



## III ENCONTRO NACIONAL I ENCONTRO LATINO-AMERICANO

Gramado, RS, 4 a 7 de julho de 1995

### ANÁLISE TÉRMICA DE PRÉDIOS

Paulo O. Beyer e José L. Salvadorette  
Departamento de Engenharia Mecânica / PROMEC / UFRGS  
Rua Sarmento Leite, 425  
90050 -120 - Porto Alegre - RS

#### RESUMO

Foi desenvolvido um programa computacional para o cálculo horário da carga térmica de resfriamento de ar condicionado de ambientes. Este programa foi aplicado à dois tipos de prédios: um com fachadas em alvenaria e janelas protegidas e outro com fachadas totalmente em vidro, sendo então comparadas e analisadas as respostas térmicas de cada prédio. É também proposta uma forma de avaliação térmica de ambientes.

#### ABSTRACT

An hourly air conditioning cooling load software was developed in order to calculate ambient cooling load. This software was then applied in two different buildings: one with walls and windows and another totally with glass on exterior surface. The results were then compared.

#### PALAVRAS-CHAVE

Carga térmica de ar condicionado; conforto térmico; avaliação térmica.

#### INTRODUÇÃO

Os prédios com fachadas totalmente em vidro são normalmente considerados como energívoros, ou seja, consumidores de grandes quantidades de energia para acionar seus sistemas de ar condicionado, em função das características térmicas de suas fachadas, normalmente constituídas por vidro termo-absorvente (escurecido ou "fumê") montados em esquadrias metálicas de cor escura. Para qualificar seu consumo é necessário compará-los com outro tipo de prédio, no caso um prédio com fachadas em alvenaria e janelas. Nesta análise foi utilizado um programa computacional desenvolvido para calcular as cargas térmicas horárias, o qual foi aplicado aos dois ambientes citados sendo após comparados seus resultados.

#### CARGA TÉRMICA

O programa desenvolvido para calcular a carga térmica baseia-se no método CLTD/CLF (Cooling Load Temperatures Differences / Cooling Load Factors), que pode ser encontrado em ASHRAE 1989a e cujas principais equações encontram-se abaixo.

$$\begin{array}{ll}
 Q_f = U A ((DTCR + LM) K_f + CTIE) f & (1) \\
 Q_{pe} = U A ((DTCR + LM) K_p + CTIE) & (2) \\
 Q_{vi} = FGCS A CS FCR_v & (3) \\
 Q_{vc} = U A (t_{ch} - t_i) & (4) \\
 Q_{ae} = V_{ae} (1,2 (t_{ch} - t_i) + 3,0(F_e - F_i)) & (5) \\
 Q_{si} = U A (t_{a,c} - t_i) & (6) \\
 Q_p = N_p (G_s FCR_p + G_i) & (7) \\
 Q_L = Pot_L FCR_L & (8) \\
 Q_e = Pot_e FCR_e & (9) \\
 Q_{mv} = Pot_{mv} & (10)
 \end{array}$$

Na eq.1  $Q_f$  é o calor que entra por um forro ensolarado em W, U a condutividade térmica deste forro em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , A a área em  $m^2$ , DTCR o diferencial de temperatura da carga de resfriamento em  $^\circ C$ , função do tipo de forro e da hora do dia, LM a correção para a latitude e mes de cálculo,  $K_f$  a correção para a cor do forro, CTIE a correção para a temperatura interna e externa média do dia e f o fator de ventilação do forro. Na eq.2  $Q_{pe}$  é o calor que entra pelas paredes externas ensolaradas, U a condutividade, A a área, DTCR o diferencial de temperatura função do tipo de parede, orientação solar e hora do dia, LM a correção para latitude e mes, também função da orientação,  $K_p$  correção para a cor das paredes e CTIE a correção para as temperaturas interna e externa média.

Na eq.3  $Q_{vi}$  é o calor de insolação pelos vidros externos, FGCS é o fator de ganho de calor solar, função da

latitude, mes e orientação solar,  $A$  a área dos vidros,  $CS$  o coeficiente de sombra função do tipo de vidro e proteções solares e  $FCR_v$ , o fator da carga de resfriamento, função do tipo de proteção interna e do peso da construção. Na eq.4  $Q_{ve}$  é o calor por condução pelos vidros externos,  $t_{eh}$  a temperatura externa, função da cidade e da hora e  $t_i$  a temperatura interna.

Na eq.5  $Q_{se}$  é o calor sensível e latente que entra com o ar exterior,  $V_{ae}$  a vazão de ar exterior, entre infiltração e renovação e  $F_e$  e  $F_i$  os fatores de umidade externo e interno respectivamente, em gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco. Na eq.6  $Q_{si}$  é o calor que entra pelas superfícies internas, sendo  $t_{ac}$  a temperatura de ambientes internos não condicionados.

Na eq.7  $Q_p$  é o calor nas formas sensível e latente devido às pessoas presentes no ambiente,  $N_p$  o número de pessoas,  $G_s$  o ganho de calor na forma sensível devido às pessoas e  $G_l$  o ganho na forma latente, e  $FCR_p$  o fator da carga de resfriamento, devido ao efeito térmico capacitivo positivo e negativo devido à entrada e saída das pessoas do ambiente. Na eq.8  $Q_L$  é o calor das lâmpadas, função da potência instalada e do  $FCR$ , fator da carga de resfriamento, que considera o efeito capacitivo do calor.

Na eq.9  $Q_e$  é o calor devido aos equipamentos presentes no ambiente, função da potência e do efeito capacitivo. Na eq.10  $Q_{mv}$  é o calor devido ao próprio sistema de movimentação de ar do condicionador.

## AMBIENTES

Dois tipos de prédio, com planta baixa idêntica (vista na fig. 1), foram submetidos ao programa. A diferença entre os prédios consiste apenas nas fachadas, que são de alvenaria com janelas protegidas em um e de vidro no outro. Como pode ser visto na figura 1, os pavimentos foram divididos em zonas térmicas conforme a orientação solar, de forma a permitir uma melhor análise do comportamento térmico de cada uma.

Planta baixa - Zonas:

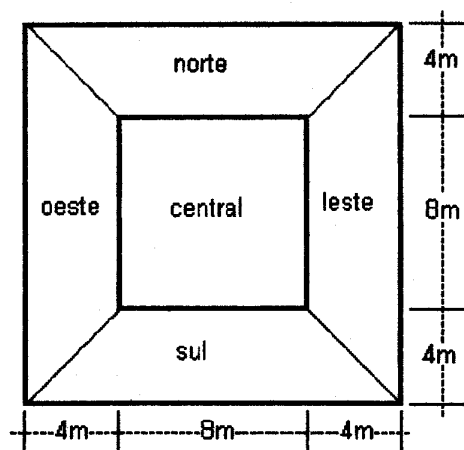


Fig.1 Planta baixa dos prédios

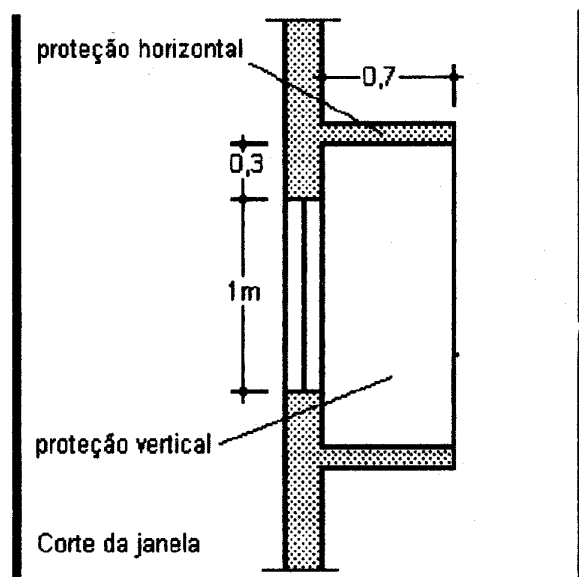


Fig. 2 Proteção solar do prédio com janelas

**Condições Térmicas Comuns.** Excetuando-se as fachadas, todas as demais características dos prédios são iguais. As condições térmicas adotadas para ambos são:

Cidade: Porto Alegre, RS; Área condicionada: 256 m<sup>2</sup>; Altura do ambiente: 3m; Temperatura de bulbo seco interna: 24,5 °C (ASHRAE 1989b); Fator de umidade interno: 8,6 gVA/kgAS; Temperatura de bulbo seco externa: 34 °C (ABNT 1978); Fator de umidade externo: 17,9 gVA/kgAS; Variação diária da temperatura externa: 11 °C (ASHRAE 1989c); Velocidade de vento: 2 m/s (INMET 1985); Área de piso por pessoa: 11,6 m<sup>2</sup> (total 22 pessoas); Necessidade de ventilação: 7,5 L/s/pessoa (ASHRAE 1989d); Vedação das janelas: média; Constituição dos entrepisos: carpete, concreto pesado 100 mm e reboco; Ganho de calor sensível das pessoas: 75 W/pessoa; Ganho de calor latente das pessoas: 75 W/pessoa(ASHRAE 1989a); Potência dissipada pelas luminárias: 20 W/m<sup>2</sup>; Potência de equipamentos: 2400 W; Hora de entrada de pessoas, ligação de lâmpadas e equipamentos: 8 h; Hora de saída das pessoas, desligamento de lâmpadas e equipamentos: 18 h; Pavimentos superior e inferior: condicionados metade da área.

**Prédios com Fachadas em Vidros.** Neste prédio as fachadas tem a seguinte composição:

Tipo de vidro:Termo-absorvente (escurecido ou fumê), 3mm; Caixilho: metálico; Proteção externa: não; Proteção interna: Cortina opaca clara.

**Prédios com Fachadas em Alvenaria e Janelas.** As fachadas deste prédio são compostas de:

Paredes: Tijolo de face + tijolo comum, 200 mm, cor clara; Janelas: 8 janelas de 2 x 1 m por fachada, com vidros e proteções internas idênticas ao prédio com fachadas em vidro; Proteção externa: Marquise horizontal e proteções laterais de 70 cm, conforme figura 2.

## COMPORTAMENTO DE CADA PRÉDIO

A primeira análise a ser feita refere-se ao comportamento individual de cada prédio, de forma global, independente de sua divisão em zonas.

**Prédio com Parede e Janelas.** A figura 3 ilustra o comportamento térmico deste caso. A curva com maiores valores representa a carga térmica total do pavimento hora a hora, no mês de dezembro, que foi o mês de máxima carga para este prédio. Nota-se, como esperado, que a carga é menor durante a madrugada, principiando a elevar-se a partir das 8 h com a entrada das pessoas, ligação de lâmpadas e equipamentos, inclusive o condicionador de ar. Esta elevação continua até seu máximo entre 15 e 17 h. Este pico ocorre pela soma das cargas parciais que tem seus máximos neste período, tal como ar exterior, pessoas, lâmpadas, equipamentos e janelas.

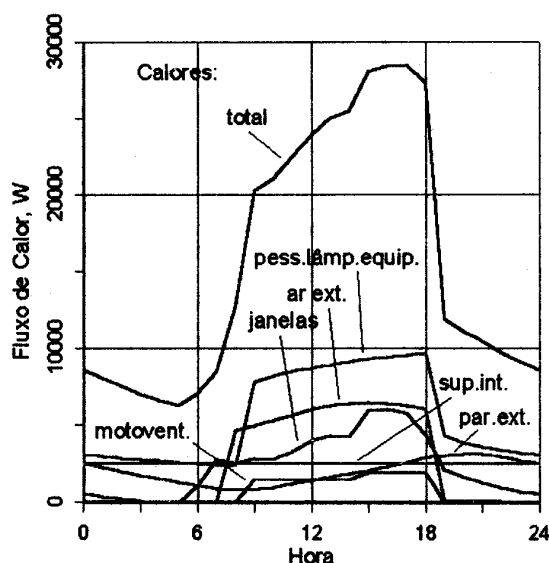


Fig.3 Prédio com janelas em dezembro

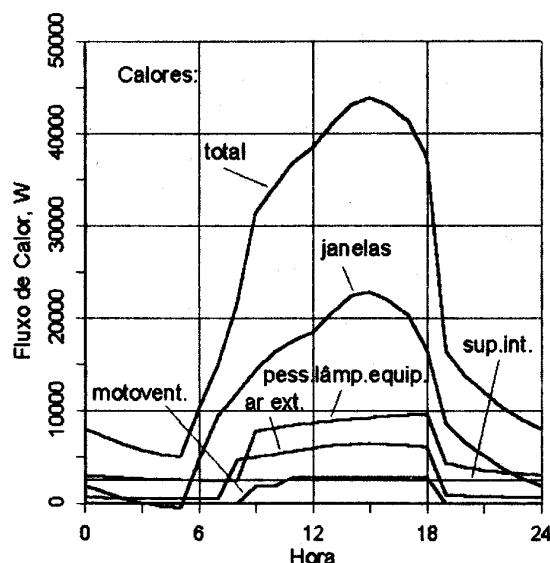


Fig.4 Prédio de vidro em março

A segunda curva mais alta é a carga devida às pessoas, lâmpadas e equipamentos, cujo período efetivo ocorre das 8 às 18 h. Neste período a evolução da carga não é constante devido ao crescimento do FCR (Fator da Carga de Resfriamento) destas cargas, pelo efeito de armazenagem destes calores nas superfícies do ambiente, com um máximo às 18 h. Fora do horário de ocupação dos ambientes esta carga não se torna zero pelo efeito de armazenagem negativa destes calores nas superfícies do ambiente. A terceira curva deve-se à entrada de ar exterior; com um máximo às 15 h, pois esta é a hora de maior temperatura do ar exterior. Esta vazão é normalmente alta, representando uma grande carga de calor, tanto sensível como latente. Em ambientes reais, esta carga é normalmente reduzida pelos próprios ocupantes pela diminuição da vazão de ar. Neste cálculo, entretanto, foram mantidos os valores recomendados. A quarta curva representa o calor de condução e insolação das janelas, com um máximo às 16 h. Este ponto ocorre devido à soma de outros dois picos: o pico de carga de insolação para fachada oeste e o pico de carga de condução, que por sua vez é decorrente da máxima temperatura de ar exterior, situada às 15 h.

Abaixo situa-se a reta correspondente ao calor transmitido pelas superfícies internas, no caso o piso e o forro. Estas cargas são constantes porque considera-se constante a temperatura dos ambientes não condicionados. A seguir vem a carga térmica de paredes externas, que por serem relativamente espessas e claras apresentam um comportamento caracterizado por baixos valores e pequenas variações em função da hora. A última curva representa o calor liberado pelo próprio sistema de movimentação do ar condicionado. Esta carga deveria ser constante, porém como o programa a calcula em função do calor total a cada hora, torna-se variável. É importante salientar que este gráfico representa as cargas somente no mês de dezembro, escolhido por sua melhor representatividade quanto à carga total. Outros meses terão cargas ligeiramente diferentes. Finalmente a carga devida à insolação do forro é nula por estarmos considerando um pavimento intermediário.

**Prédio com Fachadas em Vidro.** A figura 4 mostra o comportamento térmico do prédio com fachadas em vidro.

Comparando-se esta com a figura 3 observa-se inicialmente a diferença de valores numéricos, que denota uma diferença entre as cargas totais dos ambientes. Tal fato demonstra que o prédio em vidro é mais quente que o prédio com paredes e janelas, o que será analisado abaixo. Comparando-se as curvas abaixo da total conclui-se que as cargas de ar exterior, pessoas, lâmpadas, equipamentos e superfícies internas não se modificam de um prédio para outro, servindo assim como referência. A principal diferença é o grande aumento da curva representativa da carga devida às janelas, que nesta figura é a segunda curva abaixo da curva de carga total, entre 12 e 18 h. Outra diferença pouco visível é a ausência da curva correspondente às paredes externas. Estes dois fatos levam ao resultado final de ser este prédio mais quente que o prédio com paredes e janelas.

**Comparação entre os Dois Prédios.** Na figura 5 pode ser vista a comparação das curvas de calores totais dos dois prédios. Nota-se que o prédio de vidro apresenta uma carga térmica bem superior ao outro no período da tarde, principalmente pelo efeito da insolação. O programa permite também encontrar a potências máxima e média para cada caso. As primeiras são retiradas dos picos das curvas e as médias são calculadas pelo somatório das potências horárias dividido por 24 h. Esta potência média representa o consumo de energia elétrica do sistema de refrigeração. Para os dois prédios obtiveram-se os seguintes valores para a potência máxima de resfriamento:

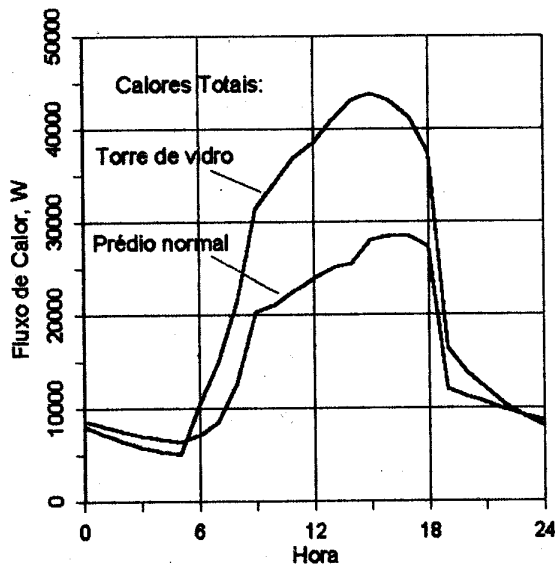


Fig. 5 Comparação entre os dois prédios

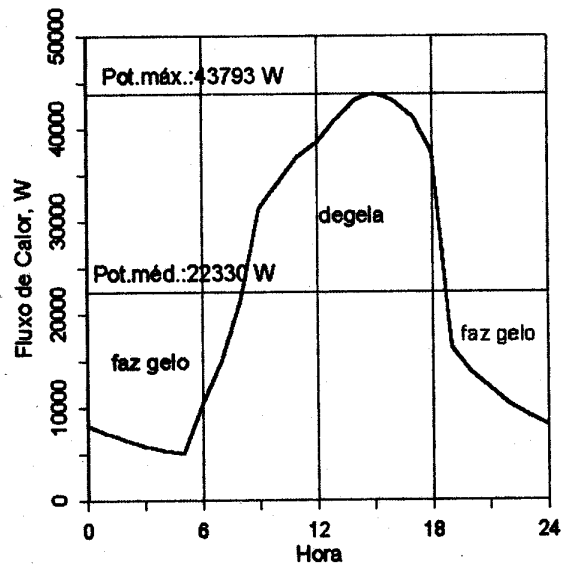


Fig. 6 Cálculo do banco de gelo

Prédio com parede/janela: 28486 W      Prédio com fachada em vidro: 43793 W

Estes valores mostram que a potência de ar condicionado a ser instalada é 54% maior no prédio com fachada em vidro. Este percentual representa o acréscimo no custo de instalação do sistema, tanto direto (que é geralmente função da potência instalada) quanto indireto - cabos elétricos, disjuntores, transformadores (em grandes prédios com vários andares como o considerado), etc., bem como um custo potencial ao sistema gerador e distribuidor de energia elétrica por aumento de demanda. Para as potências médias os valores encontrados são:

Prédio com paredes/janelas: 15625 W      Prédio com fachada em vidro: 22330 W

A potência média de resfriamento do prédio em vidro é 43% maior que a do prédio normal. Isto pode ser explicado verificando-se as figuras 3 e 4, já que a carga térmica devida às janelas aumentou significativamente no prédio em vidro, enquanto desaparecia a pequena carga de paredes externas. Estes valores indicam que o consumo de energia elétrica (conta da luz) pelo ar condicionado do prédio em vidro será 43% superior ao do prédio com janelas. Esta diferença aumenta de importância para grandes prédios com andares repetidos.

**Banco de Gelo.** O programa desenvolvido permite dimensionar sistemas de termo-acumulação (banco de gelo). Estes sistemas são recomendados para ambientes com grandes cargas térmicas, neste caso para os prédios com fachadas em vidro. As instalações normais de condicionamento devem instalar uma potência de refrigeração equivalente à carga máxima (pico), para que o sistema atenda a carga nesta hora. Nas demais horas o sistema fica ocioso. Isto penaliza a instalação de duas formas: a) Aumenta o custo inicial (instalação) por necessitar de maiores potências de refrigeração e elétricas; b) Aumenta o custo operacional, pela cobrança da demanda máxima pela concessionária elétrica, demanda esta que ocorre em algumas horas somente.

Com os sistemas de termo-acumulação, pode-se instalar a potência média, conforme pode ser visto na figura 6, para o prédio com fachadas em vidro. Neste caso o sistema faz gelo nas horas de baixa carga (madrugada) para desmanchar este gelo nas horas de alta carga (tarde principalmente). Em termos numéricos representa instalar uma

potência convencional de refrigeração de 43 MW por pavimento contra uma potência de banco de gelo de 22 MW por pavimento que o prédio contenha.

## EVOLUÇÃO TÉRMICA DAS ZONAS

Em outra análise feita dividiu-se os prédios em zonas térmicas, conforme a figura 1, o que permitiu a observação do comportamento térmico diferenciado das zonas.

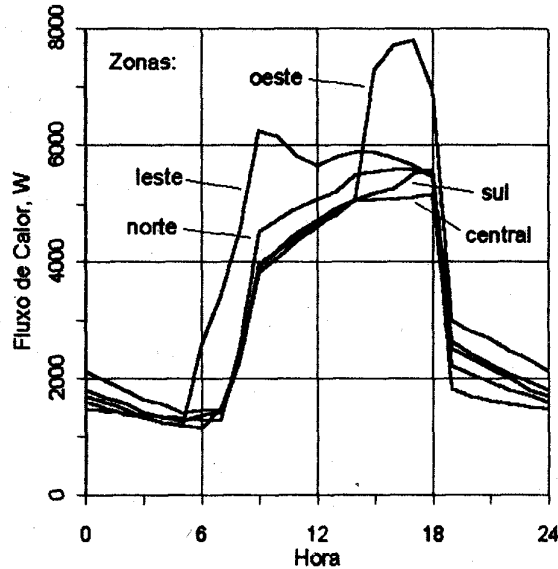


Fig. 7 Zonas térmicas do prédio com janelas

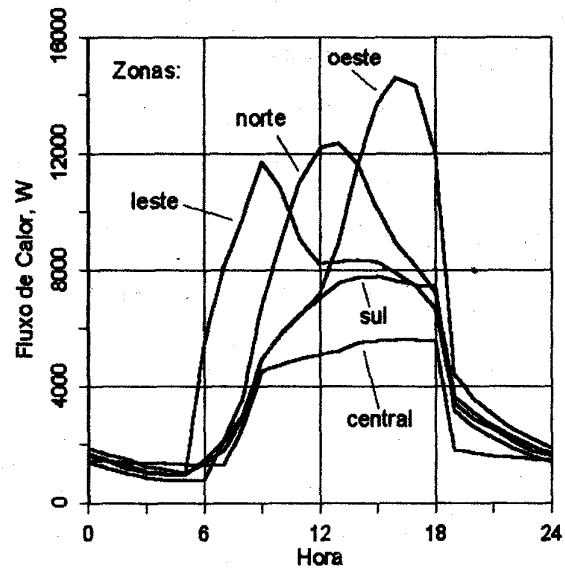


Fig. 8 Zonas térmicas do prédio em vidro

**Prédio com Paredes e Janelas.** A evolução térmica das zonas deste prédio para o mes de dezembro esta representada na figura 7, onde pode-se observar ser pequena a diferença entre o comportamento térmico das mesmas, com uma diferença de 4 para 6 MW às 9 h para a zona leste e de 5 para 8 MW às 17 h para a zona oeste, com diferença em torno de 50%. Isto demonstra que o prédio tem uma evolução térmica homogênea entre as zonas, devido principalmente à boa proteção solar representada pelas paredes e marquises. A zona leste apresenta dois picos, de manhã devido à insolação e à tarde pelas cargas internas, ar exterior e paredes. A zona oeste mostra um pico entre 15 e 18 h devido à insolação, cargas internas e ar exterior. Os picos de insolação destas duas zonas poderiam ser diminuídos pelo uso de brises externos, o que tornaria ainda mais neutro este prédio. As zonas sul e central tem máximos à tarde gerados pelas cargas internas e ar exterior, porém com comportamentos suaves.

As potências de refrigeração máximas, necessárias para definir as potências dos condicionadores de ar são as seguintes:

Zona norte: 5584 W; Zona sul: 5176 W; Zona leste: 6241 W; Zona oeste: 7788 W; Zona central: 5583 W  
Total: 30372 W

As potências médias de refrigeração, definidoras dos consumos médios do ar condicionado, são:

Zona norte: 3072 W; Zona sul: 2945 W; Zona leste: 3670 W; Zona oeste: 3575 W; Zona central: 3075 W  
Total: 16337 W

Estes resultados serão a seguir comparados com os do prédio com fachadas em vidro.

**Prédios com Fachadas em Vidro.** A evolução térmica das zonas deste prédio esta mostrada na figura 8. Pode-se ver claramente a grande disparidade entre os comportamentos térmicos de cada zona, chegando a diferenças de 4 para 12 MW para a zona leste às 9h, 5 para 12 MW para a zona norte às 13 h e 6 para 14 MW para a zona oeste às 16 h, representando acréscimos de 150 a 200% nas cargas. A zona leste apresenta um pico às 9 h, a zona norte às 13 h e a oeste às 16 h. Este tipo de comportamento térmico traz um problema para sistemas de ar condicionado central: qual a zona que controla o sistema? Para resolver este problema tem-se duas soluções: a) Instalar um condicionador por zona e b) Resfriar o ar sempre pela carga máxima e cada zona fazer seu reaquecimento compensando a eventual ausência da carga máxima. Ou seja, ocorre um duplo gasto de energia. A solução recomendada é a a) e neste caso as potências a serem instaladas nas zonas seriam as seguintes (em relação aos picos), com os respectivos acréscimos em relação às zonas do prédio com paredes e janelas:

Zona norte: 12329 W (+120%); Zona sul: 7800 W (+51%); Zona leste: 11719 W (+88%); Zona oeste: 14591 W (+87%); Zona central: 5583 W (+0%)

Total: 52022 W (+71%)

Estes valores, conforme já comentado, representam um acréscimo de aproximadamente 71% no custo inicial (de instalação) dos sistemas de ar condicionado e de alimentação elétrica, penalizando a rede elétrica com a necessidade de previsão destas cargas. Deve-se frisar ainda que estes cálculos referem-se a apenas um pavimento de um prédio, que pode ter vários.

Outro dado interessante de ser analisado é que a potência consumida pela zona sul do prédio em vidro é equivalente à maior potência do prédio com janelas, que é a zona oeste. Isto significa que todas as curvas da figura 7 estão por debaixo da curva da zona sul da figura 8. Este fato é um bom termo de comparação entre as evoluções térmicas dos dois prédios.

As potências médias de refrigeração com os respectivos acréscimos em relação às zonas do prédio com janelas são as seguintes:

Zona norte: 5231 W (+70%); Zona sul: 3876 W (+32%); Zona leste: 5407 W (+47%); Zona oeste: 5401 W (+51%); Zona central: 3075 W (+0%)

Total: 22990 W (+41%)

Observa-se portanto um aumento de 41% no consumo de energia (conta da luz) do sistema comparado ao prédio com janelas.

## ANÁLISE DE UMA ZONA INDIVIDUAL

A última análise feita refere-se ao comportamento da zona mais crítica (oeste) nos dois tipos de prédios. A figura 7 mostra este comportamento no prédio com paredes e janelas, com o pico da curva desta zona ocorrendo entre 15 e 18 h, e beirando os 8 MW. Na figura 8 vê-se a mesma zona, agora no prédio em vidro, com pico também entre 15 e 18 h, porém beirando os 15 MW, ou seja, em torno de 100% mais carga térmica para a zona causada pela intensa insolação. A diferença entre as duas curvas é demonstrativa do desconforto térmico causado por esta grande insolação. Salienta-se que esta análise é térmica, não considerando ainda o efeito da temperatura média radiante existente na zona oeste do prédio em vidro.

## AVALIAÇÃO TÉRMICA DE AMBIENTES

Toda construção para ser liberada deveria passar por uma avaliação térmica, para verificar a sua condição do ponto de vista de conforto térmico. Tem sido propostas várias formas de realizar esta avaliação. Propõe-se aqui realizar esta avaliação através da carga térmica de ar condicionado, pois existe no mercado brasileiro uma quantidade muito grande de profissionais especializados capacitados para realização destes cálculos, e que assinariam um laudo técnico liberando ou não a construção da edificação. É necessário a definição dos limites aceitos, provavelmente através de uma taxa de calor por área da edificação. O mercado de ar condicionado aceita como válido a taxa de 16 m<sup>2</sup>/TR (TR = Tonelada de Refrigeração = 3517 W). Isto representa uma taxa de calor de 220 W/m<sup>2</sup>, que poderia ser o valor limite aceito para liberação das construções. Neste calor devem ser incluídas todas as fontes existentes no ambiente. Para os prédios analisados não seriam liberadas as seguintes zonas do prédio em vidro, com respectivas taxas: norte, 257 W/m<sup>2</sup>, leste, 244 W/m<sup>2</sup> e oeste, 304 W/m<sup>2</sup>. Nestas zonas teriam que ser procuradas soluções arquitetônicas para diminuição destas taxas.

O programa desenvolvido adequa-se muito bem a realização destes cálculos com rapidez, precisão, adequação à nossa latitude e facilidade de uso. Atualmente está sendo preparada uma versão para rodar em ambiente Windows, com ainda maiores facilidades de uso.

## CONCLUSÕES

O programa desenvolvido apresenta-se como uma boa ferramenta de análise do comportamento térmico de edificações em geral, fornecendo diversos subsídios ao projeto das mesmas. O estudo desenvolvido para estes dois tipos de prédios apresentou conclusões importantes, como a possibilidade de servir como parâmetro para avaliação térmica de edificações. Como próximo passo está sendo desenvolvida uma metodologia analítica para o cálculo do fluxo de calor transiente em paredes externas multicompostas de edificações, o que permitirá o cálculo do fluxo de calor em paredes brasileiras, não sendo necessário utilizar valores prévios de paredes americanas.

## REFERÊNCIAS

1. ABNT, "Normas para Projeto de Ar Condicionado", ABNT-NB10, 1978.
2. ASHRAE, "Air-Conditioning Cooling Load", ASHRAE Fundamentals Handbook, 1989a.
3. ASHRAE, "Physiological Principles, Comfort and Health", ASHRAE Fundamentals Handbook, 1989b.
4. ASHRAE, "Weather Data", ASHRAE Fundamentals Handbook, 1989c.
5. ASHRAE, "Infiltration and Ventilation", ASHRAE Fundamentals Handbook, 1989d.
6. INMET, "Condições Meteorológicas para o Rio Grande Do Sul, "8 Dist. Met., comunicação pessoal, 1985.