

SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PASSIVAS PARA EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS EM CLIMA TROPICAL SEMIÚMIDO

Felipe da Silva Duarte Lopes (1); Daniel Cóstola (2); Lucila Chebel Labaki (3)

(1) Arquiteto e Urbanista, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, felipelopes.arq@gmail.com

(2) PhD, Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom, daniel.costola@gmail.com

(3) PhD, Professora do Departamento de Arquitetura e Construção, lucila@fec.unicamp.br
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo,
Departamento de Arquitetura e Construção, Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada, Cx. Postal
6143, Campinas/SP, CEP 13083-889, Tel.: (19) 3521-2064

RESUMO

Programas de eficiência energética têm sido aprimorados em decorrência da alta demanda de energia em edificações, porém o consumo de eletricidade em edifícios comerciais nas regiões de clima tropical ainda é bastante elevado, quando comparado com edifícios de alto desempenho em países desenvolvidos. Projetos de edifícios de escritório no Brasil geralmente não levam em conta os princípios bioclimáticos adequados, o que acaba elevando o consumo de eletricidade, nem sempre garantindo qualidade ambiental e conforto térmico satisfatórios para os usuários. O objetivo deste trabalho foi analisar o potencial de redução de consumo de energia e melhoria do conforto térmico para um edifício de escritórios em região de clima tropical semiúmido. Um modelo hipotético foi simulado com o EnergyPlus, onde foram aplicadas uma série de estratégias bioclimáticas passivas (sombreamento horizontal, ventilação noturna e massa térmica para resfriamento). O conforto térmico foi analisado através do Voto Médio Estimado (PMV) e da temperatura operativa dos ambientes. Os resultados para consumo energético, em kWh/m², demonstraram um potencial de redução de até 10,1%, e uma melhoria no conforto térmico de até 57% na sensação de neutralidade térmica durante as horas de ocupação.

Palavras-chave: simulação energética de edifícios, conforto térmico, estratégias bioclimáticas passivas.

ABSTRACT

Energy efficiency programs have increased due to the high-energy demand in buildings, however electricity consumption in commercial buildings from tropical climate regions is still higher than in similar buildings with high energy performance in developed countries. The design of office buildings in Brazil usually do not take into account the appropriate bioclimatic principles, which ultimately raise the building's energy demand, and not always ensures satisfactory environmental quality and thermal comfort for users. This paper analyzed the energy saving potential and thermal comfort improvement for an office building in a tropical climate region. A hypothetical model was simulated with EnergyPlus, using passive bioclimatic strategies (window overhangs, night ventilation and thermal mass for cooling). Thermal comfort was evaluated through Predicted Mean Vote (PMV) index and operative temperature in the rooms. Results for energy consumption, in kWh/m², showed a potential for energy reduction up to 10.1% and an improvement on thermal comfort up to 57% of neutral sensation on occupancy hours.

Keywords: building energy simulation, thermal comfort, passive bioclimatic strategies.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia em edifícios vem crescendo nos últimos anos (IWARO; MWASHA, 2010). Este aumento, entretanto, nem sempre garante uma boa qualidade ambiental para os usuários (KONG et al., 2012). No Brasil, as edificações já são responsáveis por 50,7% da demanda de eletricidade no país, dentre os quais 34% são consumidos por edifícios comerciais (BRASIL, 2016). Tal cenário tem justificado iniciativas para redução de demanda energética, promovendo conforto térmico e desenvolvimento sustentável, uma vez que as pessoas passam maior parte do tempo no ambiente de trabalho (LI; YANG; LAM, 2013).

Por outro lado, muitos ambientes em edifícios de escritório no Brasil, especialmente em regiões tropicais, não possuem medidas de condicionamento ambiental compatíveis com as características climáticas do local, o que eleva o consumo de energia e gera níveis insatisfatórios de conforto térmico para os usuários (CARLO, 2008). Em geral os ambientes possuem sistemas de ar-condicionado unitários, e apenas a infiltração natural de vento é responsável pela renovação de ar. Na maior parte do tempo cortinas e persianas são utilizadas nas esquadrias para reduzir o ofuscamento decorrente da radiação solar direta. Já os materiais de construção usuais possuem baixa massa térmica e os vidros das esquadrias são ineficientes. Além disso, a realidade do setor da construção no Brasil indica uma baixa aceitação por tecnologias mais avançadas e novos sistemas construtivos.

Assim, medidas de condicionamento ambiental devem ser estabelecidas para garantir conforto e reduzir a demanda de energia dos edifícios, de preferência ainda na fase de concepção do projeto. Para edifícios em regiões de clima tropical, existe uma série de estratégias que contribuem para a redução da temperatura interna dos ambientes, melhoram a eficiência de sistemas de condicionamento ativo de ar e reduzem o uso de iluminação artificial. Estudos anteriores já avaliam o potencial de redução de consumo energético em edifícios não-residenciais em climas tropicais (LEE; RAJAGOPALAN, 2008; SAIDUR, 2009), mas pelo conhecimento dos autores existem poucos trabalhos que avaliam tal potencial com estratégias bioclimáticas na realidade brasileira.

Nesse contexto, os “Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” (RTQ-C) trazem requisitos de classificação de edifícios quanto à eficiência energética (BRASIL, 2010), iniciativa do INMETRO e PROCEL através do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE Edifica). Porém, não existe no país estudos suficientes sobre desempenho energético de edifícios, e o PBE Edifica possui apenas requisitos voluntários de eficiência energética em novos empreendimentos. Em relação às edificações não-residenciais, o acesso às informações é dificultado por falta de vontade na divulgação dos dados ou questões de confidencialidade dos empreendedores (H. BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014).

A partir deste cenário, e como informações sobre o consumo energético de edificações no Brasil são limitadas, pesquisas sobre estratégias de eficiência energética têm se tornado cada vez mais importante para o melhor desenvolvimento do setor da construção, além de promover redução na demanda de energia.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de redução de consumo energético e de melhoria dos índices de conforto térmico para um edifício de escritório típico de região de clima tropical, através do uso de estratégias bioclimáticas passivas.

3. MÉTODO

A partir dos objetivos apresentados, este trabalho avalia a influência de estratégias bioclimáticas passivas no consumo de energia elétrica e no conforto térmico em um edifício de escritórios típico de região com clima tropical. O estudo é baseado em simulações computacionais com o *EnergyPlus 8.3* (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2016), software confiável e consolidado como ferramenta de análise energética. A metodologia desenvolvida é apresentada nas etapas a seguir.

3.1. Caracterização do clima

O edifício avaliado está localizado em Teresina/PI, cidade de clima tropical semiúmido (Aw), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), correspondendo à Zona Bioclimática 7, segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Teresina é a única capital do Nordeste a situar-se no interior, a uma distância de 350 km do litoral, na latitude 05°05'12"S e longitude 42°48'42", na faixa de transição entre o semiárido nordestino e a região amazônica.

Nos meses mais quentes (entre agosto e outubro), a média das temperaturas máximas é de 35,9°C, enquanto que no período de clima mais ameno, as temperaturas mínimas são registradas próximas de 20°C (Figura 1). Teresina possui duas estações bem definidas, uma chuvosa no primeiro semestre (de janeiro a maio), e outra seca (de julho a novembro). A umidade relativa do ar média anual é de 70%, chegando a 95% nos meses mais chuvosos e próximo de 20% nos meses mais secos (Figura 2). Para as simulações computacionais, foi utilizado o arquivo climático *EnergyPlus Weather File* (epw) de um ano típico em Teresina (CLIMATE ONE BUILDING, 2014).

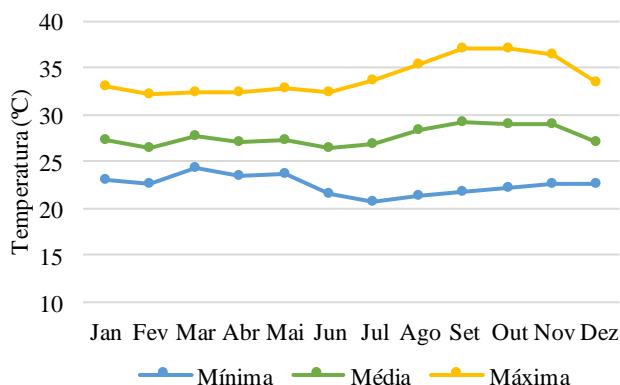


Figura 1: Temperaturas médias em Teresina (RORIZ, 2012)

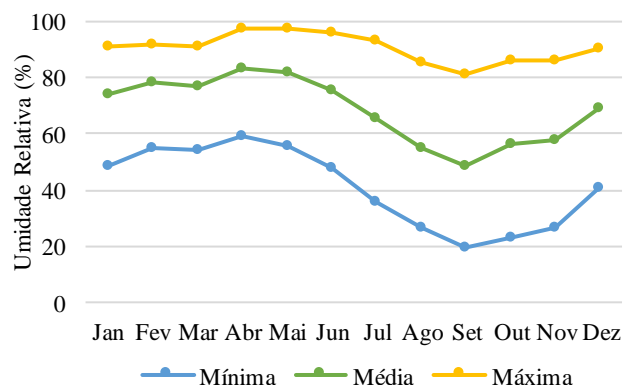


Figura 2: Umidade Relativa média em Teresina (RORIZ, 2012)

3.2. Descrição do edifício simulado

O edifício de escritórios alvo do estudo possui quinze pavimentos, com 10.800 m² de área total. As salas de escritório possuem 36 m², distribuídas em uma planta baixa de eixo retangular com fachadas principais voltadas para norte e sul (Figura 3). As paredes externas são de blocos de concreto com pintura cinza claro, as paredes internas são de tijolo cerâmico com reboco nos dois lados. As lajes internas são de concreto com piso em cerâmica convencional, e a cobertura possui laje em concreto aparente e forro de gesso com espaço de ar entre os elementos. As janelas de cada sala possuem 4,5 m² de área, com vidros laminados (espessura de 6,0 mm), sendo a Porcentagem de Abertura das Fachadas (PAF) de 38%. As características e propriedades dos materiais de construção (Tabela 1) foram retiradas do Anexo V dos Requisitos de avaliação da conformidade para eficiência energética de edificações (RAC), do INMETRO (BRASIL, 2013).

Tabela 1 – Propriedades dos materiais do edifício

| Elemento | Características |
|------------------|--|
| Paredes externas | Reboco (25mm) + Bloco de concreto (90mm) + Reboco (25mm) (Absortância solar: $\alpha = 0,6$ / Transmitância térmica: $U = 2,70 \text{ W/m}^2\text{K}$) |
| Paredes internas | Reboco (25mm) + Tijolo cerâmico (90mm) + Reboco (25mm) |
| Pisos | Laje de concreto (30mm) + Reboco (25mm) + Cerâmica (10mm) |
| Lajes internas | Reboco (15mm) + Laje de concreto (70mm) + Ar ($R = 0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$) + Forro de gesso (10mm) |
| Cobertura | Reboco (15mm) + laje de concreto (120mm) + Ar ($R = 0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$) + Forro de gesso (10mm) (Absortância solar: $\alpha = 0,6$ / Transmitância térmica: $U = 2,17 \text{ W/m}^2\text{K}$) |
| Janelas | Vidro laminado (Transmitância térmica: $U = 3,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ / Fator solar: 0,34) |

O edifício foi modelado no programa *SketchUp*, e para a simulação, foi modelado um pavimento tipo de forma simplificada no *EnergyPlus*, replicado para representar o primeiro e o último (15º) pavimentos, os quais foram analisados neste estudo, com as superfícies internas consideradas adiabáticas. A Figura 4 mostra as zonas térmicas definidas para simulação, sendo avaliados neste estudo as zonas periféricas (A, B, C e D). As zonas centrais foram agrupadas para simplificar a simulação, mas as paredes internas foram consideradas no cálculo do *EnergyPlus* (*internal mass*).

O sistema de ar-condicionado foi simulado como *Packaged Terminal Air Conditioner* (PTAC), com eficiência nominal (COP) de 3,5 W/W, e um *setpoint* de resfriamento de 24°C. A capacidade de resfriamento do sistema e a taxa do fluxo de ar (*supply air flow rate*) foram determinadas nas simulações (*autosize*), e o edifício não possui demanda de aquecimento no ano. O período de ocupação na edificação dos ambientes é de segunda-feira a sábado, das 08h às 18h, refletindo uma realidade cada vez mais presente em que os escritórios ficam abertos sem interrupção durante o dia.

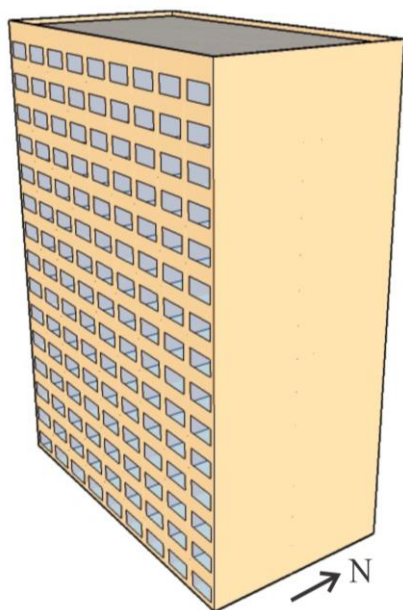


Figura 3: Vista do edifício analisado

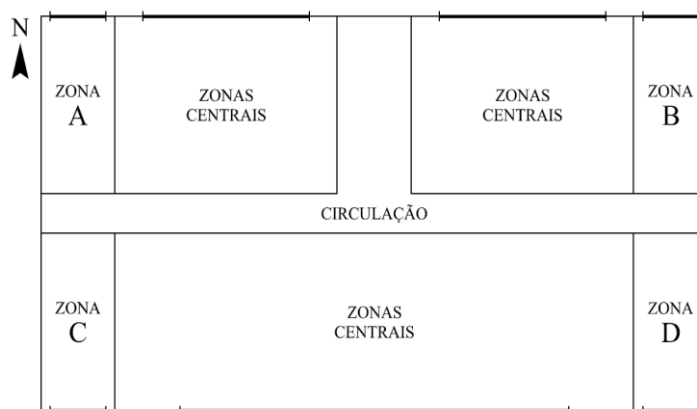


Figura 4: Pavimento tipo com as zonas térmicas simuladas

Foi considerada uma área de 6,00 m² por pessoa para a ocupação de cada escritório. A taxa metabólica por pessoa é de 130 W, em atividade moderada de escritório, de acordo com a NBR 16401-1 (ABNT, 2008). A densidade de equipamentos foi considerada nos cálculos como sendo um computador e monitor por pessoa, além de duas impressoras por sala, resultando em um valor de 20 W/m², ainda segundo a NBR 16401-1. Foi adotada densidade de potência de iluminação para escritórios de 11 W/m², de acordo com a Standard 90.1 (ASHRAE, 2007).

3.3. Estratégias bioclimáticas

Para avaliar o potencial de redução de consumo de energia e melhoria de conforto térmico, o edifício de escritórios descrito no item anterior serviu como caso base para três cenários possíveis, com o uso de uma série de estratégias bioclimáticas, descritas na Tabela 2. A primeira estratégia consistiu no uso de sombreamento horizontal nas janelas, reduzindo os ganhos de calor por radiação solar direta. Após elaboração de máscaras de sombra para as fachadas norte e sul, foram utilizadas marquises de 1,0 metro que protegem a fachada norte da radiação solar direta de 9h às 15h, e a fachada sul de 8h às 16h. nas fachadas norte e sul.

Na segunda estratégia foi utilizada ventilação noturna para reduzir a temperatura do ar interno, com mudanças nas trocas de ar por hora na taxa de infiltração de cada zona térmica simulada (*design flow rate*). Por fim, a terceira estratégia utilizada foi massa térmica para resfriamento, através de mudanças na espessura do material e absorvância solar das paredes externas. Cada estratégia foi aplicada individualmente no modelo (caso base), e os resultados para consumo energético foram obtidos em quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m²) anual.

Tabela 2 – Estratégias bioclimáticas aplicadas no caso base

| Sombreamento Horizontal (SH) | |
|-------------------------------------|---|
| Caso base | Sem marquises |
| Caso “SH” | Marquises horizontais de 1,0 metro em cada janela |
| Ventilação Noturna (VN) | |
| Caso base | 2 trocas de ar por hora (constante) |
| Caso “VN” | 2 trocas de ar por hora (5h – 23h) / 10 trocas de ar por hora (23h – 5h) |
| Massa Térmica (MT) | |
| Caso base | Reboco + Bloco de concreto + Reboco (140mm total) (Transmitância térmica: U = 2,70 W/m ² K) |
| Caso “MT” | Reboco + Tijolo cerâmico duplo + Reboco (185mm total) (Transmitância térmica: U = 1,58 W/m ² K) |

3.4. Avaliação de conforto térmico

Para ambientes condicionados artificialmente, o *Predicted Mean Vote* (PMV) ou Voto Médio Estimado (FANGER, 1972) é um método de avaliação de conforto térmico bastante difundido na literatura (CANDIDO; DEAR, 2012; CASTILLA et al., 2011; ZHANG; CHEN; MENG, 2013). O PMV prevê o valor médio dos votos de um grande grupo de pessoas baseado no balanço térmico do corpo humano, em uma escala sétima de sensação térmica, onde +3 é muito quente, +2 é quente, +1 é levemente quente, 0 é neutro (sensação de conforto), -1 é levemente frio, -2 é frio e -3 é muito frio (ASHRAE, 2013; ISO, 2005).

Para climas quentes, um PMV com valores entre 0 e +1 resultaria em um percentual entre 75% e 95% de pessoas satisfeitas termicamente com o ambiente. Neste estudo, para o cálculo do PMV, a velocidade do ar interno adotada é constante de 0,2 m/s. As vestimentas foram consideradas de acordo com a Standard 55 (ASHRAE, 2013), como sendo calça e camisa de manga curta, com sapatos, meias e roupa íntima. O conjunto resulta em 0,61 clo, valor adotado em todas as simulações. Já para a análise da temperatura utilizou-se a Temperatura Operativa, média ponderada da temperatura do ar e da temperatura radiante média.

4. RESULTADOS

Para uma avaliação mais específica, foram selecionadas as semanas típicas de verão e inverno. No Brasil, o verão vai de dezembro a fevereiro, e o inverno de junho a agosto. Porém, em Teresina as temperaturas mais altas estão entre setembro e outubro, e as mais baixas em abril e maio. A partir do arquivo climático utilizado nas simulações, a semana típica de inverno considerada vai de 27 de abril a 03 de maio, e a semana típica de verão vai de 28 de setembro a 04 de outubro, no ano de 2015, quando as simulações foram realizadas.

4.1. Consumo energético

Para cada caso simulado, a demanda de energia total no ano é a soma do consumo de eletricidade para iluminação, equipamentos e sistema de ar-condicionado. A Figura 5 apresenta o consumo energético anual e a Figura 6 traz os ganhos de calor por infiltração para as zonas térmicas simuladas (A, B, C e D). Como explicado no item 3.2, foram analisados o primeiro e o último (15°) pavimentos, obtendo-se resultados para os ambientes nas extremidades da edificação, o primeiro sendo um andar térreo e o último influenciado pela radiação solar direta da cobertura.

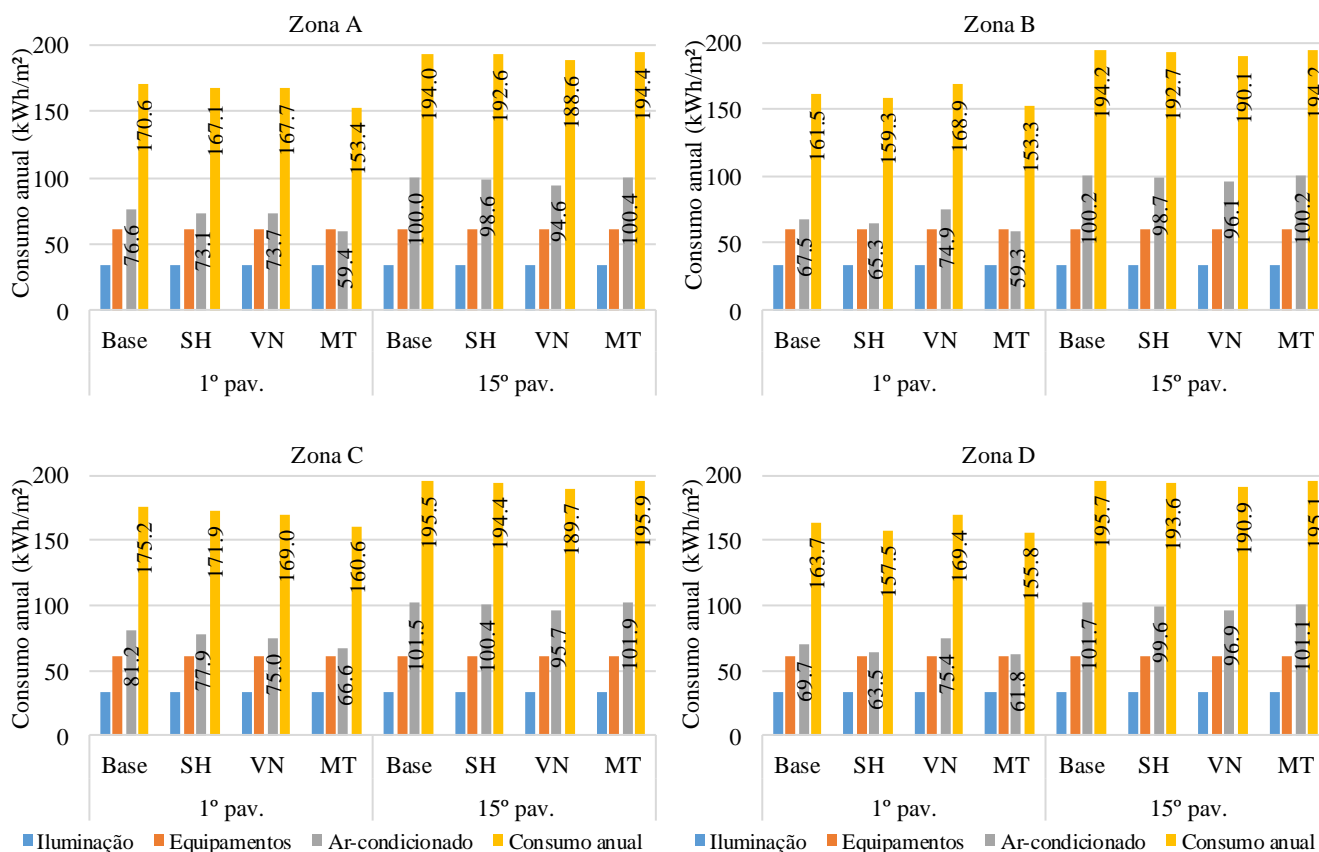


Figura 5: Consumo energético anual para as zonas térmicas simuladas

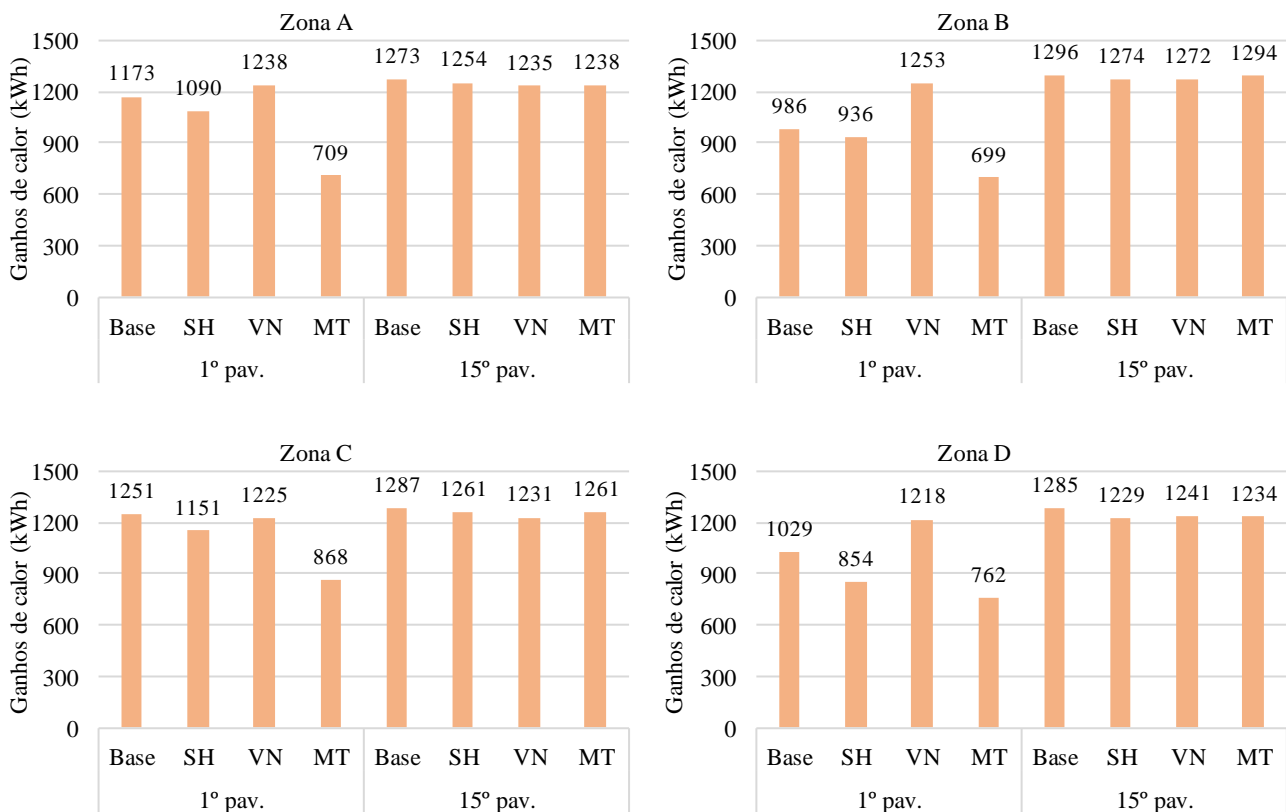


Figura 6: Ganhos de calor por infiltração para as zonas térmicas simuladas

De um modo geral, percebe-se que o uso das marquises para sombreamento horizontal e da ventilação noturna para resfriamento não resultaram em uma redução significativa no consumo energético, mas o uso da massa térmica resultou em reduções na demanda de até 10,1% no primeiro pavimento, que pode ser explicado pela diminuição dos ganhos de calor por infiltração (39,6% de redução). Já no 15º pavimento o comportamento foi bem diferente, pois com o uso da ventilação natural houve redução de até 3,0% na demanda energética, mas com as outras estratégias, o consumo não variou significativamente. O uso das marquises para sombreamento nas fachadas norte e sul mostrou-se eficaz na redução dos ganhos de calor, entre 5,1% na Zona B (fachada norte) e 17% na Zona D (fachada sul). Tal resultado refletiu na diminuição do consumo energético em até 4,8% na Zona D em relação ao caso base (sem marquises).

No caso da ventilação, houve aumento dos ganhos de calor por infiltração, já que em Teresina, mesmo no período noturno, as temperaturas do ar externo não diminuem muito. Na Zona B houve um aumento de 27,1% nos ganhos por infiltração, e consequentemente a demanda energética do sistema de ar-condicionado aumentou, resultando em um aumento de 4,6% no consumo em relação ao caso base. Esta zona térmica corresponde ao ambiente localizado no encontro das fachadas norte e leste do edifício, e os altos ganhos de calor podem ser justificados pela incidência de radiação solar direta no período da manhã, que acumulado durante o dia só é retirado parcialmente à noite com a ventilação seletiva.

Ainda em relação à essa estratégia, é possível comparar os resultados com a Zona D, localizada no encontro das fachadas sul e leste. A mesma incidência de radiação pela manhã é verificada, porém a fachada sul recebe menos radiação que a fachada norte, assim o aumento dos ganhos de radiação foi de 18,4%, menor do que aquele da Zona B. Nas Zonas A e C, localizadas na fachada oeste, esperava-se maiores valores de ganhos de calor, porém no caso da ventilação, estes foram inferiores ao da fachada leste. Uma possível explicação é que o calor acumulado no período da tarde é retirado mais rápido com a ventilação noturna.

Com a última estratégia utilizada, o uso de material de alta inércia térmica no envelope da edificação, verificou-se as maiores reduções de ganhos de calor (30,6% na Zona C e 39,6% na Zona A), assim como significativas reduções no consumo energético em relação ao caso base (8,3% na Zona C e 10,1% na Zona A). Porém, esse menor consumo teve um impacto nos resultados para conforto térmico, que será analisado no item seguinte. Uma visão abrangente do consumo energético pode ser verificada na Figura 7, que mostra o *breakdown* (divisão por sistemas) do consumo médio para toda a edificação no ano.

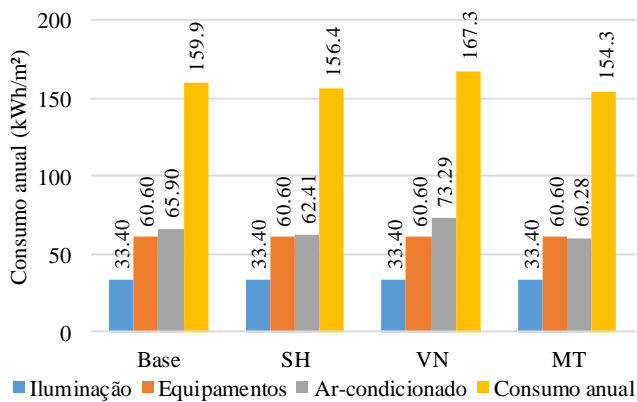


Figura 7: Consumo anual de energia do edifício todo

O gráfico demonstra um aumento na demanda energética no caso da ventilação noturna (4,6% a mais que o caso base), sendo a maior redução verificada no caso da massa térmica (3,5% a menos que o caso base). O sistema de ar-condicionado foi o responsável por todo esse aumento ou redução de consumo. Este trabalho não considerou o potencial de redução de consumo por iluminação ou equipamentos, este último pela dificuldade prática de ficar ligando ou desligando aparelhos como computadores durante as horas de trabalho, de forma a reduzir o consumo de energia do modo *standby* (SPYROPOULOS; BALARAS, 2011).

Com as simulações, o *breakdown* do consumo em média apontou que o ar-condicionado consome 41% do uso final de eletricidade, o sistema de iluminação consome 22% e os equipamentos 38%. De acordo com a Eletrobrás, em edificações comerciais no Brasil, o sistema de ar-condicionado em média é responsável por 47% do consumo de energia, sistemas de iluminação consomem 22% e equipamentos 31% (ELETROBRÁS, 2009). Como as estratégias bioclimáticas utilizadas só tiveram influência no consumo do ar-condicionado, outros estudos devem ser feitos para se ter uma base de comparação mais precisa.

4.2. Conforto térmico

A sensação térmica foi analisada a partir da escala do índice PMV. Um PMV entre 0 e +1 representa conforto térmico, entre +1 e +2 uma sensação de levemente quente, e o PMV acima de +2 uma sensação de calor experimentada pelos ocupantes. A Figura 8 apresenta a média percentual das sensações de conforto (neutro), levemente quente e quente para duas das quatro zonas térmicas analisadas. Foram selecionadas as Zonas A e D, que representam ambientes em posições opostas da edificação, e os resultados são apresentados para a semana típica de inverno e verão em Teresina.

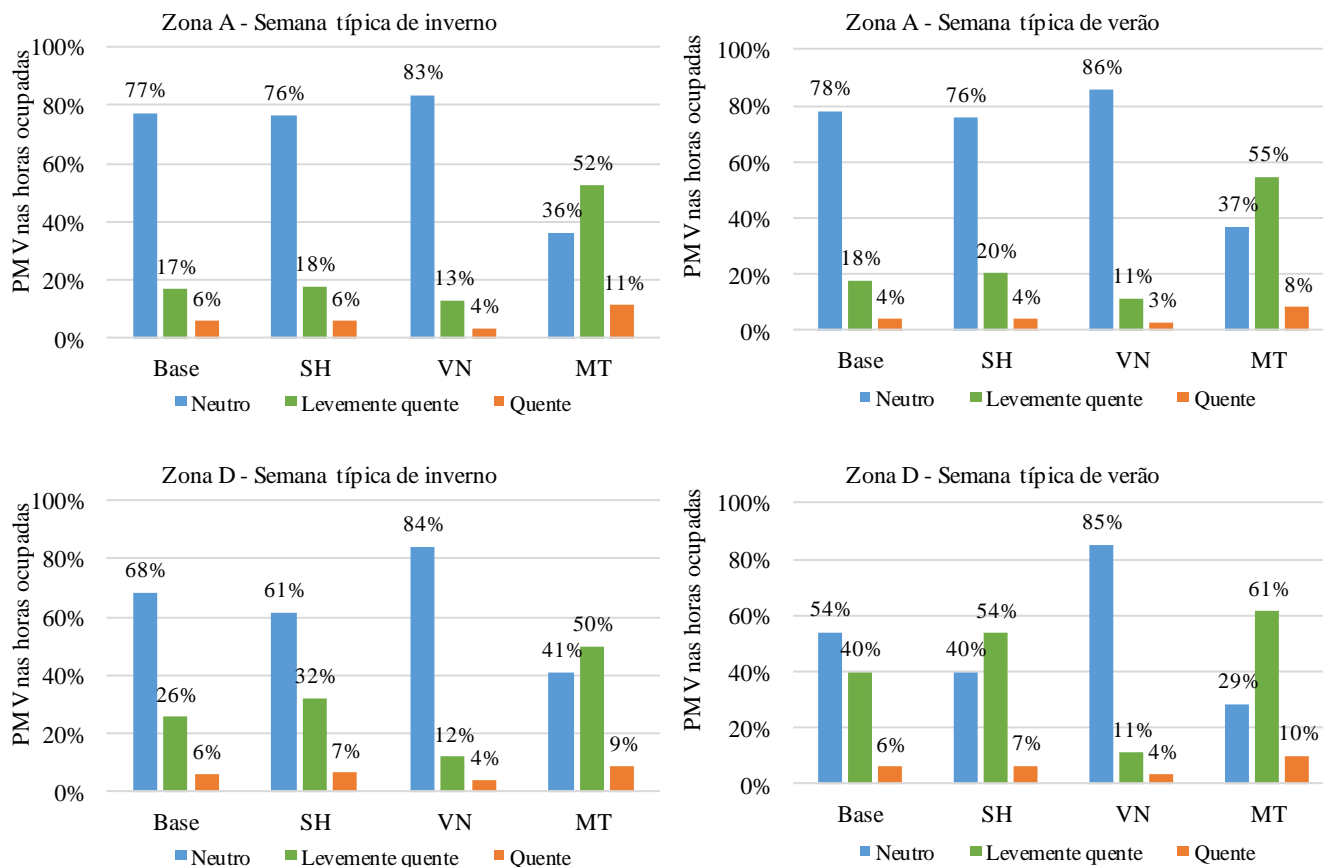


Figura 8: Médias do PMV nas Zonas A e D nas semanas típicas de inverno e verão

Na semana de inverno para a Zona A as pessoas estão confortáveis em 76% das horas ocupadas no caso do sombreamento horizontal, valor semelhante ao caso base. Com o uso da ventilação noturna, houve uma melhora na porcentagem da sensação de conforto (83% - um aumento de 9,2% em relação ao caso base). Entretanto, no caso da massa térmica, as pessoas experimentam sensação de calor em 52% do tempo e estão confortáveis apenas em 36% das horas ocupadas. Na semana de verão o comportamento é semelhante, as pessoas estão confortáveis em 86% do tempo com a ventilação noturna, e o uso da massa térmica causa sensação de leve calor em 55% das horas.

Já na Zona D, durante a semana de inverno a porcentagem das horas ocupadas em que as pessoas estão confortáveis é um pouco inferior à Zona A para o caso do sombreamento (61%) e para o caso da massa térmica (50%), porém ligeiramente superior no caso da ventilação (86%). Por outro lado, na semana de verão o cenário onde se verifica sensação de leve calor é superior em relação à Zona A. As pessoas estão confortáveis em apenas 40% do tempo no caso do sombreamento. Isso indica que para edifícios com condicionamento artificial do ar, o uso de estratégias bioclimáticas influencia de maneira distinta ambientes localizados em diferentes orientações de um edifício.

4.3. Temperatura operativa

Para melhor caracterizar a sensação térmica dos usuários, a temperatura radiante média e a temperatura de bulbo seco foram utilizadas para calcular a temperatura operativa, um indicador para análise do conforto térmico. A partir das simulações, são apresentados a seguir os resultados de um dia típico na semana de inverno para a Zona A (Figura 9) e de um dia típico na semana de verão para a Zona D (Figura 10).

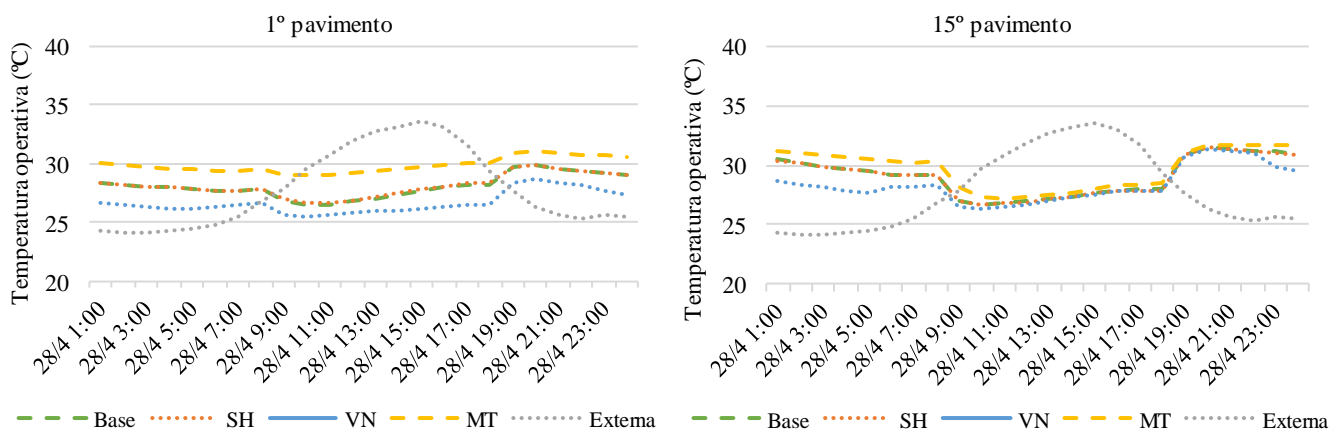


Figura 9: Temperatura Operativa em um dia típico de inverno para a Zona A

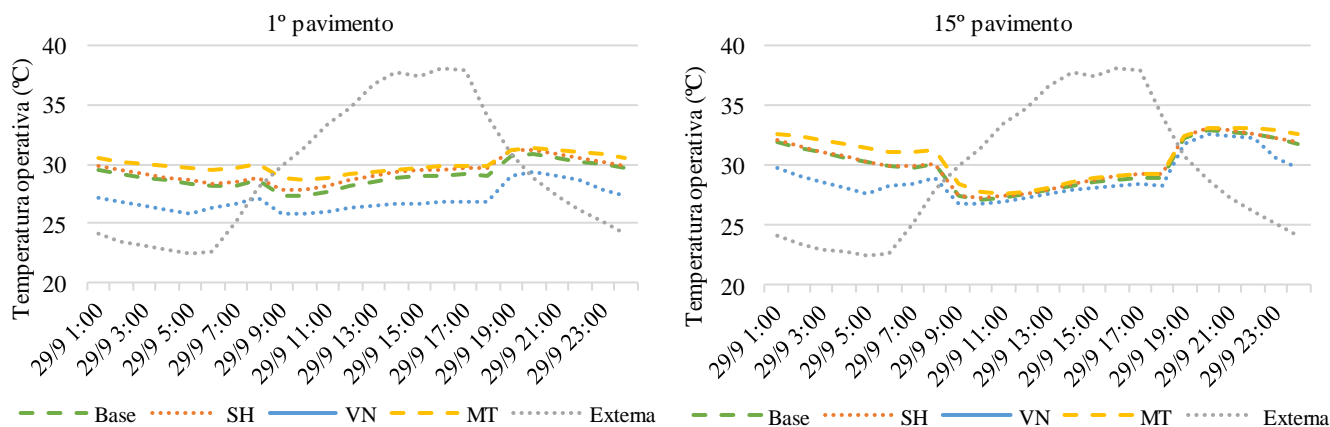


Figura 10: Temperatura Operativa em um dia típico de verão para a Zona D

No dia típico de inverno para a Zona A, o primeiro pavimento apresentou as maiores variações de temperatura operativa (TO) com o uso das estratégias em relação ao décimo quinto pavimento. Durante as horas ocupadas, a TO variou entre 25,5°C e 30°C. No caso do sombreamento horizontal, não houve variação significativa em relação ao caso base. O uso da ventilação noturna resultou em uma redução média de 1,5°C

de TO. Entretanto, o uso da massa térmica elevou a TO em média 1°C durante as horas ocupadas. Esta variação de temperatura não foi verificada no último pavimento, em todos os casos o comportamento da TO foi bastante similar, com menos de 1°C de diferença entre as 8:00 e 18:00.

Para a Zona D, no dia típico de verão, o comportamento da temperatura operativa foi similar ao dia de inverno da Zona A. O primeiro pavimento teve a maior variação da TO nas horas ocupadas, variando entre 26°C e 30,5°C. As temperaturas ficaram em média 0,5°C acima da média na Zona A. O sombreamento resultou em um aumento médio de 0,5°C em relação ao caso base, e de 1°C com o uso da massa térmica. Já no caso da ventilação noturna, em média a TO reduziu 2°C em relação ao modelo inicial, o maior verificado na análise da temperatura operativa. No último pavimento, a TO não variou muito entre os casos, oscilando entre 26°C e 29°C. Tal resultado pode ser explicado pelos maiores níveis de ventilação no último andar, o que reduz as temperaturas internas do ambiente.

4.4. Estratégias bioclimáticas

De acordo com a ISO 7730 (ISO, 2005), os resultados mostraram que as pessoas estão confortáveis na maior parte das horas ocupadas nas semanas típicas de inverno e verão com o uso da ventilação seletiva no período noturno e com sombreamento horizontal nas fachadas norte e sul. Como os valores do PMV ficaram entre 0 e +1, a sensação térmica pode ser considerada neutra com o uso da estratégia. O uso da massa térmica sozinha não representou uma melhoria significativa no conforto térmico.

A ventilação natural e a proteção solar com barreiras físicas são as estratégias mais eficazes em projetos de edifício para melhorar o conforto térmico através de meios passivos (LAMBERTS et al., 2013). O uso da massa térmica para resfriamento pode reduzir a demanda de energia elétrica na edificação, mas se não combinada com outra solução arquitetônica, não garante a melhoria da qualidade ambiental para os usuários. As estratégias propostas neste estudo foram avaliadas individualmente, então elas devem ser combinadas entre si para elevar o potencial de redução de consumo do edifício.

5. CONCLUSÕES

O principal objetivo desse estudo foi avaliar o potencial de redução de consumo e melhoria do conforto térmico para um edifício de escritórios em região de clima tropical semiúmido. O estudo enfatizou o uso de estratégias bioclimáticas nas simulações computacionais em um modelo no EnergyPlus. A partir dos resultados, é possível traçar as seguintes conclusões:

- Edifícios de escritório típicos de região com clima tropical semiúmido no Brasil consomem mais energia em relação à edifícios similares com alto desempenho energético. Entretanto, com o uso de estratégias bioclimáticas passivas, existe um alto potencial de redução de consumo para esses edifícios. A partir dos resultados das simulações, é possível atingir uma redução de até 10,1% no consumo;
- Em edifícios condicionados artificialmente, a sensação de conforto térmico é próxima da neutralidade no índice PMV com o uso da ventilação noturna e do sombreamento horizontal nas fachadas norte e sul (com uma melhoria de até 57% em relação ao caso base). De acordo com a ISO 7730, as pessoas estão termicamente confortáveis na maior parte das horas de ocupação. O uso da massa térmica não melhorou o conforto térmico, e as pessoas sentem leve calor em um grande período de tempo;
- A análise da temperatura operativa mostrou uma variação mais significativa nos primeiros pavimentos. Em ambientes localizados no último andar, a TO não apresentou grandes variações, em razão da influência dos maiores níveis de ventilação;
- As limitações deste estudo podem ser consideradas para trabalhos futuros. O consumo energético mensal não foi avaliado, e pode ser melhor investigado. Também podem ser estudadas a influência da vizinhança, a ventilação natural e a combinação de diferentes estratégias bioclimáticas, bem como potencial de redução no consumo de sistemas de iluminação e equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 16401**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro, 2008.
- ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 90.1-2007**: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Atlanta, 2007.

- _____. **Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy** Ashrae. Atlanta, 2013.
- BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria 372, de 17 de setembro de 2010**. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro: INMETRO, 2010. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001599.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2014.
- _____. **Portaria 50, de 01 de fevereiro de 2013**. Requisitos de avaliação da conformidade para eficiência energética de edificações. Rio de Janeiro: INMETRO, 2013. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/comercial/regulamentos>>. Acesso em: 21 jun. 2015.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco energético nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2017.
- CANDIDO, C.; DEAR, R. DE. From thermal boredom to thermal pleasure: a brief literature review. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 81–90, 2012.
- CARLO, J. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- CASTILLA, M. et al. A comparison of thermal comfort predictive control strategies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2737–2746, out. 2011.
- CLIMATE ONE BUILDING. **Repository for free weather data for building performance simulation**. Disponível em: <<http://climate.onebuilding.org/>>.
- ELETOBRÁS. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil – Sumário Executivo**. Ano Base 2005. Rio de Janeiro: ELETOBRÁS, 2009. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/>>. Acesso em 25 out. 2014.
- FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering**. New York: McGraw-Hill, 1972.
- H. BORGSTEIN, E.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 82–91, out. 2014.
- ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730:2005**. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Switzerland, 2005.
- IWARO, J.; MWASHA, A. A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7744–7755, dez. 2010.
- KONG, X. et al. Energy consumption, indoor environmental quality, and benchmark for office buildings in Hainan Province of China. **Journal of Central South University**, v. 19, n. 3, p. 783–790, 3 mar. 2012.
- LAMBERTS, R. et al. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. Florianópolis: LabEEE, 2013. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/node/406>>. Acesso em: 20 abr. 2014.
- LEE, S. E.; RAJAGOPALAN, P. Building energy efficiency labeling programme in Singapore. **Energy Policy**, v. 36, n. 10, p. 3982–3992, out. 2008.
- LI, D. H. W.; YANG, L.; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. **Energy**, v. 54, p. 1–10, jun. 2013.
- PEEL, M.; FINLAYSON, B.; MCMAHON, T. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, p. 1633–1644, 2007.
- RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC**. São Carlos: ANTAC, 2012. Disponível em: <[http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes nos arquivos EPW - ANTAC.pdf](http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes%20nos%20arquivos%20EPW%20-%20ANTAC.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2015.
- SAIDUR, R. Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 4104–4113, out. 2009.
- SPYROPOULOS, G. N.; BALARAS, C. A. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches—A case study. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 770–778, abr. 2011.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Energy Simulation Software v. 8.3**. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>.
- ZHANG, Y.; CHEN, H.; MENG, Q. Thermal comfort in buildings with split air-conditioners in hot-humid area of China. **Building and Environment**, v. 64, p. 213–224, jun. 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro à pesquisa, de acordo com o Processo nº 2016/21667-1.