



XIV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

X ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

BALNEÁRIO CAMBORIU | 27 a 29 de setembro de 2017

ECONOMIA DE ENERGIA COM AR CONDICIONADO PROPORCIONADA POR TELHADOS VERDES E REFLETIVOS EM DIFERENTES CLIMAS DO BRASIL

Luan Maximiano de Oliveira da Costa (1); Frederico Romagnoli Silveira Lima (2)

(1) Msc., professor, luan.costa@iff.edu.br, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense,
Av. João Jazbick, S/ nº, Aeroporto - Santo Antônio de Pádua, RJ, 28470-000

(2) Dr., professor, fredrsl@des.cefetmg.br, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Av. Amazonas, 7675, Bairro Nova Gameleira, BH,
MG, 30510-000, +553133196708

RESUMO

A combinação de sistemas passivos, que não dependem de energia elétrica, pode contribuir para redução da demanda de energia em edifícios. Entre esses sistemas passivos estão a instalação de coberturas vegetadas e coberturas refletivas sobre o telhado. O presente trabalho verificou, por meio de simulação computacional na plataforma EnergyPlus, a economia anual de energia elétrica com ar condicionado proporcionada pelo telhado verde e pelo telhado refletivo, abrangendo as diferenças climáticas do território brasileiro. Um modelo de referência de edifício comercial, com o devido padrão de cargas térmicas internas, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e implementado na plataforma *EnergyPlus*, foi utilizado como ponto de partida. Os resultados demonstraram economias significativas de energia tanto para a utilização da cobertura verde quanto para a refletiva. Foi possível identificar que climas frios e úmidos tendem a inibir o desempenho das coberturas vegetadas, podendo, a exemplo de Curitiba, ser mais vantajoso a utilização de coberturas refletivas para a economia de energia com ar condicionado. Por outro lado, climas quentes e secos são mais adequados à sua instalação, uma vez que favorecem o processo de dissipação de calor por evapotranspiração pelo solo e plantas, como na cidade de Cuiabá.

Palavras-chave: telhado verde, telhado refletivo, EnergyPlus, simulação energética, ar condicionado.

ABSTRACT

The combination of passive systems, which do not depend on electric energy, can contribute to the reduction of energy demand in buildings. Among these passive systems are the installation of plant coverages and reflective coverages on the roof. This work verified, through computational simulations, the annual savings of electric power with air conditioning provided by green roof and reflective roof, observing the climatic differences in Brazilian territory. A commercial building reference model, with the proper standard of internal thermal loads, developed by the US Department of Energy and implemented on EnergyPlus platform, was used as the starting point. The results showed significant energy savings for both green and reflective coverages. It was found that the thermal benefits of the use of these coverages vary considerably accordingly to the locality and that they are generally most benefited for those buildings located in cities where air conditioning has a larger percentage in the electric energy bill. It was possible to identify that cold and humid climates tend to inhibit vegetation cover efficiency and that the use of reflective covers may be more advantageous for energy saving with air conditioning, like in Curitiba. On the other hand, hot and dry climates are more suitable for the installation because they favor the process of heat dissipation through evapotranspiration by soil and plants, like in Cuiabá.

Keywords: green roof, reflective roof, EnergyPlus, building energy simulation, air conditioning.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de ar condicionado em edifícios comerciais no Brasil podem ser responsáveis por até 70% do seu consumo de energia elétrica (CARVALHO; LA ROVERE; GONALVES, 2010), o que, além de acarretar no alto custo da conta de energia elétrica, contribui para o agravamento do efeito estufa, uma vez que o alto consumo está intimamente ligado à maior necessidade de geração de energia, que por sua vez pode ocorrer por meio de fontes fósseis. A combinação de sistemas passivos, que não dependem de energia elétrica, permite o resfriamento de ambientes, contribuindo para reduzir a demanda de energia em edifícios sem sacrificar as exigências de conforto (YUN; STEEMERS, 2011). Segundo Zinzi e Agnoli (2012), a introdução de coberturas vegetadas ou refletivas sobre o telhado pode proporcionar economias significativas de energia nos edifícios com sistema de refrigeração.

A forma construtiva dos telhados verdes varia amplamente, seja por conta do clima da região, da empresa desenvolvedora da tecnologia ou pela forma construtiva habitual do telhado em determinadas regiões. Os telhados verdes possuem tipicamente quatro camadas construtivas. A camada de proteção, aplicada diretamente acima do telhado convencional, tem a função de proteger a laje contra umidade e contra o desenvolvimento das raízes das plantas, a mesma pode ser constituída de uma combinação de membranas impermeáveis e barreiras de raiz. A camada de drenagem, localizada logo acima da camada de proteção, pode incluir pequenos reservatórios de água e vazios para permitir que o excesso de água possa fluir para fora da construção do telhado verde por alguma calha ou ser, de alguma forma, armazenado. Normalmente, uma combinação leve de areia, agregado e matéria orgânica compõe o meio de crescimento, o qual é geralmente separado da camada de drenagem por um tecido de malha densa, para permitir a filtragem da água de drenagem. Por fim, sobre a camada do meio de crescimento localiza-se a camada de vegetação, a qual pode ser composta por diferentes espécies de plantas (SAILOR, 2008; OBERNDORFER et al., 2007).

Assim como os telhados verdes, a tecnologia de telhados refletivos, também conhecidos como telhados brancos ou frios, vem despertando grande interesse nos últimos anos. Estes telhados podem reduzir significativamente a demanda de energia em ambientes climatizados e, em grande escala, atenuar os efeitos de ilha de calor característicos de centros urbanos. O telhado branco é um sistema de cobertura que se caracteriza por uma superfície de elevada refletância solar, ou seja, elevada capacidade de refletir a radiação solar incidente, o que contribui para reduzir a transferência de calor para o interior do edifício, e alta emissividade de infravermelhos, isto é, libertação mais rápida do calor absorvido sob a forma de radiação infravermelha (SYNNEFA; SANTAMOURIS, 2012).

As coberturas verdes e as coberturas refletivas compartilham os mesmos benefícios para climatização de ambientes e atenuação dos efeitos de ilha de calor. A utilização dos telhados verdes, porém, além de vantagens estéticas, pode contribuir para reduzir o escoamento de águas pluviais, absorver poeira e poluição atmosférica, sequestrar dióxido de carbono e produzir oxigênio por meio da fotossíntese, atenuar os efeitos da poluição sonora, criar espaço para a produção de alimentos, fornecer habitat natural para animais e plantas, entre outros. Deve-se destacar que as coberturas verdes possuem também algumas desvantagens, entre as principais estão o elevado custo de instalação, se comparadas aos telhados convencionais e às coberturas refletivas, despesas com manutenção e irrigação das plantas e acréscimo de carga na cobertura do edifício (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Saadatian et al. (2013) relatam em sua revisão que a maioria dos estudos de campo sobre telhados verdes foram limitados principalmente aos efeitos de arrefecimento e em medir a temperatura da superfície dos telhados. Medições na superfície, no entanto, não impactam de forma direta na energia consumida, uma vez que a carga do sistema de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) de um edifício é significativamente determinada pelas cargas internas e cargas ambientais pelas de janelas, paredes e telhado. Assim, o percentual de redução no fluxo de calor na cobertura pode, na verdade, traduzir em um menor impacto que o previsto para a carga de AVAC (SAILOR; ELLEY; GIBSON, 2012). Para avaliar o consumo de energia de um edifício com um telhado verde, Sailor (2008) propôs um modelo de balanço energético, que foi integrado ao programa de simulação energética EnergyPlus. O modelo foi validado e teve a sensibilidade às mudanças nas características construtivas do telhado testada em seu estudo.

2. OBJETIVO

O objetivo da pesquisa foi verificar a economia de energia elétrica para o sistema de ar condicionado proporcionada pelo telhado verde e pelo telhado refletivo no período de um ano, por meio de simulação energética de um edifício comercial na plataforma EnergyPlus, abrangendo diferentes características climáticas do Brasil.

3. MÉTODO

A metodologia para a análise comparativa entre as alternativas construtivas de coberturas foi baseada nos trabalhos de Sailor, Elley e Gibson (2012), Moody e Sailor (2013) e Sailor e Bass (2014). Os procedimentos adotados para o estudo estão divididos nas cinco etapas seguintes:

1. Adoção de um modelo computacional de edificação comercial do Departamento Energia dos Estados Unidos (DOE – *Department of Energy*) utilizando o programa EnergyPlus versão 7.2.
2. Alteração das características construtivas do modelo para adequação ao caso brasileiro obtendo-se o modelo representativo para a cobertura convencional.
3. Alteração no modelo convencional para representação das coberturas verdes e refletivas.
4. Seleção dos arquivos climáticos para representar cidades brasileiras com diferentes características climáticas.
5. Simulação e análise dos resultados.

3.1. Modelo do DOE

O ponto de partida foi a adoção de um modelo de referência para o edifício, assim, recorreu-se aos modelos de referência comerciais, conhecidos como *benchmarks*, os quais foram desenvolvidos pelo DOE em parceria com seus laboratórios. Esses modelos apresentam características de formas e práticas construtivas reais, por isso tornaram-se um ponto de partida consistente para comparação de simulações energéticas de edifícios (DERU et al., 2011).

Os materiais que compõem a envoltória das edificações modeladas variam de acordo com tipo de construção e do clima. A condutividade térmica das paredes externas e do telhado, assim como as características térmicas das janelas, foram determinadas de acordo com a seção 5 da norma ASHRAE 90.1 (2004) (*Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*), para cada uma das 16 zonas climáticas definidas na norma. A ASHRAE 90.1 (2004) foi utilizada também como fonte para as cargas internas, porém, como existe uma variação considerável quanto ao tipo de construção, cada uma com requisitos de iluminação, equipamentos e características específicos, as decisões sobre os níveis de carga interna foram estabelecidas e revisadas pelos laboratórios do DOE, com contribuição de comitês técnicos da ASHRAE, guias de projetos específicos da indústria e experiência de usuários (FIELD; DERU; STUDER, 2010).

O sistema de AVAC e demais equipamentos foram determinados a partir da análise dos dados obtidos na pesquisa de consumo de energia em edifícios comerciais, CBECS 2003 (*Commercial Buildings Energy Consumption Survey*), realizada por Winiarski, Jiang e Halverson (2006), de forma a aproximar o modelo da realidade. Foram ainda, quando pertinente, seguidas as recomendações contidas na ASHRAE 90.1 (2004). Os modelos comerciais, em formato de arquivo de entrada para o EnergyPlus, são disponibilizados publicamente pelo DOE em U.S. Department of Energy (2016). Mais detalhes sobre os mesmos podem ser obtidos em Deru et al. (2011).

O modelo de referência comercial utilizado foi o de uma edificação média de escritório (*Medium Office*) para a versão 7.2 do EnergyPlus, o qual possui 3 pavimentos e área de cobertura de 1660 m². A escolha do modelo se deu pela possibilidade de verificação inicial dos modelos com telhado verde com os resultados obtidos nos trabalhos de Sailor, Elley e Gibson (2012) e por se enquadrar em uma tipologia de edifício existente em grandes centros urbanos, os quais são os principais alvos de implantação de telhados com vegetação, como forma de devolução da camada vegetal removida no processo de urbanização. Tomou-se como base o arquivo *Medium Office* da cidade de Houston, no estado americano do Texas, que está classificada na zona climática 2 de acordo com a ASHRAE 90.1-2004, assim como Brasília, Porto Alegre e São Paulo.

O edifício possui 15 zonas térmicas, uma central e quatro perimetrais em cada um de seus 3 pavimentos, totalizando uma área condicionada de 4982m². Todos os 3 pavimentos possuem entretorço, que é um ambiente não climatizado no qual são localizadas as estruturas de insuflamento do sistema de AVAC. Na Figura 2 é apresentada a planta baixa e a fachada do modelo, na qual é possível observar a disposição das 5 zonas térmicas condicionadas de cada pavimento e os 3 entretorços.

O modelo é composto por 3 unidades ar condicionado de expansão direta (DX) do tipo *rooftop* com volume de ar variável (VAV), uma para cada pavimento. Segundo a configuração padrão do modelo para o termostato, a qual foi mantida, o ar condicionado é programado de 3 formas de acordo com o dia da semana, conforme mostrado na Figura 3. Nos dias de feriado o sistema de AVAC funciona com as mesmas características de domingo, com temperatura limite de 26,7 °C. Ressalta-se que não foi considerado o controle para umidade, sendo controlada apenas a temperatura das zonas térmicas.

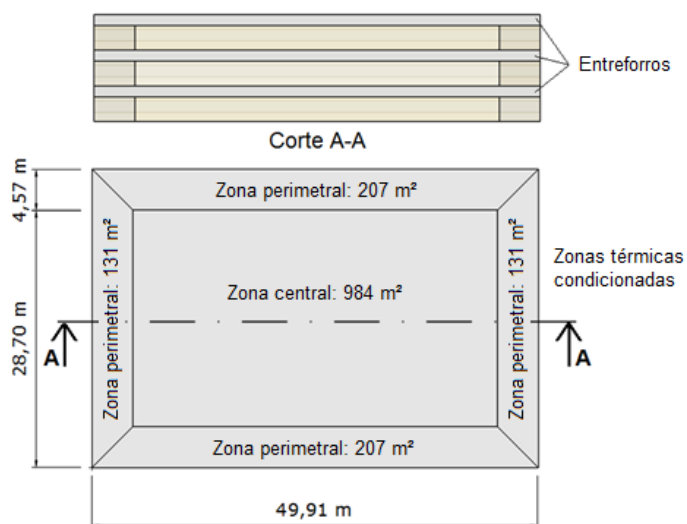


Figura 1 – Planta baixa e corte do edifício *Medium Office*.

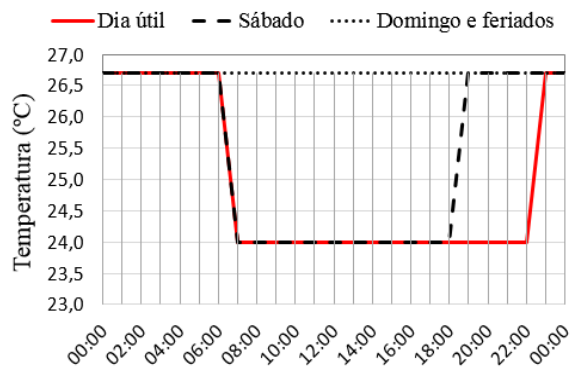


Figura 2 – Programação do termostato do ar condicionado.

3.2. Modelo convencional

Para adaptar o modelo do DOE a uma construção habitual no Brasil, o telhado do modelo de referência, o qual possui isolamento de acordo com a ASHRAE 90.1 (2004), foi modificado para o de laje maciça de concreto armado sem telhamento, conforme as configurações construtivas obtidas em LabEEE (2011). As modificações no modelo original limitaram-se à cobertura, como forma de minimizar possíveis erros na manipulação do modelo já verificado. Assim, o modelo *Medium Office* para a cidade de Houston com alteração de seu telhado original para laje de concreto maciça foi tomado como modelo convencional. As propriedades térmicas da laje maciça de concreto estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades da laje maciça de concreto armado.

| Propriedade | Valor | Referência |
|--|-------------------------|--|
| Rugosidade superficial: | Média | U.S. Department of Energy (2016c) |
| Espessura: | 0,1 m | LabEEE (2011) |
| Condutividade térmica: | 1,75 W/m.K | ABNT NBR 15220-2:2005 |
| Densidade: | 2.200 kg/m ³ | ABNT NBR 15220-2:2005 |
| Calor específico: | 1.000 J/kg.K | ABNT NBR 15220-2:2005 |
| Absortância térmica (considerando a Lei de Kirchhoff): | 0,9 | ABNT NBR 15220-2:2005 |
| Absortância solar: | 0,7 | ASHRAE 90.1 (2004) e ABNT NBR 15220-2:2005 |

3.3. Cobertura verde e refletivas

A partir do modelo para a edificação convencional (laje maciça), outros modelos do edifício comercial foram criados por meio de alterações das características construtivas de seu telhado para a análise comparativa. Os modelos construtivos podem ser, então, divididos em 3 tipos básicos, com telhado convencional, com telhado refletivo e o modelo com cobertura vegetal, conforme ilustrado na Figura 3.

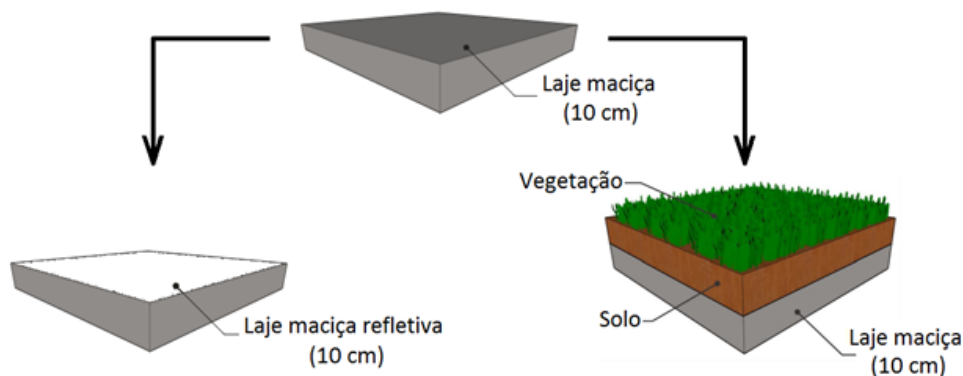


Figura 3 – Tipos de modelos construtivos de cobertura.

Dois modelos de edificação com telhado refletivo foram criados para simulação, um com refletância à radiação solar de 0,65, que condiz com um telhado novo, e outro com refletância à radiação solar de 0,50, para representar um telhado com 3 anos de instalação, segundo os critérios da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2008). Os dois modelos foram criados alterando somente o parâmetro de absorvância solar do telhado convencional no *EnergyPlus*, mantendo-se todas as outras características do modelo padrão de laje maciça.

O modelo de edificação com cobertura vegetada foi obtido por meio da utilização do modelo *EcoRoof* de Sailor (2008) integrado ao *EnergyPlus*, bastando-se inserir o material *RoofVegetation* sobre a cobertura da edificação convencional para se obter o modelo de edifício com telhado verde. Considerou-se para a estrutura vegetada uma altura da camada de solo de 15 cm e o índice de área foliar (IAF) igual a 5. Para os demais parâmetros, foram considerados os valores de *default* do *EnergyPlus*, conforme o trabalho de Sailor, Elley e Gibson (2012). O estudo não teve a intenção de representar espécies de plantas específicas, estando o valor do IAF entre os limites mínimo e máximo do *EnergyPlus* (0,5 e 5,0). Assim como efetuado para os modelos de cobertura refletiva, manteve-se todas as outras características do modelo padrão de laje maciça.

O IAF é considerado o parâmetro mais importante no desempenho térmico das coberturas verdes, sendo definido pela proporção entre a área de folhas por área de superfície de solo e influenciado pelo tipo de planta e altura da folhagem (YU, 2006). Segundo o trabalho de Zhao et al. (2014), a variação das propriedades térmicas do solo não influencia substancialmente na performance térmica da cobertura verde, o efeito principal do solo é o atraso no fluxo de calor devido à sua massa.

Deve-se destacar que, por motivos estruturais, a construção da laje abaixo de uma cobertura verde pode ser diferente da alternativa convencional, uma vez que a camada vegetal aumenta a carga de cobertura. No estudo, manteve-se a mesma laje do modelo convencional para todas as variações de cobertura verde estudadas, inserindo no modelo somente a construção com material *RoofVegetation* na camada mais externa do telhado, sobre a laje de concreto.

3.4. Arquivos Climáticos/Cidades

Para representação de edificações sujeitas às diversas características climáticas do Brasil, foram selecionadas 8 cidades do território nacional, pertencentes a cada uma das 8 zonas bioclimáticas definidas na ABNT NBR 15220-3:2005. Utilizou-se, para as simulações, 8 arquivos climáticos EPW (*EnergyPlus Weather File*), priorizando os disponibilizados na base de dados do *EnergyPlus* (EnergyPlus, 2016). Na possibilidade de mais de uma fonte, foram priorizados arquivos desenvolvidos pelo projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), como forma de padronização. Na falta de um arquivo para a zona 5, recorreu-se aos arquivos climáticos da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), disponíveis em LabEEE (2016), os quais foram obtidos pelas estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As cidades selecionadas para cada zona bioclimática com a respectiva fonte de dados meteorológicos de seu arquivo EPW estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Cidades selecionadas para simulação.

| Zona | Cidades | Fonte de Dados | Referência |
|------|--------------------|----------------|-------------------|
| 1 | Curitiba, PR | SWERA | EnergyPlus (2016) |
| 2 | Santa Maria, RS | SWERA | EnergyPlus (2016) |
| 3 | Belo Horizonte, MG | SWERA | EnergyPlus (2016) |
| 4 | Brasília, DF | SWERA | EnergyPlus (2016) |
| 5 | Niterói, RJ | INMET/ANTAC | LabEEE (2016) |
| 6 | Campo Grande, MS | SWERA | EnergyPlus (2016) |
| 7 | Cuiabá, MT | SWERA | EnergyPlus (2016) |
| 8 | Fortaleza, CE | SWERA | EnergyPlus (2016) |

Os arquivos climáticos utilizados, do projeto SWERA e o da ANTAC, consistem de arquivos TMY2 (*Typical Meteorological Year*), os quais fornecem dados de um ano típico, convertidos para o formato EPW para entrada no *EnergyPlus*. Os arquivos do tipo TMY são conjuntos de dados de valores horários de radiação solar e de outros parâmetros meteorológicos para um período de 1 ano, consistindo em uma compilação de meses típicos provenientes de diferentes anos. Em relação aos arquivos da base de dados da ANTAC, para grande parte dos municípios constantes da base do INMET foi possível montar poucos anos inteiros. Assim, os arquivos resultantes possuem baixa representatividade estatística das ocorrências climáticas históricas e deverão ser aperfeiçoados para dispor de períodos mais longos de registro (RORIZ, 2012).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na Figura 4 apresenta-se o consumo anual de energia com ar condicionado por m² de cobertura para o edifício convencional em cada uma das 8 localidades dividido por pavimento. Como se pode observar, a energia consumida com ar condicionado para o edifício varia amplamente de uma cidade para outra. O consumo em Cuiabá e Fortaleza, por exemplo, supera em mais de 2 vezes o consumo em Curitiba e se aproxima do dobro do consumo dos edifícios localizados em Santa Maria e Niterói.

Como esperado, devido à maior exposição à radiação solar e maior área de troca de calor com o ambiente externo, o terceiro pavimento apresentou um consumo de energia elétrica com ar condicionado significativamente superior aos demais pavimentos para todas as localidades, conforme apresentado na Figura 4. Para Cuiabá, caso com diferença mais relevante entre os estudados, o consumo no terceiro pavimento (105,64 kWh/m² de cobertura) foi próximo ao dobro do consumo com ar condicionado no primeiro (54,16 kWh/m² de cobertura). Assim, o fato do maior consumo de energia com ar condicionado ocorrer no terceiro pavimento vai ao encontro do propósito dos telhados refletivos e vegetados em estudo, os quais melhoram as condições de conforto térmico no ambiente logo abaixo da cobertura.

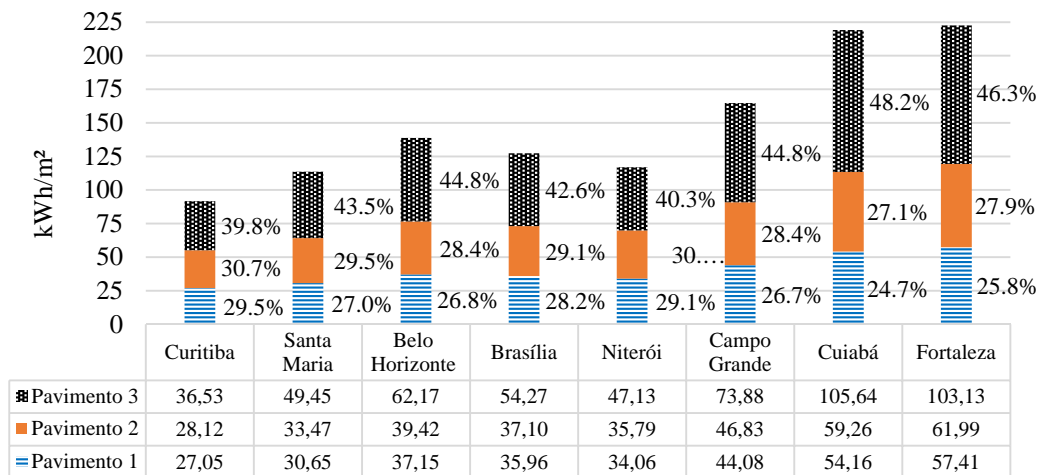


Figura 4 – Consumo anual de energia elétrica com ar condicionado por área de cobertura nos 3 pavimentos do edifício convencional para as 8 cidades.

Na Figura 5 está apresentado o resultado da simulação para consumo anual de energia elétrica com ar condicionado por m² de cobertura para o edifício com as diferentes configurações de cobertura (convencional, cobertura vegetada, cobertura com refletância de 0,65 e cobertura com refletância de 0,50) para as 8 localidades selecionadas para o estudo. Os valores percentuais na Figura 5 fazem referência à economia proporcionada por cada variedade construtiva em relação à cobertura convencional.

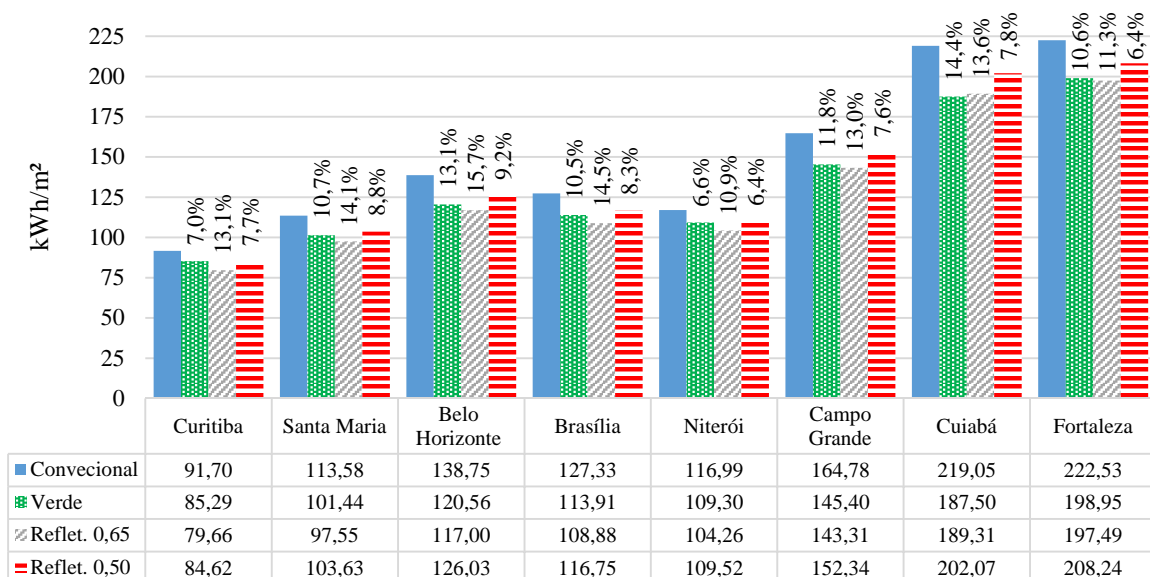


Figura 5 – Consumo anual de energia elétrica com ar condicionado por área de cobertura para as diferentes alternativas construtivas e percentual de economia em relação à cobertura convencional.

Os resultados para o consumo de energia elétrica com ar condicionado foram apresentados para toda a edificação, ou seja, a soma do consumo dos 3 pavimentos. Entretanto, é importante destacar que a economia se deu, para todos os modelos simulados, em maior parte no terceiro pavimento. Para o caso de Belo Horizonte, por exemplo, a economia para o edifício com telhado de refletância igual a 0,65 em relação ao edifício com telhado convencional foi de 15,7%. Caso considerado somente a economia de energia elétrica no terceiro pavimento, o resultado para o percentual de economia se acentuaria, atingindo 33,6%.

As cidades que consomem mais energia com ar condicionado foram também as mais beneficiadas com a cobertura verde e com as coberturas refletivas em termos de kWh/m² consumidos anualmente, porém essa economia não foi proporcional em termos percentuais. A maior economia anual de energia elétrica com ar condicionado entre as coberturas testadas se deu para o edifício com cobertura verde na cidade de Cuiabá, na qual foram consumidos 31,55 kWh/(m² de cobertura) a menos, se comparado com o edifício de cobertura convencional, que consome anualmente 219,05 kWh/(m² de cobertura) com ar condicionado. A menor economia entre todos os modelos simulados também se deu para o edifício com telhado verde, porém para a cidade de Curitiba, na qual foram economizados 6,41 kWh/(m² de cobertura) dos 91,70 kWh/(m² de cobertura) despendidos com ar condicionado no edifício com telhado convencional.

Em termos percentuais a maior economia com ar condicionado se deu em Belo Horizonte, para o edifício de telhado branco com 0,65 de refletância à radiação solar, o qual proporcionou uma redução de 15,7 % de energia elétrica durante um ano para condicionamento de ar no edifício. As menores economias em termos percentuais foram obtidas para Fortaleza e Niterói, ambas de 6,4% e ambas para a cobertura com 0,50 de refletância, valor adotado para o telhado branco com até 3 anos de utilização.

Conforme os resultados apresentados na Figura 5, Cuiabá foi a única cidade onde o desempenho do telhado verde foi superior ao telhado branco de refletância 0,65. Na Figura 6 é mostrado o consumo de energia elétrica com ar condicionado por m² de cobertura a cada mês para as diferentes coberturas na cidade de Cuiabá. Verifica-se, por meio da Figura 6, que o desempenho do telhado verde foi inferior ao do telhado com 0,65 de refletância somente para alguns meses com temperaturas mais amenas, maio, junho e julho. Cuiabá é caracterizada por um clima quente e seco, inclusive durante o inverno, que é a condição de maior desempenho dos telhados verdes. Conforme Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012), a temperatura das folhagens também é mais alta durante os dias mais quentes, condição que aumenta a dissipação de calor por radiação pelas folhagens. A umidade do ar é um fator determinante no desempenho dos telhados verdes, uma vez que o baixo teor de umidade favorece a perda de calor pelas plantas e solo por evapotranspiração (SANTAMOURIS, 2014).

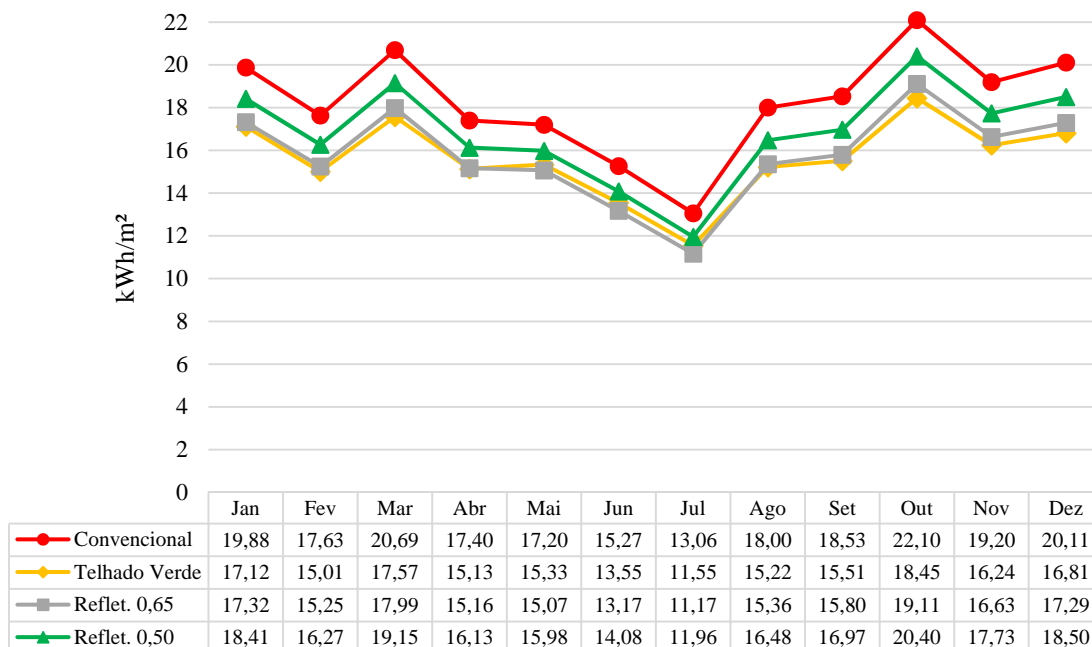


Figura 6. Consumo mensal de energia elétrica com ar condicionado por área de cobertura na cidade de Cuiabá.

Apesar de Fortaleza ser a cidade que apresentou maior consumo anual de energia elétrica com ar condicionado entre as estudadas, a mesma não se beneficiou do mesmo desempenho proporcionado pelo telhado verde para Cuiabá, cidade de maior desempenho do telhado verde em termos percentuais, com 14,4% de economia anual com ar condicionado. A cobertura vegetada proporcionou uma economia anual de 10,6% com ar condicionado para Fortaleza, isso porque mesmo possuindo médias de temperatura regularmente

elevadas para todos os meses, de acordo com seu arquivo climático, a cidade é caracterizada por clima litorâneo, contendo, assim, maior teor de umidade no ar, se comparado ao clima de Cuiabá, o que acarreta em perda de eficiência pelas coberturas vegetadas. Se comparado à Cuiabá, pode-se dizer que o alto teor de umidade do ar para Fortaleza teve um papel determinante para a queda do desempenho da cobertura vegetada para a economia de energia com ar condicionado. Na verdade, o telhado refletivo também foi menos efetivo para a cidade, se comparado ao seu desempenho para Cuiabá, neste caso devido possivelmente à temperatura ambiente durante o dia frequentemente acima do *setpoint* do ar condicionado (24 °C), de acordo com seu arquivo climático. Na cidade de Cuiabá existe uma maior alternância entre dias quentes e frios durante o ano, segundo dados de seu arquivo climático, sendo que os dias com temperaturas mais amenas podem ter contribuído para o melhor desempenho das coberturas refletivas, se comparada ao desempenho para Fortaleza, uma vez que a temperatura exterior mais baixa contribui para a dissipação de calor do telhado branco.

Nas outras sete cidades o modelo com telhado de 0,65 de refletância à radiação solar foi o mais vantajoso para a economia de energia com ar condicionado, com destaque para os 15,7% de economia obtida para Belo Horizonte. A razão para esse bom nível de economia está relacionada à elevada média de radiação solar durante todo o ano na cidade, mesmo no inverno, associada à temperatura média ambiente mais amena, o que contribui para um menor gradiente de temperatura entre o ambiente climatizado e o ambiente externo, se comparado ao gradiente das cidades mais quentes, como Fortaleza e Cuiabá. Assim, com menor gradiente de temperatura, menor é o fluxo de calor do exterior para o interior, podendo acontecer inclusive sua inversão de sentido para coberturas refletivas não isoladas em climas frios (BRITO FILHO; SANTOS, 2014). Isso pode explicar também o fato de algumas cidades com menores médias de temperatura, como Santa Maria e Brasília, apresentarem maior percentual de economia de energia com ar condicionado para a cobertura de 0,65 de refletância, 14,1 e 14,5% respectivamente, frente às mais quentes, como Campo Grande, Cuiabá e Fortaleza, com economias anuais de 13,0, 13,6 e 11,3% respectivamente. A mesma análise pode ser expandida para o telhado com 0,50 de refletância, a partir dos resultados da Figura 5 é possível observar também a melhor desempenho desse telhado para Belo Horizonte, Brasília e Santa Maria diante das cidades com temperaturas mais altas durante o ano (Campo Grande, Cuiabá e Fortaleza).

Por meio da Figura 7 é possível comparar a demanda de energia com ar condicionado para as diferentes coberturas ao longo de 2 dias típicos de outono para Belo Horizonte. Fica clara a redução da demanda de energia em relação à cobertura convencional para todas as alternativas construtivas. Em algumas horas do período da tarde o telhado verde apresenta melhor desempenho em relação aos demais, o telhado branco novo apresenta, no entanto, menor demanda de energia nas primeiras e últimas horas de *setpoint* do sistema de AVAC a 24 °C. A laje de concreto com cobertura refletiva se resfria mais rapidamente após o pôr do sol, impulsionada pela redução da temperatura do ar externo na cidade, reduzindo, assim, a demanda de energia com ar condicionado no edifício. Se tratando do telhado verde, conforme verificado no trabalho de Zhao et al. (2014), a camada de substrato proporciona uma inércia térmica, diminuindo as flutuações da curva de demanda, colaborando para maior demanda de energia elétrica no início e final do dia. A Figura 7 contribui para explicar, então, a razão pela qual a cobertura refletiva de alto desempenho, no caso do estudo a cobertura com refletância igual a 0,65, pode ser mais vantajosa que a cobertura verde.

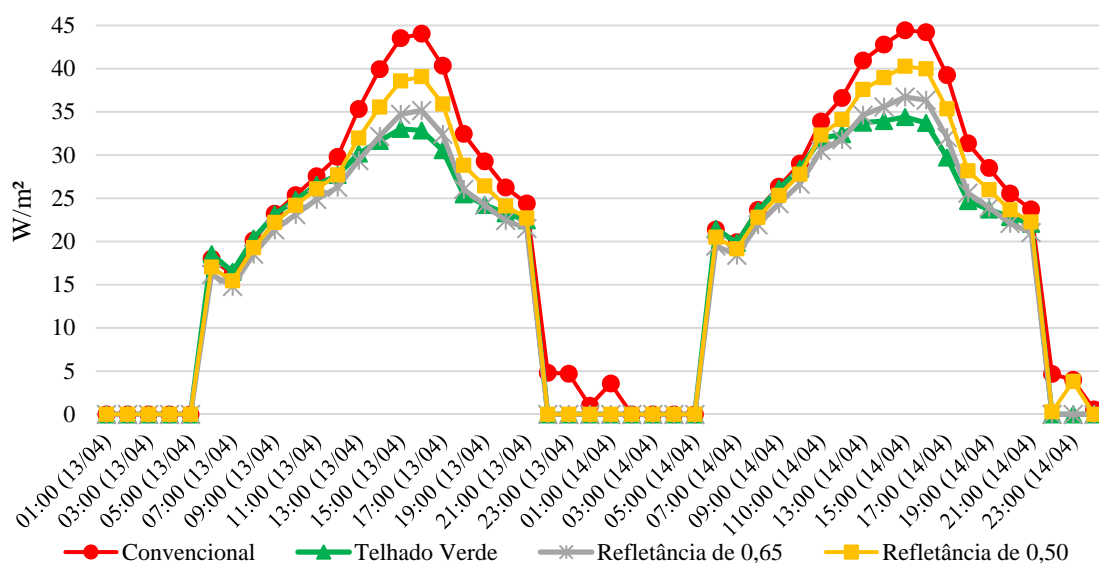


Figura 7 – Demanda de energia elétrica com ar condicionado por área de cobertura para as diferentes alternativas construtivas em dois dias típicos de outono para a cidade de Belo Horizonte – 13 e 14 de abril.

Pode-se extrair também da Figura 5 os efeitos da perda de eficiência da cobertura refletiva devida ao possível decaimento da refletância à radiação solar ao longo dos anos. Entre todas as 7 cidades nas quais o telhado refletivo novo apresenta-se como a melhor alternativa, em 6 delas sua eficiência torna-se inferior à eficiência do telhado verde quando utilizado 0,50 de refletância como parâmetro de simulação. A exceção foi a cidade de Curitiba, na qual o telhado refletivo apresenta-se como alternativa mais eficiente mesmo para a refletância de 0,50. Tal fato é justificado pelo baixo desempenho da cobertura vegetada na capital paranaense. Pode ser observado na Figura 8 que o consumo no edifício com telhado verde em Curitiba foi até inferior ao consumo no edifício com telhado de refletância igual a 0,50 em alguns meses mais quentes (dezembro, janeiro e fevereiro), no entanto, durante os meses de inverno, seu consumo equiparou-se ao proporcionado pelo telhado convencional. A queda no desempenho durante o inverno se deu porque Curitiba possui como característica o inverno úmido, condição que dificulta a perda de calor por evapotranspiração pelas plantas e solo, conforme demonstrado por Theodosiou (2003). Curitiba, com médias diárias de temperatura amenas ao longo de todo o ano, é favorável à redução do fluxo de calor para o ambiente interno por meio de coberturas refletivas, reduzindo, assim, o consumo com ar condicionado, conforme constatado por Brito Filho e Santos (2014).

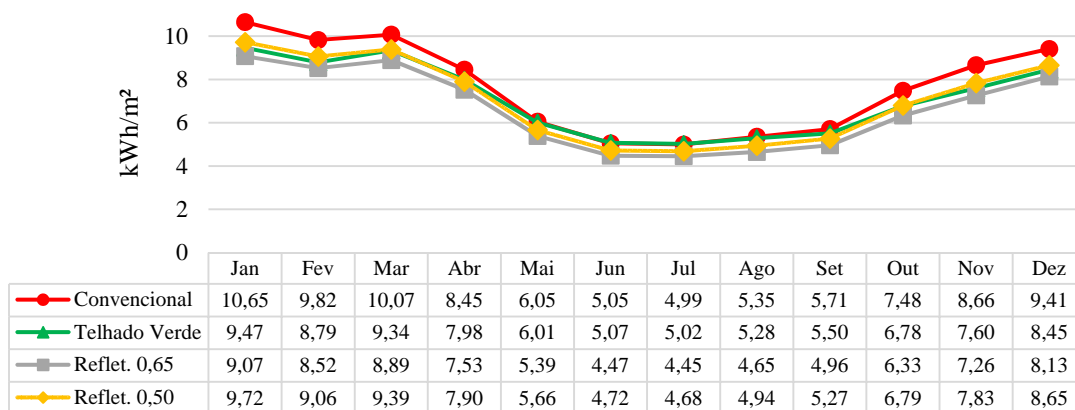


Figura 8. Consumo mensal de energia elétrica com ar condicionado por área de cobertura na cidade de Curitiba.

Niterói foi, no entanto, a cidade em que o telhado verde apresentou o pior desempenho em termos percentuais, com 6,6% de economia em relação ao mesmo edifício com cobertura convencional, sendo inferior ainda ao desempenho do mesmo telhado para Curitiba. O resultado pode ser atribuído ao alto teor de umidade do ar na cidade devido à proximidade do mar e à temperatura ambiente média durante o dia abaixo da temperatura de ajuste do sistema de ar condicionado (24 °C) para a maior parte do ano, tornando desnecessária a utilização do ar condicionado durante esse período. Vale ressaltar a baixa representatividade estatística das ocorrências climáticas presentes no arquivo climático de Niterói, conforme já citado anteriormente.

5. CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos, todas as alternativas construtivas estudadas, sejam elas a cobertura verde ou a refletiva, proporcionaram economia de energia elétrica com ar condicionado em relação à laje maciça de concreto armado em todas as cidades escolhidas para representar as oito zonas bioclimáticas brasileiras. As cidades que consomem mais energia com ar condicionado foram também as mais favorecidas em termos de kWh economizados por m² de cobertura.

Verificou-se o alto desempenho da cobertura vegetada para cidades com climas quentes e secos. Por outro lado, pôde ser verificado seu desempenho baixo para climas frios e úmidos. Já os telhados refletivos, apesar de terem se mostrado mais eficientes para cidades localizadas em zonas com médias moderadas de temperatura, apresentaram alto desempenho para todas as cidades. Foi verificado, no entanto, que a redução do desempenho das coberturas refletivas pode ser significativa com o passar dos anos devido a possíveis perdas de suas propriedades térmicas. No presente trabalho fez-se uso de valores médios para a espessura da camada de solo e para o IAF, mas vale ressaltar que o desempenho da cobertura verde pode ser ainda otimizado por meio de alteração de seus parâmetros construtivos da cobertura.

Quando comparadas ambas as coberturas (verde e refletiva), vale ressaltar que a cobertura verde contribui não só na mitigação dos efeitos do aquecimento global por meio da economia de energia e consequente redução das emissões de CO₂ presentes na geração de energia elétrica, mas também contribui por meio da captura de CO₂ pelas plantas, o que pode tornar sua utilização vantajosa em relação aos telhados com alta refletância. Além disso, o interesse por coberturas verdes vem de suas outras vantagens, tais como sua utilização para atividades recreativas e sua contribuição para o controle de águas de enchente.

O presente trabalho vem contribuir para a formação conteúdo bibliográfico sobre os benefícios térmicos das coberturas verdes e refletivas para as características climáticas específicas do Brasil, considerando, no caso, somente a economia de energia elétrica com ar condicionado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. (**ASHRAE 90.1-2004**), Atlanta, 2004.
- BRITO FILHO, J. P.; SANTOS, T. V. O. Thermal analysis of roofs with thermal insulation layer and reflective coatings in subtropical and equatorial climate regions in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 466–474, 2014.
- CARVALHO, M. M. Q.; LA ROVERE, E. L.; GONALVES, A. C. M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3199–3205, 2010.
- DERU, M. et al. **U.S. Department of Energy commercial reference building models of the national building stock**. Washington, DC: 2011. Disponível em: <http://digitalscholarship.unlv.edu/renew_pubs/44>.
- ENERGYPLUS. **Weather Data by Region**. Disponível em: <https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA>. Acesso em: 5 jul. 2016.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Roof Products**. 2008a. Disponível em: <http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/revisions/downloads/tv_vcr/FinalV3.0_TV_Requirements.pdf>.
- FIELD, K.; DERU, M.; STUDER, D. Using DOE commercial reference buildings for simulation studies. **Proceedings of the 4th National Conference of IBPSA-USA**, New York, NY, pp. 85-93, 2010.
- JAFFAL, I.; OULDOUKHITINE, S.-E.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, v. 43, p. 157–164, 2012.
- LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Catálogo de Propriedades Térmicas da Paredes e Coberturas**. v. 5, 2011.
- LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos INMET 2012**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>>. Acesso em: 18 jul. 2016.
- MOODY, S. S.; SAILOR, D. J. Development and application of a building energy performance metric for green roof systems. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 262–269, 2013.
- OBERNDORFER, E. et al. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **BioScience**, v. 57, n. 10, p. 823, 2007.
- RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos: 2012. Disponível em: <[http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes nos arquivos EPW - ANTAC](http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes%20nos%20arquivos%20EPW%20-%20ANTAC.pdf)>.
- SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 155–168, 2013.
- SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, p. 1466–1478, 2008.
- SAILOR, D. J.; BASS, B. Development and features of the Green Roof Energy Calculator (GREC). **Journal of Living Architecture**, v. 1, n. 3, p. 36–58, 2014.
- SAILOR, D. J.; ELLEY, T. B.; GIBSON, M. Exploring the building energy impacts of green roof design decisions - a modeling study of buildings in four distinct climates. **Journal of Building Physics**, v. 35, n. 4, p. 372–391, 2012.
- SANTAMOURIS, M. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, p. 682–703, 2014.
- SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 35–41, 2012.
- THEODOSIOU, T. G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 9, p. 909–917, 2003.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Commercial Reference Buildings**. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/buildings/commercial-reference-buildings>>. Acesso em: 14 abr. 2016.
- VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 740–752, 2016.
- WINIARSKI, D.; JIANG, W.; HALVERSON, M. Review of Pre- and Post-1980 Buildings in CBECS – HVAC Equipment. n. December, 2006.
- YU, C. **The intervention of plants in the conflicts between buildings and climate: a case study in Singapore**. Tese de doutorado: National University of Singapore, 2006. Disponível em: <<http://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/15511>>. Acesso em: 29 out. 2016.
- YUN, G. Y.; STEEMERS, K. Behavioural, physical and socio-economic factors in household cooling energy consumption. **Applied Energy**, v. 88, n. 6, p. 2191–2200, 2011.
- ZHAO, M. et al. Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer. **Building and Environment**, v. 78, p. 199–211, 2014.
- ZINZI, M.; AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy & Buildings**, v. 55, p. 66–76, 2012.

AGRADECIMENTOS

Às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG, e também ao CEFET-MG pelo apoio financeiro.