



COMPARAÇÃO DE SOFTWARES DE ANÁLISE TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES  
ANÁLISE DE SENSITIVIDADE

van Bellen, H.M., Rauber, DM, Schuch, L.M.S., Narciso Filho, P.A.L.e  
Lamberts, R.

Grupo de Análise Térmica de Edificações  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Tel: 0482-319397 Fax.: 0482-341519 Caixa Postal 476  
Florianópolis, S.C. 88040-900 Brasil

RESUMO

Os programas computacionais de simulação térmica não são ferramentas que auxiliam no projeto de edificações. Apresentam-se análises comparativas entre quatro programas visando verificar a sensibilidade de cada um em relação a parâmetros específicos de projeto.

ABSTRACT

Thermal Simulation Softwares are tools developed to help building designers. A comparative sensitivity analysis for four different softwares is presented, seeking to verify 'the softwares' sensitivity to various project parameters, as well as a comparison of the results for the different softwares.

fazendo um levantamento do comportamento dos programas e sua sensibilidade para estas variações bem como comparando-se os resultados obtidos para os diferentes programas.

INTRODUÇÃO

É crescente a utilização de programas computacionais de simulação térmica no projeto de edificações. Esta utilização se faz necessária pois auxilia o projetista no aspecto econômico-energético permitindo a otimização da edificação a ser construída. Esta tendência de otimização tem levado ao surgimento de novos softwares que procuram simular o desempenho térmico de edificações.

Como descrito em trabalho de A. D. Irving [11] e T. J. Wiltshire e A. J. Wright [21] a validação destes programas para simulação térmica de edificações se torna cada vez mais importante por retratarem situações do mundo real. A simples existência de discrepâncias entre resultados de diferentes programas nos indica que um estudo dos mesmos se faz necessário.

Este trabalho faz parte de um projeto de comparação de softwares de simulação térmica de edificações que visa analisar os resultados de diferentes programas frente a um projeto padrão.

A simplificação da comparação dos resultados não leva necessariamente a conclusões sobre a precisão de programas mas sim indicam as diferenças entre os mesmos como descrito por T. J. Wiltshire e A. J. Wright [21].

Este artigo descreve os resultados obtidos com a variação de parâmetros específicos dentro deste projeto padrão.

Tabela 1 - Dados climáticos referentes a 17 de janeiro de 1991 em Florianópolis.

HORA	TEMP (°C)	UMID REL(%)	RAD SOL (Wh/m <sup>2</sup> )
01	21.5	85	0
02	21.2	87	0
03	20.9	88	0
04	20.6	90	0
05	20.0	95	3
06	19.7	96	5
07	19.2	98	119
08	20.0	95	355
09	21.3	87	550
10	22.7	79	794
11	23.9	74	950
12	24.7	70	1057
13	24.8	70	1089
14	25.1	69	1050
15	24.6	71	938
16	24.8	70	772
17	23.9	74	562
18	23.8	75	329
19	23.1	77	96
20	22.0	83	3
21	21.7	84	0
22	20.9	88	0
23	20.3	93	0
24	20.0	95	0

A análise de sensibilidade é um meio sistemático para quantificar o relacionamento

entre parâmetros do modelo e os resultados do modelo. Como descrito por A. D. Irving no momento atual são utilizadas três técnicas principais para se obter a sensibilidade de programas de simulação; *sensitividade diferencial, correlação parcial e aproximação do domínio de frequência*. O método mais utilizado é o da sensibilidade diferencial definida como derivação parcial de uma saída do programa em relação a uma entrada. Esta é uma função local definida para um certo domínio de valores de entrada e assume a linearidade do modelo.

Esta técnica foi a utilizada nestas simulações isto é procurou-se com a alteração dos parâmetros de entrada de projeto observar a variação obtida na saída de resultados.

Futuramente pretende-se comparar os resultados dos programas com medições reais.

Apresentam-se aqui os resultados de 4 diferentes softwares *Archipak* (versão 1.0) [5] desenvolvido por Steven Szokolay da Universidade de Queensland - Austrália, *TheDes* (versão 3.0) desenvolvido por Miguel Sattler do CIENTEC Porto Alegre-R.S., programa *Arquitrop* (versão 3.0)[3] desenvolvido por Maurício Roriz e Admir Basso da Universidade Federal de São Carlos e o programa *Casamo-Clim* [4] desenvolvido pelo Centro de Energia da Escola de Minas de Paris.

**Tabela 2 - Propriedades dos Materiais**

**PROJETO PADRÃO**

Cidade: Florianópolis-S.C.  
 Latitude: 27°35' Longitude: 48°35'  
 Vento dominante: NE  
 Data: 17 de Janeiro  
 Ventilação: N=0,1,10,17 (N = número de renovações por hora)  
 Ocupação: 0 pessoas  
 Janelas: abertas e fechadas (Conforme o nº de renovações de ar)

**Componentes**

$\alpha$ : absorvidade                      e: espessura (m)  
 $\rho$ : refletividade                      d: densidade (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\tau$ : transmissividade                 $\lambda$ : condutividade (W/m.K)  
 c: calor específico (J/kg.K)

**Cobertura**

-Telha de cimento amianto escurecida.  
 $e=0.006$  ;  $d=1600$  ;  $\lambda = 0.4$  ;  $c=1000$  ;  $\alpha = 0.8$   
 -Forro de madeira  
 $e=0.010$  ;  $d=600$  ;  $\lambda=0.14$  ;  $c=1200$

**Parede**

-Tijolo maciço aparente  
 $e=0.100$  ;  $d=1650$  ;  $\lambda=0.81$  ;  $c=800$  ;  $\alpha=0.6$

**Janela**

-Armação de madeira (20% da área de janela)  
 $d=600$  ;  $\lambda=0.14$  ;  $c=1200$   
 - Vidro  
 $c=0.003$  ;  $\alpha=0,07$  ;  $\tau=0.85$  ;  $\rho=0,08$

**Porta**

-Madeira  
 $c=0.020$  ;  $d=600$  ;  $\lambda=0.14$  ;  $c=1200$  ;  $\alpha=0,6$

**Piso**

-Concreto  
 $e= 0.050$  ;  $d=2000$  ;  $\lambda=1.13$  ;  $c=1000$  ;  $\alpha=0.5$

**Solo Argiloso**

$d=1500$  ;  $\lambda=1.1$  ;  $c=1000$   
 Albedo = 0.2

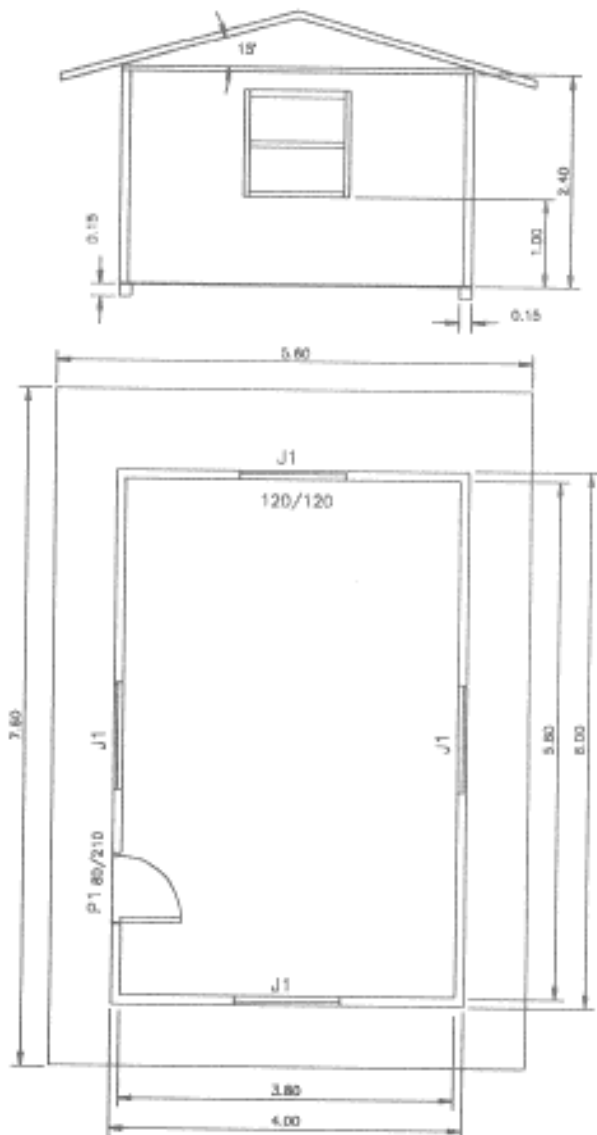


Figura 1-Planta Baixa Projeto Padrão.

## PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

O projeto padrão aqui utilizado consiste em uma casa popular térrea simulada para um dia real com alta radiação solar (17 de Janeiro de 1.991) em Florianópolis. A planta do projeto padrão é mostrada na figura 1 e os dados meteorológicos e propriedades dos materiais encontram-se nas tabelas 1 e 2.

Os dados de radiação solar foram obtidos em microvoltagem utilizando um sistema de aquisição de sinais HP 3497A, ligado a um micro PC-XT por uma placa de comunicação GB1B. A radiação direta é medida por um Kipp & Zonnen e, o valor corrigido utilizando fator desenvolvido por K. Dehne. os dados de temperatura e Umidade foram obtidos na estação meteorológica do aeroporto Hercílio Luz, Florianópolis.

Para todas as simulações feitas foi considerado este projeto padrão. Os parâmetros selecionados para verificação da sensibilidade de cada programa são;

- espessura das paredes
- absorvidade das paredes
- ventilação do ambiente
- área envidraçada nas fachadas
- contato ou não do piso com o solo
- inclinação do telhado

Para cada simulação dentro do projeto padrão foi selecionado um parâmetro por vez mantendo-se fixas outras características do projeto. Em todas as simulações a ventilação foi considerada como nula com exceção do caso específico da variação da ventilação. A seguir encontram-se os resultados para cada parâmetro dentro dos respectivos programas.

### ESPESSURA DE PAREDE

Foram selecionadas quatro espessuras para uma parede de concreto : 3 cm, 8 cm, 15 cm e 20 cm. A tabela 3 mostra os resultados obtidos para temperatura máxima e mínima em cada programa bem como os valores de maior ganho e maior perda através das paredes. Os valores de fluxo de calor para o programa Casamo-Clim não são mostrados pelo fato deste programa não apresentar em sua saída estes valores. Nesta tabela o termo  $Q_{\max}$  refere-se ao maior ganho através do elemento em estudo, no caso a parede, e o termo  $Q_{\min}$  refere-se a maior perda através deste elemento. O item tempo mostra o horário de ocorrência dos picos de temperatura e fluxo. A figura 2 mostra as curvas de temperaturas para cada programa em função da espessura de parede.

Para os programas a temperatura máxima ocorre para o projeto com menor espessura de parede. No programa Thedes entretanto a temperatura máxima alcançada ocorre para a casa com espessura de parede de

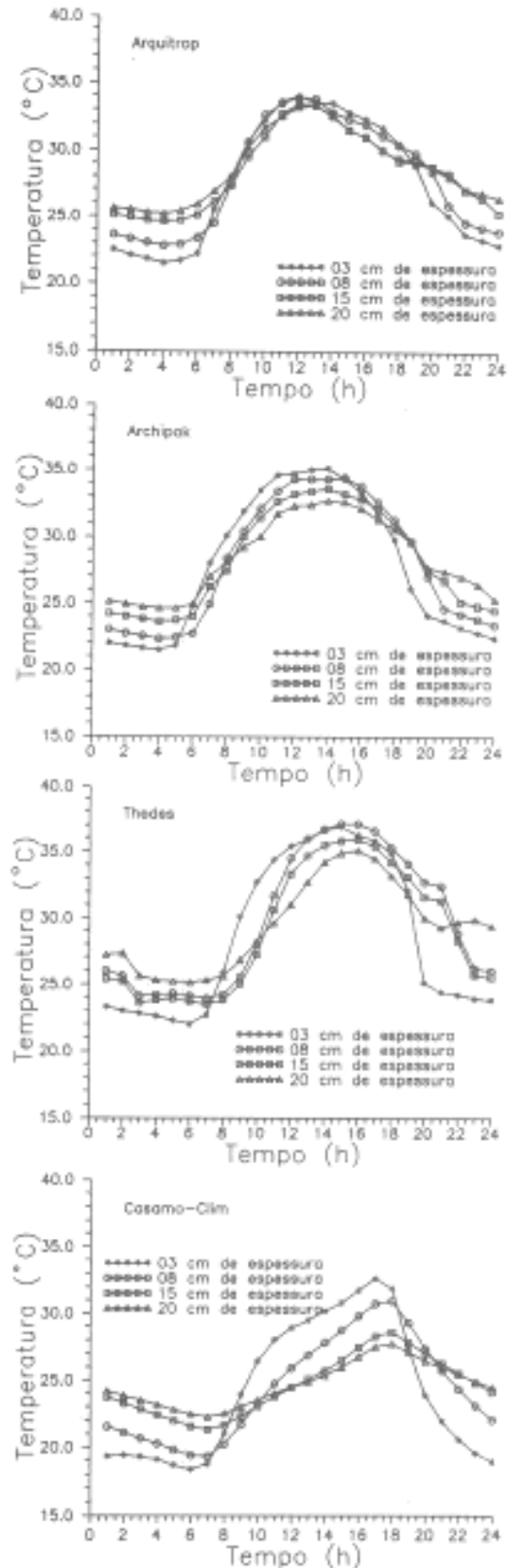


Figura 2 - Parâmetro Espessura de parede

8 cm embora esta temperatura máxima fique bem próxima da temperatura máxima do projeto com espessura de parede igual a 3 em. A temperatura mínima não ocorre para a casa com menor espessura embora isto ocorra para todos os outros programas. A variação da temperatura máxima entre os programas é de 5°C sendo o maior valor para o programa Thedes e o menor valor o do programa Casamo-clim. o tempo de ocorrência destas temperaturas varia de 13 às 17 horas. Já para os, valores de temperatura mínima a variação entre, os programas é de 4°C com ocorrência variando das 4 às 6 horas.

**Tabela 3-** Comparação entre Softwares-Variável. espessura de parede

	Tmax	tempo	Tmin	tempo	Qmax	tempo	Qmin	tempo
Thedes	31.0	15 h	22.0	4 h	3000	18 h	-800	6 h
Archipak	36.0	13 h	21.0	4 h	1000	15 h	-2000	7 h
Arquitrop	34.0	13 h	21.5	4 h	750	17 h	-1750	6 h
Casamo	32.6	17 h	18.4	6 h	---	---	---	---

Nota-se que com o aumento de espessura de parede a amplitude de variação de temperaturas decresce. Isto é mais facilmente observável nos programas Arquitrop e Casamo-clim.

Com relação aos fluxos de calor temos em termos quantitativos uma grande variação. o comportamento qualitativo das curvas de fluxo é semelhante, contudo os valores obtidos apresentam diferenças entre os quatro programas. Para fluxo máximo de calor (maior ganho) entre os projetos temos no programa Thedes o valor de 3000 W enquanto que nos programas Archipak e Arquitrop os valores são de 1000 e 750 W respectivamente. Para maior perde de calor esta mesma discrepância ocorre com valores variando de 2000 à 800 W. Os valores de ocorrência destes picos também varia entre 15 e 18 horas para maior ganho e 6 a 7 horas para a maior perda.

**ABSORTIVIDADE DE PAREDE**

Deseja-se com esta simulação verificar a sensibilidade dos programas para com o parâmetro cor de parede. Especificou-se como valores de absortividade para a parede na simulação os valores de 0.3, 0.6 e 0.9.

**Tabela 4-** Comparação entre softwares-Variável absortividade de parede

	Tmax	tempo	Tmin	tempo	Qmax	tempo	Qmin	tempo
Thedes	39.0	15 h	23.5	7 h	3500	20 h	-800	8 h
Archipak	34.0	13 h	22.0	4 h	600	18 h	-1100	9 h
Arquitrop	36.0	12 h	23.0	4 h	600	18 h	-1350	7 h
Casamo	33.0	18 h	19.0	7 h	---	---	---	---

A tabela 4 mostra os resultados, encontrados com estas simulações e a figura 3

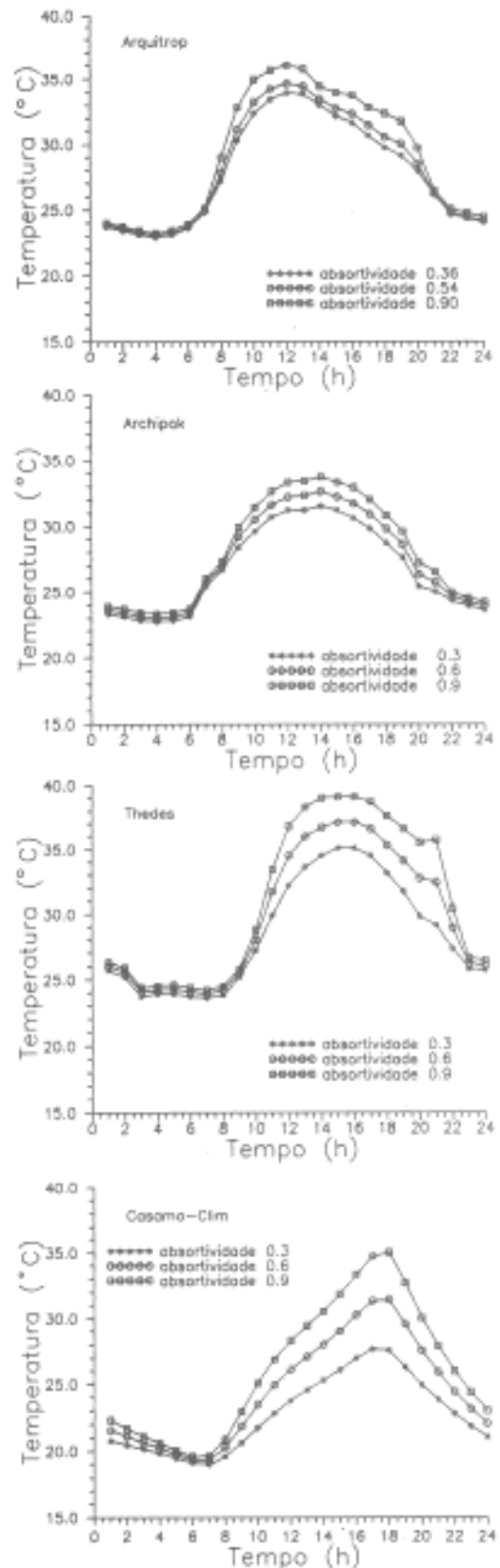


Figura 3 - Parametro Absortividade da parede

revela o comportamento das curvas de temperatura para cada programa em função da absorptividade.

Como o programa *Arquitrop* tem como entrada para a absorptividade das fachadas uma escala de números de 1 a 5 que correspondem a valores fixos de absorptividade optou-se neste programa para valores de absorptividade de, 0.36, 0.54 e 0.90.

Os resultados apresentados pelos programas com as diferentes absorptividades tem algumas características em comum. Nota-se que as máximas temperaturas ocorrem com os projetos de maior absorptividade de parede e que as temperaturas mínimas ocorrem ao contrário para os projetos de menor absorptividade. As diferenças de temperatura entre os projetos durante o período noturno são mínimas. As maiores diferenças de temperatura durante o período diurno para os diferentes projetos ocorrem para o programa *Thedes*. Os programas *Arquitrop*, *Archípak* e *Casama-Clim* tem comportamento semelhante excetuando-se pelo fato deste último apresentar seu ponto de máxima temperatura um pouco mais tarde.

O maior ganho de calor também ocorre para os projetos com maior absorptividade e a maior perda também ocorre para estes projetos. Isto indica que apesar da maior perda de calor pelas paredes, esta perda não é capaz de, reduzir a temperatura abaixo dos outros projetos. Outra característica observada foi a grande sensibilidade dos programas para com as fachadas orientadas para oeste. Isto pode ser observado com a verificação dos valores de fluxo de calor dos diferentes programas após o horário das 12 horas.

#### VENTILAÇÃO DO AMBIENTE

Nesta etapa foram feitas simulações para Determinar a variação dos resultados obtidos em cada programa em função do número de trocas de ar que ocorrem no ambiente. Foram estabelecidas as seguintes condições de projeto:

- 0 trocas de ar por hora
- 10 trocas de ar por hora.
- 15 trocas de ar por hora
- 30 trocas de ar por hora
- 50 trocas de ar por hora

O programa *Arquitrop* não permite nas simulações um número de trocas de ar superior a 30 por isto os resultados para o valor máximo de 50 trocas de ar por hora não foram mostrados. A Figura 4 mostra os resultados obtidos pelos programas com as simulações e a Figura 5 apresenta as respectivas curvas de temperatura.

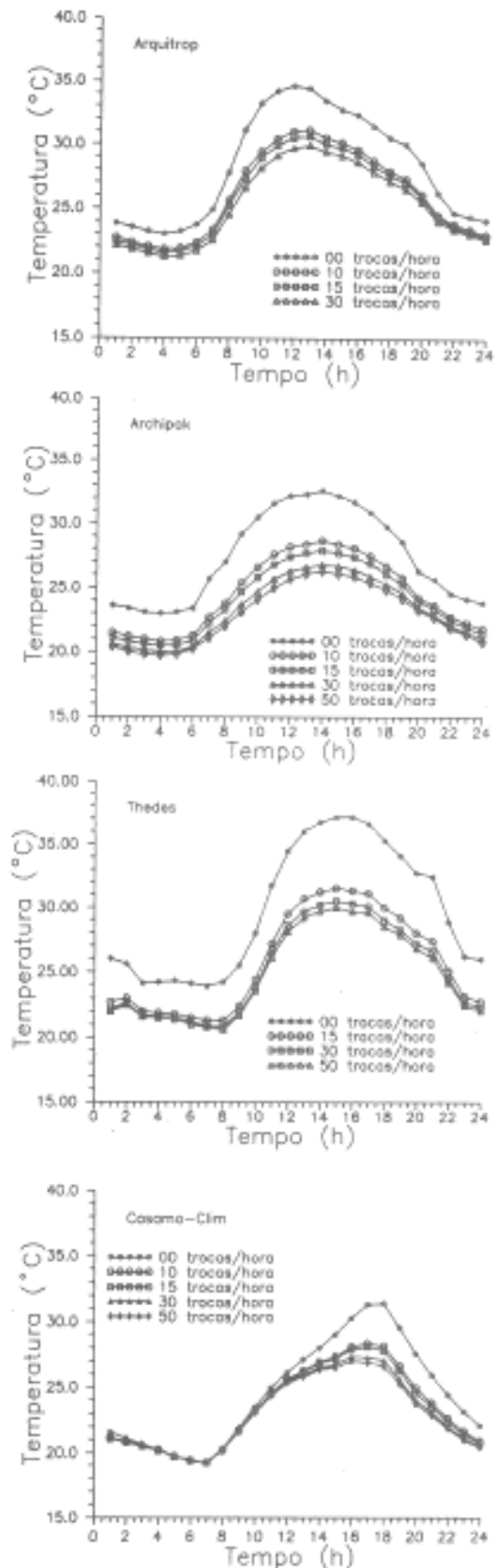


Figura 4 - Parametro Ventilacao

**Tabela 5-** Comparação entre softwares- Variável ventilação do ambiente

	Tmax	tempo	Tmin	tempo	Qmax	tempo	Qmin	tempo
Thedes	37.0	15 h	20.5	8 h	1200	14 h	-1200	7 h
Aróki	35.0	13 h	19.5	4 h	-200	22 h	-1200	11 h
Argzi	35.0	12 h	21.0	4 h	-200	23 h	-1400	9 h
Casamo	31.0	16 h	19.2	7 h	-----	-----	-----	-----

A variação da temperatura máxima para os diferentes programas fica em torno de 6 °C sendo a máxima temperatura a fornecida pelo programa Thedes e a mínima pelo programa Casamo-Clin. Todas estas temperaturas ocorrem, independente do programa, com os projetos sujeitos a ventilação nula. O mesmo acontece para as temperaturas mínimas que ocorrem todas para os projetos, com ventilação máxima. Para estas temperaturas (mínimas) a variação de um programa para o outro é menor; 2°C. O tempo de ocorrência para estas temperaturas varia de 4 às 8 horas e para os pontos de máximo das 13 às 18 horas.

Nota-se para todos os programas que com o aumento da taxa de ventilação a conseqüente redução de temperatura torna-se cada vez menor. Nos programas *Arquitrop* e *Casamo-Clim* a redução da temperatura interior após se atingir a taxa de 10 trocas de ar/hora é pequena.

Com relação aos fluxos de calor existem diferenças de valores entre os três programas e no programa Thedes existem períodos em que a ventilação fornece calor ao ambiente.

**ÁREA ENVIDRAÇADA NAS FACHADAS**

Nesta simulação foram pré-determinadas as áreas de superfície envidraçada dentro dos projetos. Executaram-se simulações do projeto padrão variando o percentual de superfície da janela dentro das fachadas. Os valores de entrada para a área envidraçada na superfície foram determinados em função da própria Área de fachada, isto é;

- 0 % de janela - projeto sem janela
- projeto padrão - janela normal
- 50% de janela
- 100% de janela

**Tabela 6-** Comparação entre softwares-Variável área envidraçada das Fachadas

	Tmax	tempo	Tmin	tempo	Qmax	tempo	Qmin	tempo
Thedes	35.0	13 h	21.0	4 h	5100	21 h	-800	7 h
Aróki	34.0	12 h	22.0	5 h	7000	12 h	-4500	6 h
Argzi	47.0	11 h	22.0	4 h	4200	11 h	-3200	4 h
Casamo	35.8	11 h	16.9	24 h	-----	-----	-----	-----

Este percentual correspondo a área total de fachadas, isto é; 100% de área de janela corresponde a 100% de área envidraçada para cada fachada. Os resultados obtidos para

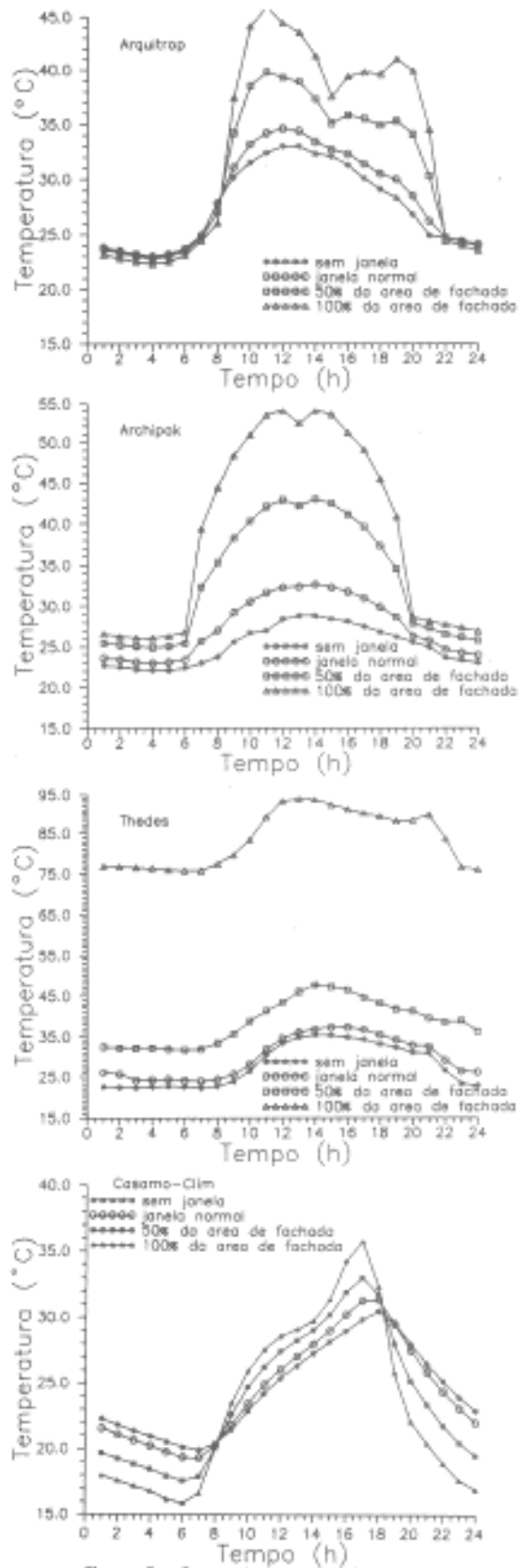


Figura 5 -Parametro Area envidraçada

estas simulações estão mostrados na tabela 6a a figura 5 fornece as curvas de temperatura. Os resultados destas simulações mostram alguns pontos discordantes entre os programas. Principalmente quanto ao fluxo de calor que atravessa as janelas temos valores diversos entre os programas. Quanto ao comportamento das curvas de fluxo em termos qualitativos temos uma boa semelhança entre o programa Archipak e Arquítrop. Nestes dois programas e também para o programa Thedes ocorre queda do fluxo de calor através das janelas no período das 12 às 14 horas. Outro ponto importante é o pico de fluxo de calor que ocorre para o programa Thedes no horário entre 21 e 23 horas. Para o projeto com 100% de área envidraçada, o programa Casamo-Clim fornece uma temperatura mínima inferior à temperatura mínima externa. Nota-se que a temperatura máxima atingida pelo programa pai a o projeto com 100% de área envidraçada é muito superior à fornecida pelos outros programas embora o maior ganho através das janelas para este programa seja inferior ao ganho de calor fornecido pelo programa Archipak.

Nos programas Arquítrop e Archipak ocorre uma leve queda de temperatura no horário das 11 às 13 horas. Esta queda talvez possa ser explicada, pela influência da cobertura na radiação que atravessa as janelas.

#### TIPO DE PISO

Todos os programas oferecem a opção de simulação de projetos com o piso em contato com o solo ou não. Em cima do projeto padrão foi levantado o comportamento das curvas de temperatura e fluxo de calor através do piso para os quatro programas. A tabela 7 e a figura 6 mostra os resultados obtidos para cada simulação.

Tabela 7 - Comparação entre softwares-variável piso

Programa	Tmax	Tempo	Tmin	tempo	Qmax	tempo	Qmin	tempo
Thedes	39,0	15 h	23,6	7 h	1000	15 h	-1000	4 h
Archipak	34,0	13 h	21,0	4 h	120	cte	-540	5 h
Arquitrop	35,5	12 h	21,0	4 h	199	cte	-201	cte
Casamo	31,4	18 h	19,5	7 h	...	...	...	...

Os resultados obtidos para estas simulações mostram algumas características de cada programa. Primeiramente observa-se que as temperaturas ambientais para cada projeto dentro dos diferentes programas não se alteram substancialmente para cada variação. Neste ponto os programas que apresentam a maior variação são o Archipak e o programa Thedes. a maior diferença de temperatura entre os dois projetos para o programa Archipak é de

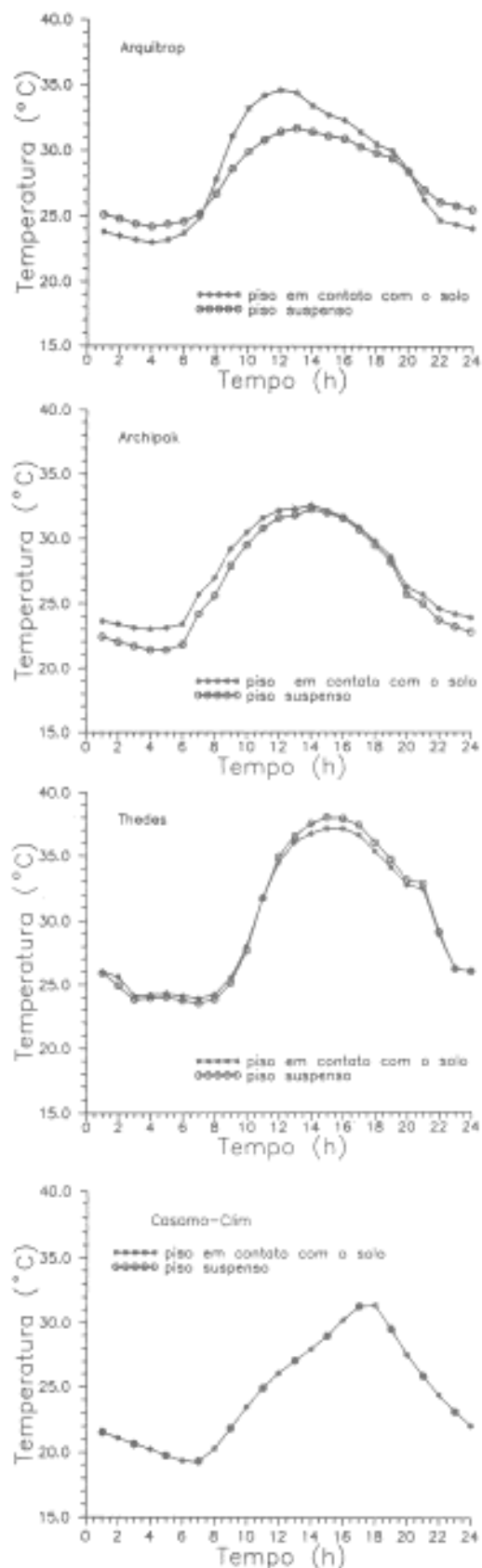


Figura 6 - Parametro Tipo de piso

2°C e no programa *Thedes* esta diferença fica em torno de 1°C.

Os programas *Archipak* e *Arquitrop* adotam para piso em contato com o solo perda de calor constante pelo mesmo. O programa *Thedes* para este caso, tem variação do fluxo de calor pelo solo durante o período. No caso de piso suspenso o programa *Arquitrop* considera uma perda de calor constante enquanto os outros programas tem curvas senoidais para descrever os fluxos de calor. Observa-se que, todos os programas à exceção do *Thedes* consideram o piso como perdendo calor durante todo o período. No programa *Thedes* existe ganho de calor para os projetos com piso em contato sem contato. Este ganho de calor ocorre das 0 às 11 horas e das 22 às 24 horas para o projetode piso em contato com o solo. Para o projeto com piso sem contato com o solo o período de ganho de calor fica restrito ao horário das 11 às 22 horas.

### INCLINAÇÃO DO TELHADO

Foram simuladas diferentes inclinações de telhado para o projeto padrão. As inclinações selecionadas são de 0°, 15°, 30° e 45°. O programa *Arquitrop* não permite a simulação com variação desta característica do telhado por isto os resultados deste programa não são apresentados nesta etapa. A tabela 8 mostra os resultados para os três programas. A figura 1 mostra o comportamento das curvas de temperatura para cada programa em função da inclinação do telhado.

**Tabela 8** - Comparação entre softwares-Variável inclinação do telhado

	Tmax	Tempo	Tmin	Tempo	Qmax	Tempo	Qmin	Tempo
Thedes	40,5	15 h	24,0	7 h	4200	11 h	700	6 h
Archipak	35,0	13 h	23,0	4 h	1500	12 h	800	4 h
Casamo-Clim	31,4	18 h	19,3	7 h				

Os resultados obtidos para esta simulação mostram que os programas *Archipak* e *Casamo-Clim* apresentam pouca alteração dos resultados quando da variação da inclinação do telhado. Já o programa *Thedes* tem grande sensibilidade para esta variável de projeto. Pode-se notar que a diferença de temperatura entre os quatro projetos são consideráveis.

### CONCLUSÃO

Como observado anteriormente a análise de sensibilidade traça uma relação entre os valores de entrada fornecido aos programas e as variações dos resultados de saída observados no programa. Os resultados encontrados não são suficientes para determinar a precisão do programas utilizados

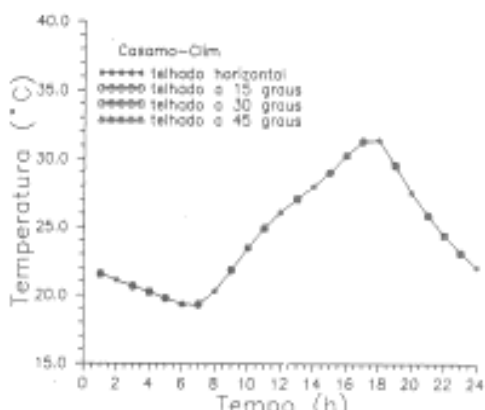
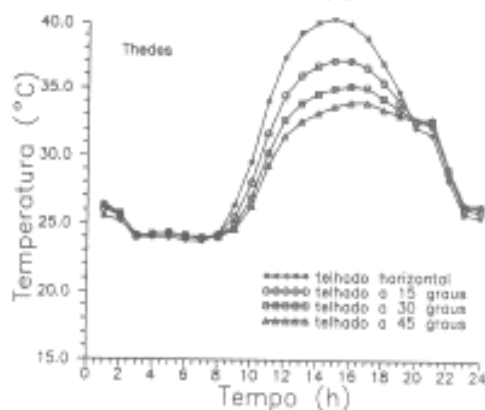
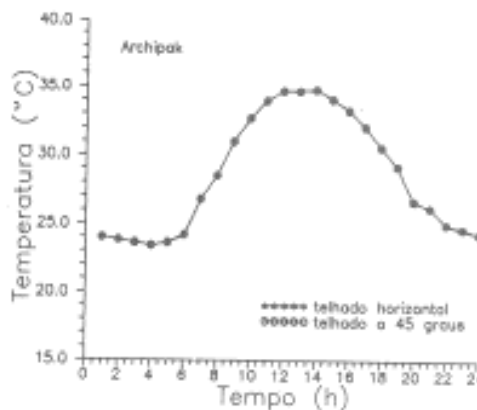


Figura 7 -Parâmetro Inclinação do telhado

mas levam a algumas conclusões sobre a sensibilidade das mesmas.

Quanto a espessura da parede todos os programas apresentam semelhante comportamento na simulação. Os programas *Arquitrop* e *Casamo-Clim* apresentam menores variações de temperatura com os diferentes projetos entretanto as variações de temperatura para os outros programas ficam próximas destes valores. Os programas *Thedes* e *Archipak* apresentam uma maior amplitude de variação da temperatura durante o período do que os outros programas.



A sensibilidade dos programas para o parâmetro absorvidade de parede é mais acentuada no programa *Thedes*. Enquanto no programa *Arquitrop* a variação do perfil de temperatura com os diferentes projetos é mínima no *Thedes* a diferença de temperatura entre o projeto com maior absorvidade e o projeto com menor chega a 4°C. Nos outros dois programas, *Casamo-Clim* e *Archipak*, a variação de temperatura entre estes dois projetos (maior e menor absorvidade) chega a 2°C.

Os programas mais sensíveis ao parâmetro ventilação do ambiente são o *Archipak* e o *Thedes*. Todos os quatro programas apresentam grande variação no perfil de temperatura quando da passagem de 0 trocas por hora para 10 trocas. Entretanto os programas *Casamo-Clim* e *Arquitrop* mostram pequena variação de temperatura com o acréscimo do número de trocas enquanto para os outros dois programas estas variações ainda são nítidas.

No parâmetro área envidraçada nota-se que o programa *Casamo-Clim* tem pouca variação dos resultados com a mudança de projetos. Os programas *Archipak* e *Thedes* tem grande sensibilidade em relação a este parâmetro. No programa *Arquitrop* uma maior variação do perfil de temperatura pode ser observada a partir de 50% de área de janela.

Todos os programas tem pouca sensibilidade quanto ao parâmetro piso. As maiores variações são observadas no programa *Archipak* principalmente no período noturno. O programa *Thedes* também apresenta descontinuidades tanto no período noturno quanto diurno.

Para o parâmetro inclinação de telhado observa-se que apenas o programa *Thedes* apresenta variações de resultados com a mudança de projetos. Esta variação ocorre no período diurno quando a cobertura está sujeita a incidência dos raios solares.

#### AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos autores dos programas que permitiram este trabalho e sua publicação.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. D Irving, Validation of Dynamic Thermal Models, *Energy and Buildings* 10(1988) 213-220.
- [2] T. J. Wiltshire and A. J. Wright, Advances in Building Energy Simulation in the U.K. - The Science and Engineering Research Council's Programme, *Energy and Buildings* 10(1988) 175-183
- [3] *Arquitrop* - Manual do usuário
- [4] *Casamo-Clim* - Manuel d'utilisation 1989
- [5] *Archipak* - User's