



## POTENCIAL DA VENTILAÇÃO INERCIAL PARA RESFRIAMENTO PASSIVO EM CLIMAS BRASILEIROS

**Pierre Hollmuller (1); Roberto Lamberts (2); Fernando S. Westphal (3); Martin M. Ordenes (4); Joyce C. Carlo (5)**

(1) Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)  
Université de Genève, Suíça  
(++41) 22 379 0649 – [www.unige.ch/cuepe](http://www.unige.ch/cuepe)

(2) Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE)  
Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina  
(48) 331-5185 – [www.labeee.ufsc.br](http://www.labeee.ufsc.br)

### RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar o potencial de duas técnicas de ventilação inercial (tubos enterrados e defasador térmico) para resfriamento passivo de edificações localizadas em climas brasileiros. Usando o EnergyPlus, uma edificação multifamiliar típica foi simulada em duas localidades (São Paulo e Florianópolis). As simulações consideram 5 alternativas de resfriamento passivo, combinando cenários distintos de ventilação direta controlada, tubos enterrados e defasador térmico. Os resultados mostram o potencial destas técnicas em ambientes não condicionados bem como usando o ar-condicionado.

### ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the potential of two inertial ventilation techniques (buried pipes and thermal phase-shifting) for passive cooling of buildings in Brazilian climates. Using EnergyPlus, a typical residential building was simulated in two locations (Sao Paulo and Florianopolis). Simulations consider 5 alternatives of passive cooling, combining different scenarios of controlled direct ventilation, buried pipes and thermal phase-shifting. Results show the potential of such techniques in free-floating as well as in air-conditioned buildings.

### 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, assim como na Europa, o ar condicionado tem sido comumente utilizado para compensar o excesso de calor nas edificações. Esta tendência crescente e rápida não só induz a um maior consumo como também aumenta a curva de carga nas horas de pico, tornando-se um problema tanto para as concessionárias de energia como para os proprietários de edificações.

Como alternativa para o ar-condicionado, um projeto adequado para a envoltória da edificação (uso de proteções solares e isolamento térmico, controle da área de vidro na fachada, adaptação da massa da estrutura, uso de iluminação natural) pode ajudar a manter a edificação na zona de conforto (ambientes não condicionados) ou a reduzir a carga de resfriamento (usando ar-condicionado).

Uma redução no uso ou mesmo a eliminação do ar-condicionado pode ser atingida usando estratégias passivas ou de baixo consumo para resfriamento. Duas dessas técnicas serão apresentadas neste trabalho. Ambas usam a inércia para armazenamento ativo da oscilação das temperaturas meteorológicas diurnas e noturnas, e podem ser classificadas como técnicas de ventilação inercial:

1) Tubos enterrados, que consiste em direcionar o ar exterior através do solo logo abaixo ou próximo à edificação, de forma a reduzir a oscilação diária e para evitar picos de temperatura durante o dia. Embora suas derivações tenham sido aplicadas através dos séculos, mais ou menos na forma tradicional, uma versão moderna se manifestou na Europa nas últimas décadas, através da construção e análise crítica de instalações piloto e de demonstração, bem como a produção de ferramentas de simulação e regras práticas para engenheiros. Em particular, foi mostrado que a redução da oscilação diária pode ser atingida com apenas 15-20 cm de terra em volta dos tubos, permitindo a existência de sistemas compactos e eficientes de baixo custo (HOLLMULLER, 2002).

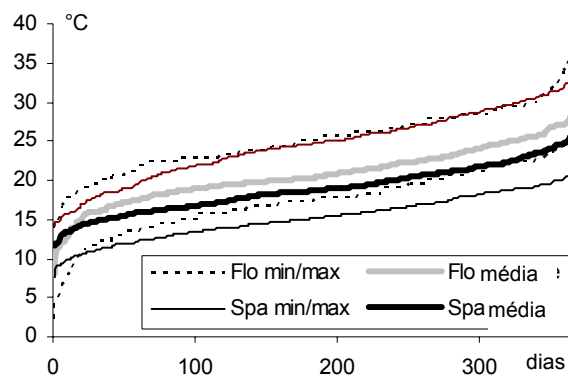
2) Defasador térmico, uma nova técnica relacionada à já descrita troca de calor entre ar e solo, mas baseada em descobertas recentes de um fenômeno físico simples, permitindo deslocar o pico de temperatura ao longo das horas quase sem queda deste, de forma que o pico da baixa temperatura no ambiente externo, durante a noite, ocorra no ambiente interno no meio do dia. O fluxo de ar é então dirigido através de um sistema de armazenamento tipo leito de rochas de dimensões bastante precisas e com melhoramentos nas trocas convectivas. Uma série destes protótipos tem sido desenvolvida na Universidade de Genebra (HOLLMULLER et al., 2005), sendo que o sistema mais promissor disponível consiste em um canal de seção quadrada de 1x1 m e 4,5 m de comprimento preenchido com placas de argila de 1,5 cm de diâmetro distanciadas em 2 mm. Um fluxo de ar de 500 m<sup>3</sup>/h permite que o sistema retarde em 12h o pico de temperatura diária, preservando 60% da amplitude original.

O objetivo deste estudo é avaliar o potencial destas técnicas de ventilação inercial para o resfriamento passivo em climas brasileiros.

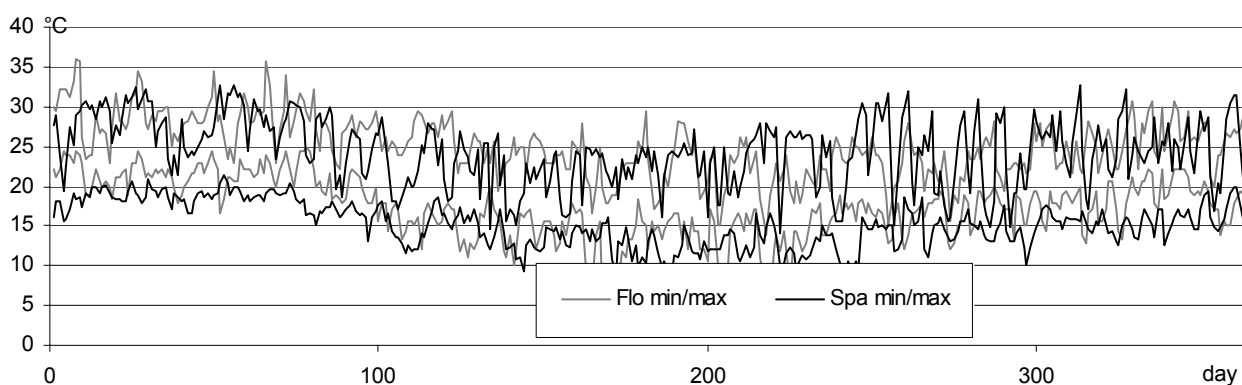
## **2. SISTEMAS SIMULADOS**

### **2.1 Climas**

Já que as técnicas anteriormente mencionadas dependem das médias diárias das temperaturas externas ou das mínimas para estar na zona de conforto, regiões de clima quente do Norte e Nordeste não serão avaliadas. As duas cidades enfocadas (Figura 1) foram São Paulo (17.000.000 hab, 23°S, 60km do litoral) e Florianópolis (300.000 hab, 27°S, no litoral), com máximas diárias semelhantes (cerca de 150 dias alcançando 26°C), mas amplitudes diárias distintas (mínima acima de 20°C durante menos de 10 dias em São Paulo contra quase 90 dias em Florianópolis). A Figura 1 apresenta as máximas, médias e mínimas ordenadas separadamente de forma a facilitar a visualização da frequência de ocorrência das temperaturas ao longo do ano. Sendo assim, as curvas devem ser lidas separadamente, sem informações sobre a amplitude diária. As amplitudes diárias podem ser visualizadas na Figura 2 para as duas cidades mencionadas. Para realizar as simulações foram utilizados arquivos climáticos TRY (*Test Reference Year*) de 1963 para Florianópolis e de 1954 para São Paulo (disponíveis em [www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadaclim.html](http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadaclim.html)).



**Figura 1 - Temperaturas diárias ordenadas (média e extremas) para os TRY São Paulo (Spa) e Florianópolis (Flo).**



**Figura 2 – Temperaturas máximas e mínimas diárias reais para os TRY de São Paulo (Spa) e Florianópolis (Flo).**

## 2.2 Edificação

O modelo considerado foi um protótipo de edificação residencial representativo para a classe média brasileira. A planta, número de andares, materiais e cargas internas de calor foram definidas de acordo com dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e do SINPHA (Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo). Este protótipo representa 15% dos apartamentos residenciais de classe média e apresenta um crescimento constante nas regiões (TAVARES, 2003).

O protótipo possui quatro andares, uma superfície de 15 x 20 m e quatro apartamentos por andar. Cada apartamento foi dividido em três zonas térmicas: uma sala (20 m<sup>2</sup>), dois quartos (24 m<sup>2</sup>) e uma área de serviços (33 m<sup>2</sup>, sem janelas). As principais características térmicas e construtivas são:

- Paredes externas (24 cm) são de blocos de concreto e revestimento de argamassa, com uma transmitância térmica de 2.6 W/m<sup>2</sup> K e capacidade térmica de 280 kJ/K.m<sup>2</sup>.
- Percentagem de janela e piso 9,5% (16,7% sem considerar a área de serviços).
- Infiltração de 1,5 trocas por hora. 24 horas durante todo o ano e para todos os casos.

- Proteção solar (brises horizontais e verticais), como estratégia adotada para reduzir o ganho de calor por radiação solar nas janelas. Para verificar a importância desta medida também foi considerada, para o caso base, uma alternativa sem brise solar.

### 2.3 Padrão de uso e temperatura de conforto

A ocupação de cada apartamento foi considerada desde o começo da tarde até a madrugada, sendo que o primeiro período de ocupação ocorre na sala (14 – 22h), seguido do período nos quartos (22 – 7h). Esses períodos e zonas foram utilizados para o cálculo de requerimentos energéticos no caso das zonas condicionadas.

Apesar do ar condicionado não ser, atualmente, um equipamento comum na classe média brasileira, sua difusão pode derivar em um incremento importante no consumo de energia elétrica. Alternativamente, o caso sem condicionamento considera o resfriamento e aquecimento do ambiente através de ventiladores. As temperaturas máximas e mínimas de *setpoint* (24 e 18°C) para o sistema de climatização, foram utilizadas exclusivamente nos períodos de ocupação.

### 2.4 Ventilação direta e inercial

Comparado com o caso base (só infiltração), os benefícios da ventilação direta e inercial foram testados com uma vazão de 5 ACH (trocas por hora), isto é 9.760 m<sup>3</sup>/h para todas as salas e quartos. Foram considerados os seguintes sistemas para um do solo de 1.9 W/K.m de condutividade térmica, 1.9 MJ/K.m<sup>3</sup> de capacidade térmica e de 1E-6 m<sup>2</sup>/s difusividade térmica:

1) Ventilação direta, com entrada de ar acionada se a temperatura externa for 1°C inferior à temperatura da zona em questão.

2) Tubos enterrados de 20 cm de diâmetro e 30 m de comprimento, com 50 cm de distância entre os centros dos tubos e uma vazão de 200 m<sup>3</sup>/h por tubo, permitindo um amortecimento razoável da amplitude diurna de temperatura, com valores extremos abaixo de 26° C (Figura 3, primeiro gráfico). De acordo com a geometria da edificação, os 50 tubos necessários para a vazão de 9,760 m<sup>3</sup>/h foram distribuídos em duas camadas, totalizando 25 x 0,5 = 12,5m de largura por 2 x 0,5 = 1 m de altura (375 m<sup>3</sup> de volume de armazenamento). Ao contrário da ventilação direta, o ventilador desse sistema deve funcionar sem interrupção. Faz-se necessário então um controle que permita a entrada na edificação do ar da ventilação ( $T_{vent} < T_{zona} - 1^{\circ}C$ ) ou o descarte no ambiente externo ( $T_{vent} < T_{zona} - 1^{\circ}C$ ).

3) *O defasador térmico*, baseado no protótipo descrito anteriormente, para um atraso de 12 horas (Figura 2, primeiro gráfico). Para satisfazer os requisitos de vazão de ventilação, o defasador precisa um volume de 90 m<sup>3</sup> (2 x 3 x 15 m) se comparado aos tubos enterrados,) o que representa um volume quatro vezes inferior ao do sistema de tubos enterrados. Possui os mesmos controles do sistema de tubos enterrados.

4 et 5) Finalmente, é considerado o uso da ventilação inercial (tubos ou defasador) e da ventilação direta, de modo complementar, utilizando a temperatura mínima entre o ambiente exterior e a saída do sistema (tubos ou defasador). Assim, a ventilação direta é acionada durante a noite, enquanto a ventilação proveniente dos tubos ou do defasador é utilizado durante o dia, com a mesma regulação dos dois sistemas precedentes.

A Tabela 1 apresenta a aplicação destas estratégias em diferentes casos. Também é conveniente considerar outros casos em que a ventilação direta é usada paralelamente à ventilação inercial. Isto fica

mais evidente para o caso do defasador (Shift e VentShift), em que o pico de resfriamento encontra-se disponível duas vezes por dia.

## 2.5 Simulação

As diferentes configurações elaboradas a partir das considerações anteriores encontram-se na Tabela 1. Elas foram simuladas no programa EnergyPlus, com a temperatura de saída da ventilação inercial (tubos enterrados ou defasador) estimada através de um modelo analítico que descreve as trocas convectivas entre o fluxo de ar e a matéria, assim como a difusão de calor dentro da mesma (HOLLMULLER, 2003).

**Tabela 1 - Lista das configurações simuladas (cada uma com e sem condicionamento artificial).**

Configuração	Descrição	Brise Ventilação		
		Fluxo <sup>1)</sup>	Temperatura <sup>2)</sup>	Contrôle <sup>3)</sup>
NoShade	infiltração, sem brise	não	0	
Base	infiltração	sim	0	
Vent	vent. direta	sim	9600 m <sup>3</sup> /h	$T_{vent} = T_{ext}$ $T_{vent} < T_{zona} - 1^{\circ}C$
Pipe	vent. por tubos	sim	9600 m <sup>3</sup> /h	$T_{vent} = T_{pipe}$ $T_{vent} < T_{zona} - 1^{\circ}C$
VentPipe	vent. direta / por tubos	sim	9600 m <sup>3</sup> /h	$T_{vent} = \text{Min}(T_{ext}, T_{pipe})$ $T_{vent} < T_{zona} - 1^{\circ}C$
Shift12h	vent. por defasador	sim	9600 m <sup>3</sup> /h	$T_{vent} = T_{shift}$ $T_{vent} < T_{zona} - 1^{\circ}C$
VentShift12h	vent. direta / por defasador	sim	9600 m <sup>3</sup> /h	$T_{vent} = \text{Min}(T_{ext}, T_{shift})$ $T_{vent} < T_{zona} - 1^{\circ}C$

1) A mais da ventilação, todos os casos tem infiltração continua de 1,5 ACH

2) Temperaturas :  $T_{ext}$  = exterior,  $T_{pipe}$  = tubos,  $T_{shift}$  = defasador,  $T_{vent}$  = ventilação,  $T_{zona}$  = zona

3) Controle: enquanto o ventilador dos tubos ou do defasador funcionar em contínuo, o controle decide se o ar da ventilação deve ser descartado ou não.

O programa EnergyPlus estima as cargas térmicas transferidas para o interior da edificação e as geradas no ambiente interno através do método do Balanço Térmico, para cada intervalo de cálculo. Estas informações são enviadas para os sistemas que compõem a edificação, o que inclui o sistema de climatização. O consumo de energia é estimado para toda a edificação e para os sistemas em separado, sendo possível então verificar o consumo proveniente dos ventiladores (*fan-coils*), do ar-condicionado, da iluminação, etc.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Comportamento de dia típico de verão

No modo sem condicionamento, a análise da média das temperaturas nos quartos em uma semana típica de verão em São Paulo (Figura 3) leva às seguintes conclusões:

- O primeiro gráfico da Figura 3 apresenta as propriedades de amortecimento e defasagem das temperaturas de entrada (temperatura externa) e de saída nos sistemas Buried Pipe e Phase-Shifter respectivamente.
- A importância da proteção solar (caso base). A temperatura mantém o mesmo comportamento, mas 1 - 2°C abaixo comparado com o caso sem proteção solar (“NoShade”). Os principais ganhos de calor por radiação acontecem nas horas mais quentes, às 17h. A temperatura nos edifícios permanece abaixo de 28°C enquanto no ambiente externo ela aumenta para 32°C.
- Ventilação noturna direta é uma boa estratégia que permite um ganho adicional de 2°C durante a noite. Esse ganho desaparece durante o dia devido à inércia térmica da edificação não ser suficiente para armazenar o resfriamento noturno por 24 h.
- O caso dos tubos enterrados (“Pipe”) não apresenta benefícios significativos se comparado à ventilação noturna direta. Devido ao amortecimento da amplitude da temperatura externa, a temperatura na edificação fica mais quente durante a noite. Em compensação, o ganho de resfriamento durante o dia é possível em períodos curtos (nas primeiras 96 horas da semana escolhida, quando a saída dos tubos ainda é mais fresca), mas desaparece em períodos mais longos (as seguintes 72h, em que a saída dos tubos atinge a temperatura dos ambientes internos).
- O uso da ventilação direta junto com os tubos enterrados (“VentPipe”) apresenta-se como uma alternativa um pouco melhor, mantendo os benefícios da ventilação noturna e permitindo o resfriamento diurno através dos tubos em certos períodos.
- A defasagem de 12 horas (“Shift12h”) apresenta resultados mais interessantes para o período diurno, mas precisa ser utilizada junto à ventilação direta (“VentiShift12h”) para aproveitar o pico de resfriamento noturno.

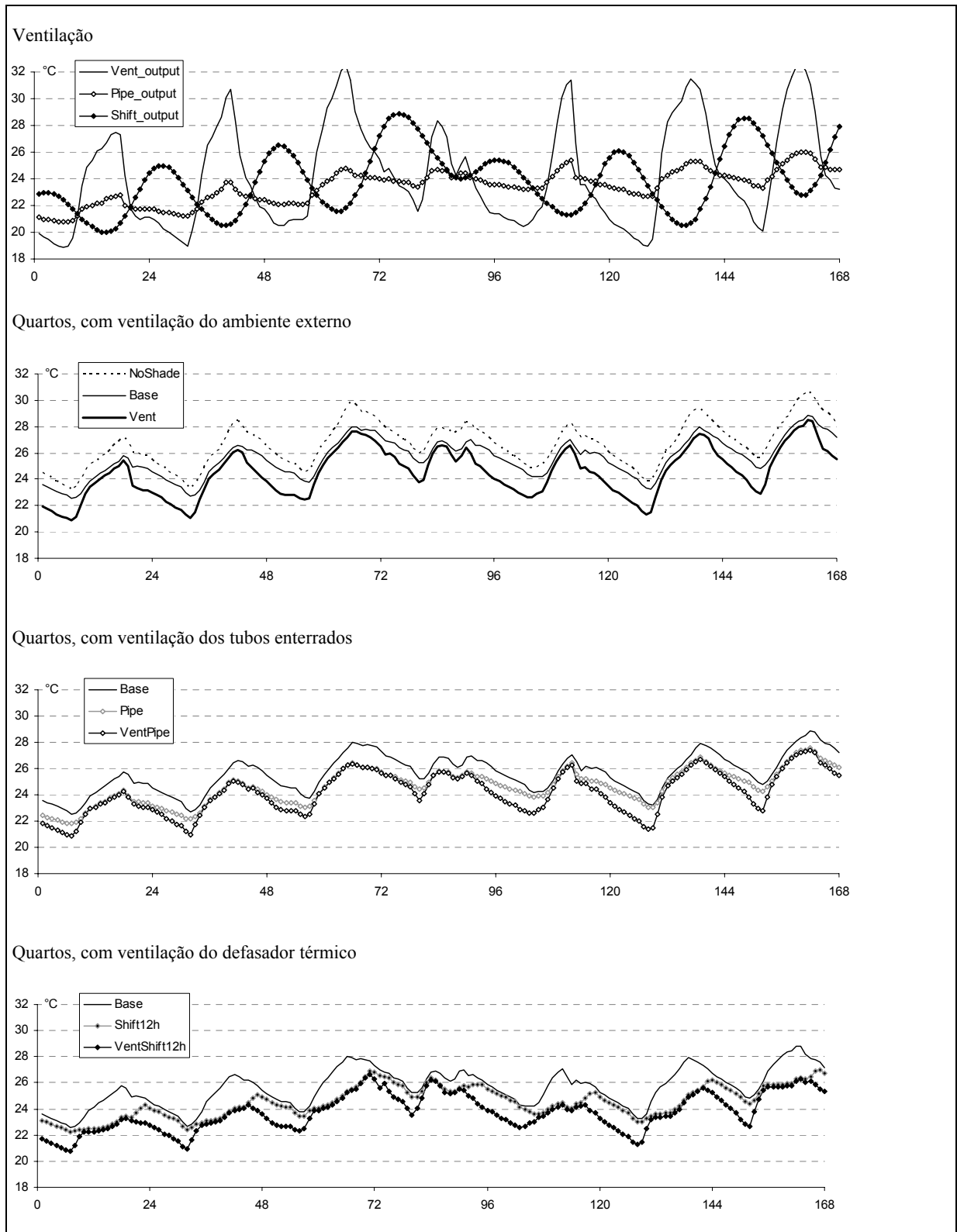


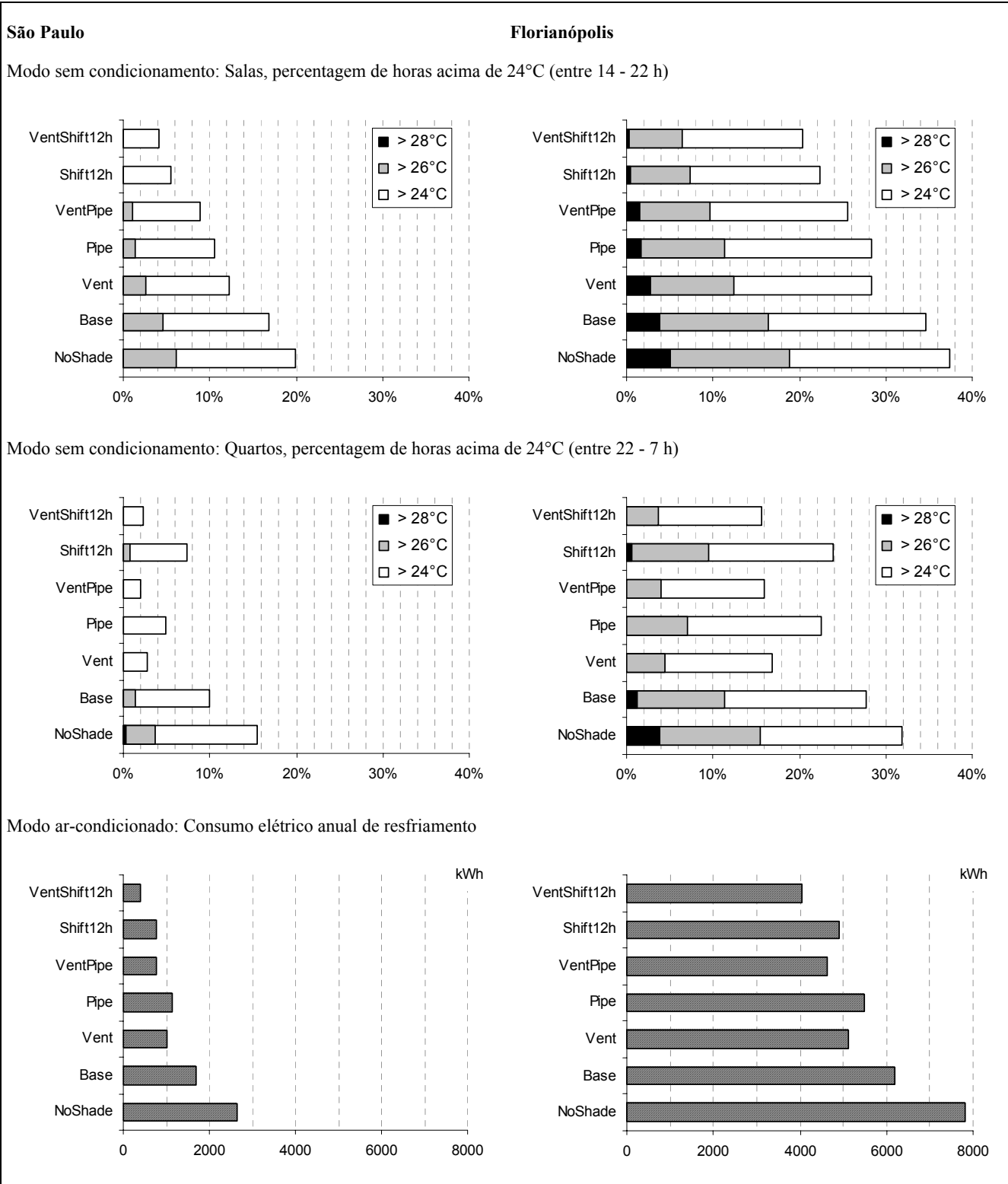
Figura 3: São Paulo, fluxo de ar e temp. nos quartos para as estratégias de ventilação (19–25/02)

### **3.2 Balanço anual, ambientes não condicionados**

A seguinte análise é feita a partir do balanço anual (Figura 4), em termos de percentagem de horas acima de 24, 26 e 28°C durante a ocupação das salas e quartos, em ambas cidades:

- Novamente, observa-se a importância das medidas de eficiência energética como proteção solar e ventilação noturna, principalmente para ambientes de ocupação noturna como os quartos.
- No caso de ocupação diurna (quartos), o uso dos tubos enterrados apresenta condições de temperatura piores que a ventilação noturna, e só se atinge um pequeno benefício no caso da ocupação à tarde (salas). Os tubos enterrados devem ser usados junto com a ventilação noturna para obter resultados mais favoráveis.
- O defasador térmico é uma alternativa mais interessante, permitindo manter a temperatura máxima anual durante a ocupação abaixo dos 26°C (São Paulo) e 28°C (Florianópolis). De acordo com o período de ocupação, o defasador deve ser acoplado à ventilação noturna.
- Por último, é importante destacar que os cuidados com o desempenho térmico da envolvente e o uso adequado da ventilação direta são medidas básicas que permitem manter as temperaturas abaixo dos 26°C (São Paulo) e dos 28°C (Florianópolis) durante o ano todo.





**Figura 4: Resultados das simulações para os modos com e sem ar-condicionado.**

### 3.3 Balanço Anual, modo ar-condicionado

Conclusões similares são válidas para o modo ar-condicionado, em que a defasagem de 12h junto com a ventilação direta permite economias da mesma ordem de magnitude que a ventilação noturna.

## 4. CONCLUSÕES

Foram elaboradas simulações para um protótipo residencial localizado em condições de climas moderados (São Paulo e Florianópolis), considerando cinco alternativas de resfriamento passivo, com e sem ar-condicionado. As principais conclusões são:

- Destacar a importância das medidas para melhorar o desempenho térmico da envolvente, em particular o uso de proteção solar.
- Observou-se o interessante potencial da ventilação noturna.
- Sistemas de ar-condicionado são desnecessários se temperaturas de até 26 ou 28°C são permitidas.
- Como medida adicional, a defasagem pode ser aproveitada para melhorar as condições térmicas durante a ocupação diurna, mas é necessário considerar que apresenta ganhos de calor durante a noite.

Alguns aspectos complementares que devem ser considerados são:

- Avaliação de consumo elétrico adicional para ventilação, que deve diminuir consideravelmente no caso do ar-condicionado.
- Situações de condensação e evaporação dentro dos tubos enterrados e defasadores.
- Aspectos construtivos como a distribuição de ar na edificação.
- Aspectos econômicos.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Comissão Suíça para Parceria de Pesquisa com Países em Desenvolvimento pelo apoio financeiro deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- HOLLMULLER P. (2002) *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*. PhD, Université de Genève.
- HOLLMULLER P. (2003) *Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers*. Int. Journal of Heat and Mass Transfer 46, 2003, pp. 4303-4317.
- HOLLMULLER P., LACHAL B. AND ZGRAGGEN J.M. (2005) *Déphasseur thermique diffusif*. Rapport final, CUEPE - Université de Genève.
- TAVARES, S. F. (2003) *Metodologia para análise energética do ciclo de vida de blocos cerâmicos vermelhos*. Documento para qualificação (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.