

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO PARA EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS VENTILADAS NATURALMENTE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL BASEADA EM ABORDAGEM ADAPTATIVA

Francisco Massucci Silveira⁽¹⁾; Lucila Chebel Labaki⁽²⁾

(1) Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas,
e-mail: massucci@gmail.com

(2) Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas,
e-mail: lucila@fec.unicamp.br

Resumo

Recentes normativos vêm adotando modelos não prescritivos para avaliação de edifícios. Apresentando valores de desempenho mínimo exigido como metodologia de análise, estas normas abrem caminhos para utilização de componentes e sistemas construtivos inovadores, permitindo ainda a verificação de conformidade de sistemas já consagrados pela prática comum. Entre diversos fatores que compõem a avaliação do desempenho global de uma edificação, o conforto térmico é um dos requisitos constante das exigências dos usuários. Neste contexto, este trabalho destina-se a analisar e quantificar o desempenho térmico de uma residência, através de estudos do envelope sob a influência da ventilação natural e ocupação da residência, utilizando-se para tal, da abordagem adaptativa proposta pela norma ASHRAE 55/2010. O método utilizado compreende a simulação computacional de uma edificação habitacional unifamiliar de 63m², através da utilização do software EnergyPlus. O modelo simulado não possui sistema de condicionamento ativo e a ventilação natural foi simulada pelo EnergyPlus, através do algoritmo AirflowNetwork, um modelo de ventilação por rede, onde são estimados fluxos de massa através de aberturas e perda de carga térmica em decorrência de diferenças de pressão no edifício. A condição para abertura das janelas é, neste estudo, dependente da temperatura externa e de uma temperatura máxima interna estipulada, o que permite utilizar a ventilação natural exclusivamente como ferramenta de resfriamento passivo. O estudo aponta ainda para a importância do modelo adaptativo, que aliado a simulação computacional, apresenta-se como excelente ferramenta de verificação e quantificação do desempenho térmico para edifícios naturalmente ventilados.

Palavras-chave: Conforto térmico, Modelo adaptativo, Ventilação natural

Abstract

Recent standards are adopting non-prescriptive models for buildings evaluation. Presenting minimum performance values as analysis methodology, these standards open pathways to innovative use of construction components and constructive systems, while still allowing verification of compliance in systems already established by common practice. Among several factors that compose the evaluation of building's overall performance, thermal comfort is a constant prerequisite of user requirements. Thus, this work intended to analyze and quantify the thermal performance of a residence, by studying the envelope under the influence of natural ventilation and user occupation, using for this the adaptive approach proposed by ASHRAE 55/2010 - Environmental Conditions for Human Occupancy. The method comprises computer simulation of a family housing building with 63m², using EnergyPlus software. The simulated model has not active air conditioning system and natural ventilation was simulated by EnergyPlus, through AirflowNetwork algorithm, a network model for natural ventilation. The condition for window opening is dependent on external temperature and a internal

setpoint temperature which allows to use natural ventilation only as a tool for passive cooling. The study also indicates to significance of the adaptive model, which combined to computer simulation, presents itself as an excellent tool to verify and quantify thermal performance for naturally ventilated buildings.

Keywords: Thermal comfort, Adaptive model, Natural ventilation

1. INTRODUÇÃO

Em 2004, a norma *ASHRAE 55 Environmental Conditions for Human Occupancy* (ASHRAE, 2010) adotou uma abordagem de análise denominada modelo adaptativo: uma metodologia opcional, proposta para avaliação do desempenho térmico em edifícios ventilados naturalmente. Segundo Nicols (2002), o principal conceito desta abordagem é o princípio adaptativo que preconiza: “Se uma mudança ocorre de maneira a produzir desconforto, os indivíduos reagirão de modo a restaurar sua condição de conforto”. Ainda segundo Nicols, as pessoas tem a tendência natural de se adaptar às mudanças térmicas ocorridas em seus ambientes, modificando vestimentas, alterando dispositivos de ventilação, etc.

O método adaptativo utiliza-se da temperatura operativa como principal fator indicador de conforto, relacionando a faixa de temperatura de conforto à ocorrência de temperaturas externas (T_e), possibilitando assim a comparação entre edificações situadas em climas distintos, a partir de um contexto de preferência térmica variável. A figura 1 apresenta a correlação entre temperatura operativa do ambiente e a média das mínimas e máximas diárias de 30 dias antecedentes (T_e), presente na norma *ASHRAE 55 Environmental Conditions for Human Occupancy* (ASHRAE, 2010). A norma define ainda a temperatura neutra (T_n), ou temperatura de conforto, e os limites da faixa de conforto em relação à T_n , para índices de 80% e 90% de pessoas satisfeitas, como sendo $+ - 3,5^{\circ}\text{C}$ e $+ - 2,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

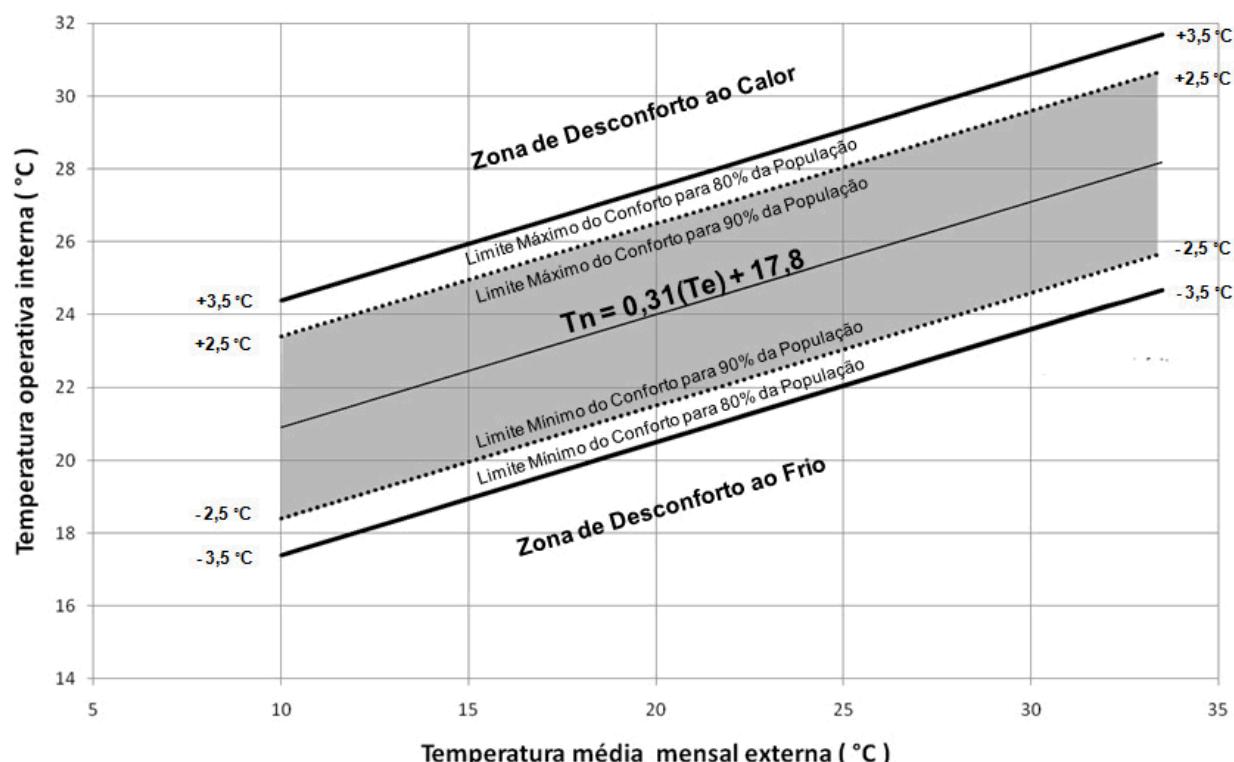


Figura 1 – Relação entre temperatura operativa interna e temperatura média mensal externa. (ASHRAE,2010 – Adaptado)

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho térmico de uma edificação unifamiliar naturalmente ventilada, modificando-se componentes da envoltória e verificando-se, a partir de modelo adaptativo de conforto e através do software *EnergyPlus* (DOE, 2012), os efeitos destas modificações em diferentes condições climáticas brasileiras.

3. METODOLOGIA

3.1. Geometria do modelo

O objeto base de estudo foi definido como sendo uma habitação unifamiliar térrea, com área total de 63m² com orientação leste-oeste para as fachadas de maior dimensão, segundo planta e corte representados pelas figuras 2 e 3, respectivamente. Esse modelo é baseado em Matos (2007), para um protótipo habitacional com faixa de renda de até 5 salários mínimos. Contendo 2 quartos, 1 banheiro, sala e cozinha, o modelo foi dividido em 6 zonas térmicas distintas, sendo uma para cada ambiente e uma para o ático.

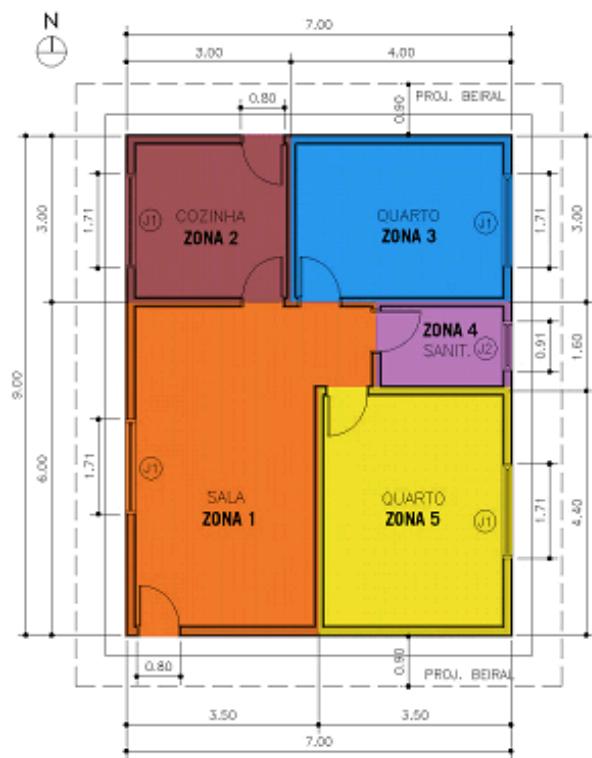


Figura 2 – Planta baixa

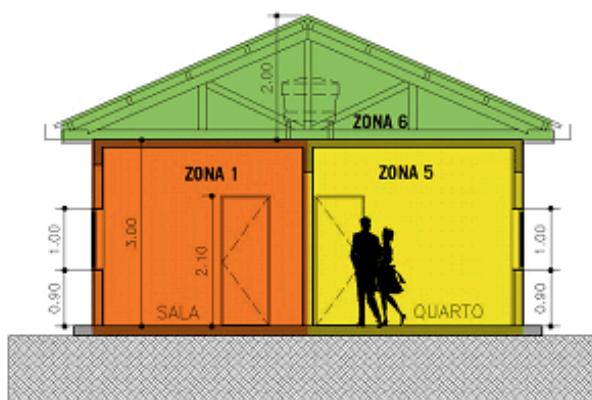


Figura 3 – Corte transversal

3.2. Definições da envoltória

Para este estudo foram definidos 2 tipos de paredes. A primeira, denominada PA, em bloco cerâmico de 8 furos (espessura = 9cm), sem revestimento e com pintura clara ($\alpha = 0,4$). A transmitância total da parede PA é de 2,99 W/m².K, e a capacidade térmica de 42 kJ/m².K. O segundo tipo, denominado PB, em tijolo de barro (espessura = 20cm), com emboço de 2,5cm em ambos os lados, totalizando 25cm de espessura, com pintura clara ($\alpha = 0,4$). A transmitância total da parede PB é de 1,85 W/m².K, e a capacidade térmica de 161 kJ/m².K.

Para cobertura foram definidos 4 tipologias distintas. A primeira, denominada C1, constituída

apenas de telhas de barro (espessura de 1cm), sem a existência do ático (zona 6). A transmitância térmica total da cobertura C1 é de 4,55 W/m².K, a absorção a radiação solar é de 60% ($\alpha = 0,6$) e a capacidade térmica de 18 kJ/m².K. A segunda tipologia, denominada C2, é constituída da mesma cobertura em telhas de barro sem ático, acrescido de uma lâmina polida de alumínio abaixo da telha. A transmitância térmica total da cobertura C2 é de 2,00 W/m².K, a absorção a radiação solar é de 60% ($\alpha = 0,6$) e a capacidade térmica de 18 kJ/m².K. A terceira tipologia de cobertura, denominada C3, é constituída de telhas de barro e laje pré-moldada, de blocos cerâmicos e vigotas em concreto armado, com capamento em argamassa de 2,5cm de espessura. A transmitância térmica total da cobertura C3 é de 1,92 W/m².K, a absorção a radiação solar é de 60% ($\alpha = 0,6$) e a capacidade térmica de 113 kJ/m².K. A quarta tipologia, denominada C4, é idêntica a terceira, incorporando-se apenas uma lâmina de alumínio polido abaixo da telha. A transmitância térmica total da cobertura C4 é de 1,09 W/m².K, a absorção a radiação solar é de 60% ($\alpha = 0,6$) e a capacidade térmica de 113 kJ/m².K. As definições de propriedades físicas para as paredes e coberturas foram estipuladas com base da norma ABNT/NBR 15220-3/2005 – Desempenho térmico de edificações: Zoneamento bioclimático Brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005).

O piso de todos os ambientes são compostos de contrapiso em concreto (espessura = 12cm) acrescidos de argamassa de assentamento (espessura = 2,5cm) e piso em cerâmica (espessura = 1cm). A transmitância térmica total do piso é de 3,02 W/m².K

As janelas são compostas de esquadrias de alumínio vidro simples de 3mm. Todas as janelas, exceto a do banheiro, possuem as mesmas dimensões de 1,71x1,00m. A janela do banheiro possui dimensões de 0,91x0,50m. A área destinada a ventilação é de 50% da área das janelas.

3.3. Uso e ocupação

A habitação é ocupada por 4 pessoas que compõem a família, sendo 1 casal e 2 filhos. A figura 4 representa o padrão de ocupação da edificação para dias úteis e a figura 5 representa os finais de semana. Ambos os gráficos correlacionam o número de ocupantes por zona em intervalos de 1 hora.

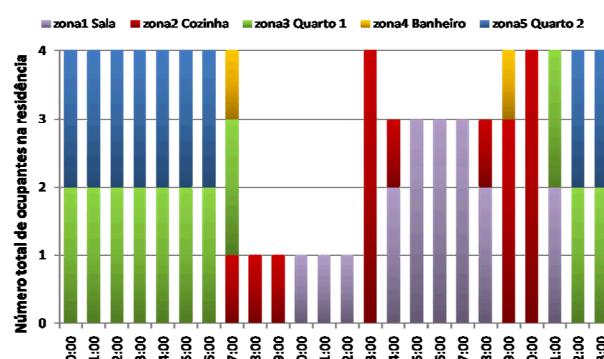


Figura 4– Padrão de ocupação dias úteis

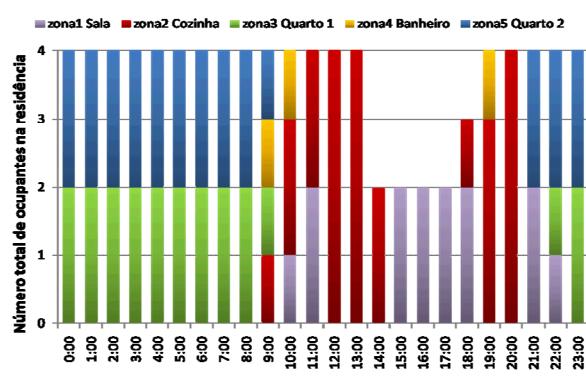


Figura 5 – Padrão de ocupação finais de semana

3.4. Iluminação

O padrão de iluminação para a simulação foi definido segundo quadro 1, que representa a potência instalada em cada ambiente. Definiu-se uma lâmpada por ambiente, com potências distintas em função da área do ambiente. O uso da iluminação é dependente do padrão de ocupação de cada zona. Havendo ao menos 1 ocupante em determinada zona, entre o período

de 07:00h e 23:00h, foi considerado o uso da iluminação na potência indicada.

zona1	zona2	zona3	zona4	zona5	zona6
sala	cozinha	quarto	banheiro	quarto	átilco
100w	100w	60w	40w	60w	0

Quadro 1 – Potência instalada de iluminação em cada ambiente

3.5. Equipamentos

A potência e padrão de uso dos equipamentos foram estimados com base em dados de consumo de eletrodomésticos do PROCEL (2012). O quadro 2 apresenta a estimativa de potência instalada por ambiente e de padrão de uso. A partir destes dados foram gerados *schedules* de utilização de equipamentos para cada zona, considerando a média de utilização diária e a quantidade de dias utilizados no mês.

zona	aparelho	potência (w)	Dias estimados uso / mês	Média utilização diária
zona1/sala	televisão	90	30	4
	ferro de passar	1200	12	1
	aparelho de som	20	20	3
	aparelho de dvd	25	8	2
zona2/cozinha	refrigerador	200	30	24
zona4/banheiro	chuveiro	3500	30	0,5

Quadro 2 – Potência instalada de equipamentos em cada ambiente

3.6. Ventilação

A ventilação natural foi simulada utilizando-se o algoritmo *AirflowNetwork* incorporado ao software *EnergyPlus*, e ocorre através de portas e janelas, nas zonas de 1 a 5. A zona 6 (átilco), para este trabalho, foi considerada com sendo uma zona estanque, sem ventilação ou infiltração de ar. A abertura dos dispositivos de ventilação se dá quando a temperatura interna do ar na zona é igual ou superior a uma temperatura de *setpoint* e ainda quando a temperatura interna do ar na zona é igual ou superior a temperatura do ar externo. A ocorrência de ventilação é também dependente de uma *schedule* de disponibilidade de ventilação, estipulada para ocorrer no período compreendido entre 8:00h e 22:00h e quando há, no mínimo, uma pessoa na residência. Ou seja, neste estudo excluiu-se a possibilidade do uso de ventilação noturna. A temperatura de *setpoint* foi fixada em 25°C, após estudos preliminares de simulações para análise de sensibilidade. Os coeficientes de pressão das fachadas da edificação foram definidos pelo próprio software *EnergyPlus/AirflowNetwork*. A rugosidade do entorno foi fixada em 0,33 e o coeficiente de descarga de portas e janelas foi definido em 0,60, com um coeficiente de frestas de 0,001 e expoente de 0,66.

3.7. Casos simulados

As estratégias adotadas foram simuladas para 6 cidades brasileiras, sendo estas: Brasília-DF, Florianópolis-SC, Natal-RN, Porto Alegre-RS, Rio de Janeiro-RJ e São Paulo-SP. Desta maneira, a combinação dos 8 casos de variação no envelope - sendo 2 para paredes e 4 para coberturas - simulados para as 6 cidades totalizam 48 situações distintas. Os padrões de ventilação natural, orientação da edificação, uso, ocupação e iluminação não foram alterados nas diversas situações.

Os resultados obtidos foram analisados através do somatório graus-hora de desconforto para para cada caso. A temperatura de conforto é definida com base na equação propostas por De Dear e Brager (2002) (equação 1) e incorporada pela norma ASHRAE 55 no modelo

adaptativo (ASHRAE, 2010). Os limites da faixa de conforto para 90% de pessoas satisfeitas é de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ em relação a temperatura de conforto e $\pm 3,5^{\circ}\text{C}$ para 80% de pessoas satisfeitas. O Somatório de graus-hora de desconforto para cada zona foi realizado de acordo com a equação 2, para as 8670 horas do ano, e então ponderado pela área de cada ambiente (com excessão da zona 6 – ático), compondo um indicador único para residência (equação 3).

$$Tc = 0,31Te + 17,8 \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

Tc = Temperatura operativa de conforto ($^{\circ}\text{C}$)

Te = Média das temperaturas máximas e mínimas diárias do ar exterior, de 30 dias antecedentes ($^{\circ}\text{C}$)

$$GH_i = \sum (Tc - li_n)^+ + (Top_n - Tc - ls_n)^+ \quad [\text{Eq. 2}]$$

Onde:

GH_i = Graus-hora de desconforto na zona i

Top_n = Temperatura operativa para a *nésima* hora ($^{\circ}\text{C}$)

$Tc - li_n$ = Temperatura de conforto limite inferior para a *nésima* hora ($^{\circ}\text{C}$)

$Tc - ls_n$ = Temperatura de conforto limite superior para a *nésima* hora ($^{\circ}\text{C}$)

$+$ = Somam-se apenas valores positivos

$$GH_t = \sum (Azona_i / Atotal) \times GH_i \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde:

GH_t = Graus-hora de desconforto na residência

$Azona_i / Atotal$ = Relação entre a área da zona i e área total da residência

GH_i = Graus-hora de desconforto na zona i (i variando de 1 a 5 - a zona 6 foi desconsiderada para efeito de ponderação final do indicador de desconforto)

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O somatório de graus-hora foi utilizado como indicador global para análise do conforto térmico na edificação. A figura 6 apresenta a ordenação dos resultados das 48 simulações, separados em 3 séries distintas: $GH_{aquecimento}$ que representa o somatório de graus-hora abaixo do limite inferior de $3,5^{\circ}\text{C}$ (80%); $GH_{resfriamento}$ que representa o somatório de graus-hora acima do limite superior de $3,5^{\circ}\text{C}$ (80%) e $Ghtotal$ que é, portanto, a soma das parcelas $GH_{aquecimento}$ e $GH_{resfriamento}$.

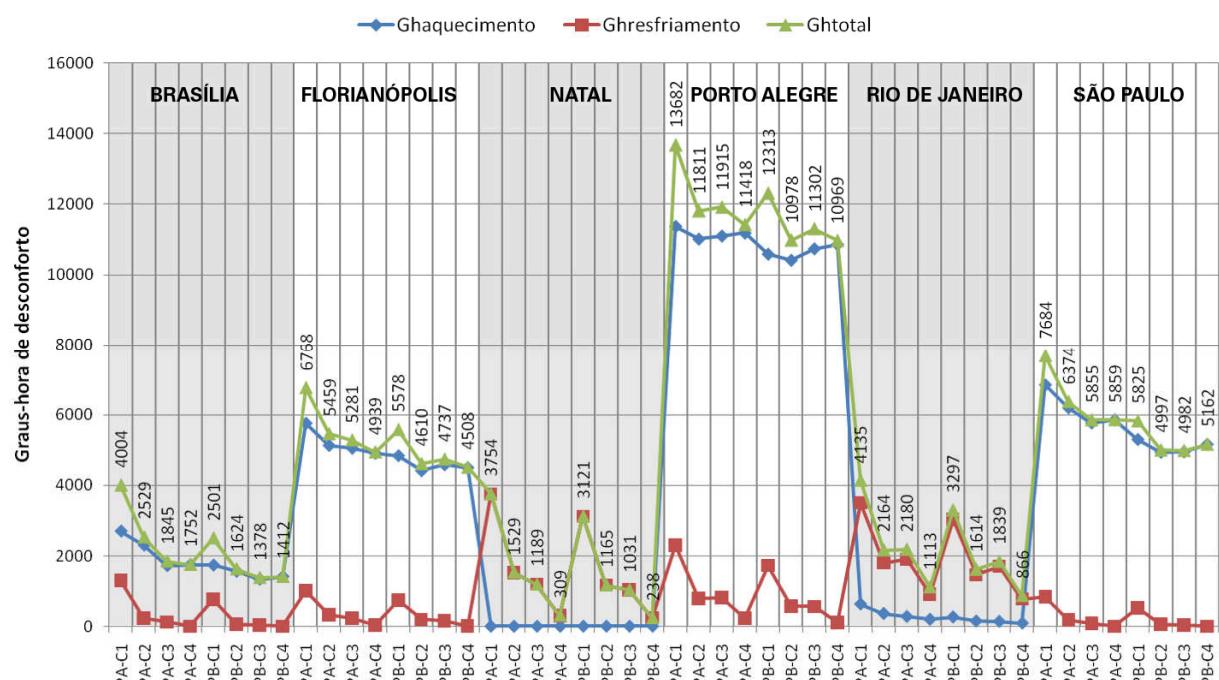


Figura 6 – Valores de graus-hora de desconforto anual para 80% de pessoas satisfeitas.

Desta maneira, verifica-se que para todas as condições climáticas apresentadas, a utilização da parede PB (de maior resistência e capacidade térmica), aliada a cobertura C4 (também de maior resistência e capacidade térmica) apresenta-se como a solução construtiva mais adequada entre as opções estudadas. É notório ainda a importância da escolha dos componentes construtivos da cobertura frente as vedações verticais. A presença do ático e a utilização da subcobertura em alumínio, um material de baixa emissividade que age como barreira radiante, mostraram-se soluções eficazes na redução do ganho de calor devido principalmente a incidência de radiação solar.

Os casos simulados para a cidade de Porto Alegre foram os que obtiveram o maior desconforto em relação ao frio, com condições extremas na simulação PA-C1, alcançando 11.374 graus-hora de aquecimento. Ao passo que, de maneira geral, os casos simulados para a cidade do Rio de Janeiro foram os que obtiveram o maior desconforto em relação ao calor. No entanto, o caso de maior desconforto ao calor se deu na simulação PA-C1 para a cidade de Natal, com o total de 3.754 graus-hora de resfriamento.

As figuras 7 e 8 apresentam o gráfico de dispersão de temperaturas que correlaciona a temperatura operativa ponderada interna (*Top*) à média mensal das mínimas e máximas diárias da temperatura externa (*Te*) para as simulações PA-C1_Natal e PA-C1_PortoAlegre, respectivamente. O gráfico apresenta ainda a função de regressão linear e um valor de R^2 para a dispersão das temperaturas. Esta análise permite a verificação e o entendimento do comportamento térmico da edificação frente as condições climáticas ao qual o edifício está submetido.

É possível notar, em ambos os casos, uma dispersão elevada das temperaturas, resultado da utilização de componentes leves para as paredes e de pouca resistência térmica para cobertura. Ao analisarmos, por exemplo, casos de menor desconforto como PB-C4 para Natal (figura 9) e PB-C4 para o Rio de Janeiro (figura 9), verifica-se um valor de R^2 elevado (pouca dispersão) e uma função de regressão linear de menor inclinação, indicadores de uma edificação com menor amplitude de temperaturas internas (maior massa térmica) e resposta mais lenta às modificações de condições climáticas externas.

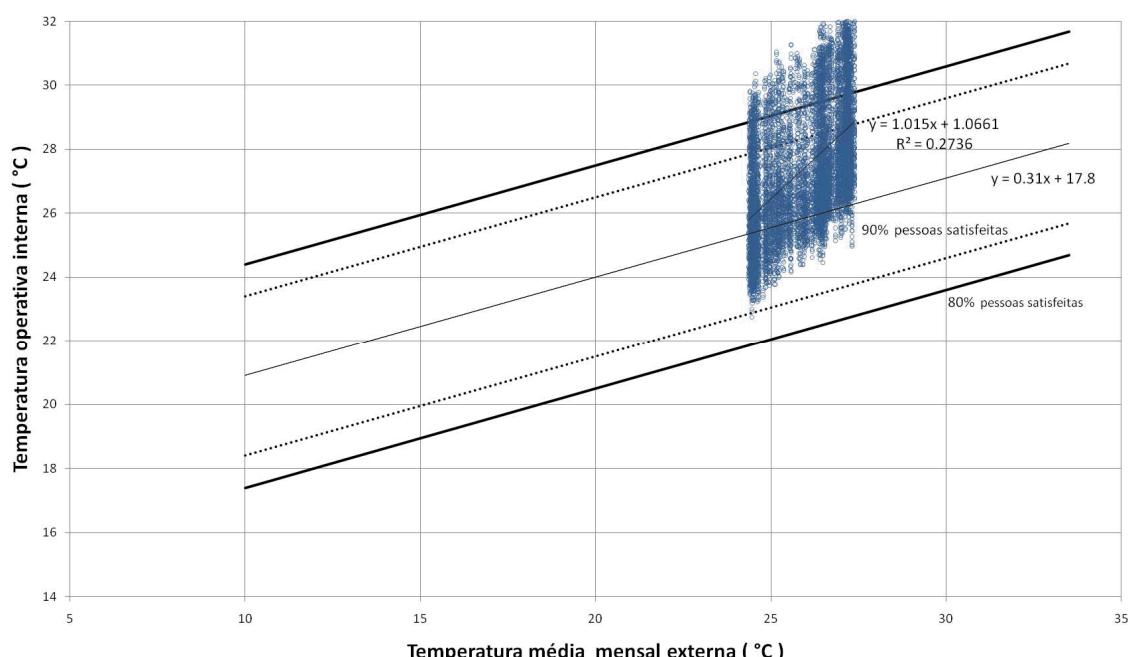


Figura 7 – Correlação *Top* e *Te* para a PA-C1_Natal.

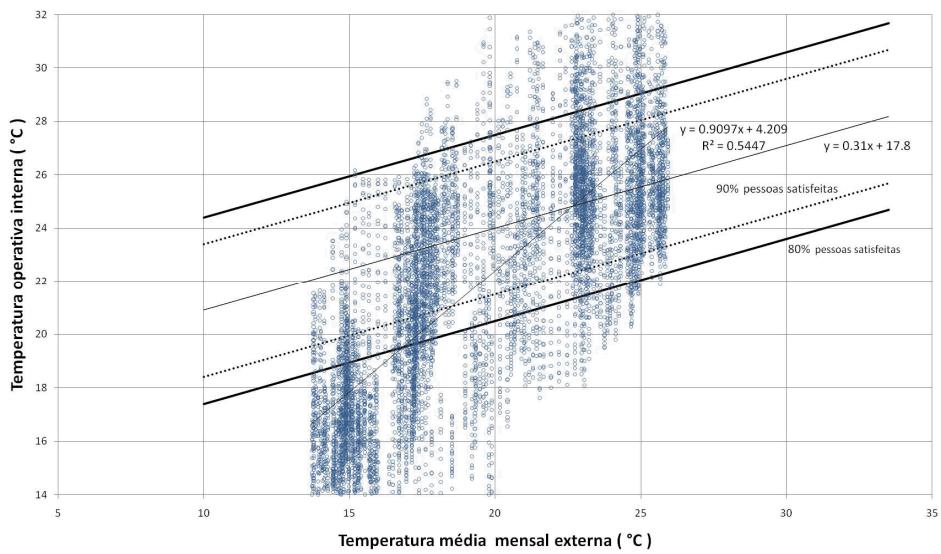


Figura 8 – Correlação *Top* e *Te* para a PA-C1_Porto Alegre.

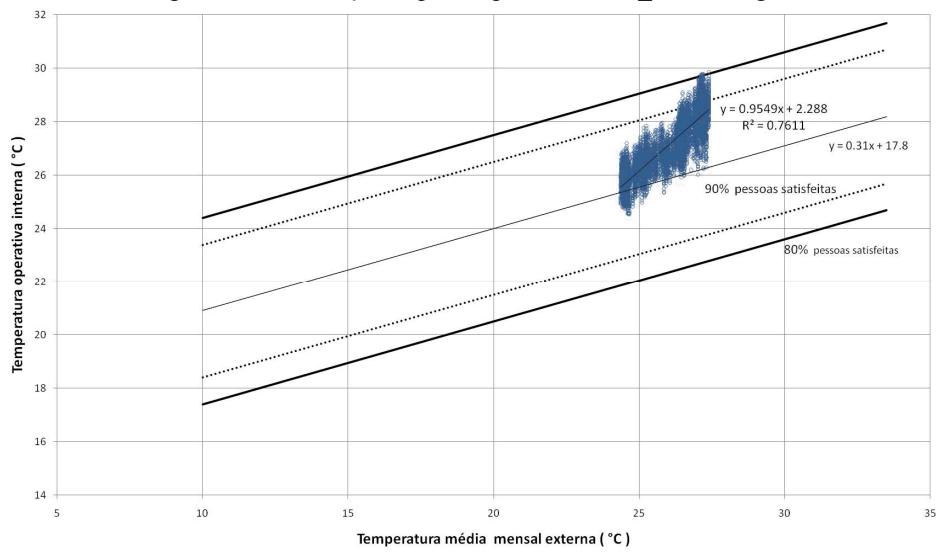


Figura 9 – Correlação *Top* e *Te* para a PB-C4_Natal.

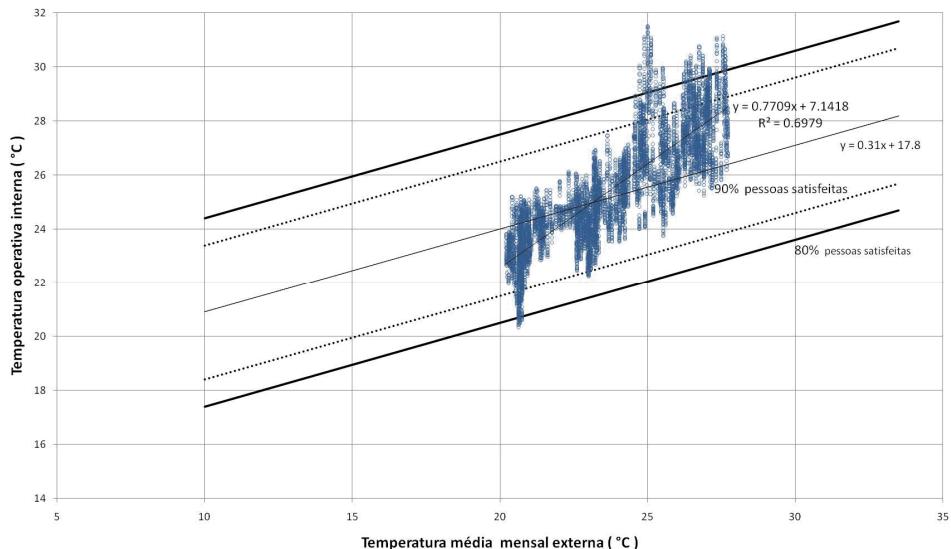


Figura 10 – Correlação *Top* e *Te* para a PB-C4_Rio de Janeiro.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise de desempenho térmico de edificações residenciais naturalmente ventiladas a partir de uma abordagem adaptativa de conforto, um modelo de análise complementar ao método convencional e analítico de análise de conforto térmico. O modelo adaptativo pressupõe novos fatores contextuais e experiências térmicas que modificam as expectativas dos ocupantes em relação às condições e preferências de conforto.

A temperatura interna em edifícios naturalmente ventilados encontra-se em constante variação em resposta às condições climáticas externas. Dessa maneira, normas que pressupõem temperaturas fixas de conforto, abdicam da possibilidade do uso da ventilação natural em detrimento de um ambiente térmicamente homogêno (NICOLS, 2002). A introdução de temperaturas de conforto variáveis auxilia na redução do consumo energético e incorpora o uso da ventilação natural como fator essencial na redução do desconforto. Fica evidente que, em análises onde a faixa de conforto é definida a partir de valores constantes, casos como os das simulações PA-C1_Natal e PA-C1_Porto Alegre apresentariam-se como situações ainda mais extremas, tornando o uso de climatização ativa um fator inevitável.

Neste contexto, a simulação da ventilação natural apresenta-se como um dos parâmetros de maior relevância no estudo de modelos adaptativos. O software *EnergyPlus* permite a introdução de *schedules* para a temperatura de *setpoint*. Desta maneira, ao invés de se utilizar um valor fixo para abertura dos dispositivos de ventilação, esta temperatura poderia também estar correlacionada às condições climáticas externas. Esta abordagem incorporaria maior dinamismo a simulação, aproximando-a ainda mais de um comportamento real dos usuários.

É importante ressaltar ainda a necessidade de adequações e novos estudos acerca da equação da temperatura de conforto para o território nacional, adaptando-a às preferências térmicas da população Brasileira.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2010

DE DEAR, R.J. BRAGER, G.S. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings revisions to ASHARE Standard 55**. Energy and Buildings [S.I], v. 34, n. 6, p. 549-561, jul 2002.

DOE. **United States Department of Energy**. Disponível em: <<http://www.energy.gov/>>. Acesso em: Maio de 2012.

MATOS, M. **Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural**. Dissertação (Mestrado). Centro Tecnológico - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

NICOLS, J. F. HUMPHREYS, M. A. **Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings**. Energy and Buildings [S.I], v. 34, n. 6, p. 563-572, jul 2002.

PROCEL. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Canal do consumidor**. Consumo de Eletrodomésticos. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp?TeamID=%7B32B00ABC-E2F7-46E6-A325-1C929B14269F%7D>>. Acesso em: Maio de 2012.