

# ESTRATÉGIAS PARA CONFORTO TÉRMICO COM CAPTAÇÃO SOLAR EM CASA-ENVOLTÓRIA NO (SUB)TRÓPICO ÚMIDO

**F. Horowitz** – flavio.horowitz@ufrgs.br  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física  
**G.B. de Azambuja** – arqgiovani@terra.com.br  
Hábilis Arquitetura Ltda.  
**A.F. Michels** – michels@if.ufrgs.br  
**R.S. Ribeiro** – spinato@if.ufrgs.br  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física

**Tema 5.** Energia Solar e Ambiente Construído (5.1 Uso da energia solar para produzir conforto térmico vinculado ao ambiente construído).

**Resumo.** *Com vistas ao conforto térmico a baixo consumo elétrico de edificações em regiões de clima tropical ou subtropical úmido, dificultado quando há pouca variação térmica no ciclo dia-noite, um sistema de casa-envoltória é apresentado, com elementos sintonizáveis, que utiliza diferenciais de temperatura e pressão nas direções norte-sul e abaixo-acima do espaço de vivência: captação solar na face norte por fachada vidro /persiana solar/ vidro e por solarium com cobertura retrátil; ventilação e resfriamento com admissão de ar voltada à mata nativa ao sul e com leito de rochas na forma de valas e dutos (convecção natural ou forçada); subteto direcionador e clarabóia. Em particular, a troca térmica pode ser intensificada em parte do subteto por superfície metálica, texturizada e recoberta para maior emissividade / absorvidade. No mesmo sentido, uma estimativa conservadora indica que um metro de vala preenchida com pedras irregulares e rugosas, com 0,15m de diâmetro médio, pode apresentar superfície de troca térmica equivalente a vinte metros de duto com paredes lisas, e a custos bem mais baixos. Como resultado prático, elementos projetados do sistema foram construídos e testes iniciais conduzidos, ainda ao nível individual, na atual etapa de desenvolvimento da casa-envoltória com captação solar. Seu esquema global de funcionamento é discutido, tanto para resfriamento de verão em sistema aberto, como para aquecimento de inverno em sistema fechado.*

**Palavras-chave:** Energia Solar, Conforto Térmico, Ambiente Construído, Casa-Envoltória, (Sub)Trópico Úmido.

## 1. INTRODUÇÃO

Muitas têm sido as abordagens para conservação de energia e uso da radiação solar, geralmente para o aquecimento de edificações em regiões de inverno rigoroso, ou com noites frias à baixa umidade (Courgey e Oliva, 2007). Para regiões de clima ameno, tropical ou subtropical, simulações detalhadas (Olsen e Chen, 2003; Hollmuller et al., 2006) e estudos de casos sobre o ambiente construído (Mascarenhas et al., 1988) têm sido relatados, visando atender às necessidades de conforto térmico com minimização do consumo elétrico por condicionadores de ar (Horowitz et al., 2005). Entretanto, avanços experimentais no clima (sub)tropical úmido são dificultados quando há pouca variação de temperatura no ciclo dia-noite.

Neste sentido, encontra-se em desenvolvimento uma casa experimental próxima ao Campus do Vale da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) do tipo *envelope house*, i.e. com envoltória de paredes externas, sobre-piso e subteto internos, que privilegia a ventilação e o resfriamento, sem descuidar dos curtos períodos de frio relativo, que busca também utilizar diferenciais de temperatura e pressão nas direções norte-sul e abaixo-acima do espaço de vivência.

A casa é alongada na direção leste-oeste, aproximadamente, tendo a leste e a oeste arborização caduca de crescimento rápido e porte médio, composta de variedades de Uva-do-Japão (*Hovenia dulcis*, de origem asiática) e de Canafistula (*Senna multijuga*, nativa brasileira). Ao sul, a mata nativa está preservada, com grande diversidade de espécies perenes, operando como barreira aos ventos de inverno predominantes.

Também para atenuação das variações sazonais, assim como das flutuações intermitentes em torno de cada média sazonal, está destinado um conjunto de fontes de energia, principalmente renováveis, complementadas por dispositivos e processamentos ajustáveis.

Dentre estes, o intuito deste trabalho está focado no sistema de climatização que integra as direções norte-sul e abaixo-acima do espaço de vivência da casa através de sua envoltória, elementos adaptativos, e com duas versões experimentais de captação solar na face norte.

## 2. CAPTAÇÃO SOLAR DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

Para fins estéticos e comparativos de performance, a face norte foi dividida em duas partes: (i) fachada com duas aberturas de vidro, intermediadas com persiana solar, e (ii) solarium ajustável, descritas a seguir.

## 2.1 Fachada vidro /persiana solar/ vidro

A persiana solar, mostrada na Fig.1, consiste de aletas metálicas com a face convexa recoberta com tinta refletiva, e a face côncava com tinta absorptiva – o que permite controle da quantidade de energia solar absorvida pela persiana. Adicionalmente, a angulação das aletas permite ajustar a intensidade do aquecimento por iluminação solar direta e quase-imediata do interior da casa *versus* o aquecimento indireto, com retardo inercial do sistema, via transmissão de calor da persiana ao ar passante, e deste às paredes de alvenaria da envoltória (ver esquema de funcionamento do sistema).

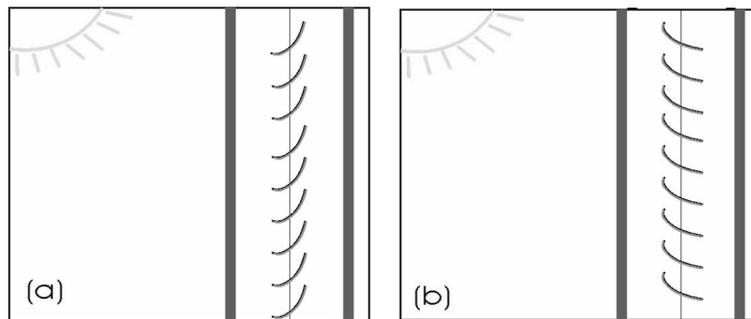


Figura 1– Conceito da Persiana Solar: (a) Modo Absorção; (b) Modo Reflexão, onde as barras verticais representam os vidros que envolvem a persiana. Estes são continuados pelas paredes da envoltória (não mostradas, ver Fig. 4); insolação e ar externos estão indicados à esquerda.

Esta estratégia pode ser vista como correspondente à clássica *Trombe Wall*, em que agora as próprias paredes da casa armazenam o calor, com a vantagem de que a captação solar é realizada pela estrutura leve e sintonizável da persiana.

## 2.2 Solarium com subteto e divisória retráteis.

Como variante de captação solar direta / indireta, o solarium apresenta janelas voltadas para norte na forma de *bay window*, e telhado transparente com elemento refletivo de forro retrátil, como pode ser visto na Fig.2. Desta forma, o ingresso da radiação solar pode ser controlado de forma simples.

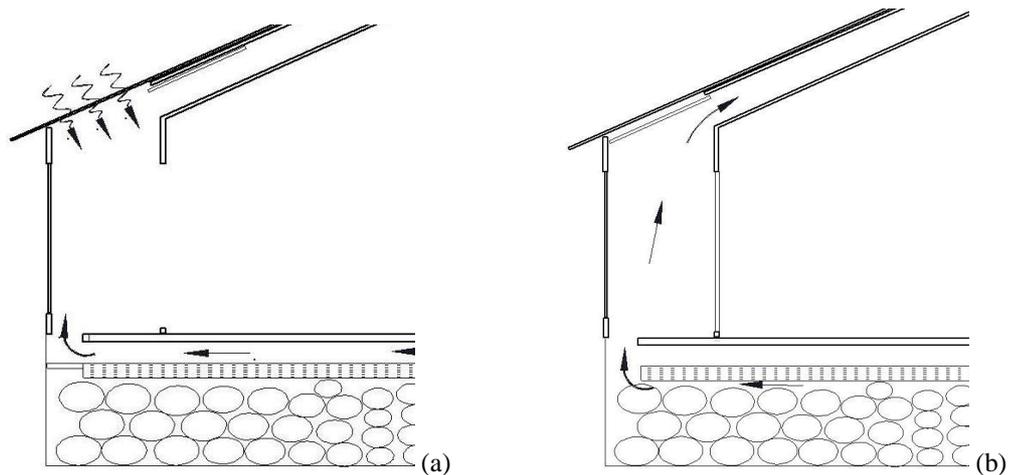


Figura 2 – Conceito do solarium: (a) Modo inverno; (b) Modo verão.

Em um dia típico de inverno, com todas interfaces transparentes desobstruídas à luz solar, há o ajuste adicional da divisória sanfonada entre o solarium e o restante da casa, o que permite ajustar o direcionamento da transmissão por convecção, do calor gerado no solarium, diretamente para o interior da casa (divisória aberta) ou apenas para a fachada sul via subteto (divisória fechada), ou de forma intermediária (divisória semi-aberta). Adicionalmente, o próprio solarium pode ser um ambiente de conforto em uma fria manhã de inverno.

Em um dia típico de verão, o ingresso da radiação solar é controlado nas janelas e pelo subteto móvel, ficando o solarium isolado do interior da casa. Nesta configuração, ela se assemelha à fachada vidro /persiana solar/ vidro, com o ar aquecido sendo conduzido pelo subteto à abertura da clarabóia (ver esquema de funcionamento do sistema).

### 3. COMPONENTES DE RESFRIAMENTO

#### 3.1 Ao sul: entrada de ar por convecção natural ou forçada

Com vistas à ventilação e resfriamento da casa em dias quentes, ar é admitido pela fachada sul, sombreada e voltada à mata nativa. A admissão pode ocorrer por convecção natural ou forçada, passando por valas ou dutos de concreto, respectivamente, que envolvem o leito de pedra descrito a seguir.

A convecção natural foi testada através de fluxo de fumaça, tendo mostrado bom funcionamento através das valas preenchidas com pedras. Para mais convecção ao atendimento de todo o sistema, de acordo com avaliações que serão realizadas após a conclusão da obra, ventilação forçada será adicionada ao sistema pela instalação de exaustores nos dutos, de modo a aproximar condições extremas de verão úmido à zona de conforto térmico humano.

#### 3.2 Abaixo: leito de pedras (*rock bed*)

Enquanto o leito de pedras é tradicionalmente empregado em países frios para armazenamento de calor (Wright e Andrejko, 1982), a proposta é de uso predominante para resfriamento em dia típico de verão, tendo em conta o calor específico e alta condutividade térmica da rocha granítica para material não-metálico, mostrada na Tab.1 para diferentes variedades, assim como sua grande disponibilidade na região.

Tabela 1. Propriedades térmicas do granito e da argila para temperatura entre 0°C e 50 °C, e umidade entre 0% e 30%.

MATERIAL	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	CALOR ESPECÍFICO (KJ Kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
Granito (Referência)	1,9 - 4,0 (Weast e Astle, 1980)	0,79 (Weast e Astle, 1980)
Argila [umidade] (Referência)	0,25 – 1,67 [ 0 - 30% p/ vol ] (Cook, 2008)	1,17 – 2,25 [ 2 - 25% p/ peso ] (Abu-Hamdeh, 2003)

No Estado do Rio Grande do Sul, houve o desenvolvimento pioneiro de uma moradia sobre um bloco com volume equivalente de rochas graníticas, tendo como princípio básico a moderação da temperatura pela grande inércia térmica (Costa, 1982). O bloco granítico é atravessado por dutos de ar com seção reta retangular, exceto pela superfície superior em forma de arco romano. A principal dificuldade em popularizar este procedimento, segundo o próprio autor, consiste na construção do bloco de paralelepípedos clivados e da extensão de dutos em seu interior, com os custos decorrentes.

No sentido de resolver esta dificuldade, na casa experimental – por sua envoltória com sobre-piso e paredes duplas com total de 0,30m de espessura em tijolos maciços, a custos mais acessíveis - o leito de pedras deixa de ser o único componente de significativa inércia térmica. Além disso, as pedras graníticas têm forma aleatória e são simplesmente dispostas em valos escavados no solo argiloso, ou seja, é também acessada a inércia térmica do solo já existente (note-se na Tab.1 que, embora com menor condutividade térmica que o granito, a argila seca possui maior calor específico, e ambas quantidades aumentam com seu teor de umidade).

Para melhor compreensão, na Fig.3 são ilustrados, em seção reta com altura de 1,5m e largura de 1,0m, três modelos de dutos de ar.

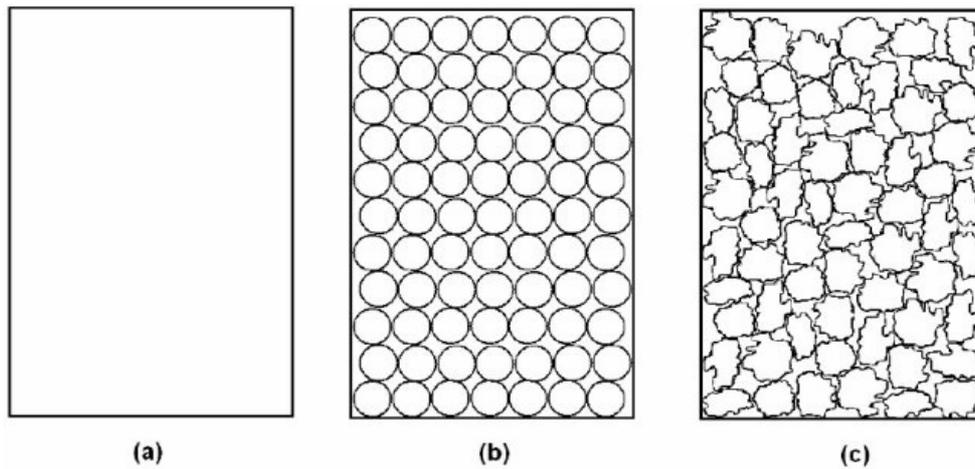


Figura 3 – Modelos de dutos de ar, em seção reta: (a) sem preenchimento; com preenchimento por: (b) esferas; (c) pedras irregulares.

Na Fig.3(a), a superfície de troca térmica está limitada às paredes, resultando em  $5\text{m}^2$  por metro de duto. Pelo modelo mostrado na Fig.3(b), supondo que as rochas são esferas lisas com diâmetro de  $0,15\text{m}$ : (i) em uma distribuição cúbica simples, haveria cerca de 440 esferas/m; (ii) em uma distribuição hexagonal compacta, pelo aumento da fração de empacotamento (Kittel, 1976), aprox. 620 esferas/m. Se supostas 500 esferas/m, a superfície de troca térmica passa a cerca de  $35\text{m}^2$  por metro de duto, sete vezes maior que em (a).

Consideradas, ainda, as irregularidades das pedras (em escala de cm) e suas rugosidades (milimétricas a sub-micrométricas), como na Fig.3(c), assim como o aumento do caminho médio de uma molécula de ar através do duto, pode-se estimar conservadoramente um fator de três vezes na superfície de troca térmica de (b) para (c), ou da ordem de vinte vezes de (a) para (c).

Um problema decorrente desta estratégia é o conseqüente aumento da perda de carga no duto, mas que foi minorado pelo aumento progressivo do tamanho das pedras e dos vazios entre elas, no sentido do movimento do ar em expansão gradativa. Este movimento através das valas com pedras em distribuição tipo (c), em convecção natural, foi verificado com êxito pelos testes de fumaça iniciais.

### 3.3 Acima: subteto, superfície de troca e clarabóia

Na região superior da casa, com isolamento térmico tipo R-19 do telhado, para evitar a formação de bolsões de ar quente, este é conduzido pela envoltória do subteto para a clarabóia. Esta, também empregada para iluminação das paredes internas ao sul, tem sua exaustão magnificada por dois fatores: (i) Sua saída de ar foi projetada com área efetiva superior à soma das áreas de entrada na região inferior da casa, o que permite aumentar a velocidade de convecção natural; e (ii) Via efeito Bernouille, na presença dos ventos da região.

Adicionalmente, parte do subteto foi confeccionada em folha de alumínio, pensada como superfície de troca com o ar passante na envoltória e de boa condutividade térmica. A superfície do alumínio interior à casa terá sua emissividade / absorvidade aumentada de 0,02 para valor próximo a 0,90 por texturização e recobrimento (*coating*) – atualmente, em estudos de laboratório – o que deverá auxiliar na retirada do calor em dia típico de verão, conforme mostrado na próxima seção.

## 4. ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE ENVOLTÓRIA

O esquema global de funcionamento, integrando os componentes de captação solar e resfriamento descritos acima, está ilustrado na Fig. 4.

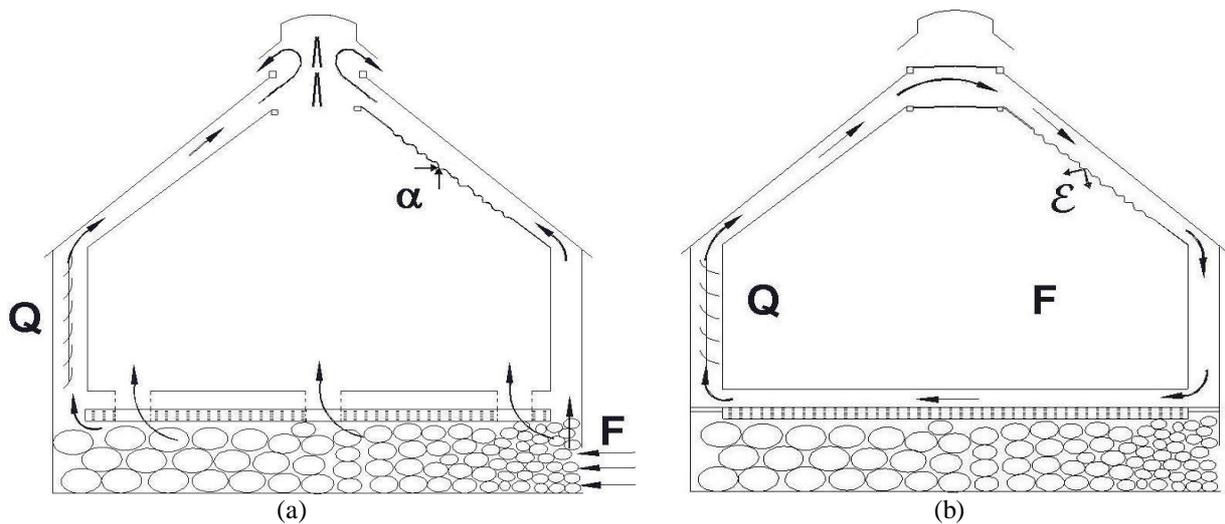


Figura 4 – Esquema simplificado do funcionamento do sistema de envoltória durante para modo: (a) Verão; (b) Inverno. **Q** e **F** representam a região quente (fachada norte) e a região fria, respectivamente. Junto à superfície metálica recoberta, de troca térmica intensificada, a absorvidade e a emissividade estão representadas para dias típicos de verão e de inverno.

Em dia típico de verão, a saída do ar quente – principalmente gerado na persiana solar (e solarium, não mostrado) ao norte – pela clarabóia produz uma região superior de pressão mais baixa, que induz a entrada de ar pelo sul, via dutos com pedras graníticas, e conseqüente resfriamento do interior da casa em sistema aberto.

Já no modo inverno, em sistema fechado, a clarabóia fica isolada do interior da casa, de maneira que o ar aquecido pela persiana solar (e solarium, não mostrado) é conduzido pela envoltória à parte sul do interior da casa, onde a superfície metálica recoberta intensifica a troca de calor, e daí ao canal do sobre-piso, que completa o ciclo de aquecimento por captação solar.

Além dos testes iniciais, realizados e em andamento, de performance individual dos elementos construídos, uma avaliação abrangente, em termos da aproximação das condições extremas à zona de conforto térmico humano, será buscada após a conclusão do sistema de envoltória integrado.

### Agradecimentos

Este trabalho, em sua fase embrionária, contou com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, e hoje o desenvolvimento da casa experimental é financiado pelo convênio da Financiadora de Estudos e Projetos com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - FINEP / SEBRAE.

### REFERÊNCIAS

- Abu-Hamdeh, N.H., 2003. Thermal properties of soils as affected by density and water content, *Biosystems Engineering*, vol. 86, n. 1, pp. 97-102.
- Cook, D.R., 2008, <http://www.newton.dep.anl.gov/askasci/env99/env140.htm>.
- Costa, E.C. da, 1982, *Arquitetura Ecológica*, Edgard Blucher.
- Courgey, S. et Oliva, J.P., 2007, *La Conception Bioclimatique*, Terre Vivante.
- Hollmuller, P., Carlo, J., Ordenes, M., Westphal, F., Lamberts, R., 2006, Potential of buried pipes systems and derived techniques for passive cooling of buildings in Brazilian climates, CUEPE, Université de Genève.
- Horowitz, F., Soave, P.A., Beyer, P.O., Krenzinger, A., Pereira, F.L., Rossini, E.G., 2005, Análise do efeito energético de diferentes materiais translúcidos em janelas. ELETROSUL, Fórum de Integração Energética: Energia sem Fronteiras, em CD-Rom (5f, il.).
- Kittel, C., 1976, *Introduction to Solid State Physics*, 5th ed., John Wiley & Sons.
- Mascarenhas, A., Nery, J.F., d'Alcântara, A., 1988, *Conservação de energia e conforto ambiental em edificações comerciais de Salvador*, Relatório COELBA/UFBA/PROCEL.
- Olsen, E.L., Chen, Q.Y., 2003, Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate, *Energy and Buildings*, vol. 36, n. 6, pp. 561-571.
- Weast, R.C. and Astle, M.J., 1980, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 61th ed., CRC Press.

Wright, D. and Andrejko, D.A., 1982, Passive Solar Architecture, Van Nostrand Reinhold.

**Abstract.** *With regard to thermal comfort with low consumption of electricity for buildings in humid tropical or subtropical regions, which is made difficult when there is small thermal variation in the day-night cycle, an envelope-house system is presented, with tunable elements, that uses temperature and pressure differentials directed north-south and below-above the living space: solar capture by glass /solar curtain/ glass façade and by solarium with retractile cover; ventilation and cooling with air admission from the native forest, south direction and with rock bed shaped as trenches and ducts (natural or forced convection); under-ceiling guide and clerestory. In particular, thermal exchange can be enhanced in part of the under-ceiling by a metallic surface, textured and coated for higher emissivity / absorptivity. In the same sense, a conservative estimation indicates that one meter of a trench filled with irregular and rough rocks, with average diameter of 0.15m, might present a thermal exchange surface equivalent to twenty meters of a duct with smooth walls, and at much lower costs. As practical results, projected elements of the system were constructed and initial test conducted, still at individual level, in the present development stage of the envelope house with solar capture. Its global operation scheme is discussed, in open system for summer cooling, as well as in closed system for winter heating.*

**Key words:** Solar Energy, Thermal Comfort, Built Environment, Envelope House, Humid (Sub)Tropic.