

ENSAIO SOBRE A UTILIZAÇÃO DA AUTOMAÇÃO DE ABERTURAS NA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

David José Martins (1); Sabrina Leal Rau (2); Simone Reckziegel (3); Anderson Priebe Ferrugem (4); Antonio César Silveira Baptista da Silva (5)

(1) Graduando, Bolsista do LabCEE/FAUrb/UFPeI, djmmaster@hotmail.com

(2) Graduanda, Bolsista do PET/FAUrb/UFPeI, sasarau@yahoo.com.br

(3) Graduanda, Bolsista do PET/FAUrb/UFPeI, simone.rec@hotmail.com

(4) MSc, Professor do Departamento de Informática (IFM/UFPeI), ferrugem@inf.ufrgs.br

(5) Dr, Professor do Departamento de Tecnologia da Construção (FAUrb/UFPeI), acsbs@ufpel.edu.br
Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto e Eficiência Energética, Rua Benjamin Constant, 1359, Pelotas-RS, 96010-020, Tel.: (53) 3284 5500

RESUMO

Este trabalho compara a simulação do desempenho térmico de uma edificação considerada fechada e estática com uma simulação na qual há o gerenciamento das potencialidades do projeto arquitetônico, tais como abertura e fechamento de janelas para ventilação, acionamento de dispositivos de sombreamento e acionamento de aberturas para ventilação do ático. A edificação foi simulada no Programa *Energy Plus* utilizando a interface do Programa *Design Builder* utilizando os recursos destes programas para acionar os dispositivos. Os resultados demonstram os diferentes desempenhos da edificação e a influência complexa de cada um dos dispositivos quando acionados. Os resultados levam ao questionamento se a obtenção do máximo desempenho térmico de uma edificação real não necessitaria de dispositivos automatizados e gerenciados por um sistema especialista, frente às limitações normais do usuário comum.

Palavras-chave: simulação computacional, ventilação natural, desempenho térmico, automação.

ABSTRACT

This paper compares the thermal performance simulation of a closed and static building with the simulation in which it has a management of the design potentialities such as opening and closing the windows for ventilation, operating shading devices and promoting the attic ventilation. The building was simulated in the *Energy Plus* building energy simulation software using the interface of the *Design Builder* software and their own resources to active the devices. The results demonstrate the different building performances and the complex influence of each one of the devices when active. The results bring into question whether, to attain the maximum thermal performance of a real building wouldn't be necessary automatized devices managed for an expert system, due to the normal limitations of the common users.

Keywords: computer simulation, natural ventilation, thermal performance, automatization.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é das atividades humanas, a que mais consome energia, considerando desde os processos de produção, transporte e manutenção até ao uso final da edificação. No Brasil, mais de 40% da energia elétrica é consumida só no uso das edificações (LAMBERTS *et al.*, 1997).

O uso racional da energia elétrica em edificações, sem dúvida, inicia pelo projeto arquitetônico, que orientado por princípios bioclimáticos, pode reduzir o uso de condicionamento artificial ou, até mesmo torná-lo desnecessário. Numa segunda etapa, passa pela especificação de equipamentos eficientes e verificação se estes podem ser substituídos, ou ter seu uso reduzido, por tecnologias alternativas de menor consumo energético. Finalmente, numa terceira etapa, cabe ao usuário o uso racional e correto dos recursos disponibilizados pelo projeto.

Avaliar o desempenho térmico de uma edificação é algo bastante complexo e por este motivo bastante discutido e questionado, tanto para avaliações por meio de medições (monitoramento) quanto por meio de simulações computacionais. No primeiro caso se discute se a edificação deve ou não estar ocupada. Se estiver desocupada, geralmente é mantida constantemente fechada e algumas vezes até vedada com fita adesiva, o que foge do uso habitual da mesma. Se estiver ocupada representa o uso real, porém este dependerá essencialmente do usuário e de sua “sensibilidade” ou “habilidade” para perceber e acionar os mecanismos (dispositivos de ventilação, sombreamento, etc) que podem em alguns projetos ser bastante complexos.

Pfafferott *et al.* (2007) verificou uma grande influência dos usuários no balanço de energia em edifícios de escritórios de baixo consumo energético com associação de condicionamento natural e artificial, devido ao manuseio de janelas e dispositivos de sombreamento.

Ou seja, se a edificação fosse um carro de fórmula 1 isso equivaleria a contratar um motorista comum como piloto de testes a fim de verificar o desempenho do carro e fazer o ajustes necessários. Isso leva a conclusão de que para se avaliar o potencial desempenho térmico de uma edificação seria necessário um especialista. Solução, na grande maioria das vezes, impraticável.

Operar os dispositivos no momento correto e oportuno, e que, algumas, vezes afetam mais o desempenho térmico e energético da edificação do que o próprio conforto pessoal naquele momento, como por exemplo, permitir ou não a ventilação do ático, exigem conhecimento e/ou ampla experiência do usuário. Além disso, as condições atmosféricas possuem um comportamento extremamente dinâmico, que exigiria do usuário uma dedicação especial para gerenciar tais dispositivos. Parte da solução pode estar na simulação computacional e na automação predial.

Por definição, toda simulação computacional representa uma simplificação da realidade em seus níveis de complexidade, que em função dos parâmetros adotados podem levar a resultados mais ou menos precisos. No entanto, as ferramentas computacionais representam mecanismos essenciais para avaliar um projeto ou uma edificação existente, permitindo contornar as dificuldades e as questões discutidas acima quanto à interferência do usuário num monitoramento. Algumas ferramentas, como é o caso do *Energy Plus* desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e um dos programas mais utilizados e confiáveis atualmente, e sua interface através do *Design Builder*, permite o acionamento de diversos dispositivos (janelas, cortinas, brises, etc) através de padrões de uso e valores de variáveis ambientais internas e externas. O uso destas possibilidades por um especialista pode aproximar os resultados de um desempenho potencial máximo da edificação, embora isso não seja assim tão fácil, pois esta flexibilidade enfrenta algumas limitações e a complexidade das variáveis e as diversas combinações possíveis podem confundir até mesmo um especialista. Mas o principal problema é que dificilmente o usuário irá obter na prática o mesmo desempenho obtido pelo especialista. A não ser que o especialista gerenciasse o edifício.

Um sistema inteligente de gerenciamento e automação, treinado a partir de simulações computacionais poderia obter na prática o desempenho simulado pelo especialista.

A maioria dos edifícios que busca eficiência energética apresenta algum tipo de automação do sistema de climatização e/ou iluminação. No entanto, Kolokotsa *et al.* (1999) ressalta que, não raro, o projeto arquitetônico e os sistemas de automação não são suficientes para alcançar o máximo desempenho energético do edifício, frente às interferências dos usuários. Com o intuito de minimizar a interferência do usuário alguns chegam ao limite de instalar janelas fixas, tornando o usuário refém de um ambiente climatizado artificialmente e o edifício dependente da energia elétrica para oferecer habitabilidade, resumindo sua eficiência energética ao uso de equipamentos eficientes.

Raros são os exemplos em que a automação serve de apoio à arquitetura bioclimática buscando gerenciar as potencialidades do projeto arquitetônico em ofertar conforto aos usuários por meios passivos. E um dos motivos pode ser a restrição dos usuários aos sistemas convencionais de automação.

Guillemin e Morel (2001) observaram que um bom sistema de automação passa despercebido, mas que o usuário costuma ficar bastante descontente quando a automação não o atende ou restringe sua liberdade. No modelo desenvolvido por Mahdavi e Pröglhöf (2008) para gerenciar a ventilação natural, o usuário é informado das decisões do sistema para atender às condições de conforto e salubridade do ar interno, mostrando que a interação entre usuário e automação pode servir de aprendizado nas duas direções. Mozer (1998) desenvolveu um sistema de automação que se adapta às necessidades particulares dos usuários, aprendendo com as intervenções destes, através de redes neurais.

Este trabalho compara a simulação do desempenho térmico de uma edificação considerada fechada e estática com uma simulação na qual há o gerenciamento das potencialidades do projeto arquitetônico, tais como abertura e fechamento de janelas para ventilação, acionamento de dispositivos de sombreamento e acionamento de aberturas para ventilação do ático, possibilitadas pelo *Energy Plus* e pelo *Design Builder*.

2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é avaliar através de simulações computacionais o potencial e as limitações da edificação para adaptar-se às condições externas de verão, utilizando o acionamento automatizado dos meios passivos de condicionamento oferecidos pelo projeto arquitetônico.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Definição da edificação a ser simulada;
2. Elaboração do modelo computacional da edificação, utilizando o programa *Energy Plus* versão 3.0, com interface do *Design Builder* versão 1.8;
3. Simulação da edificação;
4. Análise e comparação de desempenho e conforto térmico das simulações.

3.1. Definição da edificação

A escolha da edificação a ser simulada seguiu os seguintes critérios: (1) disponibilidade de informações detalhadas do projeto e dos materiais utilizados; (2) projeto com princípios bioclimáticos; (3) dados climáticos conhecidos e; (4) avaliação prévia de desempenho por medição.

Desta forma, optou-se pelo protótipo habitacional Alvorada, desenvolvido pelo NORIE-UFRGS, que preenchia todos os quesitos, tendo sido tema de dissertação de Morello (2005) e de tese de Grigoletti (2007).

O Protótipo Alvorada foi projetado para o município de Alvorada, localizado na região metropolitana de Porto Alegre – RS e construído no Campus da UFRGS e consiste em uma habitação unifamiliar de padrão popular que foge do contexto atual brasileiro. Composta de dois quartos, sala e cozinha conjugados, um banheiro e área de serviço, totaliza 48,5m² de área construída e pé-direito variável, conforme Figura 1.

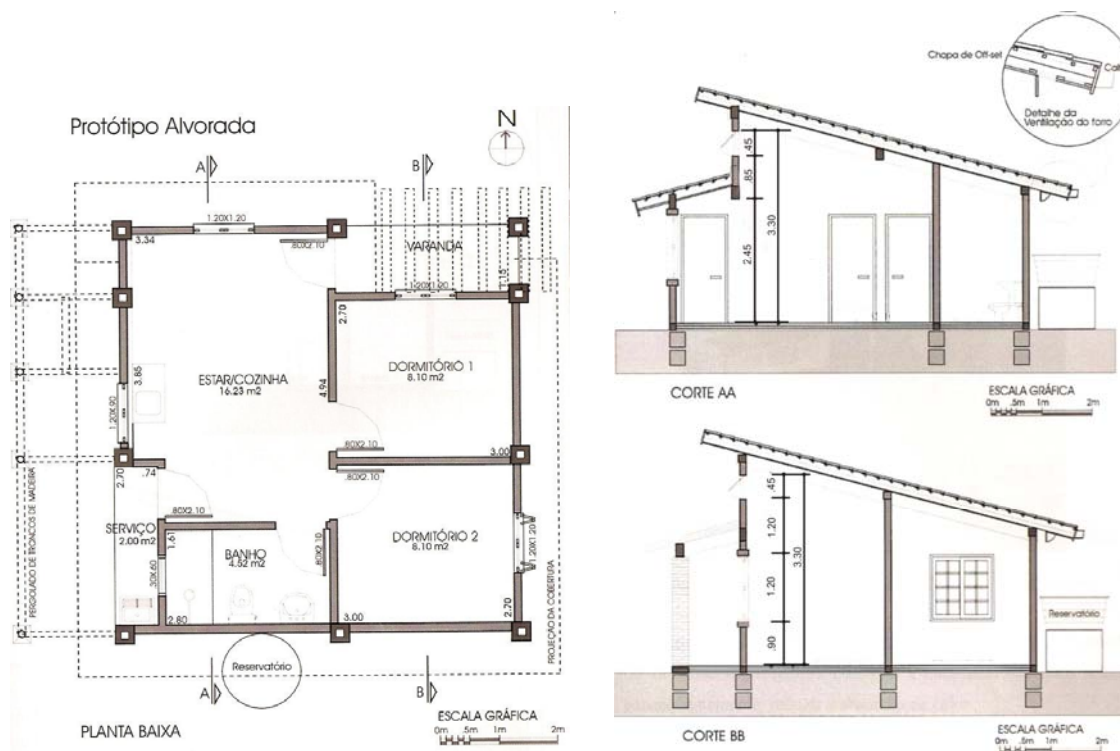


Figura 1- Planta Baixa e Cortes do Protótipo Alvorada.

Fonte: Morello (2005)

No entanto, infelizmente o arquivo EPW da cidade de Porto Alegre apresentou problemas e não rodou com o *Design Builder*, pois não apresentava algumas informações solicitadas pelo programa. Desta forma optou-se por utilizar o arquivo climático da cidade de Florianópolis (SC), também pertencente à zona bioclimática 3, conforme NBR 15220 (ABNT, 2005), para simular o protótipo Alvorada.

Ambas as cidades apresentam comportamento climático semelhante como pode ser observado na Figura 2. Tal como na capital gaúcha, a carta bioclimática de Florianópolis também apresenta distribuição das horas do ano na forma de uma mancha alongada entre as zonas de aquecimento artificial e ar

condicionado. A carta bioclimática de Porto Alegre aponta 88,5% de desconforto (25,9% para calor e 51,6% para frio) e 22,4% de conforto durante o ano, enquanto a de Florianópolis aponta 79,1% de desconforto (38,3% para calor e 40,7% para o frio) e 20,8% de conforto. A ventilação natural é a estratégia bioclimática de resfriamento mais indicada em ambos os climas, atendendo a 90% e 95% das situações de calor de Porto Alegre e Florianópolis, respectivamente.

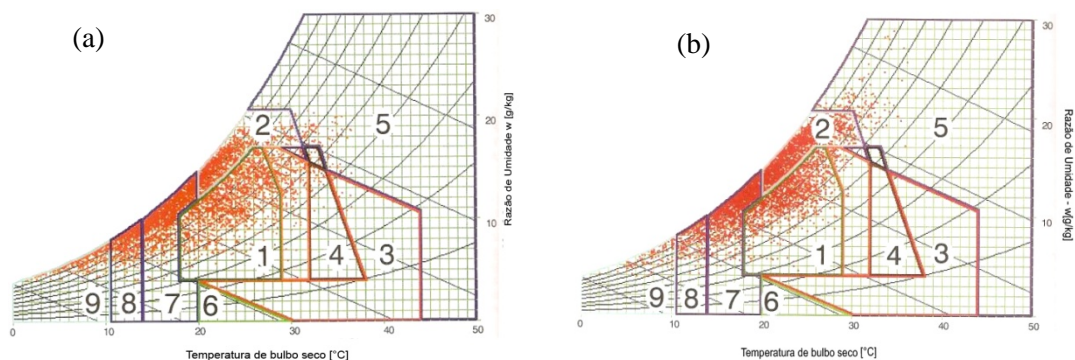


Figura 2- Carta bioclimática com as estratégias indicadas para (a) Porto Alegre e (b) Florianópolis.
Fonte: LAMBERT, R. *et al.* (2001)

Importante esclarecer que a intenção não é avaliar o desempenho da casa Alvorada, mas sim o manuseio automático das aberturas para que ela busque o melhor desempenho frente às variações das condições externas. A manutenção de mesma zona bioclimática é apenas para que a análise dos componentes não aconteça em ambiente climático tão estranho àquele condicionante do projeto arquitetônico.

Os componentes dessa edificação adotados na simulação podem ser divididos em:

a) *Componentes verticais externos:*

- portas de madeira de 80 x 2,10m;
- janelas de madeira com utilização de vidro simples, folhas de correr e veneziana externa;
- janela de madeira tipo maxim-ar com vidro simples na cozinha;
- paredes de alvenaria de tijolo cerâmico maciço de 5,5cm x 11cm x 23cm sendo que as paredes leste e norte tem 11cm e não possuem revestimento para aumentar os ganhos térmicos no inverno; a parede oeste tem 22cm até 1,10m de altura e 12cm acima de 1,10m de altura e possui revestimento externo para controle da incidência de calor; e a parede sul possui 13cm com revestimento externo para prevenção de patologias associadas à umidade (fachada que recebe menos insolação e sofre mais com as intempéries).

b) *Componentes verticais internos:*

- portas de 80cm x 2,10m;
- paredes 11 cm e possuem revestimento e azulejo apenas no banheiro e a meia altura da parede atrás da bancada da cozinha.

c) *Piso:* contrapiso de concreto magro revestidos com peças cerâmicas.

d) *Cobertura:* possui duas águas, beirais de 70cm e ático com abertura regulável.

- água orientada para sul: é maior e visa diminuir a intensidade de radiação solar incidente e favorecer uma futura instalação de coletores de água das chuvas. É formada por 5 camadas sendo elas telha cerâmica, colchão de ar, placa metálica reciclada de alumínio, colchão de ar e forro de cerne de cedrinho vermelho. A placa metálica (camada *offset*) visa criar uma barreira à radiação térmica e diminuir as transmissões de calor pela cobertura.

Quanto às soluções bioclimáticas, além da forma e componentes, a edificação conta com adequada orientação solar, ventilação cruzada e por diferença de altura, ventilação do ático e o sombreamento da edificação. A Figura 3 mostra o esquema de ventilação do ático e da diferença de altura das aberturas.

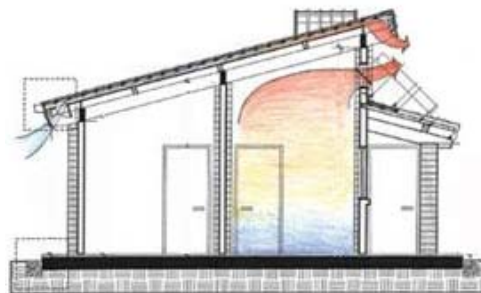


Figura 3- Ventilação pelo ático.
Fonte: Sattler (2007)

3.2. Elaboração do modelo computacional

Foi utilizado o programa *DesignBuilder* como interface do programa de simulação térmica *EnergyPlus*, pois permite uma rápida e fácil introdução de geometrias e oferece um conjunto de ferramentas que tornam mais simples a modelação de edifícios. O *Energy Plus* foi adotado porque opera de acordo com as normas ASHRAE 90.1 (1999) e ASHRAE 140 (2001). Para a simulação foram utilizados os mesmos materiais, componentes e aberturas reais, a mesma volumetria e orientação solar do projeto original. A simulação foi realizada sem fontes de calor interno, como usuários, lâmpadas e equipamentos, visto que o objetivo principal deste trabalho é analisar a operação das aberturas de modo a adaptar as condições internas frente às exigências externas, sendo as fontes internas de calor dependentes do padrão de uso da edificação e que neste momento são variáveis pouco relevantes para a análise em questão. Apesar de desocupada, o Voto Médio Previsto (PMV) de Fanger foi adotado como um dos parâmetros de análise das condições internas, como será comentado posteriormente. A residência foi modelada com 4 zonas térmicas como mostra a Figura 4.

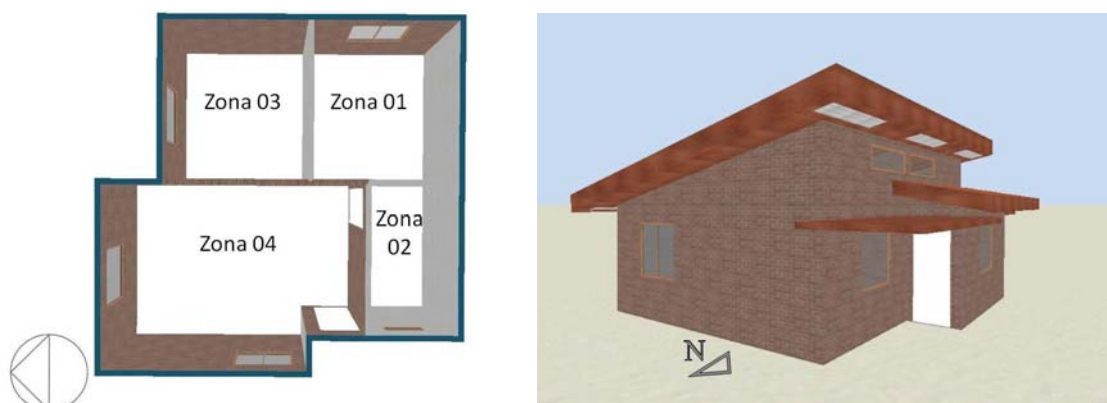


Figura 4- Planta baixa e perspectiva do modelo de simulação no *Design Builder*

As propriedades térmicas dos materiais utilizados na simulação estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos materiais utilizados na simulação

<i>Materiais e Revestimentos</i>	<i>Emissividade (m)</i>	<i>Densidade de massa aparente (kg/m³)</i>	<i>Condutividade térmica (W/m°C)</i>	<i>Calor específico (kJ/kg°C)</i>
Reboco	0,01	2000	0,95	1,00
Tijolo maciço	0,11	1800	0,62	0,84
Forro madeira pinho	0,006	600	0,15	1,34
Telha cerâmica	0,02	1800	1,00	0,92
Lâmina de alumínio polido	0,2	2700	0,84	0,88
Brita piso	0,05	1500	0,70	0,80
Contrapiso/Concreto magro	0,05	2000	0,95	1,00
Piso	0,02	2000	0,95	1,00
Vidro comum	0,925	2700	1,1	0,84

Fonte: MORELLO (2005) e GRIGOLETTI (2007)

Originalmente somente a janela leste do dormitório possuía veneziana e a janela do dormitório norte era do tipo maxim-ar. Nesta simulação foram colocadas venezianas nas janelas da sala e do quarto norte, sendo que neste último também se adotou janela de correr. A razão é que as venezianas permitem a ventilação noturna da edificação preservando a segurança, intimidade e bloqueio da iluminação externa e diminuem as perdas térmicas nas noites mais frias. Além disso, conforme destacou Morello (2005), havia a necessidade de colocação de pergolado na fachada oeste para diminuir a incidência solar durante os dias quentes. No modelo, o pergolado com vegetação foi simulado como uma cobertura leve de madeira, de baixa capacidade térmica e na cor branca, a fim de gerar sombra e pouco absorver a radiação solar, tentando assemelhar o comportamento da massa vegetal que está sobre o pergolado. A Figura 5 mostra a posição e as dimensões do pergolado reproduzidas no modelo.



Figura 5- Perspectiva da edificação com os pergolados cobertos por vegetação durante o verão.
Fonte: Sattler (2007)

3.3. Simulação da edificação

Para avaliar o desempenho das aberturas para resfriamento da edificação selecionou-se os meses de verão do arquivo climático. Dentre estes, foi selecionado o mês de fevereiro por ser o mês com máxima temperatura absoluta (34°C, 08/02), possuir o dia com a maior temperatura média (28°C, 23/02) e maior amplitude térmica (11,5°C, 13/02) da estação.

Num primeiro momento da simulação foram utilizadas três configurações para as aberturas, identificadas nos casos abaixo:

Caso 1- Aberturas Fechadas com Ático Fechado

Simulação da edificação nas condições de ambiente não ventilado, considerando infiltrações normais em função das opções do *Design Builder* quanto à qualidade de vedação das aberturas. Para a simulação foi considerado todas as aberturas fechadas inclusive do ático e com as portas internas abertas 100% durante todo tempo. Este caso serve para verificar o efeito da ventilação do ático e da edificação no desempenho da edificação quando comparado com os outros casos. Neste caso as venezianas permanecem abertas no período das 8h às 20h. Embora não seja o usual, este poderia ser o comportamento da edificação quando os usuários passam o dia fora.

Caso 2 – Aberturas Fechadas com Ático Aberto

Simulação da edificação nas mesmas condições do Caso 1, porém com a abertura do ático para verificar a eficiência desta alternativa bioclimática. Esta configuração permite verificar o efeito da ventilação do ático isoladamente.

Caso 3 – Aberturas Controladas

Simulação da edificação utilizando a automação das aberturas de uma forma geral para todo o mês de fevereiro, conforme algumas possibilidades oferecidas pelo *Design Builder*. A configuração do Caso 3 se deu a partir da análise das condições do ambiente externo e interno obtidas nos casos 1 e 2. Sendo assim, foi criada a seguinte configuração:

- ático aberto 100% durante todo mês;
- veneziana da janela leste aberta das 12h às 20h para evitar ganhos térmicos pela manhã;
- venezianas das janelas inferiores na orientação norte abertas das 8h às 20h, já que foi constatado que no mês de fevereiro os beirais e pergolado norte não permitem a entrada de radiação solar dentro da edificação;
- as janelas superiores na orientação norte foram consideradas abertas das 8h às 20h para melhor circulação do ar interno, que embora não possuam venezianas, são protegidas da radiação solar pela projeção do beiral.
- janela oeste da cozinha, do tipo maxim-ar, com vidro aberto das 8h às 20h para promover melhor circulação de ar, pois o pergolado desta fachada não permite a entrada de radiação solar e esta janela não possui veneziana;
- janela oeste do banheiro, do tipo basculante, constantemente aberta

- as portas internas permanecem abertas 100% durante todo o período e as portas externas permanecem fechadas durante todo período;
- os vidros das demais esquadrias foram controladas pela combinação do *schedule* da janela e do *setpoint* para temperatura interna (T_{sp}), em comparação com a temperatura interna (T_i) e temperatura externa (T_e) possibilitando a sua abertura e fechamento. A área de abertura do vidro pode ser definida em termos de percentual da área efetiva de abertura. Neste caso, para fins de simplificação, adotou-se que este percentual seria 100% (janela aberta) ou 0% (janela fechada), lembrando que as janelas são de correr, 100% da área efetiva de ventilação corresponde a 50% da área total. A janela vai estar aberta quando: $T_i > T_{sp}$ e $T_i > T_e$ e *schedule* permitir abertura. Definiu-se que o *schedule* dos vidros permite abertura em qualquer horário, não restringindo os parâmetros de temperatura. Desta forma, os vidros serão abertos conforme a relação entre temperatura interna, externa e o *setpoint*.

O *setpoint* da temperatura interna para abertura dos vidros foi definida em 25°C. O valor do *setpoint* foi definido a partir dos valores de PMV de Fanger calculados pelo programa. Para os resultados obtidos frente aos valores inseridos e calculados verificou-se que quando a temperatura interna estava em torno de 25°C o PMV calculado pelo *Energy Plus* tendia a zero. Os valores definidos no *Design Builder* foram vestimenta de 0,5 *clo* para o verão e atividade física leve de 70W/m². O demais dados são calculados pelo programa, com exceção da velocidade do ar. O manual do *Energy Plus* não faz referência de qual velocidade utiliza para o cálculo do PMV, no entanto para o cálculo da temperatura operativa utiliza o valor típico de 0,5 para a fração radiativa, o que corresponde a uma velocidade do ar menor do que 0,2 m/s (ENERGYPLUS, 2008). Utilizando o programa *Analysis 1.5*, desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), com velocidade do ar em 0,2m/s, o valor calculado do PMV se assemelhou com o calculado pelo *Energy Plus*. Como comentado anteriormente a edificação não está ocupada, mas o índice de conforto é avaliado para as condições citadas acima.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A Figura 6 apresenta o resultado das temperaturas internas de cada caso e do ambiente externo.

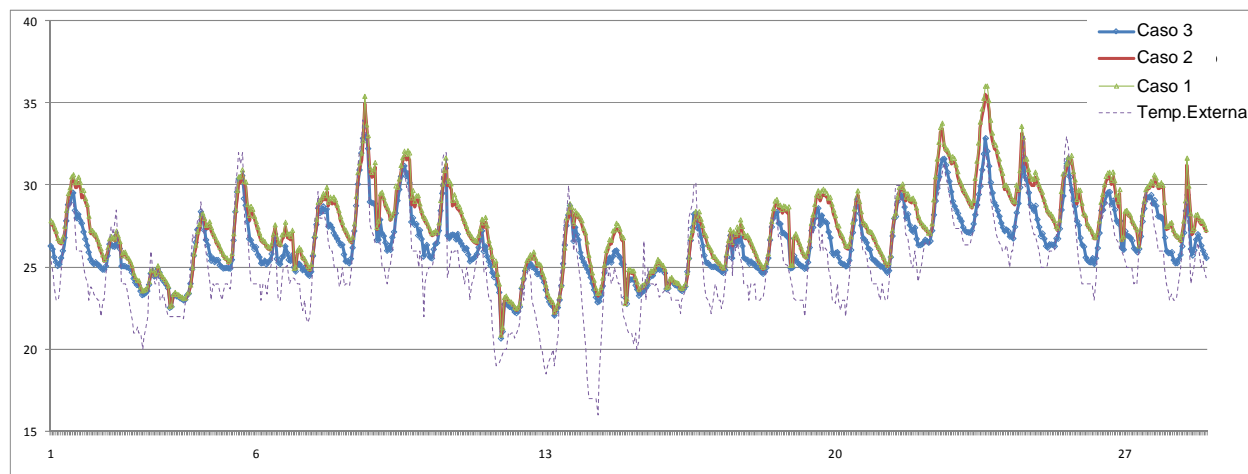


Figura 6- Temperatura interna do caso 1 (ático fechado), caso 2 (ático aberto), caso 3 (janelas e ático abertos) e temperatura externa

Pode-se perceber que as temperaturas dentro da edificação estão mais quentes do que o exterior devidos aos ganhos de calor pelo envelope da edificação. É perceptível também que o ambiente controlado (caso 3) mantém as temperaturas mais baixas do que os casos 1 e 2, como era de esperar, pois possibilita o resfriamento da edificação através da ventilação.

Por outro lado houve pouca variação da temperatura interna nos casos 1 e 2, respectivamente com o ático fechado e aberto, mantendo-se em ambos os vidros fechados. A causa pode estar na circulação de ar no ático mesmo com este fechado, como comentou Morello (2005).

O resultado destes casos no índice de conforto pode ser avaliado na Figura 7, considerando conforto quando o PMV encontra-se entre $\pm 0,8$ correspondendo a um Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD) de 20%, conforme Fanger (1970). A ventilação do ático incrementou o percentual de conforto em cerca de 3% em relação ao Caso 1, a ventilação da edificação incrementou o percentual de conforto cerca de 16%, atingindo conforto em 62,4% do mês analisado, contra 46,3% e 49,2%, respectivamente nos casos 1 e 2.

Pode-se notar também que a manutenção do ático aberto durante todo o tempo aumentou o percentual de desconforto por frio nos casos 2 e 3 em relação ao caso 1, quando era mantido constantemente fechado. Ou seja, a manutenção do ático constantemente fechado aumenta o percentual de desconforto por calor e a manutenção dele constantemente aberto aumenta o percentual de desconforto por frio. Isso indica que a ventilação do ático é uma das estratégias bioclimáticas que necessita de um controle dinâmico, mesmo neste exemplo no qual supostamente ocorra circulação no ático quando este está fechado.

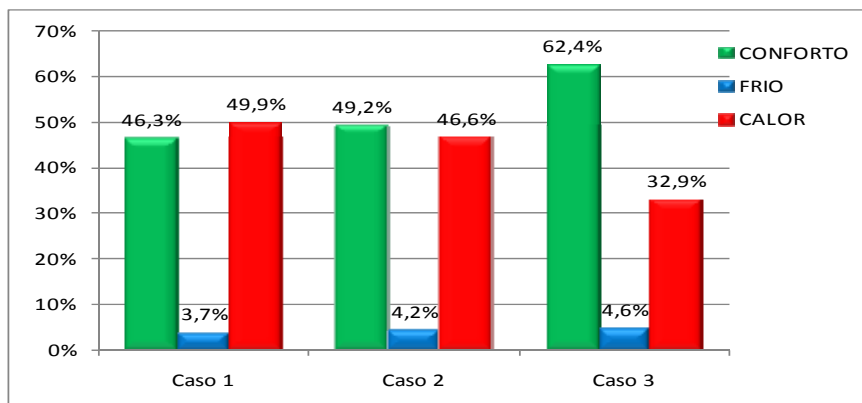


Figura 7- Percentual de conforto e desconforto por frio e calor para janelas fechadas com ático fechado (caso 1) e ático aberto (caso 2), janelas controladas com ático aberto (caso 3) e no mês de fevereiro.

Após a análise dos resultados obtidos pela simulação, tentou-se um *controle diferenciado* nos dias em que o *controle geral* do Caso 3 teve maiores dificuldades em restabelecer as condições de conforto.

Quanto às condições de frio que ocorreram nos dias 3, 4 e 11 a 14 não foi necessário propor um controle diferenciado, pois bastou elevar a resistência da vestimenta de 0,5 *clo* para 0,75 *clo*. No *Design Builder* é possível definir um valor de *clo* diferenciado para verão e inverno. Para o verão foi definido 0,5 *clo* e para o inverno 1 *clo*, porém mantém constante o valor para toda a estação, mesmo que ocorra uma condição de frio no verão ou de calor no inverno. Com a alteração do valor da resistência da vestimenta foi restabelecido o nível de conforto, como pode ser observado a Figura 8.

Outra alteração de controle ocorreu no dia 9, no qual a temperatura externa atingiu o valor máximo absoluto. Para este dia a *schedule* das venezianas foi alterado de modo que estas permanecessem fechadas a partir das 14h, período de maior desconforto por calor (Figura 9). A mesma configuração foi definida para o dia 23, caracterizado por ser o dia de maior temperatura média da estação. Porém em ambos os casos não foi possível restabelecer as condições de conforto, com estas intervenções. No caso do dia 23, a causa provavelmente seja a seqüência de dias de temperatura elevada, com noites bastante quentes, de modo que nem mesmo a manutenção das janelas superiores abertas durante a madrugada surtiu efeito. No dia 9, embora não tenha sido possível restabelecer as condições de conforto com estratégia adotada, foi possível reduzir o valor do PMV, como se pode observar na Figura 9. Cabe lembrar que o PMV calculado pelo *Energy Plus* considera a condição de ar parado (velocidade inferior a 0,2 m/s) o que na prática seria diferente quando a edificação encontra-se ventilada. Essa questão poderia também poderia justificar a pouca variação do PMV quando as janelas superiores foram mantidas abertas durante a madrugada.

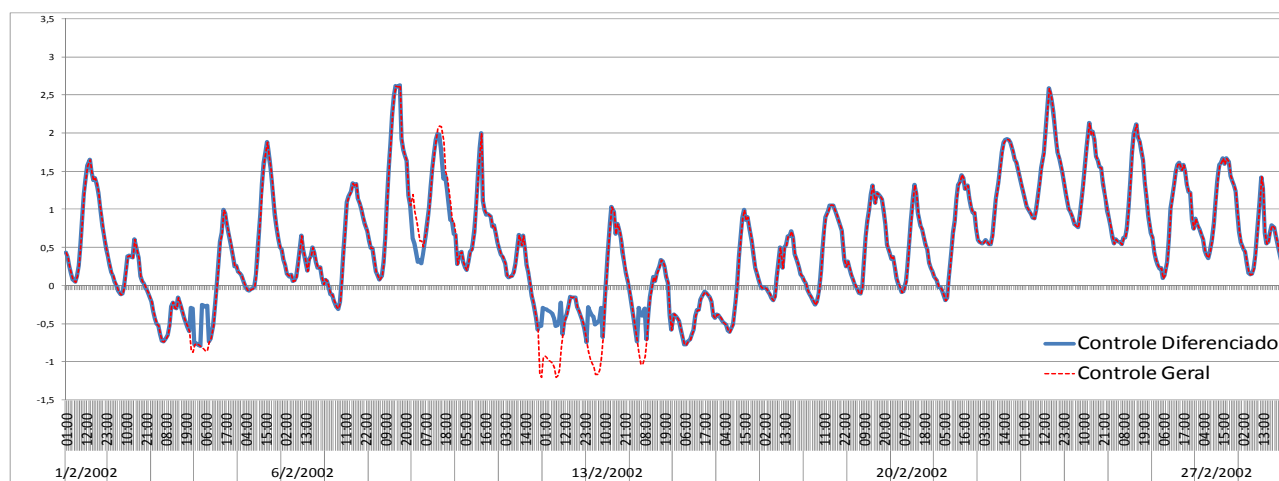


Figura 8- Comparação do PMV obtido através do *controle geral* e do *controle diferenciado* para fevereiro

Durante a aplicação desta estratégia, pôde-se observar que o fechamento das venezianas para se evitar os ganhos de calor por radiação em alguns horários do dia 9 não resultou em melhora do PMV, pois ocasionaram uma redução da vazão de ar, sendo que, com exceção da janela do dormitório leste, as demais aberturas já estavam sendo sombreadas pelos beirais e pergolados projetados. Por esta combinação de variáveis o fechamento das venezianas não surtiu o efeito desejado. Uma alternativa para contornar esta questão poderia ser acionar a veneziana em função da quantidade de radiação recebida na janela de modo a diminuir o tempo de redução da vazão de ar, como possibilitado pelo *Design Builder*.

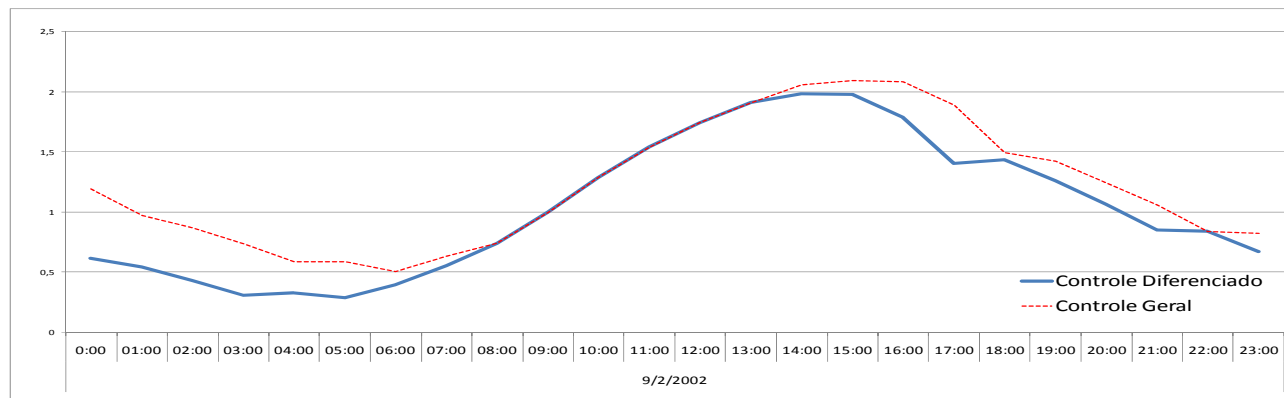


Figura 9- Comparação do PMV obtido através do *controle geral* e do *controle diferenciado* para o dia 9/02

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos foi possível verificar os equívocos de se avaliar o desempenho de uma edificação considerando-a fechada e estática, assim como a parcela de algumas estratégias no desempenho térmico e a necessidade de um controle mais dinâmico diante das variações das condições externas. O questionamento da necessidade de uma constante adaptação da edificação às condições internas e externas se confirma à medida que os resultados demonstram que os dispositivos projetados podem ajudar ou prejudicar o desempenho da edificação, quando não consoantes com a variabilidade do ambiente climático, mesmo num mês tipicamente de verão, como foi o caso.

Tanto a ventilação ou não do ático quanto à abertura e fechamento de venezianas apresentaram necessidade de funcionamento dinâmico. Enquanto o ático mantido fechado aumenta o percentual de desconforto por calor, se mantido aberto aumenta o percentual de desconforto por frio. A veneziana que diminui a incidência de radiação solar também reduz a ventilação natural compensando parcialmente esta estratégia. Isso reforça a necessidade de um gerenciamento inteligente para se obter o máximo desempenho possibilitado pelo projeto, pois esta relação extrapola a percepção do usuário quanto ao desempenho da edificação e de seu próprio bem estar térmico, salientando-se que foi analisado apenas um mês de verão. Pode-se deduzir que esta necessidade aumente quando a análise se expandir para o ano todo, sobretudo nas estações climáticas de maior instabilidade.

A reprodução destas rotinas do *Energy Plus*, de um ambiente virtual, em um ambiente real construído conduz à necessidade de uma automação inteligente do edifício. Dado o grande número de variáveis e a necessidade de adaptação, a técnica de Redes Neurais Artificiais (RN) possui ótimo potencial para esse tipo de controle inteligente. Uma das vantagens da rede neural é sua capacidade de aprender por amostragem, desta forma não é necessário conhecer a equação que representa o comportamento do sistema onde existem muitas variáveis e suas ligações não são explícitas. Este aprendizado, ou melhor, “treinamento” da rede neural pode ser desenvolvido por meio de simulação computacional em função dos resultados obtidos pelas amostras, funcionando como um aproximador de função, onde o sistema aprende por amostragem das entradas e saídas, qual seu comportamento para entradas específicas, pertencentes ou não ao conjunto de amostras iniciais.

Este ensaio, propositalmente restrito no número de variáveis e nas possibilidades de combinação, deverá ser aprofundado na perspectiva de se esgotar todas as possibilidades de restabelecer o conforto interno por meio dos dispositivos passivos projetados, ampliando também as estações climáticas analisadas, de modo a obter subsídios de treinamento da rede neural para gerenciamento destas estratégias.

Atualmente passou-se a utilizar o código CFD (*Computational Fluid Dynamics*), constante na última versão do *Design Builder*, para contornar a condição da velocidade interna constante, estabelecida pelo *Energy Plus*. Isso permitirá utilizar uma velocidade interna, resultante da abertura das diferentes janelas, no cálculo do PMV, possibilitando que esta condição faça parte da amostragem de treinamento da rede neural.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220** – Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: 2005.
- ASHRAE. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ASHRAE Standard 90.1 –1999. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 1999.
- ASHRAE. 2001. ANSI/ASHRAE Standard 140-2001: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA, Atlanta: 2001.
- ENERGYPLUS. **Input Output Reference**. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, November 11, 2008.
- FANGER, P.O. **Thermal Comfort**. New York. McGraw Hill Book Company. 1970.
- GRIGOLETTI, G. C. *Contribuição para a avaliação de desempenho higrotérmico de habitações térreas unifamiliares de interesse social para Porto Alegre*. Tese (Doutor em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.
- GUILLEMIN, A. e MOREL, N. *An innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system*. **Energy and Buildings** 33, pp. 477-487, 2001.
- KOLOKOTSA, D.; STAVRAKAKIS, G.; KALAITZAKIS, K.; TSIAVOS, D. Fuzzy Control for Improved Buildings Energy Management Systems. In European Symposium on Intelligent Techniques, Orthodox Academy of Crete, Greece, 1999.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. Eficiência Energética na Arquitetura. Ed. ProLivros, São Paulo, 1997.
- MAHDAVI, A. e PRÖGLHÖF, C. *A model-based approach to natural ventilation*. **Building and Environment** 43, pp. 620-627, 2008.
- Russell, S.; Norvig, P. **ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A MODERN APPROACH**. 2. ED. PRENTICE HALL, 2007.
- MORELLO, A. *Avaliação do comportamento térmico do protótipo habitacional Alvorada*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.
- MOZER, M. C. The Neural Network House: *An Environment that Adapts to its Inhabitants*. In **Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence Spring Symposium on Intelligent Environments**, pp. 110-114. Menlo Park, CA: AAAI Press, 1998.
- PFÄFFEROTT, J. U.; HERKEL, S.; KALZ, D. E. e ZEUSCHNER, A. *Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria*. **Energy and Buildings** 39, pp. 750-757, 2007.
- SATTLER, M. A. Habitações de Baixo Custo Mais Sustentáveis: a Casa Alvorada e o Centro Experimental de Tecnologias Habitacionais Sustentáveis. Coleção HABITARE / FINEP, Porto Alegre, 2007.
- ANALYSIS 1.5 - <http://www.labee.ufsc.br/software/analysis15.html> (acessado em 30/05/2009)
- DESIGN BUILDER - <http://www.designbuilder.co.uk/> (acessado em 30/05/2009)
- ENERGY PLUS - <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> (acessado em 30/05/2009)