

UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ENERGYPLUS PARA A SIMULAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES POPULARES EM QUATRO CAPITAIS BRASILEIRAS

Maurício D. Wallauer (1); Paulo Otto Beyer (2)

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 0xx5133438749.

e-mail: mauriciowallauer@hotmail.com

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 0xx5133163167.

e-mail: pob@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em utilizar o programa EnergyPlus para simular e analisar o conforto térmico dos moradores de uma edificação térrea simples. Para tanto, escolheu-se e definiu-se uma casa popular padrão que será utilizada nas cidades de Belém, Brasília, São Paulo e Recife.

O conforto térmico dos ocupantes da habitação foi calculado e analisado para uma semana representante da época do ano com a temperatura mais elevada, e outra que representa a época com temperaturas mais baixas. Para esta etapa necessitou-se a utilização de arquivos climáticos. O conforto foi determinado conforme o modelo de Fanger e utilizou-se como ferramentas de simulação os programas EnergyPlus e uma sub-rotina sua baseada no modelo de fluxo de ar COMIS.

Os resultados obtidos mostraram-se bastante coerentes com as condições externas e internas da residência. Analisado o conforto térmico das pessoas, melhorias nas estruturas da edificação foram sugeridas a fim da obtenção de condições otimizadas para os ocupantes desta habitação.

ABSTRACT

The purpose of this paper consists of the use the software EnergyPlus for simulating and analysing the thermal comfort of residents of a simple ground-floor building. In order to do so, a standard popular house was chosen and defined; it will be used for the towns of Belém, Brasília, São Paulo and Recife.

The thermal comfort of residents was calculated and analysed for a week which represents the time of the year with the highest temperature, and for another one representing the time with lower temperatures. For the accomplishment of this step, climatic files had to be used. The comfort was determined according to Fanger's model and used as simulation tools the software EnergyPlus and a subroutine of that software based on the COMIS air flow model.

The results obtained showed enough coherence with the external and internal conditions of the residence. After analysing the thermal comfort of individuals, improvements in the structures of the building were suggested, so as to obtain optimized conditions for the residents of that home.

1. INTRODUÇÃO

A busca constante da melhoria da qualidade de vida das pessoas é um assunto que está sempre em pauta nas principais mesas de reuniões.

Em conjunto com este um outro estudo que se faz de grande importância é quanto à qualificação do desempenho térmico das unidades residenciais.

Estes dois assuntos não são excludentes, pelo contrário, a qualificação do desempenho térmico das residências proporciona de forma direta um aumento do nível da qualidade de vida e, além disso, poderá proporcionar redução do consumo de energia elétrica e redução de gastos quanto à saúde.

Realizando um bom estudo em uma habitação, melhorias no desempenho térmico poderão ser realizadas com insignificantes acréscimos nos custos, ou até mesmo com redução destes.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 Período de simulação e parâmetros climáticos

Estudou-se o conforto térmico num período de duas semanas, uma cujas temperaturas são as mais altas e outra as mais baixas do ano. Para a simulação foram utilizados arquivos climáticos, tipo IWEC (International Weather for Energy Calculations), das quatro capitais brasileiras estudadas: Belém, PA, Brasília, DF, São Paulo, SP, e Recife, PE.

Para a cidade de Belém determinou-se a semana de 28 de maio a 03 de junho como a representante do período mais quente e a de 10 a 16 de março como a época de temperaturas mais amenas.

Em Brasília escolheu-se a semana de 23 a 29 de setembro para representar o período de temperaturas mais altas e a semana de 14 a 20 de junho como a representativa da época fria.

Para a cidade de Recife escolheu-se a semana de 05 a 11 de março para representar a época de maiores temperaturas e a de 27 de julho a 02 de agosto como representante do período de inverno.

Para São Paulo, determinou-se a semana de temperaturas mais elevadas, 25 a 31 de janeiro, e semana de 30 de julho a 05 de agosto como a representante do período mais frio.

2.2 Edificação estudada

O estudo será feito em uma residência situada no subúrbio das cidades, esta casa é do tipo COHAB RS 16-I.3-42, possuindo área interna de $35,86 \text{ m}^2$ e pé direito de $2,50 \text{ m}$.

A residência possui seis cômodos sendo três quartos, uma sala, uma cozinha e um banheiro. O telhado, de duas águas, em conjunto com o forro constituem o sótão cujo volume interno é de $56,55 \text{ m}^3$. Na figura 1 tem-se a planta baixa da edificação referencial padrão.

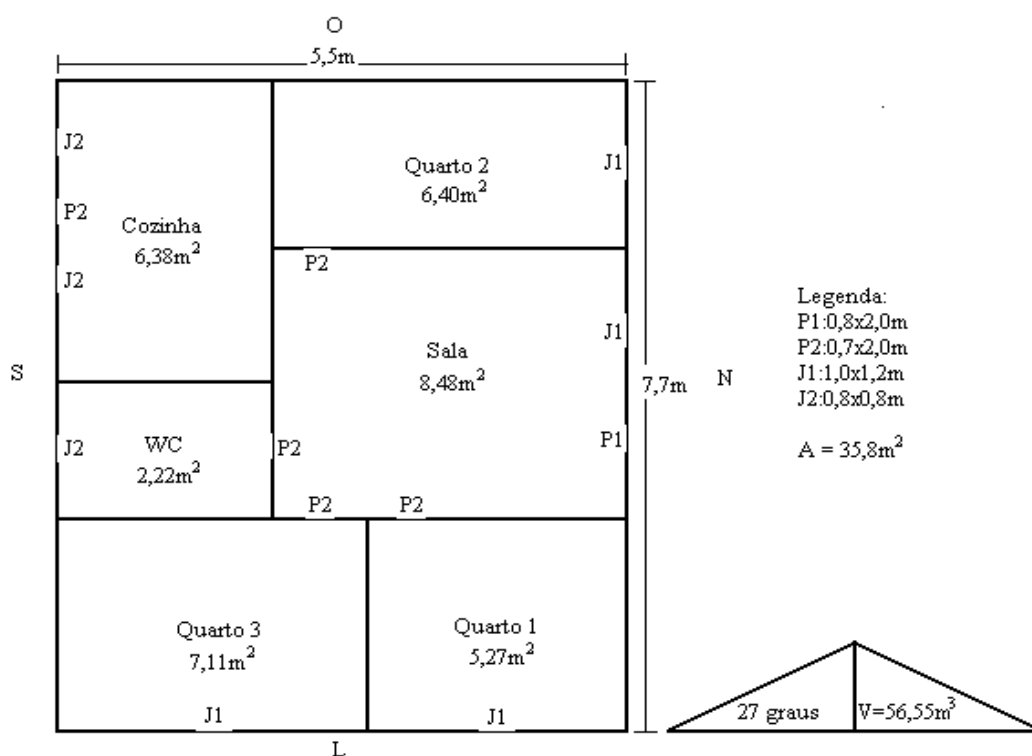


Figura 1. Edificação referencial padrão.

2.3 Cotidiano da edificação

2.3.1 Cotidiano de ocupação

Para realizar a distribuição das pessoas nos quartos e sala determinou-se aleatoriamente que o número máximo de ocupantes na casa seria quatro. A partir deste parâmetro e utilizando a tabela 13-1a de ASHRAE 90,1 (1989) determinou-se a distribuição de pessoas, luz e equipamentos elétricos nos quartos e na sala.

Tabela 1. Cotidiano de pessoas, luz e equipamentos.

Horas	Ocupantes (quartos)	Luz [W] (quartos)	Equip. [W] (quartos)	Ocupantes (sala)	Luz [W] (sala)	Equip. [W] (sala)
01 – 06	1	0	35,17	0	0	216,87
07	0,675	199,3	70,34	1,3	87,9	351,68
08	0,41	70,34	70,34	1,3	175,84	814,74
09 – 17	0	0	35,17	1,3	0	363,41
18 – 19	0	0	35,17	4	0	1041,86
20 – 21	0,322	93,8	105,50	2,7	187,5	395,65
22	0,5	140,67	231,53	2	140,67	269,60
23 – 24	1	187,5	140,67	0	93,8	216,87

A taxa metabólica (M) foi determinada utilizando os valores retirados de ASHRAE, 2001. E foi distribuída para as 24 horas diárias da seguinte forma:

- Quartos: (23:00 - 07:00), $M = 40 \text{ W/m}^2$;
- Quartos: (07:00 - 22:00), $M = 60 \text{ W/m}^2$;
- Sala, verão: $M = 60 \text{ W/m}^2$;
- Sala, inverno: $M = 70 \text{ W/m}^2$.

Os dados de metabolismo têm unidades de energia por área, sendo referida à área superficial do corpo, que pode ser calculada pela equação de DuBois. Neste trabalho, utilizou-se uma área de $1,8\text{m}^2$.

2.3.2 Vestimentas das pessoas

Para determinar a resistência térmica das vestimentas (R_v), utilizou-se a Eq.(1):

$$R_v = 0,835 \sum R_{vp} + 0,024955 \quad [\text{Eq. 01}]$$

onde, R_{vp} = resistência térmica parcial das vestimentas.

Foram utilizados os seguintes valores de resistências para o intervalo da manhã e tarde:

- Para Belém e Recife: No dia mais quente = 0,353 clo; No dia mais ameno = 0,75 clo;
- Para a cidade de Brasília: No dia mais quente = 0,5 clo; No dia mais ameno = 1,05 clo;
- Para São Paulo: No dia mais quente = 0,5 clo; No dia mais frio = 1,44 clo.

Nos horários em que as pessoas estavam nos quartos a resistência térmica foi incrementado o valor de 0,5732 clo, referente à resistência para uma pessoa deitada, representada pela equação 2, abaixo:

$$\Delta I_{cl} = (0,748 A_{ch}) - 0,1 \quad [\text{Eq. 02}]$$

onde, A_{ch} = área de contato.

Na equação 2, foi determinado como área de contato metade da área de DuBois.

Para a determinação do I_{cl} das roupas de cama a equação 3 editada abaixo, foi utilizada:

$$I_{clu} = (0,534 + 0,135x_f)(A_g/A_d) - 0,0549 \quad [\text{Eq. 03}]$$

onde, x_f = espessura da roupa, mm; A_g = superfície do corpo coberta, m^2 ; A_d = área de DuBois, m^2 .

Obtiveram-se então os seguintes valores de resistências térmicas das roupas nos períodos da noite:

- Para as cidades de Belém e Recife: Noite mais quente: 1,08 clo; Noite mais amena: 1,41 clo.

- Para Brasília e São Paulo: Noite mais quente: 1,41 clo; Noite mais fria: 4,933 clo.

2.3.3 Renovação de ar

Para calcular a renovação do ar utilizou-se uma sub rotina do simulador EnergyPlus baseada no programa desenvolvido pela Agência Internacional de Energia (IEA), intitulado COMIS 3.0.

Para a determinação do PMV fez-se necessário o cálculo da velocidade do ar interno para todos os dias estudados, etapa não realizada pelo programa de simulação EnergyPlus. Essa velocidade foi determinada, em cada zona, dividindo-se os fluxos de ar que entram ou saem desta zona pela sua seção principal constituída pela altura e por uma das larguras da zona. Os valores foram calculados e informados para o programa durante as 24 horas dos dias estudados nas quatro capitais.

3. MÉTODO DE CÁLCULO

O programa utilizado como ferramenta de simulação foi o EnergyPlus que calcula a transferência de calor entre o ambiente externo e interno por convecção, condução e radiação.

O programa possui três modelos para o cálculo de convecção: algorítmico de convecção natural simples, detalhada, e algorítmico para difusores de teto. No trabalho foi utilizado o modelo detalhado.

Para o cálculo da condução através das paredes o programa EnergyPlus utiliza as Funções de Transferência de Condução (CTFs). Através destas funções determina-se o fluxo de calor da face interna para a externa da parede (q''_{ki}) e da externa para a interna (q''_{ko}).

Com o programa EnergyPlus pode-se calcular o conforto térmico por meio de três modelos: o modelo de Fanger, de Pierce e o modelo KSU. Neste trabalho foi utilizado o de Fanger que utiliza a equação 4 para determinar o Voto Médio Previsto (VMP). Através do seu resultado pode-se verificar se uma pessoa está em conforto de acordo com a tabela 2:

$$VMP = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)(H - L) \quad [\text{Eq. 04}]$$

onde, M = nível de atividade e (H - L) = calor interno produzido - perda de calor por evaporação - perda de calor por respiração - fluxo de calor sensível pela pele.

Tabela 2. Escala de conforto térmico.

PMV	Descrição	PMV	Descrição	PMV	Descrição
-4	muito gelado	0	neutro	4	muito quente
-3	gelado			3	quente
-2	frio			2	morno
-1	levemente frio			1	levemente morno

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para realizar a análise do conforto térmico determinou-se quatro dias como sendo os mais representativos de todo o ano: Dias mais quentes com bastante ou pouco vento; Dias mais frios com bastante ou pouco vento. O critério de escolha utilizado baseou-se principalmente, em função da temperatura de bulbo seco (Tbs) externa e da intensidade e velocidade dos ventos.

Neste capítulo serão apresentados somente gráficos de PMV. Em anexo seguem gráficos de dois dias estudados da Tbs externa, das temperaturas internas e das umidades relativas internas.

4.1 Comparações entre os dias mais quentes com mais ventos

Observando a figura 2, a seguir, nota-se que durante as madrugadas as cidades que obtiveram os melhores resultados foram Belém, de temperatura externa igual a 24.5°C, e São Paulo, temperatura externa de 21°C. Nestas duas cidades obteve-se conforto térmico.

Em Brasília verificou-se desconforto, com os moradores sentindo frio em razão da baixa temperatura externa, 19°C e em Recife, sentiram um pouco de calor, temperatura externa, entre 28 e 29°C.

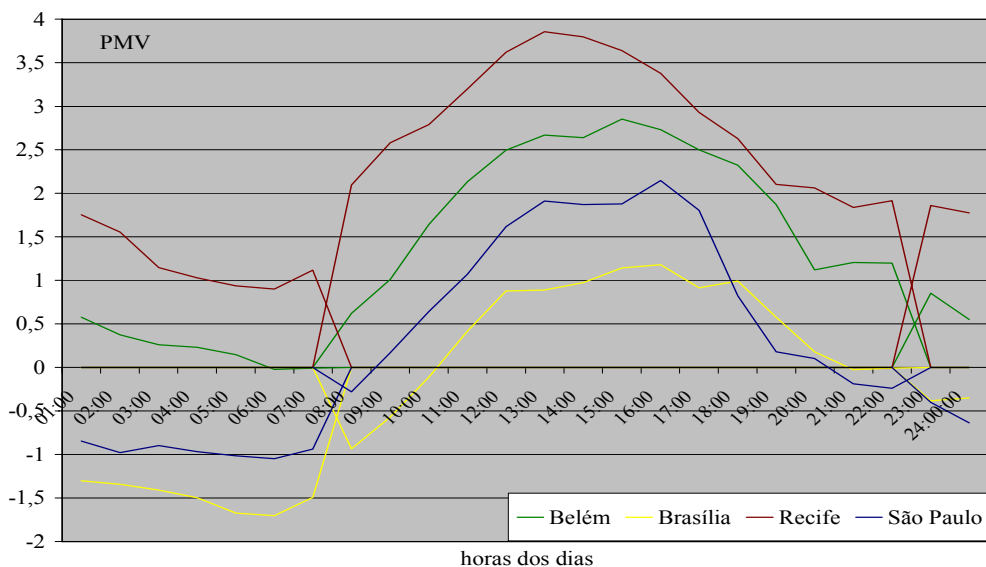


Figura 2. PMV das cidades estudadas para os dias mais quentes com maiores valores de ventos.

Conforme a figura, os resultados de PMV obtidos nos períodos da manhã e tarde se mostraram bastantes coerentes, pois durante o dia os índices de PMV são decorrentes das temperaturas e umidades externas, radiação solar e velocidade do ar interno, que foi muito baixa para todas as cidades. Como as temperaturas externas foram praticamente as mesmas, entre 33 e 32°C, Recife foi o pior caso por apresentar elevada umidade e a maior radiação solar hemisférica global comparada às outras cidades. Brasília caracterizou-se por apresentar um início de manhã bastante frio.

À noite, como durante a madrugada, o principal parâmetro que influenciou nos valores de PMV foi a temperatura externa, portanto para Recife com temperatura entre 28 e 29°C obteve-se o maior índice e para Brasília com temperatura de 19°C o menor valor de PMV.

De acordo com o estudo realizado ficou comprovado que a melhor cidade durante a manhã e a tarde foi Brasília, porém mesmo para essa capital, durante à tarde os índices mostraram que as pessoas sentiram um pouco de calor, saindo da zona de conforto térmico.

4.2 Comparações entre os dias mais quentes com menos ventos

Na figura 3 têm-se os índices de PMV das quatro cidades estudadas para os dias com temperatura maiores com menores intensidades de ventos.

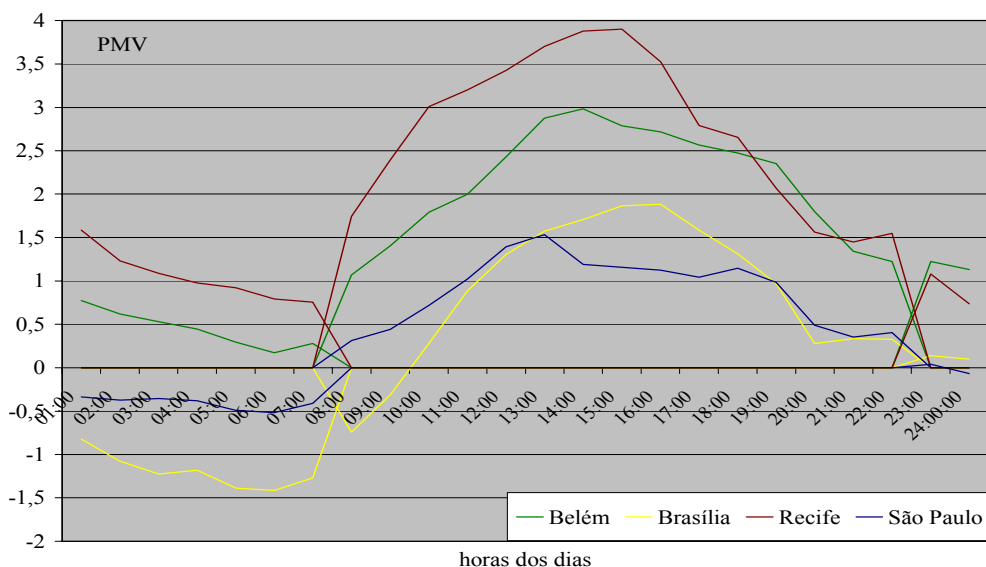


Figura 3. PMV das cidades estudadas para os dias mais quentes com menores valores de ventos.

A figura 3 demonstra que durante as madrugadas Brasília apresentou desconforto térmico com as pessoas sentindo frio. Nesta cidade a temperatura externa nos respectivos horários foi de 18°C. Para São Paulo e Belém as temperaturas externas foram um pouco mais elevadas, 23°C e 25°C, melhorando o índice de conforto. Em Recife, principalmente devido à elevada temperatura externa, em torno dos 28°C, foram obtidos os maiores valores, saindo da zona de conforto térmico.

Durante a manhã e tarde os piores índices de conforto foram para a cidade de Recife que teve maior temperatura externa associada à elevada radiação solar hemisférica global. Para Belém obteve-se também desconforto térmico devido à elevada temperatura, principalmente à tarde. A temperatura externa nesta cidade, 33°C, foi 1°C mais baixa do que em Recife e a radiação solar também foi um pouco menor, com isto os índices de PMV caíram em torno de uma unidade. Em Brasília, com temperatura externa, de 33°C, porém de umidade relativa em 25%, os índices foram bons de manhã, porém, durante a tarde, as pessoas sentiram um pouco de calor e em São Paulo, onde a temperatura externa oscilou em torno de 28°C, as pessoas também sentiram um pouco de calor à tarde.

No período da noite, em Brasília e São Paulo os moradores estavam em conforto térmico, enquanto que em Recife e em Belém as pessoas sentiram um pouco de calor, com maiores valores de PMV para Belém, temperatura externa de 26°C, e menores para São Paulo de temperatura externa igual a 24°C.

Portanto a cidade com melhores índices de conforto térmico foi São Paulo.

4.3 Comparações entre os dias mais frios com mais ventos

Na figura 4 têm-se os índices de PMV das quatro cidades estudadas para os dias com temperatura menores com maiores intensidades de ventos.

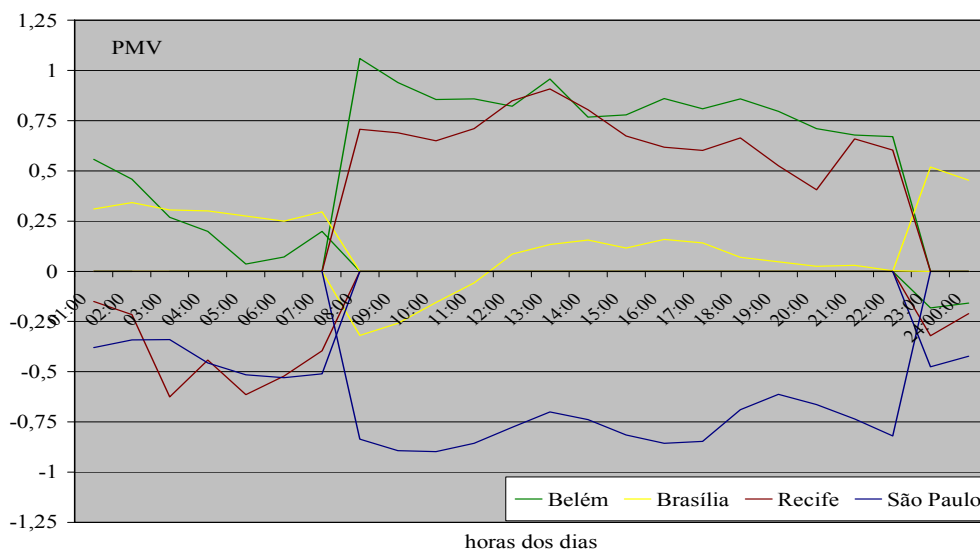


Figura 4. PMV das cidades estudadas para os dias mais frios com maiores valores de ventos.

Nota-se na figura 4, que durante o dia todas as cidades apresentaram valores de PMV entre 1 e -1, representando o conforto térmico, com Belém e Recife obtendo os maiores valores. Para as cidades de Brasília e São Paulo os índices foram mais baixos, comparados aos das cidades anteriores, mesmo utilizando roupas mais pesadas, em virtude da menor temperatura externa e menor umidade relativa em Brasília e da baixíssima temperatura externa em São Paulo, entre 10 e 11°C.

Na madrugada e de Recife, os valores de PMV foram os mais baixos, devido à temperatura externa ser em torno de 22,5°C e a vestimenta utilizada ser de baixa resistência térmica.

Para São Paulo, cidade de temperatura mais baixa, a vestimenta utilizada manteve as pessoas em conforto térmico. Em Brasília, utilizando a mesma vestimenta de São Paulo, e com temperatura externa 2°C mais alta e UR externa 10% mais baixa, os valores de PMV aumentaram. Para a cidade de Belém, onde se utilizaram as mesmas roupas de Recife, os índices de PMV foram um pouco superiores, esse fato deveu-se a um aumento de temperatura externa, entre 23,5 e 24°C.

Verificando todos os resultados, a melhor condição de conforto ocorreu em Brasília.

4.4 Comparações entre os dias mais frios com menos ventos

Na figura 5 estão representados os índices de PMV das quatro capitais analisadas para os seus dias mais frios com menores intensidades de ventos.

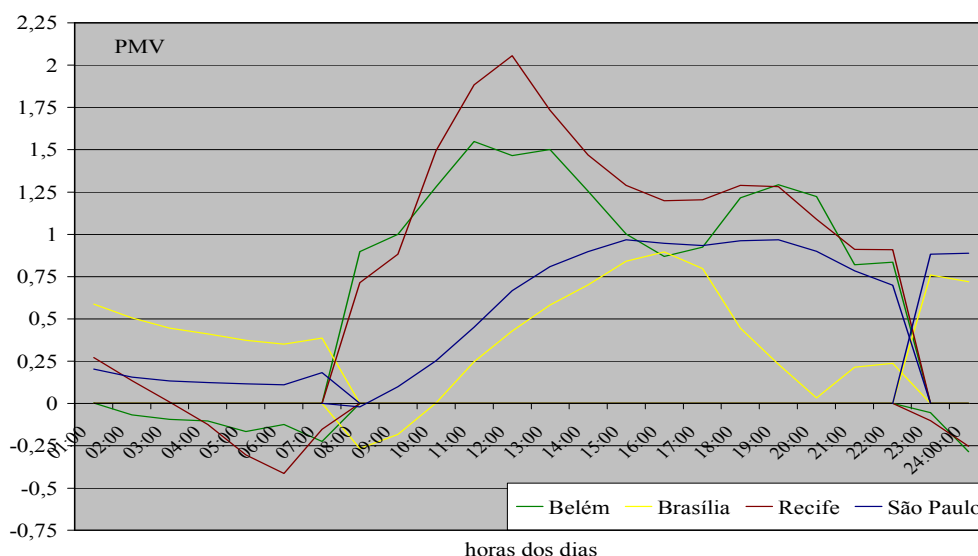


Figura 5. PMV das cidades estudadas para os dias mais frios com menores valores de ventos.

Observa-se na figura 5, que durante os períodos da madrugada e da noite nas quatro cidades obteve-se conforto térmico.

Nos períodos da manhã e tarde as cidades de São Paulo e Brasília se mantiveram sempre na faixa do conforto térmico. Nestas duas cidades as temperaturas externas oscilaram em torno de 25°C, em quanto que a umidade relativa ficou em torno de 45 a 50%.

Para as cidades de Belém e Recife houve momentos de desconforto, com as pessoas sentindo calor nos horários das 10:00 às 20:00 horas para Recife e das 09:00 às 20:00 horas para Belém. A sensação de desconforto térmico nestas cidades aconteceu, mesmo com a temperatura externa mais baixa em 1°C do que em São Paulo e Brasília, devido, principalmente, a elevada umidade relativa externa nos horários da tarde, em torno de 95%.

Analisando todos resultados de PMV verifica-se que os melhores índices aconteceram em Brasília.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para o conforto térmico dos moradores para os dias analisados se apresentaram bastante coerentes, indicando que o aplicativo EnergyPlus pode ser considerado um programa capaz de simular adequadamente os casos estudados. Este simulador mostrou-se ser uma grande ferramenta, com muitos recursos e, várias de suas aplicações ainda estão para serem desenvolvidas.

A principal limitação do simulador, verificada neste trabalho, foi a ausência do cálculo da velocidade do ar que entra/sai das zonas, a sub-rotina COMIS calcula somente os fluxos de entrada e saída de ar. Uma outra limitação é quanto a leitura da temperatura de solo dada através dos arquivos climáticos das cidades. Foi constatado neste trabalho que o programa não utiliza as temperaturas de solo disponíveis nos arquivos climáticos e deve-se portanto informá-las através do editor do programa.

Em relação aos índices sobre o conforto térmico obtidos, foi visto que durante as noites e principalmente durante as madrugadas de alguns dos dias estudados, os valores de PMV indicaram a sensação de frio para os moradores. Essa situação pode ser facilmente melhorada mudando as vestimentas das pessoas, aumentando a resistência térmica das roupas.

Já o problema da sensação de calor, verificada durante as tardes em algumas cidades, é uma questão um pouco mais complexa. Existem diversas modificações que podem ser empregadas com o intuito de resolver ou ao menos amenizar este impasse. Entre algumas podem-se citar: mudanças nos materiais de construção usados na casa e modificações na geometria da residência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE HANDBOOK (2001). Fundamentals. Atlanta.

ASHRAE STANDART 90,1 (1989). Energy Efficient Design of New Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. 1791 Tullie Circle, NE. Atlanta, Ashrae.

BEYER, P.O. (2001). Apostila de Conforto Térmico. Departamento de Engenharia Mecânica – UFRGS, Porto Alegre, RS.

CRAWLEY, D.B., et al. (1999). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, v-33/4, 443-457. Great Britain, Elsevier Science.

DILKIN, P. (2000). Estudo de Desempenho Térmico de Edificações de Interesse Social a partir de Propostas de Normas. Dissertação de Mestrado PPGEM – UFRGS, Porto Alegre, RS.

FANGER, P.O. (1970). Thermal Comfort, McGraw-Hill, New York.

MANUAIS DO ENERGYPLUS. Copyright (c) 2000-2001 GARD Analytics.

7. ANEXOS

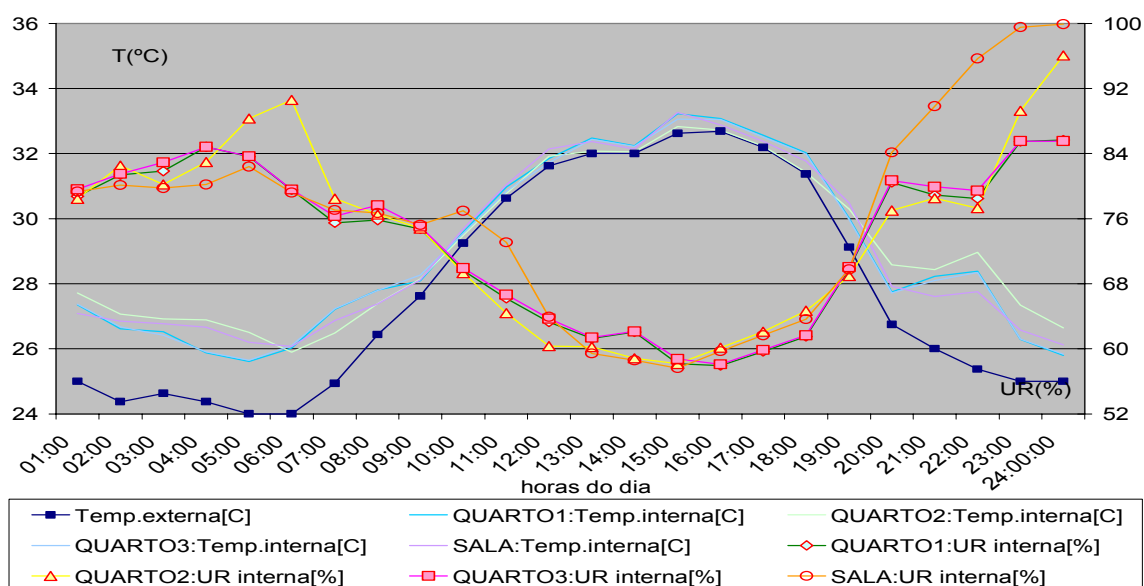


Figura 6. Tbs externa, temperaturas e umidades relativas internas do dia 03/06 em Belém.

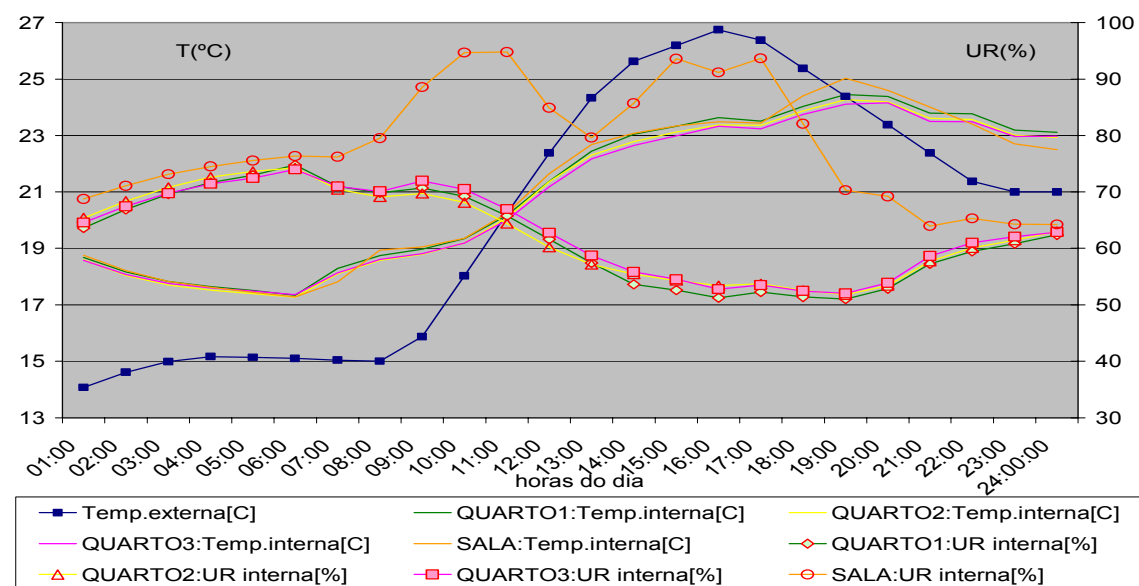


Figura 7. Tbs externa, temperaturas e umidades relativas internas do dia 01/08 em São Paulo.