térmicas Máximas

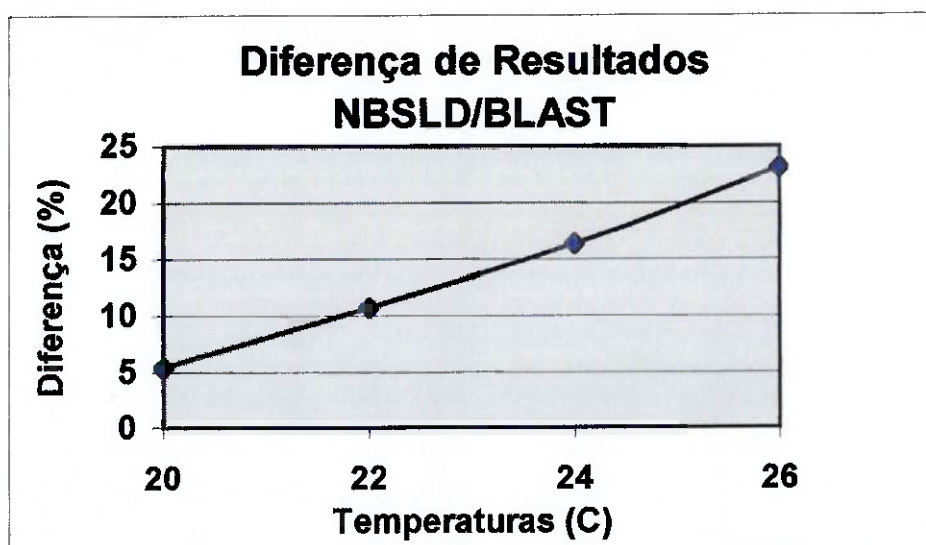


Figura 9 – Diferença BLAST/NBSLD

Análise dos Resultados

Pode-se notar através das Figuras 8 e 9 que a diferença entre as cargas térmicas máximas calculadas pelos programas possui um comportamento linear, ou seja, quanto maior a temperatura de condicionamento, maior é a diferença; que é um resultado esperado. A menor diferença ocorre para a temperatura de 20 °C (5,4%) e a maior para a temperatura de 26 °C (23,1%).

Embora os dois programas utilizem modos equivalentes de computar as trocas de calor, isto é, de calcular a carga térmica, existem algumas características de cada programa que podem levar à obtenção das diferenças de resultados observados. Uma das diferenças entre os dois programas está na avaliação da troca de calor por convecção. Os dois programas utilizam coeficientes de troca de calor por convecção constantes, porém com valores numéricos diferentes. Coeficientes maiores, como os utilizados no programa BLAST levam a resultados de carga térmica também maiores.

Os resultados obtidos na comparação reforçam a necessidade de se conhecer a fundo os detalhes de cada programa para que não sejam cometidos erros graves de avaliação.

Na Figura 10 observa-se a grande diferença na curva de carga térmica para a temperatura de 24 °C, quando é considerado como intervalo de condicionamento para o programa BLAST apenas de 8 às 17 h. Já na Figura 11 observa-se que para outros valores de temperatura interna (20,22 e 26 °C), a diferença de valores da carga térmica máxima calculada, para a mesma condição anterior, é grande.

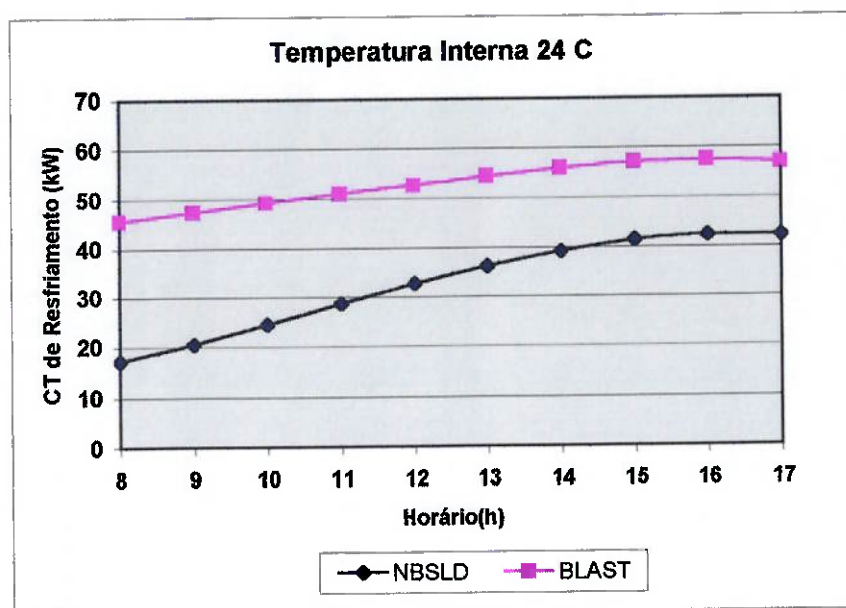


Figura 10 – Diferença BLAST/NBSLD para condições de condicionamento diferentes

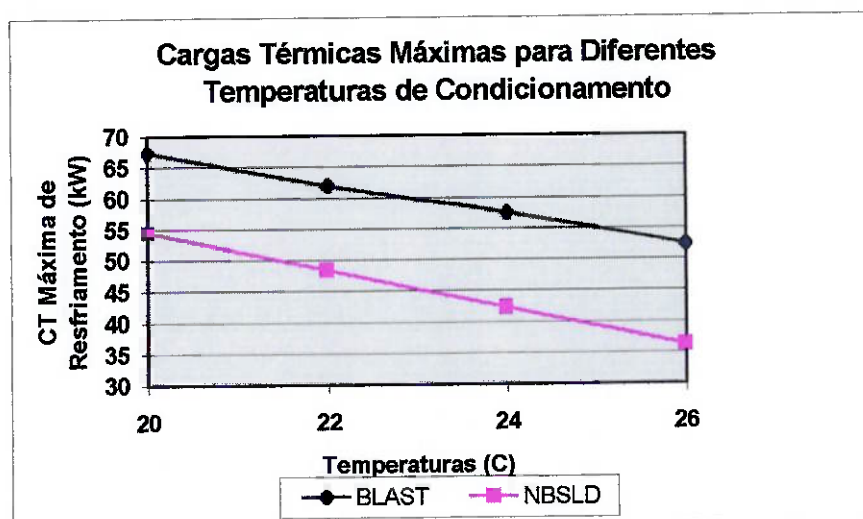


Figura 11 – Diferença BLAST/NBSLD

9. Exemplo de Aplicação utilizando NBSLD

9.1 Descrição da edificação e sua ocupação

- Geometria: Neste exemplo temos uma edificação bem simples, composta basicamente por quatro paredes, teto e piso. Esta edificação representa um sobrado e o ambiente analisado é o de um quarto. O quarto está no andar superior, logo o piso não está em contato com o solo. As paredes norte e leste são internas e as paredes sul e oeste são externas. A Figura 12 ilustra melhor a edificação. Na parede sul existe uma janela e na parede norte existe uma porta.

Os elementos desta edificação obedeceram a seguinte ordem de entrada (ordem essa dita pelo programa):

- a) Teto: 1ª superfície;
- b) Parede Sul(Externa):2ª superfície;
- c) Janela: 3ª superfície;
- d) Parede Oeste (Externa): 4ª superfície;
- e) Parede Norte (Interna): 5ª superfície;
- f) Porta (Interna): 6ª superfície;
- g) Parede Leste (Interna): 7ª superfície;
- h) Piso: 8ª superfície.

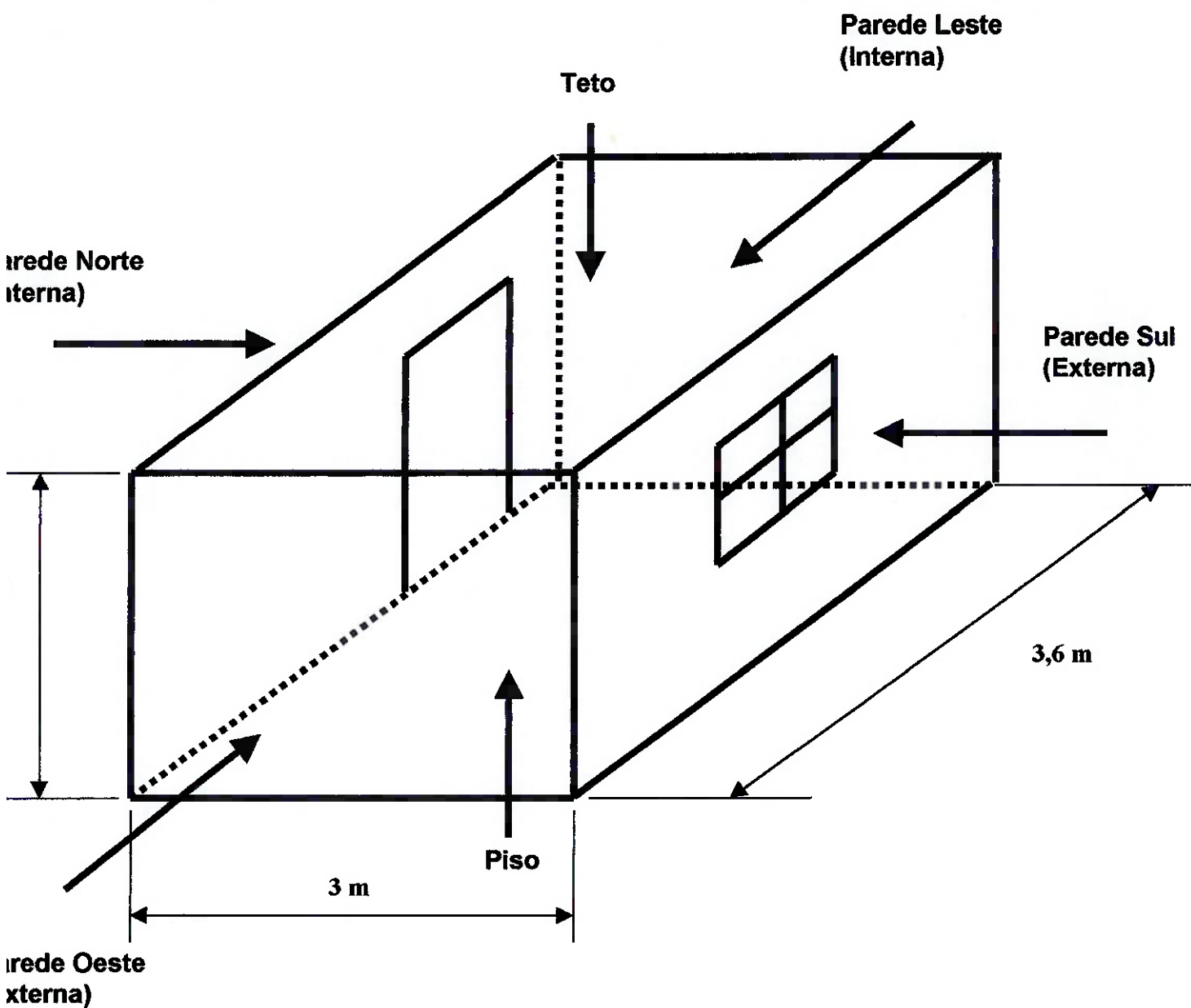


Figura 12 - Dimensões principais do quarto

A Figura 13 mostra as dimensões da porta e da janela.

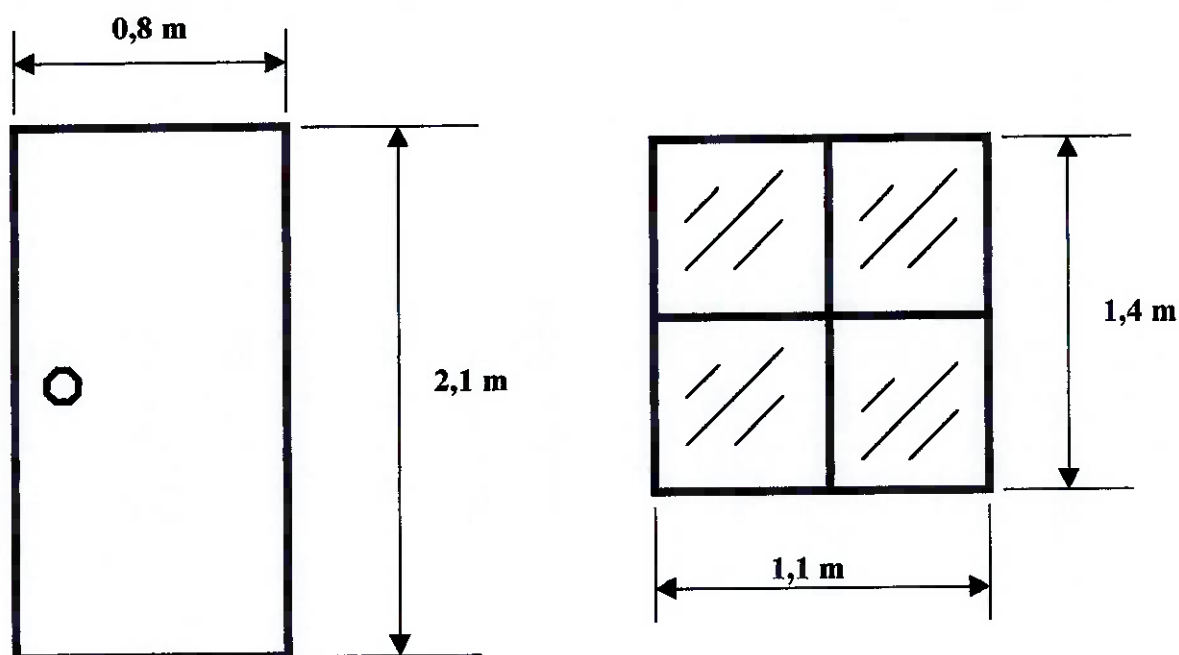


Figura 13 – Dimensões principais da janela e da porta

- Materiais: Cada parede, bem como o teto e o piso, é composta por três camadas de material diferente, que são:
 - 1ª camada: 2,5 cm de argamassa;
 - 2ª camada: 25 cm de tijolo comum;
 - 3ª camada: 2,5 cm de argamassa.

A Figura 14 ilustra melhor a disposição destes materiais. Já a Tabela 4 ilustra as propriedades físicas destes materiais.

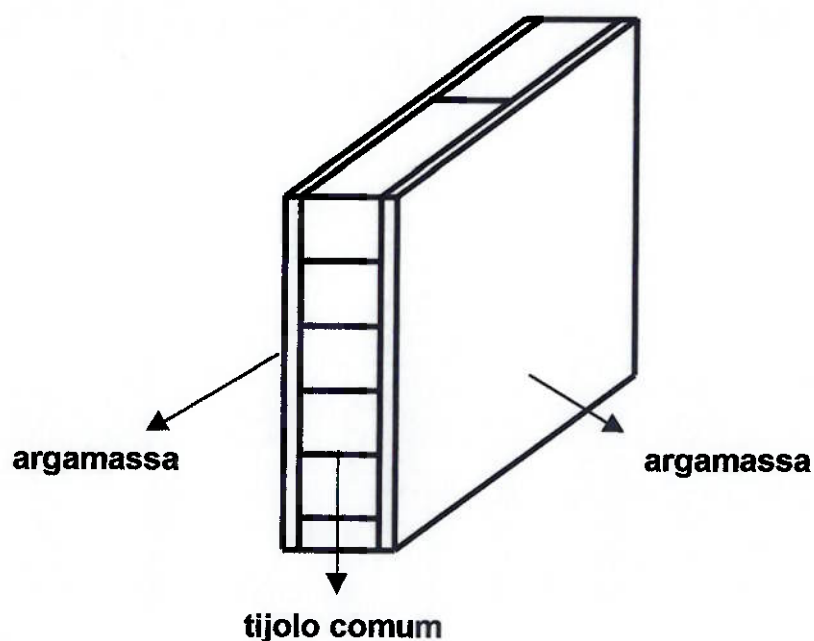


Figura 14 – Disposição das camadas de materiais das paredes, teto e piso.

Tabela 4 – Propriedades dos materiais das paredes, teto, piso, porta e janela

Superfície:	Material	Espessura [mm]	Calor Específico [J/kg.°C]	Condutividade Térmica [W/(m ² .°C)]	Densidade [kg/m ³]	ABS	Trans
Parede/piso/teto	Argamassa	50	780	0,72	1860	0,90	-
Parede/piso/teto	Tijolo comum	250	835	0,72	1920	0,90	-
Porta	Madeira	30	510	0,12	1380	-	-
Janela	Vidro	50	780	0,81	2500	-	0,85

- Ocupação: Neste exemplo o recinto não é ocupado e não possui equipamentos elétricos e de iluminação.

9.1.1. Descrição do ambiente externo

- ♦ Localidade: cidade de São Paulo (latitude:47,25 e longitude -22,75);

- ♦ Dia: Típico de verão (21 de Janeiro);
- ♦ Temperatura de bulbo seco máxima externa: 31,4 °C;
- ♦ Temperatura de bulbo úmido máxima externa: 26,7 °C;
- ♦ Amplitude máxima diária da temperatura: 10 °C ;
- ♦ Umidade relativa: 70% (Média);
- ♦ Total diário de radiação solar global: 5180 W/m²;
- ♦ Temperatura média do solo no verão: 25 °C.

1.2 Parâmetros internos de controle:

- ♦ Temperatura máxima: 26 °C;
- ♦ Umidade relativa do ar interno: 60%;

9.1.3 Análise dos Resultados

Gráfico I) Temperatura do Ar Exterior

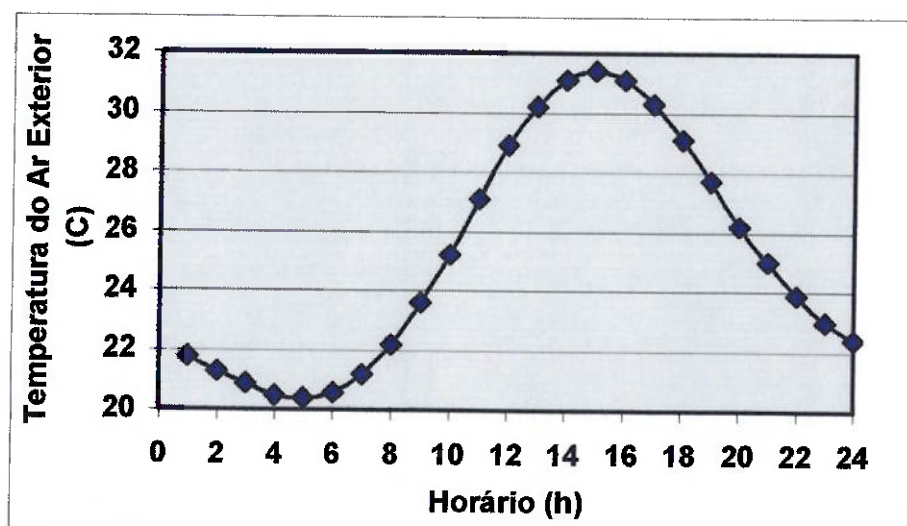


Figura 15 – Temperatura Externa

Da Figura 15 nota-se que a curva de temperatura do ar exterior é muito semelhante a uma senóide, o que é um modelo bastante razoável com o que de fato ocorre na natureza. As temperaturas oscilam entre 20 e 32 °C.

Gráfico II) Carga Térmica

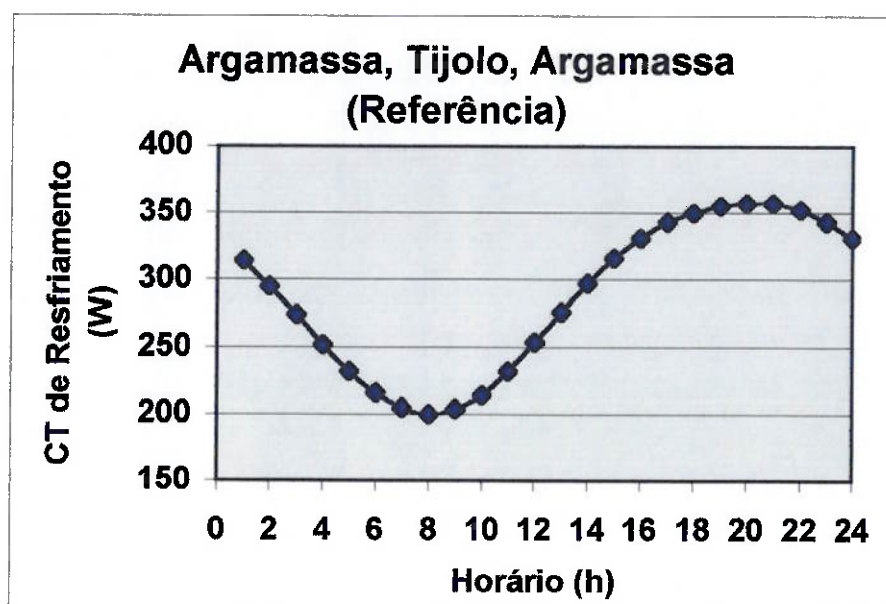


Figura 16 – Carga Térmica para Referência

Da Figura 16 nota-se que a carga térmica varia de 200 a 360 W. Enquanto o pico de temperatura do ar exterior se dá às 15 h, o pico de carga térmica ocorre às 20 h, evidenciando a inércia da edificação. A carga térmica diária é igual a 6,6 kW e a carga térmica média horária vale 275,2 W.

9.2 Exemplo B de aplicação do programa NBSLD

9.2.1 Descrição da edificação

Vamos supor agora que as dimensões da edificação, com exceção do pé direito, dobrem de tamanho, ou seja:

1. Paredes Sul e Norte: 3 X 7,2 m
2. Paredes Leste e Oeste: 3 X 6 m
3. Teto e piso: 6 X 7,2 m

Os outros parâmetros permanecem os mesmos.

9.2.3 Análise dos Resultados

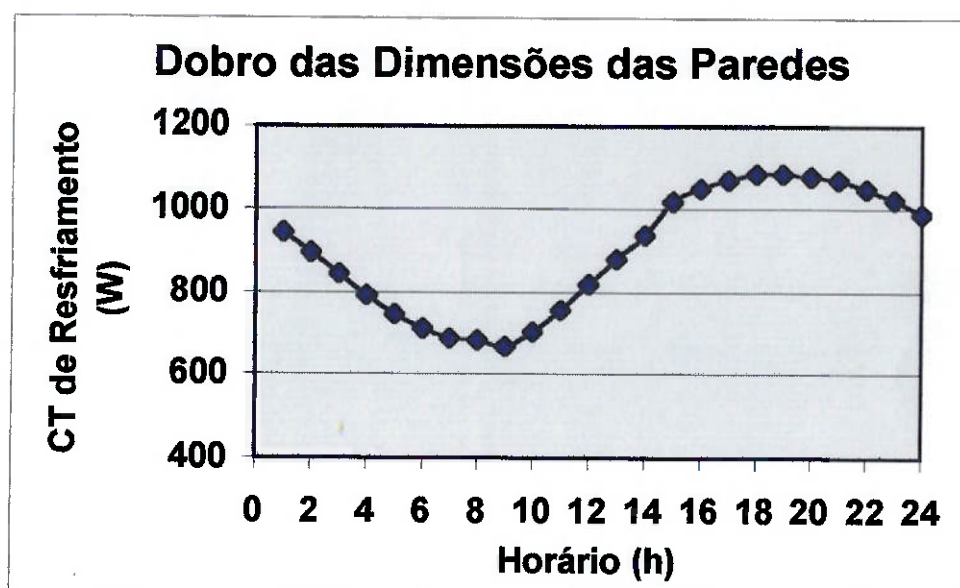


Figura 17 – Carga Térmica para o dobro das dimensões das paredes

Da Figura 17 nota-se que com o aumento das paredes e consequentemente da área de troca de calor com o meio externo, há um grande aumento da carga térmica. Isto ocorre devido ao fato que o calor trocado por condução é diretamente proporcional à área

de troca de calor. A carga térmica diária é igual a 21,6 kW e a carga térmica média horária vale 899 W.

9.3 Exemplo C de aplicação do programa NBSLD

9.3.1 Descrição da edificação

Vamos supor agora que somente a espessura das paredes mude, ou seja, seu valor caia pela metade.

Os outros parâmetros permanecem os mesmos.

9.3.2 Análise dos Resultados

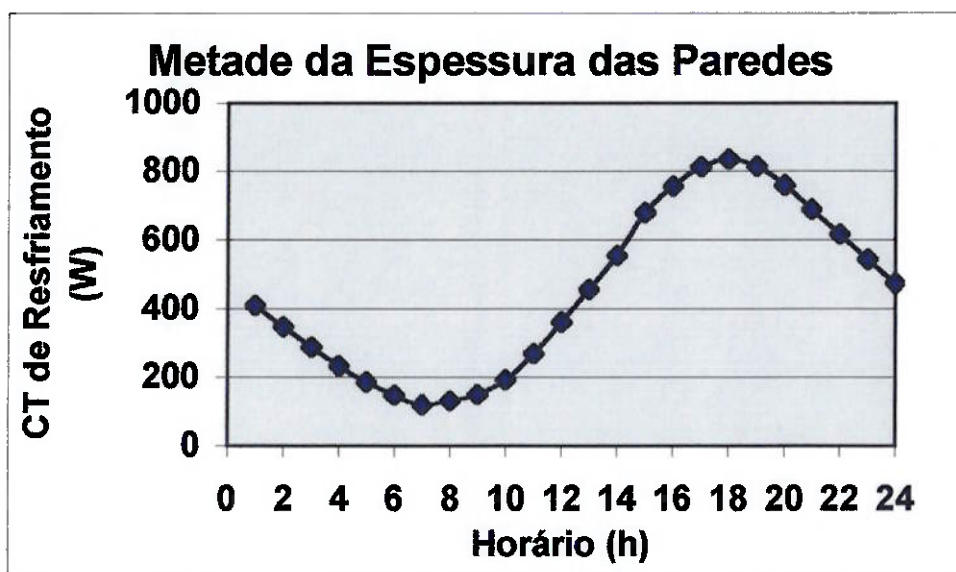


Figura 18 – Carga Térmica para a metade da espessura das paredes

Como no caso anterior, observa-se na Figura 18 que há um aumento da carga térmica devido ao calor trocado por condução ser inversamente proporcional à espessura

da parede. Esse aumento de carga térmica é ainda menor que o do exemplo anterior, mostrando que a carga térmica é mais sensível (desde que as variações destes parâmetros estejam com a mesma ordem de grandeza) a uma variação de área do que de espessura de parede. A carga térmica diária é igual a 10,83 kW e a carga térmica média horária vale 451,1 W.

9.4 Exemplo D de aplicação do programa NBSLD

9.4.1 Descrição da edificação

Vamos supor que agora temos:

- 1ª camada: 2,5 cm de argamassa;
- 2ª camada: 5 cm de isopor;
- 3ª camada: 25 cm de tijolo comum;
- 4ª camada: 2,5 cm de argamassa.

Os outros parâmetros permanecem os mesmos.

9.4.2 Análise dos Resultados

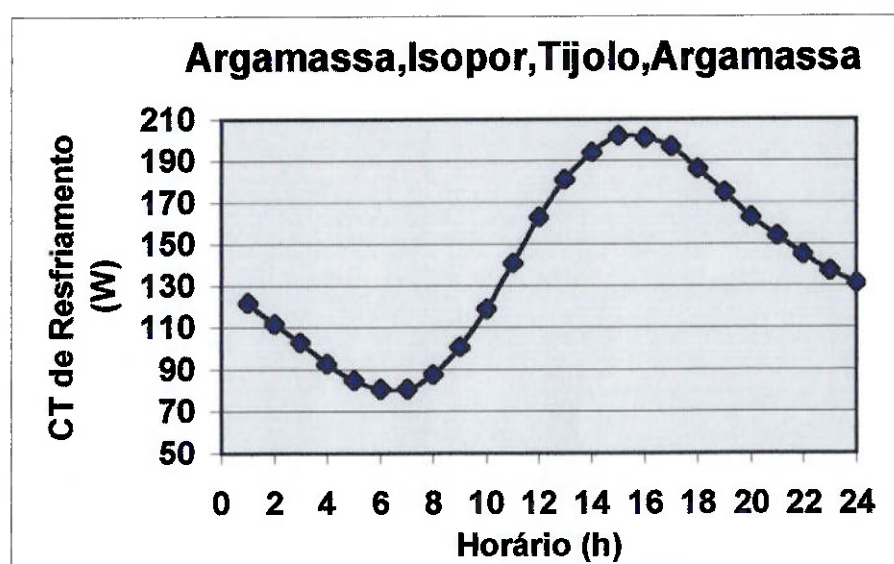


Figura 19 – Carga Térmica com introdução da camada de isopor

Nota-se pela Figura 19 que devido ao isopor ser um isolante térmico, a curva da carga térmica é achatada devido à maior inércia térmica da edificação. Os seus valores horários da carga térmica são diminuídos sensivelmente pela adição de uma camada de isopor de 5 cm de espessura. A carga térmica diária é igual a 3,3 kW e a carga térmica média horária vale 139,8 W. A Figura 20 mostra a curva de carga térmica obtida para cada parâmetro variado.

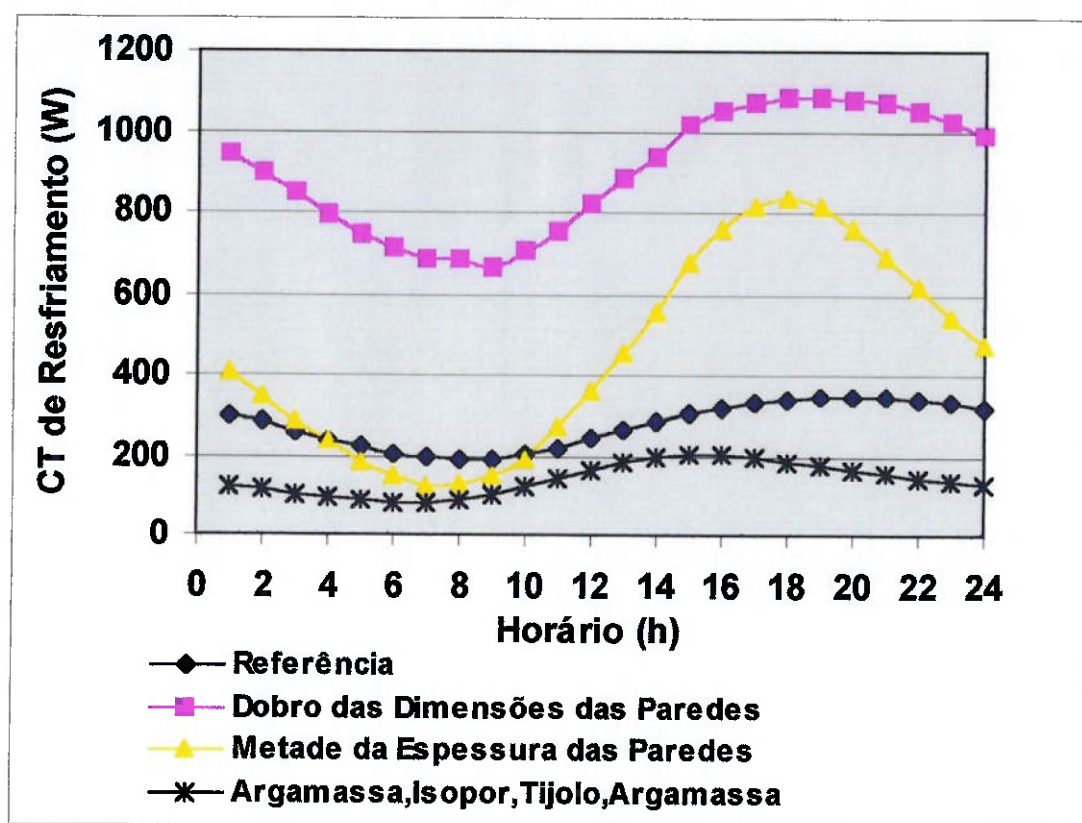


Figura 20 – Curvas de carga Térmica para os casos analisados

9.5 Análise comparativa – Espessura de Tijolo

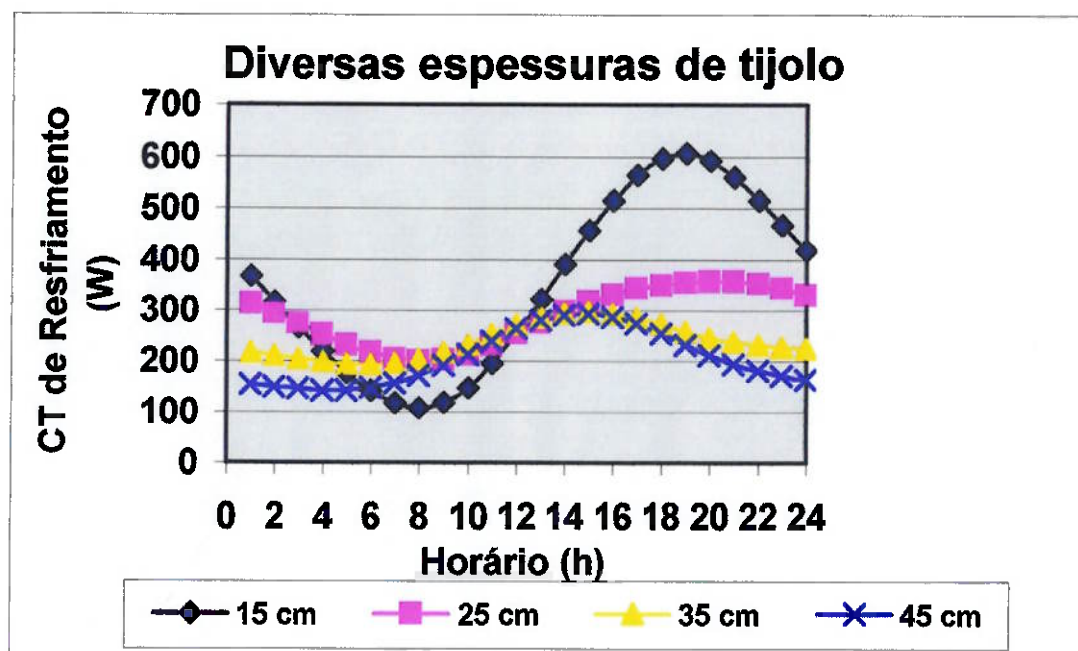


Figura 21 – Carga Térmica para diversas espessuras de tijolo

Análise dos Resultados

Da Figura 21 pode-se notar que um aumento na espessura das paredes da edificação, corresponde a um aumento na resistência térmica por condução e provoca consequentemente um achatamento e uma translação horizontal (para esquerda) do perfil de carga térmica.

9.6 Análise comparativa – Variação da Área Envidraçada

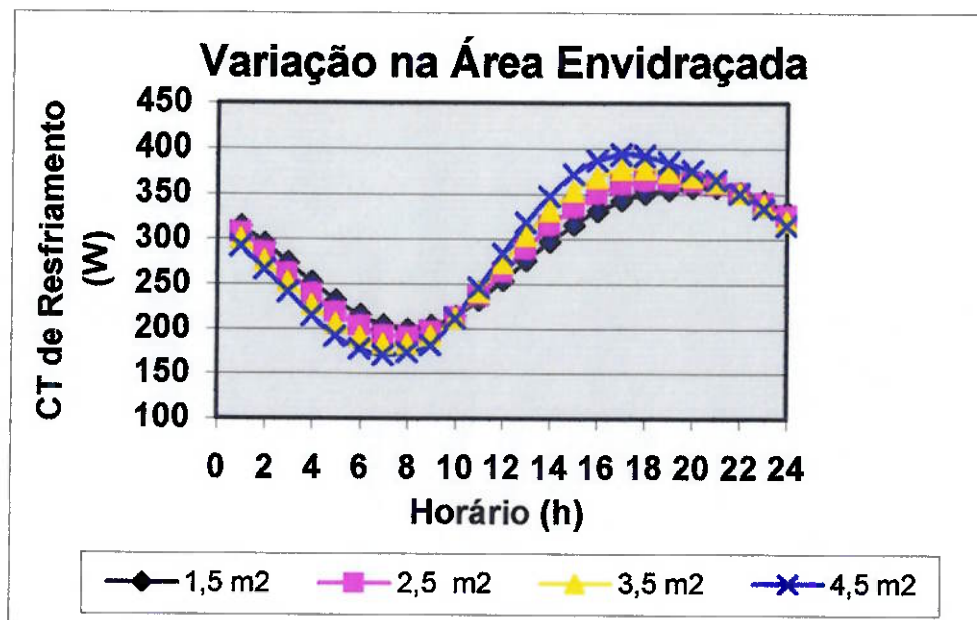


Figura 22 – Carga Térmica para diferentes áreas envidraçadas

Análise dos Resultados

Da Figura 22 nota-se que o aumento da área envidraçada na edificação provoca um aumento gradativo do perfil da carga térmica. Isto ocorre devido ao aumento da influência dos fenômenos de radiação térmica.

10. Conclusões e Comentários Finais

O Programa NBSLD é adequado para a avaliação de carga em edificações simples, com apenas um recinto, pois o mesmo não consegue relacionar vários ambientes adjacentes de uma edificação simultaneamente.

O programa NBSLD é apropriado para calcular a carga térmica em ambientes condicionados nas 24 h do dia. Para ambientes condicionados somente em um período do dia o programa BLAST é mais adequado.

Outro ponto importante é que com o aumento da temperatura de condicionamento os valores de carga térmica máxima calculados pelo programa NBSLD variam bem mais rapidamente do que aqueles calculados pelo programa BLAST.

Referências Bibliográficas

AKUTSU, M., (1983): Aplicação do Método dos Fatores de Resposta para a Determinação da Resposta Térmica de Edificações, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo.

AKUTSU, M., (1998): Método de Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações no Brasil, Tese de Doutorado, FAU/USP, São Paulo.

AKUTSU, M. e VITTORINO, F., (1993): Critério para a definição de níveis de desempenho térmico de edificações, Anais do II Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Florianópolis,.

ASHRAE Standard, (1992): Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, (ANSI/ASHRAE 55-92), New York. NUTAU'96 (1996): Conservação de energia nas edificações, Anais do Simpósio Internacional de Conservação de Energia nas Edificações, São Paulo

EPUSP, (1989): Conservação de energia nas edificações, Anais do Simpósio Nacional de Conservação de Energia nas Edificações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

JABARDO, J. M. S., Evolução dos equipamentos de ar condicionado visando a conservação de energia, Anais do Simpósio Nacional de Conservação de Energia em Edificações, São Paulo, EPUSP, 1989.

KUSUDA, T., 1969, Thermal response factors for multilayer structures of various heat conduction systems, ASHRAE Transactions, New York.

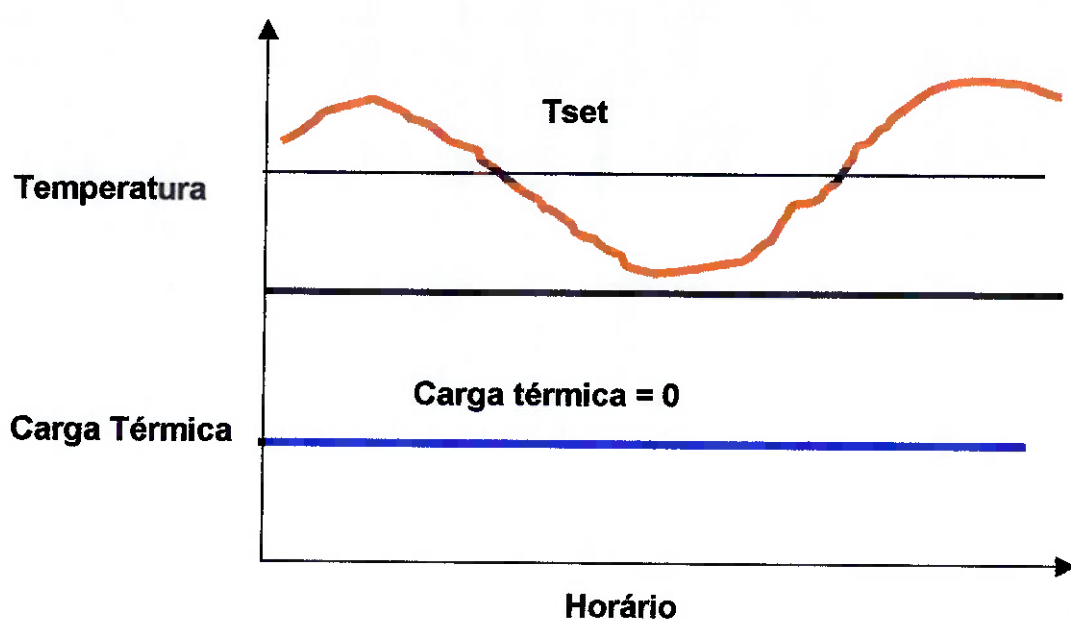
LOMARDO, L. L. B., Comparação da eficiência energética Predial – metodologia e estudo de Caso, Anais do Simpósio Nacional de conservação de Energia em Edificações, EPUSP, São Paulo, 1989.

NBSLD-IPT (1992): Manual de Utilização.

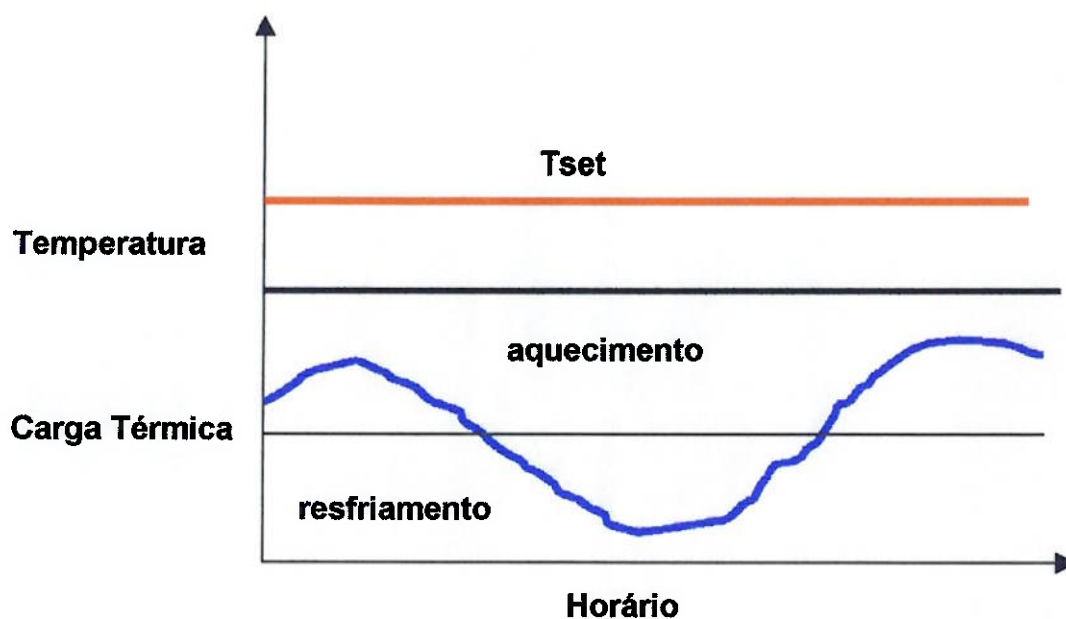
PEDERSEN, C. O. et alii , 1993, BLAST 1.0 - Building Load Analysis and System Thermodynamics, University of Illinois, Champaign - Urbana , EUA.

Anexo A

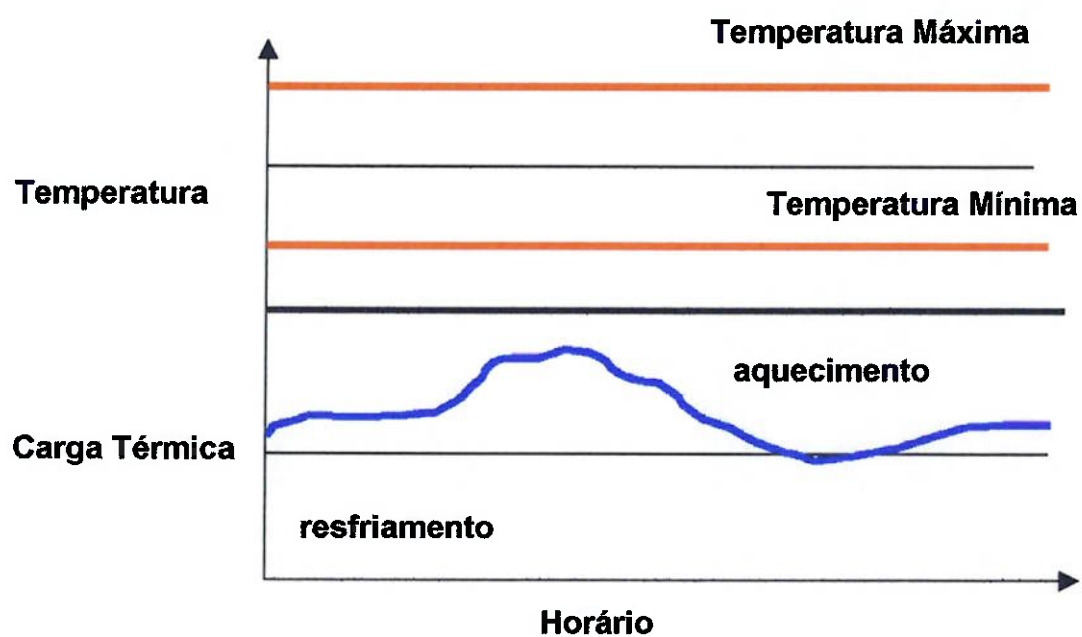
- (a) $ITHST = 0$ e $ITK = 1$: quando o ambiente não é condicionado artificialmente – neste caso é possível calcular tanto os valores da temperatura do ar interior quanto os das superfícies interiores e exteriores de todos os elementos que compõem o ambiente juntamente com os valores do fluxo de calor nessas superfícies.



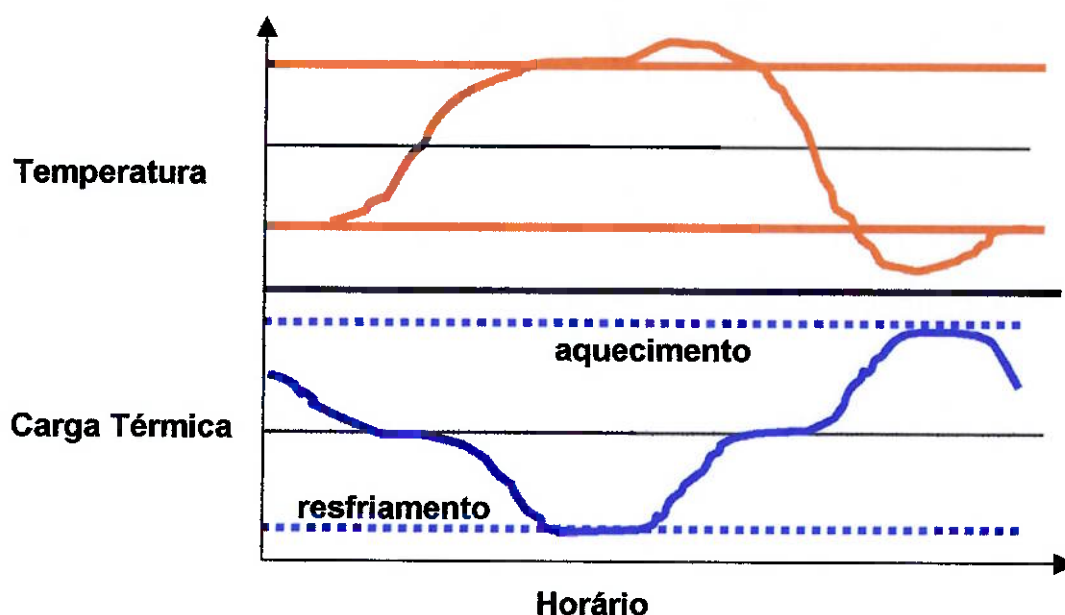
- (b) $ITHST = 1$ e $ITK = 0$: quando é fixado um valor constante para a temperatura do ar interior – neste caso são calculadas as cargas térmicas de aquecimento ou de resfriamento necessárias para manter o ar interior a esta temperatura.



- (c) $ITHST = 1$ e $ITK = 1$: quando são fixados um limite superior e um limite inferior para os valores da temperatura do ar interior – neste caso são determinadas as cargas térmicas de aquecimento ou de resfriamento necessárias para manter a temperatura do ar interior em valores dentro do intervalo pré-fixado.



- (d) $ITHST = 0$ e $ITK = 0$: quando são fixados, além dos limites superior e inferior para a temperatura do ar interior, as cargas térmicas máximas de aquecimento ou de resfriamento do sistema de condicionamento artificial do ambiente – neste caso os resultados dos cálculos efetuados pelo programa são os mesmos do item (c), com a diferença de que, quando os valores das cargas térmicas de aquecimento ou de resfriamento necessárias ultrapassarem os limites pré-fixados, serão determinados então os valores apresentados pela temperatura do ar interior mantendo-se os limites estabelecidos para as cargas térmicas.



Anexo B

RUNTYP = 1: os dados climáticos, horários, colhidos em postos meteorológicos, são fornecidos através de uma fita, organizada de forma compatível com o programa.

RUNTYP = 2: quando os dados climáticos referem-se ao “dia típico de projeto”. Neste caso os dados de entrada são: o valor máximo e o intervalo de variação da temperatura de bulbo seco e o valor máximo da temperatura de bulbo úmido do ar exterior do dia referido como “dia típico de projeto “. Partindo desses valores, o programa gera, através de uma função, os valores horários da temperatura do ar exterior e, a partir destes, os valores correspondentes da umidade relativa. Os dados referentes à radiação solar são determinados em função da posição geográfica, considerando-se a condição de céu limpo.

RUNTYP = 3: quando são fornecidos os dados climáticos horários necessários ao processamento em questão, sem se utilizar, portanto, a fita de dados climáticos.

Na página seguinte é mostrado a fluxograma geral do programa NBSLD.

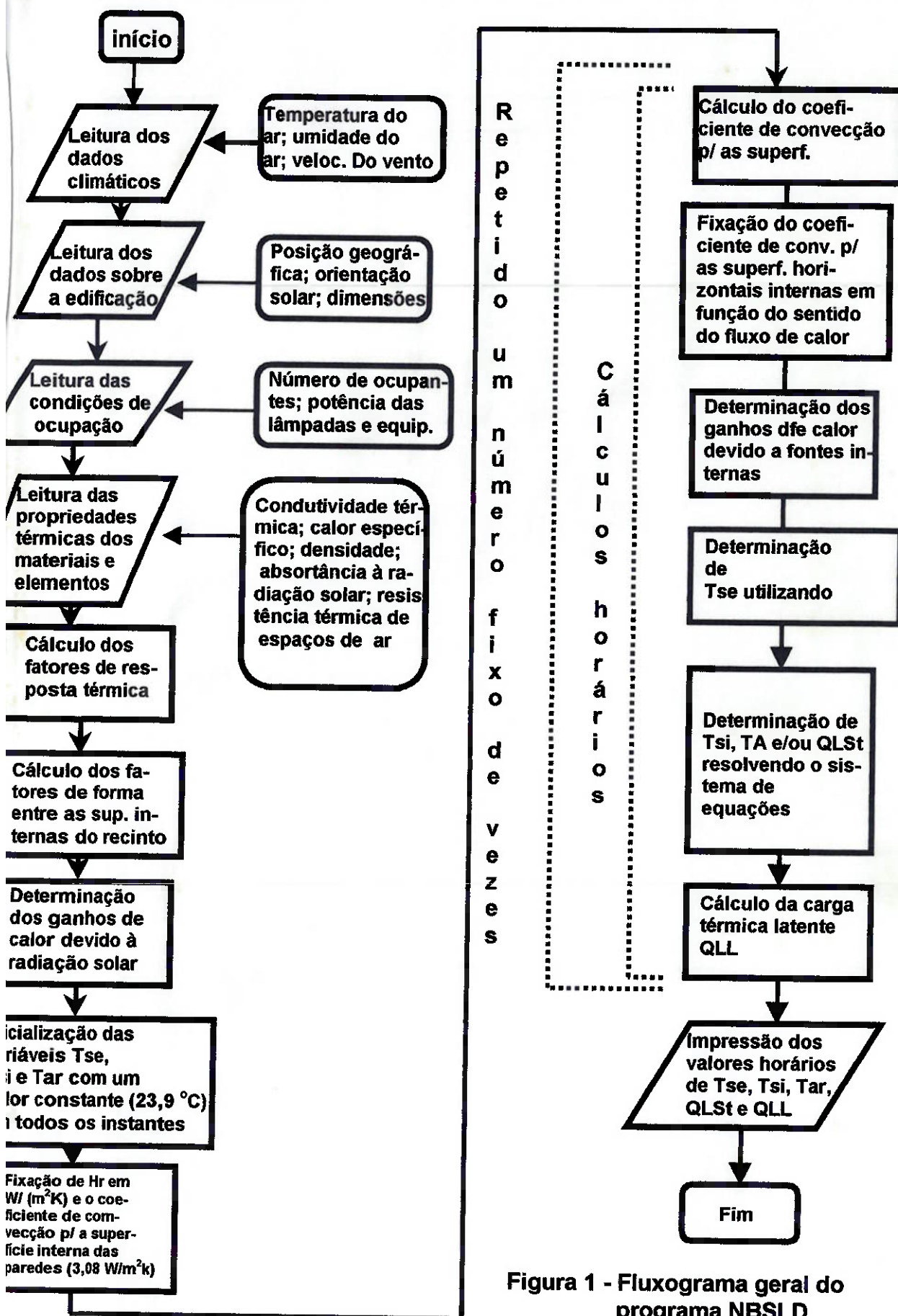


Figura 1 - Fluxograma geral do programa NBSLD