

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

SÁVIO DUARTE LOPES CAVALCANTI

**VALIDAÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM
TELHADO VERDE E VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA**

RECIFE
Fevereiro/2020



**VALIDAÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM
TELHADO VERDE E VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA**

SÁVIO DUARTE LOPES CAVALCANTI

Engenheiro Agrônomo

Orientadora: Profa. Dra. **CRISTIANE GUISELINI**

Coorientador: Prof. Dr. **HÉLITON PANDORFI**

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola da Universidade Federal Rural
de Pernambuco.

RECIFE

Fevereiro/2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

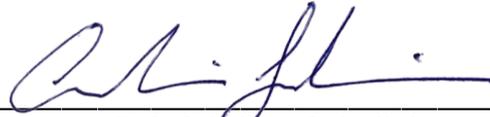
- C376v Cavalcanti, Sávio Duarte Lopes
VALIDAÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE E VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA / Sávio Duarte Lopes Cavalcanti. - 2020.
104 f. : il.
- Orientador: Cristiane .
Coorientador: HELITON .
Inclui referências e apêndice(s).
- Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2020.
1. coberturas verdes. 2. consumo de energia elétrica. 3. evapotranspiração de referência. 4. isolamento térmico. 5. saldo de radiação. I. , Cristiane, orient. II. , HELITON, coorient. III. Título

**VALIDAÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM
TELHADO VERDE E VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA**

Sávio Duarte Lopes Cavalcanti

Tese defendida e aprovada pela Banca Examinadora em: 21/02/2020

Orientador:



Dr.^a. Cristiane Guiselini

Departamento Engenharia Agrícola - UFRPE

Examinadores:



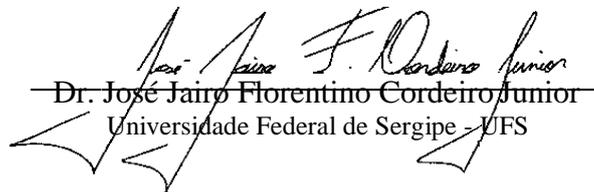
Dr. Héilton Pandorfi

Departamento de Engenharia Agrícola – UFRPE



Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida

Departamento de Engenharia Agrícola – UFRPE



Dr. José Jairo Florentino Cordeiro Junior
Universidade Federal de Sergipe - UFS



Dr. Roberto de Albuquerque Melo

Departamento de Agronomia - UFRPE

RECIFE-PE
FEVEREIRO/ 2020

A minha família, avó, irmãs, tios e tias, primos, primas, sobrinhos, amigos e professores pelo apoio, estímulo, amor e dedicação para que eu chegasse até aqui.

Dedico

Aos meus pais Silvio e Marilene, Eptácio e Silvia pelo referencial de ética, pela paciência, confiança e amor, dedicados durante minha vida.

Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido todas as oportunidades de crescimento profissional e pessoal na minha vida, por ter me dado forças para nunca desistir de lutar pelo que busco e sonho.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pelo acolhimento em toda minha trajetória, fundamental ao meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRPE pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

À orientadora professora Dra. Cristiane Guiselini pela orientação, amizade, incentivo, paciência, ensinamentos, críticas, sugestões e a cada abraço que recebi. Por ter me apoiado e acreditado em meu potencial desde o início da minha trajetória acadêmica.

Ao coorientador professor Dr. Héilton Pandorfi, agradeço pela qualidade na orientação, por acreditar em nosso trabalho em todas as horas, pelos conselhos e ensinamentos que me servirão para o resto da vida, meu sincero afeto!

Ao amigo e professor Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida pelo apoio e ensinamentos e por ter sempre cedido seu espaço para que nós pudessemos realizar nossas pesquisas.

Ao amigo e professor Dr. Roberto Melo de Albuquerque pela colaboração e conselhos.

Ao amigo e professor Dr. Jairo Florentino Cordeiro Junior pela parceria, amizade e apoio no decorrer desta jornada.

À Rochele Sheila Vasconcelos, pelo amor, paciência, carinho, compreensão e dedicação, por estar nos momentos difíceis ao meu lado me apoiando e incentivando.

À Construtora Rio Ave Empreendimentos pela parceria e por ceder a área experimental para a realização dessa pesquisa e a todos os colaboradores ligados direta e indiretamente ao Empresarial Charles Darwin, por toda assistência necessária para realização do levantamento de dados.

Aos meus colegas e amigos do curso, pelo companheirismo e lealdade no decorrer do curso, em especial, Miguel, Luiz, Jairo e Breno.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelos ensinamentos transmitidos com seriedade e compromisso.

Meu grande agradecimento à toda equipe que compõe o Grupo de Pesquisa em Ambiência (GPESA) pelo convívio, críticas, apoio, amizade e pelos momentos de descontração.

Aos professores, que participaram da banca examinadora, obrigado pela disponibilidade, presteza, atenção e conselhos.

À minha família serei eternamente grato por todo o carinho, amor e paciência que sempre nutriram por mim e o demonstrando a cada segundo. Leais, corajosos, amorosos, amo vocês e sem seu apoio eu jamais completaria este trabalho.

Na UFRPE passei graduação, mestrado e doutorado, aqui eu tive crescimento pessoal e profissional e em todas essas fases pessoas me ajudaram a conseguir meus objetivos por isso, a todos que, direta ou indiretamente participaram de todos os momentos vividos nessa jornada, minha eterna gratidão.

Muito Obrigado!

“Seu trabalho vai preencher uma grande parte da sua vida e, a única maneira de ficar realmente satisfeito é fazer o que você acredita ser um ótimo trabalho. E a única maneira de fazer um excelente trabalho é amar o que você faz. ”

Steve Jobs

VALIDAÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE E VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

Autor: SÁVIO DUARTE LOPES CAVALCANTI
Orientadora: Prof. Dr^a. CRISTIANE GUISELINI
Coorientador: Prof. Dr. HÉLITON PANDORFI

RESUMO

O telhado verde apresenta potencial de redução no consumo de energia elétrica para o condicionamento térmico das instalações prediais. O desenvolvimento de modelos para predição da eficiência térmica das edificações, após a implantação do telhado verde, bem como sua validação, geralmente ocorre em ambiente de simulação computacional, sem o emprego de dados obtidos a partir do monitoramento real dos elementos meteorológicos para o estabelecimento do balanço de energia de coberturas sob telhado verde. Dessa forma, objetivou-se com este estudo validar um modelo de desempenho térmico de telhado verde, obtido pelo estabelecimento do balanço de energia, ajustado pela determinação da evapotranspiração de referência, comparando a dados reais do monitoramento da instalação predial, bem como a determinação de sua viabilidade técnico-econômica. A primeira etapa do estudo consistiu na validação do modelo de desempenho térmico proposto por Da Silva Omar et al., (2018) a partir de dados reais do monitoramento da laje e do telhado verde extensivo sobre o edifício garagem do empresarial Charles Darwin, Rio Ave Empreendimentos, Recife-PE (8° 04' 03" S e 34° 55' 00" O) de fevereiro de 2017 a dezembro de 2019. Para o monitoramento meteorológico foi utilizada uma plataforma automática de registro de dados CAMPBELL® SCIENTIFIC modelo CR800, na laje externa do edifício, equipada com sensores de radiação solar global, saldo de radiação, pluviômetro, anemômetro, barômetro, temperatura do ar e a umidade relativa do ar, em dois níveis acima da superfície (20 cm e 160 cm). Na segunda etapa, com base no balanço de energia, foi desenvolvido a análise técnico-econômica do emprego do telhado verde, associado a laje exposta da instalação predial antes de sua implantação. O modelo de simulação conseguiu prever adequadamente os fluxos de energia no ambiente de estudo, apresentando alta correlação e índices estatísticos avaliados. A implantação do telhado verde apresentou relação custo-benefício positivo, gerando redução no consumo de energia elétrica de 31.939,07 Kwh⁻¹, com impacto mensal de US\$ 3.065,91. O ponto de equilíbrio econômico ocorreu aos 31 meses após a implantação do telhado verde, o que o caracteriza como um investimento de curto prazo.

Palavras-chave: coberturas verdes, consumo de energia elétrica, evapotranspiração de referência, isolamento térmico, saldo de radiação

VALIDATION OF THE PREDICTION MODEL OF THE GREEN ROOF ENERGY BALANCE AND TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY

Author: SÁVIO DUARTE LOPES CAVALCANTI

Advisor: Prof. Dr^a. CRISTIANE GUISELINI

Joint Supervisor: Prof. Dr. HÉLITON PANDORFI

ABSTRACT

The green roof has the potential to reduce the consumption of electricity for the thermal packaging of the building installations. The development of models to predict the thermal efficiency of buildings, after the implementation of the green roof, as well as its validation, usually occurs in a computer simulation environment, without the use of data obtained from the actual monitoring of meteorological elements for the establishment of the energy balance of roofs under green roof. Thus, the objective of this study was to validate a green roof thermal performance model, obtained by the establishment of the energy balance, adjusted by the determination of the reference evapotranspiration, comparing the actual data of the monitoring of the building installation, as well as the determination of its technical-economic viability. The first stage of the study consisted of the validation of the thermal performance model proposed by Da Silva Omar et al., (2018) from real data from the monitoring of the slab and the extensive green roof on the garage building of the Charles Darwin business, Rio Ave Empreendimentos, Recife-PE (8° 04' 03" S and 34° 55' 00" O) from February 2017 to December 2019. For meteorological monitoring, an automatic data recording platform CAMPBELL® SCIENTIFIC model CR800, was used in the external slab of the building, equipped with global solar radiation sensors, radiation balance, rain gauge, anemometer, barometer, air temperature and relative humidity, at two levels above the surface (20 cm and 160 cm). In the second stage, based on the energy balance, the technical-economic analysis of the use of the green roof was developed, associated with the exposed slab of the building facility before its implementation. The simulation model was able to adequately predict energy flows in the study environment, presenting high correlation and statistical indices evaluated. The implementation of the green roof presented a positive cost-benefit ratio, generating a reduction in electricity consumption of 31,939.07 Kwh⁻¹, with a monthly impact of US\$ 3,065.91. The economic equilibrium point occurred at 31 months after the implementation of the green roof, which characterizes it as a short-term investment.

Keywords: green toppings, electricity consumption, reference steamperpiration, thermal insulation, radiation balance

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE SIGLAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1. INTRODUÇÃO	15
2. HIPÓTESES.....	17
3. OBJETIVO GERAL.....	17
3.1. Objetivos Específicos.....	17
4. JUSTIFICATIVA	18
CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
5.1. Telhado Verde	20
5.1.1. Histórico	20
5.1.2. Tipologia do Telhado Verde.....	22
5.1.3. Componentes estruturais do Telhado Verde.....	22
5.1.4. Benefícios do telhado verde	24
5.2. Modelagem em telhados verdes	27
5.3. Balanço de radiação	29
5.4. Balanço de Energia	34
5.5. Conforto térmico	36
5.6. Ilhas de calor	37
5.7. Análise técnico-econômica	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
CAPÍTULO II - VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE.....	57
RESUMO	58
ABSTRACT.....	59
INTRODUÇÃO.....	61
MATERIAL E MÉTODOS.....	63
RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
CONCLUSÕES.....	78

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
CAPÍTULO III - VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM TELHADO VERDE EXTENSIVO	82
RESUMO.....	83
ABSTRACT.....	84
INTRODUÇÃO.....	85
MATERIAL E MÉTODOS.....	87
RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
CONCLUSÕES.....	100
CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	102

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 1 - Diferenças de temperatura, telhado verde e convencional.....	26
Figura 2 - Saldo de radiação à superfície (Rn).	32
Figura 3 - Esquema do balanço de energia.....	364
Figura 4 - Perfil de ocorrência das ilhas de calor.....	38

CAPÍTULO II - VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

Figura 1 - Antes e após a instalação do telhado verde.....	62
Figura 2 - Estudo da sombra no empresarial	653
Figura 3 - Bloxplot, ao longo do período experimental	73
Figura 4 - Relação funcional	764

CAPÍTULO III - VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM TELHADO VERDE EXTENSIVO

Figura 1 - Esquema da localização geográfica da área experimental.....	85
Figura 2 - (A) Antes e (B) após a instalação do telhado verde	86
Figura 3 - Detalhamento dos componentes do telhado verde	86
Figura 4 - Vista frontal da sala de alvenaria com portas de vidro	88

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 1- Albedo de diferentes superfícies	34
--	----

CAPÍTULO II - VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

Tabela 1 - Classificação do desempenho da simulação pelo índice “C”	70
Tabela 2 - Classificação das simulações.....	72
Tabela 3 - Variação média mensal da radiação solar global (Qg), temperatura média do ar (Tar), umidade relativa do ar (UR) e acumulado mensal da precipitação pluviométrica (PREC).....	74
Tabela 4 - Valores da correlação de Pearson, índice de exatidão de Willmott e o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas “C”	78
Tabela 5 - Valores de classificação das simulações pelos indicies NSE, BIAS e RSR	Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO III - VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM TELHADO VERDE EXTENSIVO

Tabela 1 - Composição química do substrato utilizado no telhado verde	89
Tabela 2 - Calor Liberado pelas Pessoas.....	92
Tabela 3 - Trocas de ar por hora.....	94
Tabela 4 - Variação média mensal da radiação solar global (Qg), temperatura média do ar (Tar), umidade relativa do ar (UR) e acumulado mensal da precipitação pluviométrica (PREC) da normal climatológica em relação aos anos de 2016 e 2017	95
Tabela 5 - Média da temperatura do ar na estação de referência (Tar Ref., °C) e na laje externa (Tar Ext., °C) em 2016 e 2017.	97
Tabela 6 - Média da temperatura do ar na estação de referência (INMET) (Tar Ref., °C) e no ambiente interno (Tar Int., °C) em 2016 e 2017	97
Tabela 7 - Custo de implantação do telhado verde	99

LISTA DE SIGLAS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
BOC	Balanço de ondas curtas
BOL	Balanço de ondas longas
ET _o	Evapotranspiração de referência
FAO	Food and Agriculture Organization
IGRA	International Green Roof Association
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
PROGCLIMA	Boletim de prognóstico climático do INPE
TIR	Taxa interna de retorno
V PL	Valor presente líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

- δ - Declinação solar ($^{\circ}$)
- BOC – Balanço de ondas curtas
- BOL – Balanço de ondas longas
- e_a – Pressão atual de vapor
- e_s – Pressão de ar de vapor d'água
- G – Fluxo de calor no solo
- H – Fluxo de calor latente
- hn – ângulo horário
- LE – Fluxo de calor sensível
- N – Fotoperíodo
- n – insolação
- NDA - número de dia do ano
- P_{atm} - pressão atmosférica
- PREC – Precipitação pluviométrica
- Q_g – Radiação solar global
- r - Albedo
- R_n – Saldo de radiação
- T_{ar} – Temperatura do ar
- T_{max} - temperatura do ar máxima
- T_{min} - temperatura do ar mínima
- UR – Umidade relativa do ar
- VV – Velocidade do vento
- Y – Constante psicrométrica
- β – Razão de Bowen
- Δ – Declividade da curva de pressão de vapor
- ϕ - latitude ($^{\circ}$)

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente urbanização no mundo, as áreas verdes foram suprimidas, muitas superfícies naturais foram pavimentadas e impermeabilizadas para dar suporte ao desenvolvimento de infraestrutura das cidades e, como consequência, verifica-se a ampliação de ilhas de calor nos centros urbanos, o aumento na ocorrência de enchentes, o desequilíbrio ecológico, a intensificação dos efeitos da poluição urbana e o aumento no consumo de energia elétrica para o condicionamento térmico das construções para ocupação humana. A substituição da cobertura natural do solo altera o balanço de energia devido às diferentes propriedades térmicas dos materiais empregados e reduz o isolamento termoacústico depreciando o conforto humano, além do impacto direto na qualidade de vida da população (YAGHOUBIAN e SREBRIC 2015; PENDIUK et al., 2017).

A perda da biodiversidade está relacionada diretamente com a intervenção humana nos habitats, por isso, biomas estão sendo ocupados em diferentes escalas de velocidades: extensas áreas de vegetação nativa foram devastadas, como resultado das pressões da ocupação humana na zona costeira, a Mata Atlântica Brasileira ficou reduzida a 7% de sua vegetação original (ATLÂNTICA INPE, 2014; RIBEIRO et al., 2018).

As superfícies verdes estão desaparecendo, devido à especulação imobiliária. Por consequência, transformar superfícies de telhados em áreas verdes torna-se uma escolha sustentável (DE OLIVEIRA et al., 2017), tanto para minimização do consumo energético como minimização das ilhas de calor, economia de água, aumento da biodiversidade, valor estético e minimização de poluentes urbanos (RAZZAGHMANESH et al., 2014; FOUSTALIERAKI et al., 2017). No que diz respeito a ilhas de calor, alguns autores indicam que Recife já apresenta esse fenômeno (NÓBREGA, SANTOS & MOREIRA, 2016; DE LIMA MENDES et al., 2019).

Telhado verde ou cobertura verde é definido como um sistema construtivo que consiste na utilização de uma cobertura vegetal instalada em laje ou sobre telhados inclinados (BERNDTSSON, 2010). Os efeitos da camada de solo e da vegetação são complexos e difíceis de manipular, no entanto, com a crescente importância dos telhados verdes na última década, muitos modelos de cálculo vêm

sendo desenvolvidos (ALEXANDRI et al., 2007; TABARES-VELASCO et al., 2012; ZIRKELBACH et al., 2017).

Os telhados verdes foram introduzidos no meio urbano, por contribuir significativamente com a sustentabilidade, o que resulta num grande número de benefícios ambientais (BERARDI, 2016; ONDONO et al., 2016). Mas o alto investimento inicial necessário para instalação atua como uma barreira à sua introdução no mercado, o que ressalta a necessidade de estudos que avaliem sua viabilidade técnico-econômica (MAHDIYAR et al., 2016).

Os benefícios dos telhados verdes são inquestionáveis do ponto de vista térmico, pois, o maior benefício do telhado verde é a redução da radiação solar incidente nas lajes (REFAHI e TALKHABI, 2015). O telhado com vegetação apresenta proteção extra a superfície de cobertura, devido a estratificação promovida pela implantação do telhado verde, que pode reduzir a carga térmica aplicada a edifícios, pois, a vegetação e o substrato atenuam a transmissão de calor, realizam a fotossíntese, assim transformam parte da energia incidente e protegem a cobertura contra a ação dos raios ultravioletas e extremos de temperatura.

A maioria dos modelos de desempenho térmico existentes para telhados verdes são voltados a quantificação e a redução no consumo de energia elétrica empregada para o condicionamento térmico das instalações, porém, ainda não foram validados para condições tropicais com dados experimentais, incluindo dados meteorológicos. Os modelos existentes se concentram no índice de área foliar para descrever a quantidade de sombreamento e variáveis ambientais, efeitos de radiação e trocas de calor são desconsideradas (OULDBOUKHITINE et al., 2011).

O monitoramento em campo do comportamento energético, redução de custos e desempenho dos telhados verdes, exige muito trabalho e é oneroso, além de não ser apropriado investigar individualmente cada telhado e cada fator que afeta o seu desempenho. A modelagem oferece uma solução para lidar com esses problemas e podem ser usados por construtoras para avaliar potencial de economia de energia dos telhados verdes e ajudá-los nos estágios iniciais do projeto, para apoiar o processo de tomada de decisão. No entanto, é importante ter modelos precisos e validados para que isso aconteça (VERA et al., 2019).

2. HIPÓTESES

- O modelo de predição do balanço de energia proposto se adequa as condições tropicais do Recife;
- A instalação do telhado verde promove redução no consumo de energia elétrica do edifício;
- A redução dos custos de aquisição dos equipamentos de climatização e consumo mensal de energia elétrica são maiores que os custos de instalação do telhado verde;

3. OBJETIVO GERAL

Objetiva-se com essa pesquisa validar um modelo de desempenho térmico de telhado verde, obtido pelo estabelecimento do balanço de energia e ajustado pela determinação da evapotranspiração de referência, comparando a dados reais, bem como a determinação de sua viabilidade técnico-econômica.

3.1. Objetivos Específicos

- Validar modelo de simulação do balanço de energia para laje e ajustado pelo método da razão de Bowen, proposto por Da Silva Omar et al. (2018), a partir dos dados reais registrados;
- Obter e comparar os custos de instalação e manutenção do telhado verde com o sistema de cobertura convencional;
- Avaliar a relação custo-benefício do telhado verde em função da redução do consumo de energia elétrica (condicionador de ar) e identificar o ponto de equilíbrio econômico.

4. JUSTIFICATIVA

No Brasil, a primeira lei de telhados verdes foi criada no Sul do país, em Santa Catarina. A Lei nº 14.243 de 2007, dispõe sobre a implantação e criação de telhados verdes em espaços urbanos. O programa estadual de incentivo a adoção de telhados verdes em espaços urbanos densos, objetiva a minimização do fenômeno de ilhas de calor e a atuação como isolantes térmicos (BAROSKY, 2011).

Em 10 de Março de 2009, à câmara de vereadores de São Paulo apresentou um projeto de lei que tratava da obrigatoriedade da implementação de coberturas verdes, em edificações com mais de três unidades agrupadas verticalmente, construídas após a publicação da Lei (STAHLHÖFER & PEREIRA, 2013).

Na cidade do Recife, estado de Pernambuco, a Lei Nº 18.112/2015, regulamenta sobre a obrigatoriedade do emprego do telhado verde, respaldada na melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do telhado verde e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para as redes de drenagem urbana (RECIFE, 2015).

Após a sanção da lei em 12 de janeiro de 2015, todos os projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400 m² de área de cobertura deverão prever a implantação de telhado verde e reservatório de águas pluviais como condição para aprovação do projeto construtivo (DA SILVA OMAR et al., 2018).

As empresas especializadas na implantação do telhado verde ainda estão em fase inicial e constantemente se deparam com dificuldades técnicas como a falta de padrões, altos custos de instalação, preocupações climáticas, problemas estruturais e falta de pesquisa confiável. Nota-se, no atual escopo de conhecimento, que a falta de pesquisas nacionais é uma das maiores barreiras para a implementação mais ampla de telhados verdes.

Nesse sentido, os estudos sobre os benefícios proporcionados pelos telhados verdes contribuem de forma expressiva para o preenchimento dessas lacunas.

CAPÍTULO I

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. Telhado Verde

Os telhados verdes surgiram como uma solução para o aumento das superfícies vegetadas no meio urbano e na tentativa de minimizar às condições climáticas extremas das cidades, redução do consumo de energia elétrica dos sistemas de climatização e das emissões de CO₂ (CHAROENKIT & YIEMWATTANA, 2016; MORAKINYO et al., 2017).

O telhado verde consiste em um sistema de cobertura especializado, que suporta a vida vegetal, com o propósito de satisfazer necessidades humanas decorrente de melhorias ambientais. Geralmente, opta-se por espécies de plantas tolerantes à seca, com exigência de substrato leve, que contém nutrientes e água suficiente para as plantas e um sistema de drenagem simples (WANG et al., 2017). Apesar das dificuldades construtivas, a demanda por telhados verdes está aumentando gradualmente. Em muitas cidades brasileiras, o telhado verde tornou-se uma medida obrigatória e com respaldo legislativo (SETTA, 2017).

5.1.1. Histórico

O telhado verde é uma tecnologia originalmente desenvolvida na Europa, porém, na literatura há controvérsias quanto ao primeiro telhado verde, mas os maiores indícios são de que os primeiros datam de aproximadamente 600 a.C., a história apresenta que as finalidades eram diferentes, os propósitos incluíam principalmente estética e uma fuga do ambiente urbano. Outros autores citam que as primeiras evidências de jardins no telhado incluem os mausoléus de Augusto e Adriano. Os romanos já plantavam árvores sobre muitas construções (ALMEIDA, BRITO & SANTOS, 2018).

O telhado verde mais antigo é o dos Zigurates da antiga Mesopotâmia, estes eram grandes torres de pedra em forma de pirâmide, construídas por etapas. Nos patamares dessas torres escalonadas, plantações de árvores e arbustos em terraços planos amenizavam a escalada e ofereciam alívio ao calor. O exemplo mais comum são os Jardins suspensos da Babilônia, esses não foram preservados

até os dias atuais, mas é considerado uma das 7 maravilhas do mundo antigo (ERDEMIR & AYATA, 2017).

No Brasil, o emprego do telhado verde se popularizou nas últimas décadas e ganharam mais notoriedade durante os últimos 5 anos, onde foram propostas leis que obrigam edificações a construírem telhado verde (ALMEIDA, BRITO & SANTOS, 2018).

5.1.2. Tipologia do Telhado Verde

Os telhados verdes são divididos de acordo com a International Green Roof Association (IGRA, 2018) em 3 tipos: extensivo, semi-intensivo e intensivo, conforme as características e critérios de custo, manutenção, comunidade de plantas, profundidade do substrato e conseqüentemente a sobrecarga na estrutura.

O telhado verde extensivo em comparação aos demais, necessita de menor manutenção, geralmente utiliza-se plantas de porte baixo, como suculentas do gênero *Sedum* ou gramíneas, substrato mais fino e leve, de 6 a 20 cm de espessura. É mais viável financeiramente, no entanto, não suporta alta carga de águas pluviais, tem peso médio de 60 a 150 kg m⁻² (CALHEIROS & PALHA, 2017).

O telhado semi-intensivo necessita de manutenção e irrigação periódica, utiliza-se plantas de porte baixo em conjunto com alguns arbustos, o substrato apresenta camada de 12 a 25 cm de espessura, tem peso médio de 120 a 200 kg m⁻² (IGRA, 2018).

O intensivo apresenta plantas de porte alto como árvores e arbustos, a camada de substrato é mais espessa e varia de 15 a 40 cm, suporta maior variedade de plantas, por isso, necessita de alta manutenção e irrigação com regularidade. Além disso, deve-se tomar especial atenção nos cálculos estruturais, pois, admite-se sobrecarga de 180 a 500 kg m⁻² (CALHEIROS & PALHA, 2017).

5.1.3. Componentes estruturais do Telhado Verde

O sistema construtivo de um telhado verde, independentemente do tipo, apresenta camadas, que segundo ZHANG et al., (2018) há uma composição básica

levada em consideração para sua implantação, como a camada de vegetação, a camada de substrato, a camada filtrante, a camada de drenagem, a camada de impermeabilização e a estrutura de sustentação, sendo que cada uma delas tem função e funcionalidades específicas.

A camada de vegetação promove a biodiversidade no telhado e ajuda a manter o teto frio, pois absorve a maior parte da radiação (SCHINDLER et al., 2019). O tipo de vegetação a ser escolhido, deve ser a mais adaptada possível às condições climáticas do local, considerando ainda o tipo de substrato, a estrutura de suporte e manutenção, a relação entre luz e sombra, a exposição ao vento e a orientação do telhado. O ideal é que sejam utilizadas espécies nativas (AZEÑAS et al., 2019).

Estudo realizado por Wong et al. (2013) em região de clima tropical, identificaram que plantas com maior índice de área foliar promovem maior eficiência no isolamento térmico e variação de até 4,5°C na temperatura do ar, inversamente proporcional ao índice de área foliar das espécies vegetais utilizadas na composição do telhado verde. Da mesma forma Lins et al. (2017) relataram que quanto maior a área foliar maior a evapotranspiração.

O substrato precisa ser bem aerado e estruturalmente estável. A espessura deve variar de acordo com a arquitetura das plantas e sistema radicular das espécies utilizadas, que deve fornecer espaço para o enraizamento e sustentação ao crescimento das plantas, boa capacidade de retenção de umidade e facilidade de drenagem, a fim de evitar o acúmulo excessivo de água e conter as reservas de nutrientes requeridas pelas plantas (WANG, TIAN & ZHAO, 2017b).

A camada filtrante evita que as partículas finas e os elementos do substrato sejam lavados da camada de vegetação para a camada de drenagem, prejudicando a permeabilidade da água na camada de drenagem (BARYLA et al., 2018).

O estrato de drenagem apresenta como principal função a vazão ao excesso de umidade do substrato e pode ser constituída por restos de construção (brita, seixos, argila expandida ou elementos à base de poliestireno). Uma boa drenagem é primordial, pois, garante que grande quantidade de água não sejam retidas no substrato e telhado, comprometendo a integridade estrutural do edifício e oxigenação do substrato, mantendo a saúde das plantas (ZAREMBA, TRAVER & WADZUK, 2016). POMPEU et al. (2017) também citam a importância da boa drenagem para o pleno desenvolvimento das plantas.

A impermeabilização é o sistema cuja função é proteger a laje ou outro suporte estrutural contra danos mecânicos (penetração das raízes e infiltrações), garantindo que o sistema possa permanecer em sua melhor forma durante o tempo, sem necessitar de ajustes ou manutenções periódicas (PÉREZ & COMA 2018). A laje de sustentação do telhado verde deve ser dimensionada considerando-se a carga média a ser instalada sobre ela, assim como os elementos que compõem um telhado verde (EDWARDS et al., 2016).

5.1.4. Benefícios do telhado verde

Os telhados verdes permitem manter um senso de natureza, mesmo nas grandes cidades. O espaço natural do solo em que a construção se encontra inserido torna-se impermeável, onde a flora e a fauna naturais desaparecem. Telhados verdes apresentam-se como uma forma de compensar os espaços naturais perdidos, tornando possível o aumento da biodiversidade em áreas urbanas (BLAUSTEIN, KADAS & GUREVITCH, 2016) e aumentando a área de superfícies permeáveis. A vegetação presente no telhado verde atrai pássaros, borboletas e insetos, expandindo seu habitat. Além disso, as aves usam os telhados verdes como habitat de parada durante a migração e como habitat de forrageamento durante a época de reprodução (ROSENZWEIG, 2016).

Em Nova York foi investigado o número de aves e artrópodes em telhados verdes e convencionais, esse estudo identificou que a presença dos animais foi mais abundante e diversos em telhados verdes. Isso indica que o uso de telhados verdes promove o aumento na quantidade de habitats disponíveis para as aves migratórias, o que pode mitigar a perda de habitat devido à crescente urbanização (PARTRIDGE & CLARK 2018).

O telhado verde muitas vezes atrai mais atenção do que as fachadas dos edifícios. Eles são esteticamente mais atraentes, melhoram a aparência do edifício e da cidade como um todo. Cria um espaço adicional para o descanso das pessoas sem sair de casa e sem necessitar de nenhum transporte para se aproximar da natureza. Além disso, as culturas alimentares podem ser plantadas nos telhados (ALOISIO, TUININGA & LEWIS, 2016).

É uma prática comum pagar um preço mais alto por propriedades próximas a áreas verdes, podendo ser usado como um método para atribuir valor monetário a características qualitativas (FENG & HEWAGE, 2018). Segundo Bianchini e Hewage (2012), um telhado verde gera incrementos de 5 a 8% no valor do imóvel, levando-se em consideração apenas valores estéticos.

Algumas pesquisas comprovam melhor recuperação de pacientes no pós-operatório, quando expostos a um jardim na janela de cabeceira, em comparação com uma visão monótona (parede). Os pacientes que dispunham da visão do jardim, exigiram doses menores de analgésicos, chamaram a enfermeira com menos frequência e tiveram alta mais cedo, graças aos benefícios psicológicos de um ambiente mais agradável (RAANAAS, PATIL & ALVE, 2016; KHAN et al., 2016).

Além disso, alguns autores ressaltam que o telhado verde proporciona também uma atividade terapêutica na manutenção das plantas, refletindo no estado psicoemocional dos usuários, liberando endorfina e proporcionando sensação de bem-estar (REBOLLAR et al., 2017; DE ALMEIDA et al., 2017; MARCUS, 2018).

As áreas plantadas são isolantes acústicos naturais e absorvem mais som que as superfícies duras. Os telhados verdes reduzem o som refletivo e aumentam o isolamento acústico em até 3 dB. Isto é muito eficaz para construções localizadas em centros comerciais e próximos a aeroportos e indústrias (PÉREZ et al., 2016).

Além de sua natureza visualmente atraente, os telhados verdes oferecem benefícios indiscutíveis, tanto ecológicos quanto econômicos, desde que sejam construídos de forma correta. Um telhado verde tem a capacidade de ampliar a inércia térmica das superfícies de cobertura e reduzir a temperatura do ar no interior das instalações, além de melhorar o desempenho energético dos edifícios (COMA et al., 2016).

A presença da vegetação no telhado aumenta a umidade do ar, diminuindo assim a temperatura ao redor, contribuindo para a melhoria do microclima nos centros urbanos (SOLCEROVA et al., 2017). O efeito de resfriamento aumenta significativamente o desempenho dos sistemas de climatização, reduz as emissões de carbono e os custos com energia elétrica, além disso, a vegetação ajuda a filtrar a poeira e as partículas de fumaça. Materiais nocivos são absorvidos do ar e da chuva pelas plantas e fixados no substrato (LÓPEZ-UCEDA et al., 2018).

Em todo o mundo, as grandes cidades continuam a se expandir e os efeitos das ilhas de calor tem um impacto significativo na vida da população urbana. A ilha

de calor é um fenômeno em que a temperatura ambiente no centro urbano é maior do que nas áreas suburbanas (RAZZAGHMANESH, BEECHAM & SALEMI, 2016). Esse fenômeno foi estudado e provado por diversos autores como Nóbrega, Santos & Moreira (2016), que instalaram nove termohigrômetros em áreas distintas da cidade do Recife, comprovando que a temperatura no centro da cidade é frequentemente, 1,5 °C maior do que nas áreas circundantes.

O efeito de ilha de calor é causado pela presença de um maior número de materiais absorvedores de calor, como asfalto e concreto. Estes materiais absorvem o calor em vez de refletir e transformar, como faz uma cobertura vegetal realizando a fotossíntese. Como resultado disso, as áreas urbanas retêm o calor por mais tempo e a temperatura do ar torna-se maior do que na área circundante (AKBARI et al., 2016).

Estudo realizado na Itália, verificou que, enquanto a temperatura típica da laje chegava a 51 °C, um teto verde mantinha temperatura média de 17 °C. O estudo também revelou que o telhado verde reduziu as flutuações de temperatura da laje, pois, a temperatura em um telhado convencional nos meses de verão foi em média de 15 °C, enquanto no telhado verde foi de apenas 5 °C (BEVILACQUA et al., 2017). Em um dia típico, a temperatura superficial do telhado verde da prefeitura de Chicago (Figura 1) registrou-se quase 40 °C (80 °F) menor que a temperatura superficial do telhado convencional vizinho (WONG et al., 2016).



Figura 1 - Diferenças de temperatura entre um telhado verde e convencional. Fonte: WONG et al. (2016).

Edificações que apresentavam cobertura verde, parede viva e parede verde, apresentou redução da temperatura interna e externa dos edifícios em todos os casos. Nos horários mais quentes do dia a cobertura verde promoveu redução de

9 °C na temperatura de superfície, em comparação à cobertura de telha de cerâmica. A presença da cobertura vegetal modificou o pico de temperatura e isso possibilitou manter a temperatura interna entre 23 e 27 °C por um maior intervalo de tempo (MATHEUS et al., 2016).

O telhado convencional não armazena água da chuva, por isso a precipitação quase que imediatamente desce pelo telhado em escoamento livre. Essa rápida drenagem da água nas áreas urbanas aumenta as chances de inundações, principalmente durante chuvas fortes (LI et al., 2017; LIU et al., 2017).

A retenção da precipitação da água da chuva por absorção e drenagem na camada de substrato é tida como uma das funções do telhado verde, o que implica no atraso do escoamento pluvial, que pode ser de várias horas, a depender da inclinação, intensidade e duração da chuva (ZHANG et al., 2015).

Segundo Tassi et al. (2014), o telhado verde pode reduzir até 62% do escoamento superficial, reduzindo as vazões em horários de pico. A capacidade média de armazenamento de água em um telhado verde é de 12 mm dia⁻¹.

A capacidade de retenção dos telhados verdes depende de vários fatores como a intensidade e as variações sazonais da precipitação, evapotranspiração e umidade do substrato (SFAKIANAKI et al., 2009; KARACHALIOU, SANTAMOURIS & PANGALOU, 2015). Estudos de retenção de água também foram realizados nos Estados Unidos e indicaram que durante o período de observação de 15 meses, a retenção de água de um telhado verde com profundidade de 100 a 120 mm foi de 69% (HUTCHINSON et al., 2003).

Nos últimos anos, cientistas documentaram o aumento da temperatura média em todo o mundo. As mudanças climáticas causadas pelo homem ocorrem quando a atividade humana introduz mais gases na atmosfera. Os principais gases atmosféricos responsáveis pelo efeito estufa, conhecidos como gases de efeito estufa são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) (SHI et al., 2015; JEVREJEVA et al., 2016; FANTE & NETO, 2017).

O gás do efeito estufa mais relevante na atmosfera é o CO₂, como resultado, os processos climáticos no mundo são desestabilizados. Os telhados verdes podem contribuir para reduzir os efeitos das mudanças climáticas, pois, a vegetação durante a fotossíntese reduz a quantidade de dióxido de carbono, absorve-o com a energia solar e liberando oxigênio na atmosfera, necessário para todas as criaturas vivas (SUSCA, 2019).

5.2. Modelagem em telhados verdes

Quando não são encontrados na literatura dados para uma determinada região, a solução é monitorar a estrutura e calibrar parâmetros preditores para o estabelecimento do balanço de energia, almejando avaliar o desempenho e a caracterização térmica, além disso, a modelagem possibilita analisar a eficiência dos telhados verdes em diferentes escalas espaciais, desde uma edificação até um conjunto distribuídos em uma região urbana (VIOLA, HELLIES e DEIDDA 2017).

Segundo BASSANEZI (2016) modelagem é o ato de modelar ou criar moldes, comumente consiste na arte de transformar problemas da realidade em equações matemáticas e resolvê-las interpretando as soluções para o mundo real, é considerada também como a área do conhecimento que estuda a simulação de sistemas reais a fim de prever o seu comportamento.

Configura-se como um conjunto de procedimentos cujo objetivo é construir uma equação para tentar explicar, os fenômenos presentes no cotidiano humano, que ajudam a fazer previsões e tomar decisões (BURAK, 1992; BIEMBENGUT e HEIN, 2011). Após a modelagem é necessário realizar a validação para provar que a simulação se adequa as condições reais.

Um componente importante da modelagem é a validação, que se trata do ato de validar, de declarar algo legítimo. Em informática, validação é o teste que comprova sua validade, a correção ou concordância com padrões, a partir de dados de entrada num sistema computacional. A validação é um procedimento para demonstrar que o modelo é capaz de prever a resposta de um fenômeno real, com base no problema estudado (FINN, GOODFELLOW e LEVINE 2016).

A modelagem em telhados verdes é uma abordagem recente, com estudos desenvolvidos principalmente a partir da segunda metade da década de 2000, como as pesquisas de Carter e Jackson (2007), Hollander (2007), Palla et al. (2008) e Tang (2012), que realizaram análises em escala de bacia hidrográfica. Além de autores como Alexandri e Jones (2007); Takebayashi and Moriyama (2007); Sailor (2008); Tabares-Velasco and Srebric (2011); Zirkelbach et al. (2017), Da Silva Omar et al. (2018) e VERA et al. (2019) que realizaram simulações em escala de telhado.

Na construção civil existem uma série de modelos e softwares que podem prever os benefícios da construção de telhados verdes, tanto para fins de economia de energia como para gerenciamento das águas pluviais incidentes no telhado verde (ALEXANDRI e JONES, 2007; SAILOR, 2008; TABARES-VELASCO e SREBRIC, 2011; TASSI et al. 2014; NIQUINI et al., 2019).

A maioria dos modelos existentes para predição do consumo energético utilizam o balanço de energia em torno do telhado verde e, alguns realizam um balanço de massa adicional, já outros modelos o separam em várias camadas e calculam o balanço de energia em cada camada. Esta discretização aumenta potencialmente a precisão do modelo, porém, aumentam o número de equações e variáveis necessárias para resolver o problema (LAZZARIN et al., 2005; SAILOR, 2008). Zirkelbach, et al. (2017) desenvolveram um modelo higrótico para telhado verde baseado em testes de campo e laboratoriais, com base nas condições de umidade e temperatura abaixo da vegetação. O modelo considerou todos os elementos climáticos externos relevantes, como radiação solar de ondas curtas, radiação de ondas longas e precipitação. O dossel da planta foi considerado como uma camada isolante.

Alexandri and Jones (2007) investigou a modelagem matemática do efeito de telhados verdes na mitigação de temperaturas urbanas elevadas, os autores desenvolveram um modelo unidimensional, descrevendo a transferência de calor e massa em materiais de construção, considerados como corpos capilares porosos, a cobertura vegetal, modelada como uma camada combinada de planta, solo e ar.

Um protótipo em escala reduzida foi construído por Tabares-Velasco e Srebric (2011) de forma a medir continuamente os processos de transferência de calor e massa para amostras de telhado verde dentro de uma câmara ambiental. Os dados coletados mostram que a evapotranspiração controlava a intensidade de todos os outros fluxos, dependendo da planta e das condições ambientais. Além disso, sob as condições laboratoriais, as amostras de telhado verde não isoladas e com plantas, apresentaram redução média do fluxo de calor de 25%, quando comparado com amostras sem plantas.

Sailor (2008) mediu a condutividade térmica, a emissividade térmica, refletividade de ondas curtas e a densidade para amostras de solo de telhados verdes em vários estados de umidade, para modelar os impactos dos telhados verdes na transferência de calor para a construção com precisão. Os resultados

indicaram grande variabilidade nas propriedades em função da composição e umidade do solo. O albedo foi maior nas amostras secas (0,17-0,40), diminuindo substancialmente (0,04-0,20) à medida que a umidade foi adicionada, as emissividades foram constantes independentemente do tipo de solo ou do teor de umidade.

Vera et al. (2019) analisaram e compararam em detalhes dois modelos de fluxo de massa e energia para telhados verdes, desenvolvidos por Sailor (2008) e Tabares-Velasco e Srebric (2011), a precisão dos modelos foi avaliada por meio da comparação de seus resultados com dados experimentais obtidos em seis telhados vegetativos, localizados em três zonas climáticas diferentes, durante diferentes estações do ano. Eles identificaram que os modelos forneceram previsões semelhantes das temperaturas do substrato e portanto, de acordo com os dados experimentais para cinco dos seis telhados vegetativos, o quadrado médio da raiz é limitado à faixa de 1,2 a 2,5 °C para o modelo Sailor e de 0,6 a 3,0 °C para o modelo de Tabares-Velasco e Srebric. Apesar da concordância entre os modelos, o estudo também revelou que eles diferem na maneira como avaliam os fluxos de calor latentes e sensível, sugerindo que pelo menos um deles apresenta discrepância na determinação do fluxo de calor.

5.3 Balanço de radiação

A radiação solar é a principal fonte de energia para todos os processos físicos e biológicos ocorrentes no sistema Terra-atmosfera, sendo assim, o principal fator que assegura a vida na terra, o que ressalta a importância de investigações referentes ao seu monitoramento (GÓMEZ et al., 2018). O balanço é uma demonstração detalhada das entradas e saídas da radiação em uma determinada superfície. Essa variável é essencial em estudos do balanço de energia, sendo de grande importância no monitoramento do clima, previsão de tempo e modelagem hidrológica (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2017).

A radiação solar que atinge a superfície da terra é denominada de ondas curtas, pois, essas têm comprimentos de onda entre 0,3 e 3,0 μm (RYU et al., 2018). Um feixe da radiação solar antes de chegar à superfície terrestre sofre várias interferências decorrentes das nuvens e constituintes atmosféricos, fazendo com

que a radiação seja absorvida, refletida ou espalhada. Ao vencer os obstáculos atmosféricos, a radiação solar alcança a superfície terrestre de forma direta e indireta, uma parte é absorvida, transmitida e outra é refletida ao espaço de acordo com o poder refletor de cada superfície denominado albedo (α) (ALVES et al., 2017; CARLESSO et al., 2019)

A soma de toda energia radiante recebida e perdida por uma superfície resulta no saldo de radiação. Uma das formas de se obter o saldo de radiação é diretamente por meio do sensor saldo radiômetro (GOMES et al., 2009). O saldo de radiação exerce um papel fundamental nos processos de troca de calor e massa na troposfera, uma vez que se constitui no principal responsável pelo aquecimento do solo, do ar e principalmente, pela evapotranspiração da vegetação (AN, HEMMATI & CUI, 2017)

Segundo Silva et al. (2018) o saldo de radiação pode ser determinado matematicamente, pela soma de fluxos, tendo eles sinal positivo quando chegam a superfície e negativo quando saem da superfície, conforme a Equação seguinte (Eq. 1) e de maneira esquemática apresentada na Figura 2.

$$Rn = R_{OC,INC} - R_{OC,REF} + R_{OL,INC} - R_{OL,REF} - R_{OL,EMI} \quad (1)$$

Em que:

$R_{OC, INC}$ = Radiação de onda curta incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$R_{OC, REF}$ = Radiação de onda curta refletida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$R_{OL, INC}$ = Radiação de onda longa incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$R_{OL, REF}$ = Radiação de onda longa refletida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$R_{OL, EMI}$ = Radiação de onda longa emitida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

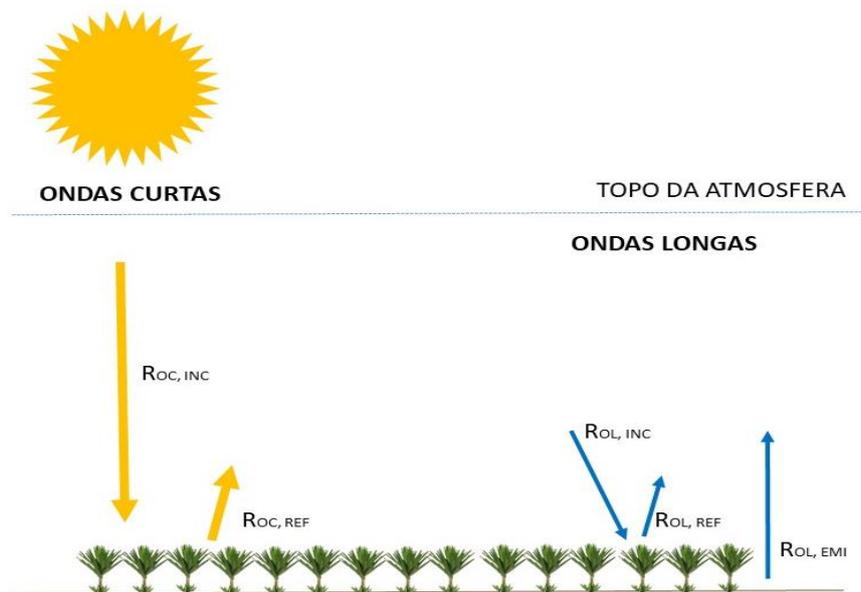


Figura 2 - Saldo de radiação à superfície (Rn). Fonte: Arquivo pessoal, 2020.

Uma outra forma de obtenção do saldo de radiação é pela soma entre o balanço de ondas curtas (BOC) que chegam ao telhado e o balanço de ondas longas (BOL) que saem do telhado e sua influência nos processos de evaporação, fotossíntese e aquecimento do solo e do ar como descrito na equação 2 (SANTOS et al., 2013).

$$R_n = BOC + BOL \quad (2)$$

Em que:

R_n = Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

BOC = Balanço de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

BOL = Balanço de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

Segundo Oliveira et al. (2015) os ganhos e perdas de radiação, são contabilizados como Balanço de Ondas Curtas (BOC) expresso em função da radiação solar incidente a superfície ($R_{oc, INC}$) e o albedo da superfície (α) como descrito na equação 3.

$$BOC = R_{oc, INC} - \alpha \cdot R_{oc, INC} \quad (3)$$

Em que:

BOC: Balanço de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$R_{OC, INC}$: Radiação de onda curta incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

α : Albedo da superfície

A radiação de onda longa (BOL) emitida pela atmosfera é a outra fonte de radiação que incide na superfície terrestre (PEREIRA & JUNIOR, 2017). Esta radiação tem comprimento de onda variando de 4 a 100 μm e depende da temperatura do ar, quantidade de vapor de água e cobertura das nuvens. Cada corpo existente na superfície terrestre também vai emitir radiação que é função de sua temperatura e emissividade (ALVES et al., 2017). Assim, o balanço de radiação de onda longa (BOL) é definido pela equação 4.

$$BOL = R_{OL, INC} - \alpha \cdot R_{OL, INC} - R_{OL, EMI} \quad (4)$$

Em que,

BOL = Balanço de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$R_{OL, INC}$ = Radiação de ondas longas incidentes ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$R_{OL, EMI}$ = Radiação de ondas longas emitidas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

α : Albedo da superfície

O albedo de um alvo é definido como a razão entre os fluxos de radiação solar refletido pelo alvo e o fluxo de radiação solar incidente (DE SOUSA LEITE, BEZERRA & DE OLIVEIRA, 2019). O Valor do albedo varia em função da posição do Sol, estágio de desenvolvimento da planta, grau de cobertura do solo, umidade do solo e do ar e o grau de cobertura de nuvens (GUL et al., 2018; WIE et al., 2020). O valor do albedo na superfície terrestre varia de 2 a 70%, dependendo da vegetação, minerais e propriedades físicas e químicas do solo (Tabela 1).

Tabela 1- Albedo de diferentes superfícies

SUPERFÍCIE	ALBEDO (%)	SUPERFÍCIE	ALBEDO (%)
Solo negro e seco	14	Gelo	50 - 70
Solo descoberto úmido	10 - 20	Água	2 - 4
Solo descoberto	7 - 20	Cidades	14 - 18
Areia	15 - 25	Concreto	17 - 27
Gramados	15 - 30	Madeira	5 - 20
Savana	16 - 18	Asfalto	5 - 10
Campos cultivado seco	20 - 25	Terra	31
Cana-de-açúcar	15	Lua	6 - 8

Fonte: Adaptado de Mendonça & Danni-Oliveira (2017)

5.4 Balanço de Energia

A radiação solar é responsável pela redistribuição de calor na atmosfera, em razão disso é fundamental o conhecimento sobre os mecanismos de transferência para a compreensão do balanço de energético de uma superfície (CODDINGTON et al., 2016).

A determinação do balanço de energia envolve duas partes, a primeira consiste em quantificar a energia líquida (Saldo de radiação - R_n) que chega e sai da superfície. A segunda consiste em quantificar a parte dessa energia (R_n) que são utilizadas para aquecimento do solo (fluxo de calor no solo - G), aquecimento do ar (calor sensível - H) e na evapotranspiração (calor latente - LE).

$$R_n - H - LE - G = 0 \quad (5)$$

Em que,

R_n = saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

H = fluxo de calor sensível ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

LE = fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

Um método bastante utilizado para cálculo da estimativa do balanço de energia é a Razão de Bowen. O conceito de razão de Bowen é a relação entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE) introduzido por Bowen (1926). Esta relação pode ser expressa, de forma simplificada, como o produto do

coeficiente psicrométrico pela razão entre o gradiente de temperatura do ar e o gradiente de pressão de vapor de água no ar, em pelo menos dois níveis acima da superfície, equações 6 e 7 (DA SILVA et al., 2016).

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (6)$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T_{ar}}{\Delta e_a} \quad (7)$$

Em que,

β = razão de Bowen

H = fluxo de calor sensível ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

LE = fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

ΔT_{ar} = diferença de temperatura do ar entre dois níveis ($T_{ar160\text{cm}} - T_{ar20\text{cm}}$; °C)

Δe_a = diferença de pressão de vapor d'água ($e_{a160\text{cm}} - e_{a20\text{cm}}$; kPa)

γ = constante psicométrica ($0,0626 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

O método da razão de Bowen tem sido largamente utilizado porque possui as vantagens de um conceito físico claro, poucos requisitos de parâmetros e um método simples de cálculo (HU et al., 2013). Soares et al. (2017), assim como outros autores, utilizaram a razão de Bowen como forma de estimar os fluxos de calor sensível e de calor latente no cálculo do balanço de energia e para estimativa da evapotranspiração (MASHIKI e CAMPOS, 2013; DA SILVA et al., 2016; DO CARMO et al., 2017; SILVA FILHO et al., 2019).

Em pesquisa realizada por Bevilacqua et al. (2017) na Itália, mostrou que enquanto a temperatura superficial em um telhado tradicional atingiu máxima de $74,3 \text{ } ^\circ\text{C}$, o telhado verde foi capaz de reduzir em 63% a temperatura máxima. COMA et al. (2016) observaram um telhado típico e um telhado verde e identificaram redução de energia de 6,0 a $7,5 \text{ kWh dia}^{-1}$ para um telhado com uma área de 72 m^2 .

Em qualquer superfície não vegetada o fluxo de calor sensível é maior que o latente, pois, a maior parte da energia é utilizada para aquecimento do ar, porém, após a instalação do telhado verde esse procedimento se inverte, sendo que a maior parte da energia é utilizada para mudança de estado físico da água (Figura 3). Essa relação é comprovada por Da Silva Omar et al. (2018) em simulações

realizadas em Recife, após a instalação do telhado verde, a porcentagem do calor latente foi alterada de 22 para 87%, enquanto que o calor sensível diminuiu de 75 para 6%, comprovando a diminuição de até 65% do calor transferido do telhado para o interior da construção, o que contribui para a redução do consumo de energia utilizado no sistema de resfriamento do prédio.

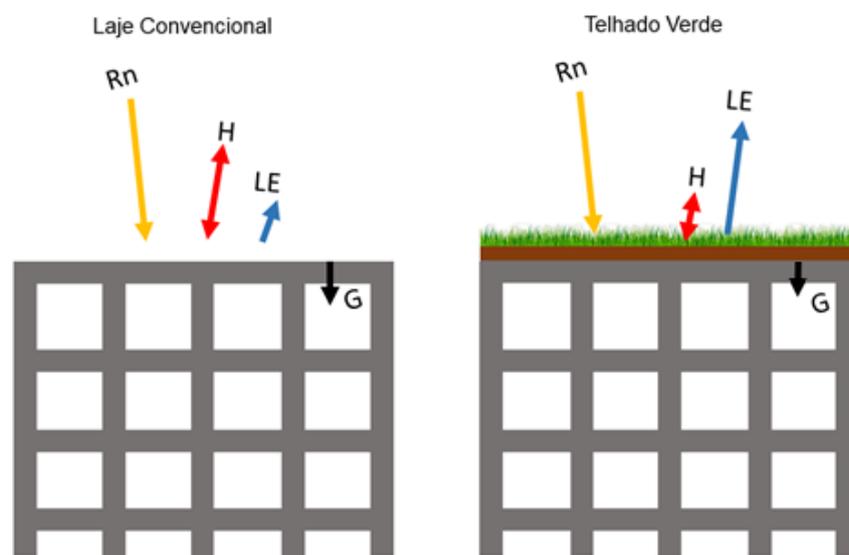


Figura 3 - Esquema do balanço de energia na área com laje convencional e na área com telhado verde. Fonte: Arquivo pessoal, 2020.

Alguns autores têm utilizado com frequência o método da razão de Bowen para estimar o balanço de energia. Da Silva Filho et al. (2019), estimou o balanço de energia para três dias, em uma área de cana-de-açúcar e para uma área urbana. Os resultados dos testes de campo constataram que o balanço de energia na área de cana-de-açúcar apresentou fluxo de calor latente 56,7%, fluxo de calor sensível, 39,6% e no solo 3,6%. Já para a área urbana foi de 43,8% o fluxo de calor latente, 25,6% o fluxo de calor sensível e 30,5% para fluxo de calor no solo.

Pereira et al. (2019), estimaram o balanço de energia pelo método da razão de Bowen numa floresta de transição entre o cerrado e a floresta amazônica, na cidade de Sinop/MT e verificaram que a partição da energia líquida disponível priorizou o fluxo de calor latente (90,0%), seguidos pela sensível (4,7 %) e no solo (1,3 %).

A cobertura verde instalada no telhado é capaz de reduzir o aquecimento ocasionado pela incidência da radiação solar em um edifício refletindo 27% dessa radiação, absorvendo 60% através da fotossíntese e evapotranspiração e, absorvendo os 13% restantes no meio de cultivo. Essa atenuação da radiação solar

reduz a temperatura dos edifícios e as necessidades energéticas de ar-condicionado (WATERFORD, 2015).

5.5 Conforto térmico

O conforto térmico exprime a satisfação térmica de um indivíduo com o ambiente. O ser humano é um animal homeotérmico e tem temperatura média interna constante de 37 °C, com limite inferior na faixa de 32,0 °C e superior em 42 °C, quando acusa um estado de enfermidade (PAGNOSSIN et al., 2016; RUPP et al., 2017). A interação com o ambiente externo induz respostas fisiológicas a fim de manter o equilíbrio térmico do organismo. O corpo humano atinge o equilíbrio térmico quando as trocas de calor, juntamente com o calor metabólico se anulam (BURIOL et al., 2015).

De acordo com as exigências humanas, as condições de conforto térmico dependem da atividade desenvolvida pelo indivíduo, vestimenta e variáveis do ambiente. Assim, quando a temperatura e a umidade relativa do ar estão fora do ideal afetam as trocas de calor e o rendimento no trabalho (BERARDI, ROCHE & ALMODOVAR, 2017).

Para a adequação térmica de ambientes construídos no nível do conforto térmico de seus ocupantes é necessário o controle dos elementos meteorológicos, como a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a radiação solar. Este processo pode ser feito artificialmente com o uso de condicionadores de ar, ventiladores; ou de forma natural, como a colocação de vegetação. A relação entre o ambiente e a edificação é importante, pois, o conhecimento das variáveis climáticas possibilita a construção de projetos arquitetônicos, que visam perfeita interação entre esses fatores (BAËTA e SOUZA, 2010; BERARDI, ROCHE e ALMODOVAR, 2017).

Devido à dificuldade em estabelecer parâmetros em um ambiente para que o homem se sinta confortável termicamente, surgiram algumas pesquisas que avaliam o conforto térmico nos ambientes, com isso, foram estabelecidos inúmeros índices de conforto. Os modelos existentes para quantificação do conforto térmico empregam a análise de variáveis meteorológicas, de forma a se estabelecer um

único parâmetro, que indique conforto ou desconforto, além de estabelecer seus intervalos (ROSENBERG, BLAND & VERMA, 1983; FANG et al., 2018).

SILVA JUNIOR et al. (2017) realizaram pesquisa no Recife-PE avaliando os efeitos do telhado verde e os impactos no ambiente interno. A cobertura com telhado verde demonstrou melhor desempenho térmico com relação aos demais, em que se observou redução nos índices de Temperatura de Globo Negro de Umidade, Temperatura e Umidade do ar, Conforto Humano e Temperatura Efetiva.

5.6 Ilhas de calor

Nas últimas décadas a população está crescendo rapidamente devido a redução da taxa de mortalidade, aumento da taxa de natalidade e migração da população rural para as cidades em busca de melhor qualidade de vida, conflitos locais e falta de oportunidade causam a urbanização desordenada (BRITO, HORTA & AMARAL 2018).

Urbanização consiste no processo pelo qual a população urbana cresce em proporção superior à população rural. É um fenômeno de concentração urbana e consequente crescimento e desenvolvimento das cidades. Uma sociedade é considerada urbanizada quando a população urbana ultrapassa 50%. Na urbanização, a especulação imobiliária e o acúmulo do capital são fatores influenciadores, que muitas vezes não considera a qualidade de vida para o indivíduo e ou ambiente (ZANCHETI & HIDAKA, 2014; MESQUITA, SILVESTRE & STEINKE, 2017).

O processo de urbanização causa a remoção da cobertura vegetal original, aumento da impermeabilização, canalização das águas e ocupação das planícies ribeirinhas, além disso, as áreas urbanas sofrem mudanças significativas de seus atributos biofísicos, conhecidos como expansão urbana, combinados à mudança no uso da terra (OBERMAIER & ROSA, 2013; HERNÁNDEZ-CALVENTO et al., 2018).

Assim, os impactos na redução do conforto térmico, inundações, contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos a partir dos efluentes urbanos, promovem a queda da qualidade de vida da população. Segundo o relatório das Nações Unidas cerca de quatro bilhões de pessoas vivem nas

idades, o número de moradores urbanos deve crescer em mais de 60% até 2050 (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2016).

No Brasil o êxodo rural aconteceu acelerado e desordenadamente a partir da segunda guerra mundial. A população urbana passou de aproximadamente 16% em 1920 para 80% em 2000 e 84,4% em 2010. Dos municípios brasileiros 32% estão em estágio avançado de urbanização, esses são responsáveis por 87,60% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (DA SILVA MELO, SILVA & DE ASSIS, 2018).

No Recife, o processo de urbanização se iniciou em 1820 e passou por intensas modificações, tais como a iluminação das ruas, o abastecimento de água com a implantação do projeto da companhia Beberibe, o transporte público que era feito por meio de carroças e liteiras e, a partir de 1860 foi implantado o sistema ferroviário que ligava o centro da cidade a localidades adjacentes (ZANCHETI & HIDAKA, 2014).

Quando os diversos fatores que estão ligados ao processo de urbanização se intensificam, ocorre o fenômeno de ilhas de calor (TASSI et al., 2014), que são definidas como áreas mais aquecidas da cidade em razão das alterações nos atributos naturais originais, como na cobertura e uso do solo (DE LUCENA et al., 2011).

Essa mudança na distribuição da vegetação causa uma elevada capacidade de armazenamento calorífico dos materiais utilizados, a produção do calor antropogênico, a diminuição da umidade do ar devido à pavimentação do solo, a redução na velocidade do ar originada pela rugosidade da superfície, o aumento da absorção da radiação solar e consequente alteração do albedo (CHUNG & PARK, 2016; FALASCA et al., 2019).

O termo ilha de calor descreve áreas construídas mais quentes que as áreas rurais próximas. Segundo WONG et al. (2016) a temperatura média anual do ar de uma cidade com 1 milhão de pessoas ou mais, pode ser de 1 a 3 °C mais quente do que seus arredores. À noite a diferença pode chegar a 12 °C.

Assim, no centro das grandes metrópoles as ilhas de calor se intensificam, onde os materiais de baixa reflexão ou baixo albedo estão mais concentrados e, à medida que nos afastamos do centro, a tendência é de redução da temperatura (SANTANA, 2014), como mostra a Figura 4. Estes materiais absorvem o calor em

vez de refletir e transformar, como faz uma cobertura vegetal realizando a fotossíntese (AKBARI & KOLOKOTSA, 2016).

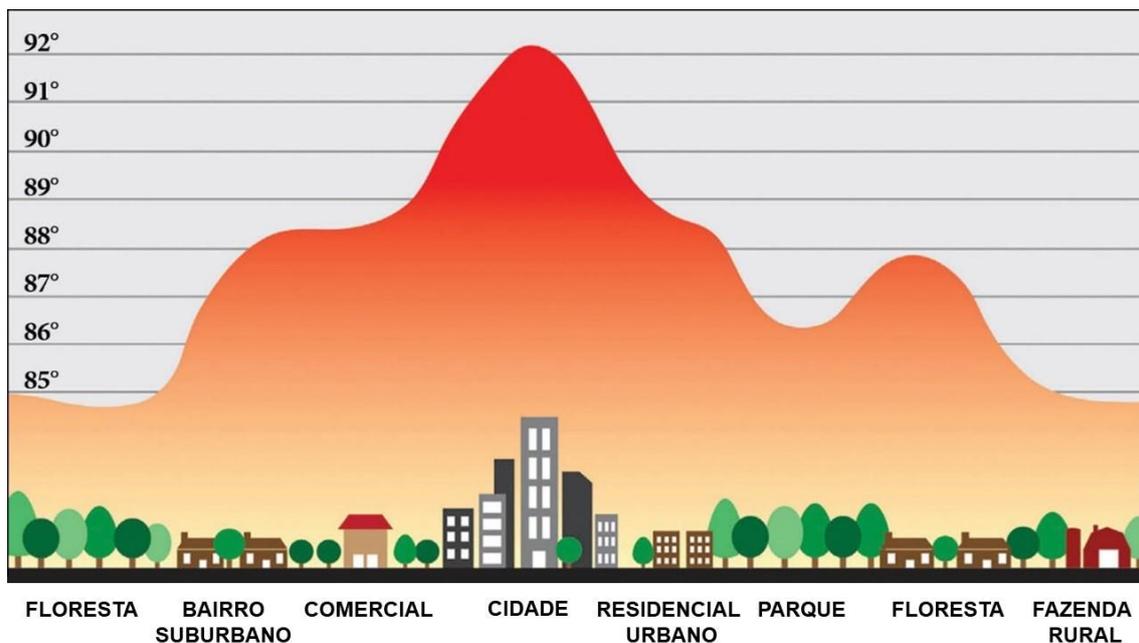


Figura 4 - Perfil de ocorrência das ilhas de calor. Adaptado e traduzido. Fonte: United States Environmental Protection Agency (EPA, 2011).

Na cidade do Recife esse fenômeno foi estudado e identificado por Nóbrega, Santos & Moreira (2016), que instalaram nove termohigrômetros em áreas distintas da cidade do Recife, comprovando que a temperatura no centro da cidade é frequentemente 1,5 °C maior do que nas áreas circundantes.

Santos et al. (2013) identificaram em Recife um aumento notável na temperatura superficial na direção do subúrbio ao centro, resultando em uma diferença de 6 °C entre essas áreas. Esse aumento da temperatura pode ser atribuído à intensificação do processo de antropização do espaço urbano.

Nas comunidades as ilhas de calor podem aumentar a demanda por energia elétrica nos horários de pico, aumentando assim a demanda e os custos com climatização, poluição do ar e as emissões de gases de efeito estufa, doenças e mortalidade relacionadas ao calor e a poluição da água (DE SOUZA, 2013).

As ilhas de calor também favorecem o surgimento de nuvens baixas ocasionando assim precipitação convectiva (MANOLI et al., 2019). Em pesquisas realizadas pelo METROMEX (Experimentos em Meteorologia Metropolitana) em cidades americanas confirmam que os efeitos da urbanização incrementam a

precipitação nos centros urbanos cerca de 5 a 25% (DE LUCENA et al., 2011). Outros estudos com o uso de modelos têm observado incremento da precipitação associada à urbanização, em que se verificou aumento entre 19 e 39% no total de chuvas, com efeito mais pronunciado nas cidades mais quentes, causando também a propagação de doenças transmitidas por mosquitos (WAI et al., 2017; ZHANG et al., 2018).

A umidade próxima à superfície pode ser o mais importante fator para a ocorrência da maior precipitação induzida pela ilha de calor urbana (LI et al., 2019). O telhado verde trata-se de uma tecnologia que consiste na utilização de solo e vegetação instalados na cobertura de edificações ou estruturas de apoio (SILVA & KASHIWA, 2018).

Portanto, é uma ótima solução para minimizar os efeitos causados pelas ilhas de calor (SILVA, SIQUEIRA, & ARAGÃO, 2017), além de atuar como isolante termo acústico, ou seja, dificulta a transferência de calor, frio e ruído para o interior da edificação e minimiza o consumo de energia com aquecimento ou refrigeração (DE FREITAS et al., 2015).

De acordo com GAY-ANTAKI & LIVERMAN (2018), a temperatura mundial deve subir entre 1,1 e 6,4 °C durante o próximo século, o que resultará numa elevação no nível do mar entre 18 e 59 cm e uma maior frequência dos eventos climáticos extremos.

Esses eventos que já se mostraram trágicos e desastrosos nas grandes capitais devido ao uso inadequado do solo e da água, técnicas pouco eficientes de drenagem, podem ser agravados em um cenário de ciclo hidrológico alterado, essa situação piora principalmente nas planícies costeiras, como é o caso da cidade do Recife, que teve seu processo de ocupação urbana desordenada e possui um sistema de drenagem altamente vulnerável às oscilações de maré, o que provocar sérios problemas de alagamentos em períodos de chuvas intensas (DA SILVA JUNIOR & DA SILVA, 2016).

O telhado verde promove redução ou atenuação na temperatura média do ar do entorno onde fica inserido, o que demonstra que o mesmo tem a capacidade de mitigação de ilhas de calor (DOS SANTOS & REZENDE, 2019).

5.7 Análise técnico-econômica

O Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (PROCEL) estimou que edifícios comerciais e residenciais consomem aproximadamente 50% da eletricidade no Brasil. Para reduzir os danos causados pela indústria da construção, foram introduzidas práticas ecológicas que contribuem para economia de energia, redução de emissões, reutilização e reciclagem de materiais (BIANCHINI E HEWAGE, 2012a).

Os telhados verdes são usados como um produto ecológico para incentivar a construção sustentável e sua popularidade está aumentando devido aos seus múltiplos benefícios ambientais; no entanto, sua desvantagem de elevado custo de instalação têm sido um desafio para a indústria, devido a esse fator, o estudo da viabilidade econômica da implantação de telhados verdes é de extrema importância (SHAFIQUE et al., 2018).

No estudo da viabilidade econômica, busca-se avaliar a aplicabilidade do negócio e obter uma projeção do seu comportamento frente ao mercado. Isso oferece maior segurança aos investimentos, podendo assim, avaliar as condições de mercado para que um novo produto, tecnologia ou serviço torne-se lucrativo. Muitas empresas encaram as análises matemáticas de forma estratégica para priorizar quais produtos devem ser implementados e quais áreas têm maior potencial para cada segmento (ZIOGOU et al., 2018).

Além dos benefícios ambientais, a viabilidade econômica da construção torna-se uma ferramenta necessária para convencer proprietários e construtoras a instalar telhados verdes. Segundo Rosato et al. (2016) o custo de implantação de um telhado verde é maior do que um telhado típico, no entanto, deve-se considerar sua relação custo-benefício para viabilização dos projetos de construção do telhado verde.

Os telhados verdes usam as propriedades reflexivas do substrato e da vegetação que protegem a estrutura do telhado dos efeitos nocivos da radiação solar e flutuação da temperatura, o que reduz os custos com manutenção (FENG & HEWAGE, 2018).

Vários estudos têm investigado custos econômicos de telhados verdes, principalmente com relação à economia de energia e água (TASSICKER, RAHNAMAYIEZEKAVAT & SUTRISNA, 2016; MAHDIYAR et al., 2016; DARAIA &

REDA 2017). As soluções baseadas no emprego do telhado verde, podem fornecer benefícios ambientais, sociais, econômicos e ajudar a construir resiliência térmica nas cidades.

A redução da temperatura interna das edificações promovidas pelo telhado verde resulta na redução do consumo de energia elétrica, devido a ampliação do tempo de intermitência no funcionamento do condicionador de ar. A redução no consumo de energia elétrica, geralmente é o fator mais convincente para que os proprietários de edifícios e empresariais instalem telhados verdes (REFAHI & TALKHABI, 2015).

Pesquisa realizada em uma edificação no Canadá, permitiu verificar que em um dia ensolarado de verão, com a temperatura externa atingindo um pico de 35 °C, um telhado de referência absorveu a radiação solar e atingiu aproximadamente 70 °C, enquanto que no telhado verde a cobertura permaneceu em torno de 25 °C, nessa mesma pesquisa foi identificado que o telhado verde extensivo reduziu os ganhos de calor em 95% e as perdas em 26%, quando comparado a telhado convencional, além de terem reduzido a amplitude térmica na laje, que foram de 46 para 12,5 °C, nessa construção, a demanda de energia por condicionamento de espaço no caso do telhado de referência foi de 6,0 a 7,5 kWh (20.500 a 25.600 BTU). Entretanto, o meio de cultivo e as plantas modificaram o fluxo de calor e reduziram a demanda diária de energia para menos de 1,5 kWh (5.100 BTU), uma redução de mais de 75% (LIU, 2002).

O benefício econômico e energético com a intermitência no funcionamento de condicionadores de ar foi quantificado por Bianchini e Hewage (2012b), que demonstraram que o telhado verde promoveu economia de US\$ 0,68 por m⁻³ de ar, anualmente. No Canadá o custo de implantação de um telhado verde extensivo padrão varia de US\$ 130 m⁻² a US\$ 165 m⁻², enquanto que um telhado verde intensivo tem custo variando de US\$ 165 m⁻² para US\$ 540 m⁻², nessa mesma pesquisa foi identificado que o período de retorno do capital investido pode ser de até 10 anos, porém, o período mais provável é de 4,6 anos (55 meses). Mostrando assim, que os telhados verdes são investimentos de curto prazo em termos de retorno líquido, visto que a instalação de telhados verdes é um investimento de baixo risco e a probabilidade de lucros dessa tecnologia é maior do que as possíveis perdas financeiras, pois, a inclusão de custos sociais e benefícios de telhados verdes também aumentam o valor do imóvel.

No estudo de DE SOUZA LIMA et al. (2019) foi realizado uma comparação do custo de construção de telhado verde e telhados convencionais para uma cobertura de 60 m² (fibrocimento e telha cerâmica) a fim de apresentar uma análise do custo-benefício e das vantagens e desvantagens no processo de execução. Suas descobertas revelaram que o telhado verde apresenta um custo maior (R\$ 192,11 m⁻²) que os telhados convencionais (75,42 e R\$ 100,59 m⁻²), porém, no aspecto da sustentabilidade, a cobertura verde apresenta maior vantagem em relação aos outros telhados.

Na China, o preço médio de um telhado verde investigado em três províncias foi entre US\$ 48.00 e US\$ 76.00 m² (LIU E HONG, 2012). Na Alemanha, os custos médios do telhado verde variam de US\$ 15.00 a US\$ 45.00 m⁻². Os menores preços da cobertura verde na Alemanha são resultado de pesquisa e desenvolvimento contínuos, assim como sua presença no mercado, que já somam duas décadas.

Em uma pesquisa realizada por SHAN et al. (2019) no Rio de Janeiro, Brasil, como proposta de jardim terapêutico em unidades hospitalares foi identificado a estimativa de custos de materiais a serem utilizados para instalação de um telhado verde, esse valor foi de R\$136,03 m⁻², o que de acordo com os autores é um valor interessante, pois, verificou-se benefícios aos pacientes quando em contato com a natureza, reagindo melhor ao tratamento, devido à sensação de bem-estar e tranquilidade que os jardins proporcionam. Essas vantagens de ordens social e ambiental podem contribuir para redução dos impactos ambientais causados pelas ações do homem ao meio ambiente. No entanto, segundo Boni (2015) o telhado verde possui uma variação de preço entre R\$100,00 m⁻² e R\$ 150,00 m⁻² dependendo do tipo e região onde será instalado.

Em uma simulação, Mahdiyar et al. (2016) analisaram o custo benefício da instalação de dois tipos de telhados verdes e concluíram que em relação ao custo total de uma construção, a instalação de um telhado verde é um investimento baixo para os proprietários com reduzida probabilidade de perda. Um telhado verde é um investimento de longo prazo com retorno de curto prazo, o período de retorno é de até dois anos e vida útil de até 50 anos, o que torna o emprego do telhado verde como uma alternativa viável.

Simulação realizada como se os edifícios da universidade de Pisa-Itália (230 m²) tivessem telhado verde, indicaram uma redução de 33% no consumo de energia no inverno e 30% no verão, resultando em uma economia anual 16,4 MWh,

mais de US\$ 10930,95 para a área analisada e redução de descargas de água da chuva no sistema de esgoto de até 369 m³ por evento de chuva (LISI et al., 2017).

A manutenção do telhado verde gera uma desvantagem quando comparados aos telhados convencionais, pois, são necessárias visitas periódicas para pequenos reparos, no entanto, apesar dos telhados convencionais serem mais empregados, o telhado verde possui maior durabilidade, tornando o custo de reparo e reforma menor. Segundo William et al. (2016), o telhado verde possui uma camada impermeabilizada, com a finalidade de proteger da água, da radiação solar e das variações de temperatura, apresentando assim uma vida útil maior (40 anos), enquanto o telhado convencional tem sua vida útil menor (20 anos).

Contudo cabe ressaltar que as coberturas verdes intensivas necessitam de manutenção mais frequentes, geralmente mensal. Essa manutenção se dá para o cuidado com a vegetação e limpeza no local, sendo necessário mão de obra especializada. A manutenção periódica dos telhados verdes conta com o corte da vegetação, o controle de pragas e doenças, adubação e limpeza do sistema de drenagem (COLLI et al., 2018; OLIVEIRA e CARVALHO, 2018).

O telhado verde apresenta-se como um ótimo investimento financeiro de retorno assegurado, porém, existem uma série de detalhes que podem causar grande variação no custo total do projeto como o tipo de telhado verde (intensivo, semi-intensivo ou extensivo), o tipo de vegetação e a estrutura utilizada. No entanto, certamente esse custo será compensado pelo retorno de se utilizar um sistema natural (DE SOUZA LIMA et al., 2019).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, H., CARTALIS, C., KOLOKOTSA, D., MUSCIO, A., PISELLO, A. L., ROSSI, F. & ZINZI, M. Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 22, n. 1, p. 1-16, 2016.

ALEXANDRI, E., & JONES, P. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 2835-2849, 2007.

ALMEIDA, S. C., BRITO, G. P., & SANTOS, S. M. Revisão Histórica dos Telhados Verdes: da Mesopotâmia aos dias atuais. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 2, n. 1, 2018.

ALOISIO, J. M., TUININGA, A. R., & LEWIS, J. D. Crop species selection effects on stormwater runoff and edible biomass in an agricultural green roof microcosm. **Ecological engineering**, v. 88, p. 20-27, 2016.

ALVES, L. E. R., GOMES, H. B., DOS SANTOS, M. N., & DE FREITAS, I. G. F. Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 33, p. 117-127, 2017.

AN, N.; HEMMATI, S.; CUI, Y-J. Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scale of meteorological variables. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 9, p. 239-246, abr, 2017.

ATLÂNTICA, S. M. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica, período 2012-2013. **São Paulo**, 2014.

AZEÑAS, V., JANNER, I., MEDRANO, H., & GULÍAS, J. Evaluating the establishment performance of six native perennial Mediterranean species for use in extensive green roofs under water-limiting conditions. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 41, p. 158-169, 2019.

BAROSKY, T. K. Plasticidade ornamental e propagação de herbáceas para utilização em telhado verde. 2011.

BARYLA, A., KARCZMARCZYK, A., & BUS, A. Role of substrates used for green roofs in limiting rainwater runoff. **Journal of Ecological Engineering**, v. 19, n. 5, 2018.

BERARDI, U. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 217-229, 2016.

BERARDI, U., LA ROCHE, P., & ALMODOVAR, J. M. Water-to-air-heat exchanger and indirect evaporative cooling in buildings with green roofs. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 406-417, 2017.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological engineering**, v. 36, n. 4, p. 351-360, 2010.

BEVILACQUA, P., MAZZEO, D., BRUNO, R., & ARCURI, N. Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate. **Energy and Buildings**, 150, 318-327, 2017.

BIANCHINI, F., & HEWAGE, K. Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: a lifecycle approach. **Building and Environment**, v. 58, p. 152-162, 2012b.

BLAUSTEIN, L., KADAS, G. J., GUREVITCH, J. Integrating ecology into green roof research. **Israel Journal of Ecology & Evolution**, v. 62, n. 1-2, p. 1-6, 2016.

BONI, Filipe. Telhado verde: Uma opção sustentável? Disponível em: <<http://2030studio.com/category/artigos>>. Acesso em: Jan de 2020.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical review**, v. 27, n. 6, p. 779, 1926.

BRITO, F., HORTA, C. J. G., & AMARAL, E. F. A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas. 2018.

BURIOL, G. A., ESTEFANEL, V., RIGHI, E. Z., & BRESSAN, V. C. Conforto térmico para os seres humanos nas condições de ambiente natural em Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Rural**, v. 45, n. 2, p. 223-230, 2015.

CALHEIROS, C. S. C.; PALHA P. Infraestruturas verdes: a tendência das coberturas verdes nas cidades. **Revista Ingenium**. N. ° 158, 3 eds. 2017.

CARLESSO, F., GÓMEZ, J. M. R., VIEIRA, L. E. A., SAVONOV, G. D. S., BERNI, L. A., & COSTA, L. L. Conceitos básicos de radiômetros de substituição elétrica para medidas da Irradiância Solar Total. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 2, 2019.

CHAROENKIT, S., & YIEMWATTANA, S. Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review. **Building and environment**, 105, 82-94. 2016.

CHUNG, M. H., & PARK, J. C. Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 341-348, 2016.

CODDINGTON, O., LEAN, J. L., PILEWSKIE, P., SNOW, M., & LINDHOLM, D. A solar irradiance climate data record. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 7, p. 1265-1282, 2016.

COLLI, F. R., BEDIN, A. M., MESACASA, C., & BARBISAN, A. O. ANÁLISE E PERCEPÇÕES DOS PROFISSIONAIS DE ENGENHARIA CIVIL NA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE COBERTURAS VERDES. **Anais da Engenharia Civil**, v. 1, n. 1, p. 77-96, 2018.

COMA, J., PÉREZ, G., SOLÉ, C., CASTELL, A., & CABEZA, L. F. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable energy**, 85, 1106-1115. 2016.

DA SILVA FILHO, A., BIUDES, M. S., MACHADO, N. G., QUERINO, C. A. S., & JÚNIOR, E. S. A. Estimativa do balanço de energia pelo método da razão de bowen a partir de medidas de protótipo de estação micrometeorológica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.

DA SILVA JUNIOR¹, M. A. B., & DA SILVA, S. R. Impactos da urbanização e das alterações climáticas no sistema de drenagem do Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 06, p. 2034-2053, 2016.

DA SILVA MELO, J. G., SILVA, E. R. A. C., & DE ASSIS, D. R. S. Avaliação dos impactos ambientais na Lagoa do Araçá, Recife, Pernambuco, Brasil. **Acta Brasiliensis**, v. 2, n. 1, p. 6-10, 2018.

DA SILVA OMAR, A. J., VIGODERIS, R. B., PANDORFI, H., DE ALBUQUERQUE MOURA, G. B., & GUISELINI, C. Telhado verde: simulação dos componentes do balanço de energia. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 3, 2018.

DA SILVA, L. D. B., LYRA, G. B., SILVA, J. B. G., DE PINHO, C. F., NASCENTES, A. L., DE ALMEIDA, G. V., & FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia - Razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, v. 21, n. 3, p. 516-516, 2016.

DARAIA, P. S., & DE LIMA REDA, A. L. Telhados verdes: estudo quantitativo de eficácia técnica e econômica. In: **XVII Safety, Health and Environment World Congress**. 2017. p. 35-39.

DE ALMEIDA, R. G., MAIA, S. A., JÚNIOR, M. M. A. R., DE ALMEIDA LEITE, R. P., SILVEIRA, G. T. R., & FRANCO, A. R. Biodiversidade e botânica: educação ambiental por meio de um jardim sensorial. **Revista Interdisciplinar de Extensão**, 1(1), 60-74. 2017.

DE FREITAS, J. C., DOS SANTOS, J. A., CÂNDIDO, S. M., & DA PAIXÃO RAMOS, D. Energias Renováveis, Clima e Mudanças Climáticas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 317-329, 2015.

DE LIMA MENDES, T. G., DOS ANJOS, R. S., SANTOS, T. N., MOREIRA, A. B., & NÓBREGA, R. S. Abordagem científica sobre ilhas de calor em Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n. 1, p. 001-013, 2019.

DE LUCENA, A. J., CORRÊA, E. B., ROTUNNO FILHO, O. C., DE FARIA PERES, L., DE ALMEIDA FRANÇA, J. R., & DA SILVA, M. G. A. J. Ilhas de calor e eventos de precipitação na região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). 2011.

DE OLIVEIRA, T. H., DE MENDONÇA, P. R. M., GALVÍNCIO, J. D. Vegetation fragment influence over urban climate. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 1, p. 72-86, 2017.

DE SOUSA LEITE, A. C., BEZERRA, U. A., DE OLIVEIRA, L. M. M. Comportamento do Albedo e NDVI no Núcleo de Desertificação de Gilbués–Piauí (Brasil), usando imagens do Satélite Landsat. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 2, 2019.

DE SOUZA LIMA, C. A., DA SILVA, J. R. A., & FONTINELES, F. H. S. Telhados verdes e telhados convencionais: uma análise comparativa sob a ótica da relação de custo-benefício. **Revista Artigos. Com**, v. 10, p. e2050-e2050, 2019.

DE SOUZA, L. C. L. Relações entre ilhas de calor, geometria urbana e consumo de energia elétrica. Fórum Patrimônio: **Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 3, n. 2, 2013.

DO CARMO, J. F. A.; DE MOURA, M. S. B.; DA SILVA, T. G. F.; DE SOUZA, L. S. B.; LEITAO, M. de M. V. B. R. Balanço de Energia e Coeficiente de Cultura da Cana-De-Açúcar por Dois Métodos Micrometeorológicos. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.101-111, 2017.

DOS SANTOS, S. P., & DE REZENDE M. C. Telhado verde como estratégia de mitigação de ilhas de calor em São Paulo. In: **XV Jornada de Iniciação Científica e IX Mostra de Iniciação Tecnológica**. 2019.

EDWARDS, Y., EMILSSON, T., MALMBERG, J., SKOG, A. P., & CAPENER, C. M. Quality-assured solutions for green roof gardens on concrete deck with zero tolerance for leaks. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, 204, 363-372. 2016.

ERDEMIR, D., & AYATA, T. Prediction of temperature decreasing on a green roof by using artificial neural network. **Applied Thermal Engineering**, 112, 1317-1325. 2017.

FALASCA, S., CIANCIO, V., SALATA, F., GOLASI, I., ROSSO, F., & CURCI, G. High albedo materials to counteract heat waves in cities: An assessment of meteorology, buildings energy needs and pedestrian thermal comfort. **Building and Environment**, v. 163, p. 106242, 2019.

FANG, Z., LIN, Z., MAK, C. M., NIU, J., & TSE, K. T. Investigation into sensitivities of factors in outdoor thermal comfort indices. **Building and Environment**, v. 128, p. 129-142, 2018.

FANTE, K. P., & NETO, J. L. S. A. Mudanças nos padrões da temperatura do Estado de São Paulo/Brasil nos últimos 50 anos. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 33, p. 12-23, 2017.

FENG, H., & HEWAGE, K. N. Economic Benefits and Costs of Green Roofs. **Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability**. p 307-318. 2018.

FOUSTALIERAKI, M., ASSIMAKOPOULOS, M. N., SANTAMOURIS, M., & PANGALOU, H. Energy performance of a medium scale green roof system installed on a commercial building using numerical and experimental data recorded during the cold period of the year. **Energy and Buildings**, v. 135, p. 33-38, 2017.

GAY-ANTAKI, M., & LIVERMAN, D. Climate for women in climate science: Women scientists and the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 115(9), 2060-2065.

GOMES, H. F., SILVA, B. B. DA, CAVALCANTI, E. P., ROCHA, H. R. Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências**, v.28, p.153- 164, 2009.

GÓMEZ, J. M., CARLESSO, F., VIEIRA, L. E., & DA SILVA, L. Solar irradiance: basic concepts. **Revista brasileira de ensino de física**, v. 40, n. 3, 2018.

GUL, M., KOTAK, Y., MUNEER, T., & IVANOVA, S. Enhancement of Albedo for Solar Energy Gain with Particular Emphasis on Overcast Skies. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 2881, 2018.

HERNÁNDEZ-CALVENTO, L., HESP, P. A., & PÉREZ-CHACÓN, E. Geomorphological changes in an arid transgressive coastal dune field due to natural processes and human impacts. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 10, p. 2167-2180, 2018.

HU, S.; ZHAO, C.; LI, J.; WANG, F.; CHEN, Y. Discussion and reassessment of the method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrol. Process**, v. 28, p. 4506–4510, 2013.

HUTCHINSON, D., ABRAMS, P., RETZLAFF, R., & LIPTAN, T. Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA. **City of Portland Bureau of Environmental Services**, 2003.

IGRA. **Tipos de telhado verde**. Disponível em: http://www.igra-world.com/types_of_green_roofs/index.php. Acesso em: 15 março 2018.

JEVREJEVA, S., JACKSON, L. P., RIVA, R. E., GRINSTED, A., & MOORE, J. C. Coastal sea level rise with warming above 2 C. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 47, p. 13342-13347, 2016.

KARACHALIOU, P., SANTAMOURIS, M., & PANGALOU, H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. **Energy And Buildings**, v. 114, p. 256-264, 2016.

KHAN, M. A., AHMAD, I., SAJID, M., JAN, I., KHATTAK, A. M., KHAN, J. & HAYAT, S. Therapeutic horticulture: influencing psychological responses of surgical patients

and their environmental assessment scale. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 53, n. 2, 2016.

LI, D., LIAO, W., RIGDEN, A. J., LIU, X., WANG, D., MALYSHEV, S., & SHEVLIAKOVA, E. Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? **Science Advances**, v. 5, n. 4, p. eaau4299, 2019.

LI, H., DING, L., REN, M., LI, C., & WANG, H. Sponge city construction in China: A survey of the challenges and opportunities. **Water**, 9(9), 594. 2017.

LINS, F. A. C., DOS SANTOS ARAÚJO, D. C., DA SILVA, J. L. B., LOPES, P. M. O., & OLIVEIRA, J. D. A. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido pernambucano utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 64-75, 2017.

LISI, F., SANTI, G., LECCESE, F., TESTI, D., & CINELLI, F. Green roof: benefits analysis and development of a simplified dynamic energy model. In: **International Symposium on Greener Cities for More Efficient Ecosystem Services in a Climate Changing World**. p. 81-88. 2017.

LIU, C, LI, Y, LI, J. (2017). Geographic information system-based assessment of mitigating flash-flood disaster from green roof systems. **Comput Environ Urban Syst**; 64:321–31. 2017.

LIU, K. K. Y. Energy efficiency and environmental benefits of rooftop gardens. **Construction Canada**, v. 44, n. 2, p. 17-23, 2002.

LIU, K., & BASKARAN, B. Thermal performance of green roofs through field evaluation. **Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference, Awards and Trade Show**. p. 1-10. 2003.

LIU, L. P., HONG, G. X. Popularizing path research on green roof project in China rural region: cost-effectiveness assessment. **World Automation Congress, WAC 2012**.

LÓPEZ-UCEDA, A., GALVÍN, A. P., AYUSO, J., JIMÉNEZ, J. R., VANWALLEGHEM, T., & PEÑA, A. Risk assessment by percolation leaching tests of extensive green roofs with fine fraction of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste. **Environmental Science and Pollution Research**, 25(36), 36024-36034. 2018.

MAHDIYAR, A., TABATABAEE, S., SADEGHIFAM, A. N., MOHANDÉS, S. R., ABDULLAH, A., & MEYNAGH, M. M. Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A Monte Carlo simulation approach. **Urban forestry & urban greening**, 20, 317-327. 2016.

MANOLI, G., FATICHI, S., SCHLÄPFER, M., YU, K., CROWTHER, T. W., MEILI; BOU-ZEID, E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. **Nature**, v. 573, n. 7772, p. 55-60, 2019.

MARCUS, C. C. Therapeutic landscapes. **Environmental Psychology and Human Well-Being**. Academic Press. p. 387-413. 2018.

MASHIKI, M. Y.; CAMPOS, S. Geoprocessamento aplicado na influência do uso e ocupação do solo na temperatura aparente da superfície do Município de Botucatu (SP). **Energia na Agricultura**, v. 28, p. 143-149, 2013.

MATHEUS, C., CAETANO, F. D. N., MORELLI, D. D. D. O., & LABAKI, L. C. Thermal performance of green envelopes in buildings in the Brazilian southeast. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 71-81, 2016.

MENDONÇA, F., DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de textos, 2017.

MESQUITA, F. N., SILVESTRE, K. S., & STEINKE, V. A. Urbanização e degradação ambiental: análise da ocupação irregular em áreas de proteção permanente na região administrativa de Vicente Pires, DF, utilizando imagens aéreas do ano de 2016. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 03, p. 722-734, 2017.

MORAKINYO, T. E., DAHANAYAKE, K. K. C., NG, E., & CHOW, C. L. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A cosimulation parametric study. **Energy and Buildings**, 145, 226-237. 2017.

NÓBREGA, R. S., SANTOS, P. F. C., & MOREIRA, E. B. M. Morfologia urbana e ilhas de calor na cidade do Recife/PE: distribuição espacial e intensidade. **Revista de Geografia**, 33(4). 2016.

OBERMAIER, M., & ROSA, L. P. Mudança climática e adaptação no Brasil: uma análise crítica. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 78, p. 155-176, 2013.

OLIVEIRA, J. D. D., & CARVALHO, L. C. VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA UM TELHADO VERDE PARA MUNICÍPIO DE VARGINHA/MG. 2018.

OLIVEIRA, L. M., MONTENEGRO, S. M. G. L., SILVA, B. B., & MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 16-28, 2015.

ONDOÑO, S., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. J., & MORENO, J. L. The composition and depth of green roof substrates affect the growth of *Silene vulgaris* and *Lagurus ovatus* species and the C and N sequestration under two irrigation conditions. **Journal of environmental management**, 166, 330-340. 2016.

OULDBOUKHITINE, S. E., BELARBI, R., JAFFAL, I., & TRABELSI, A. Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. **Building and environment**, 46(12), 2624-2631. 2011.

PAGNOSSIN, E. M., BURIOL, G. A., & DE ARAUJO GRACIOLLI, M. Influência dos elementos meteorológicos no conforto térmico humano: bases biofísicas. **Disciplinarum Scientia| Saúde**, v. 2, n. 1, p. 149-161, 2016.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Mudanças Climáticas e Cidades. **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.). PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p., 2016.

PARTRIDGE, D. R., & CLARK, J. A. Urban green roofs provide habitat for migrating and breeding birds and their arthropod prey. **PloS one**, v. 13, n. 8, 2018.

PENDIUK, F., MOISÉS, I. C., & PEREIRA, M. P. Telhado verde: a evolução da tecnologia e suas funcionalidades. **Revista eletrônica dos cursos de engenharia**. v.1, n.3, 2017.

PEREIRA, J. A. D. S., & JUNIOR, J. R. T. Classificação supervisionada e saldo de radiação para discriminação de alvos de superfície no entorno do reservatório de Itaparica-PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, 2017.

PEREIRA, O. A., DANELICHEN, V. H. M., NOGUEIRA, J. S., MUSIS, C. R., PINTO JUNIOR, O. B., VOURLITIS, G. Study of CO² Flow and Energy Balance in a Transition Forest in Southwestern Amazonia by the Modified Bowen Ratio Methods and Eddy Covariance. **Australian Journal Of Basic And Applied Sciences**, v. 13, p. 12-18, 2019.

PÉREZ, G. & COMA, J., Green Roofs Classifications, Plant Species, Substrates. **Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability**. **Butterworth-Heinemann**. p. 65-74. 2018.

PÉREZ, G., COMA, J., BARRENECHE, C., DE GRACIA, A., URRESTARAZU, M., BURÉS, S., & CABEZA, L. F. Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings. **Applied Acoustics**. 110, 218-226. 2016.

POMPEU, F. S. S., DE MIRANDA, E. P., DE OLIVEIRA, F. É. R., MARTINS, G. S., & MACIEL, W. M. Ensaio comparativo entre envoltórios de drenos tubulares na drenagem agrícola. **Magistra**, v. 28, n. 1, p. 29-35, 2017.

RAANAAS, R. K., PATIL, G., & ALVE, G. Patients' recovery experiences of indoor plants and viewsof nature. A Rehabilitation Center. **Work**, v. 53, n. 1, p. 45-55, 2016.

RAZZAGHMANESH, M., BEECHAM, S., & SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 15, p. 89-102, 2016.

REBOLLAR, N., MELLO, E., OLIVEIRA, G., & REBOLLAR, P. Telhados Verdes: uma abordagem multidisciplinar. **Editora Ledix. Florianópolis**, 144p, 2017.

RECIFE. PREFEITURA MUNICIPAL. (2015, 13 de janeiro). Lei nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do “telhado verde”, e construção de

reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife: Prefeitura Municipal. Recuperado em 7 de maio de 2019, de [http:// leismunicipa.is/cjeuk](http://leismunicipa.is/cjeuk).

REFAHI, A. H., & TALKHABI, H. Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. **Renewable Energy**, v. 80, p. 595-603, 2015.

RIBEIRO, L. A. C. Considerações do humano e do ambiental no contexto antropocêntrico moderno. **Dignidade Revista**, v. 3, n. 5, p. 86-95, 2018.

ROSATO, P., VALCOVICH, E., STIVAL, C. A., BERTO, R., & CECHET, G. Horizontal extensive green roofs. **Existing buildings**. Part Two-Economic features. 3-24. 2016.

ROSENZWEIG, M. L. Green roofs: new ecosystems to defend species diversity. **Israel Journal of Ecology & Evolution**, v. 62, n. 1-2, p. 7-14, 2016.

RUPP, R. F., DE VECCHI, R., ASMUS, B. F., CANDIDO, C., & GHISI, E. Conforto térmico humano em escritórios com sistema central de condicionamento artificial em clima subtropical úmido: estudos de campo vs. abordagem analítica. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 111-123, 2017.

RYU, Y., JIANG, C., KOBAYASHI, H., & DETTO, M. MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 812-825, 2018.

SAILOR, D. J.; HUTCHINSON, D. & BOKOVOY, L. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western US. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1246-1251, 2008.

SANTAMOURIS, M., & KOLOKOTSA, D. **Urban climate mitigation techniques**. Routledge, 2016.

SANTANA, N. C. Investigação de Ilhas de Calor em Brasília: Análise Multitemporal com Enfoque na Cobertura do Solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, p. 1044, 2014.

SANTOS, F. A. C.; SANTOS, C. A. C. ; ARAUJO, A. L. ; BRAGA, A. C. Alterações no Balanço Radiativo em Áreas de Pastagem e Floresta Obtidas por meio de Imagens Orbitais MODIS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 1023, 2013.

SANTOS, T. O. D., MOURA, G. B. D. A., SILVA, B. B. D., DE OLIVEIRA, L. M., & MACHADO, C. C. Influence of urbanization on land surface temperature in Recife city. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1234-1244, 2013.

SCHINDLER, B. Y., BLAUSTEIN, L., VASL, A., KADAS, G. J., & SEIFAN, M. Cooling effect of Sedum sediforme and annual plants on green roofs in a Mediterranean climate. **Urban Forestry & Urban Greening**, 38, 392-396. 2019.

SETTA, B. R. S. Telhados Verdes Como Políticas Públicas Ambientais Para O Município De Volta Redonda–RJ. **Revista LABVERDE**, 8(1), 13-35. 2017.

SFAKIANAKI, A., PAGALOU, E., PAVLOU, K., SANTAMOURIS, M. & ASSIMAKOPOULOS, M. N. Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece. **International Journal of Energy Research**, 33(12), 1059-1069. 2009.

SHAFIQUE, MUHAMMAD; KIM, REEHO; RAFIQ, MUHAMMAD. Green roof benefits, opportunities and challenges - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 757-773, 2018.

SHAN, V. L. X. S., NETO, P. D. S. G., CALCADO, G. C. D. S. C., DA MOTTA, A. L. T. S., & VAZQUEZ, E. G. Telhados verdes como proposta de jardim terapêutico em unidades hospitalares/Green roofs as a therapeutic garden proposal in hospital units. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 16513-16532, 2019.

SHI, L., KLOOG, I., ZANOBETTI, A., LIU, P., & SCHWARTZ, J. D. Impacts of temperature and its variability on mortality in New England. **Nature climate change**, v. 5, n. 11, p. 988, 2015.

SILVA FILHO, A. DA; BUIDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, C. A. S.; ALMEIDA JÚNIOR, E. S. Estimativa do Balanço de Energia pelo Método da Razão de Bowen a Partir de Medidas de Protótipo de Estação Micrometeorológica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 134-150, 2019.

SILVA, B. B. D., MERCANTE, E., BOAS, M. A. V., WRUBLACK, S. C., & OLDONI, L. V. Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 2, p. 221-227, 2018.

SILVA, V. L. A., & KASHIWA, L. Sustentabilidade e conforto a aplicação do telhado verde como solução sustentável. **MIX Sustentável**, v. 4, n. 1, p. 117-122, 2018.

SOARES, W. A., ANTONINO, A. C. D., LIMA, J. R. S., & HAMMECKER, C. Modelagem da Evapotranspiração e do Fluxo de Água em um Solo Cultivado com Feijão Caupi. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 2, p. 115-124, 2017.

SOLCEROVA, A., VAN DE VEN, F., WANG, M., RIJSDIJK, M., & VAN DE GIESEN, N. Do green roofs cool the air? **Building and Environment**, 111, 249-255. 2017.

STAHLHÖFER, I. S., & PEREIRA, M. F. B. Políticas públicas de implementação de coberturas verdes: o projeto de lei nº 115/2009 da câmara de vereadores de São Paulo. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, v. 8, p. 386-398, 2013.

SUSCA, T. Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. **Building and Environment**, p. 106273, 2019.

TABARES-VELASCO, P. C., & SREBRIC, J. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. **Building and Environment**, v. 49, p. 310-323, 2012.

TASSI, R., DA SILVA TASSINARI, L. C., PICCILLI, D. G. A., & PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 139-154, 2014.

TASSICKER, N., RAHNAMAYIEZEKAVAT, P., & SUTRISNA, M. An insight into the commercial viability of green roofs in Australia. **Sustainability**, v. 8, n. 7, p. 603, 2016.

TRINDADE, P. M. P., SALDANHA, D. L., & PEREIRA FILHO, W. Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, 2017.

VERA, S., PINTO, C., TABARES-VELASCO, P. C., MOLINA, G., FLAMANT, G., BUSTAMANTE, W. & KINCAID, N. Analysis and comparison of two vegetative roof heat and mass transfer models in three different climates. **Energy and Buildings**, 202, 109367. 2019.

WAI, K. M., WANG, X. M., LIN, T. H., WONG, M. S., ZENG, S. K., HE, N., ... & WANG, D. H. Observational evidence of a long-term increase in precipitation due to urbanization effects and its implications for sustainable urban living. **Science of the total environment**, 599, 647-654, 2017.

WANG, X., TIAN, Y., & ZHAO, X. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. **Science of the Total Environment**, 592, 465-476. 2017a.

WANG, H., QIN, J., & HU, Y. Are green roofs a source or sink of runoff pollutants? **Ecological Engineering**, 107, 65-70. 2017b.

WATERFORD, D. **21st Century Homestead: Urban Agriculture**. Lulu. com, 2015.

WIE, J., HONG, S. O., BYON, J. Y., HA, J. C., & MOON, B. K. Sensitivity Analysis of Surface Energy Budget to Albedo Parameters in Seoul Metropolitan Area Using the Unified Model. **Atmosphere**, v. 11, n. 1, p. 120, 2020.

WILLIAM, R., GOODWELL, A., RICHARDSON, M., LE, P. V., KUMAR, P., & STILLWELL, A. S. An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. **Ecological engineering**, v. 95, p. 1-9, 2016.

WONG, E., HOGAN, K., ROSENBERG, J., & DENNY, A. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics. **Climate Protection**

Partnership Division in the US Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, 2016.

WONG, N. H., CHEN, Y., ONG, C. L., & SIA, A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and environment**, 38(2), 261-270 2013.

YAGHOUBIAN, N., & SREBRIC, J. Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 103, p. 1-13, 2015.

ZANCHETI, S. M., & HIDAKA, L. T. F. O monitoramento da gestão da conservação urbana. **Textos para discussão**, v. 56, 2014.

ZAREMBA, G. J., TRAVER, R. G., & WADZUK, B. M. Impact of drainage on green roof evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 142(7), 2016.

ZHANG, Q., MIAO, L., WANG, X., LIU, D., ZHU, L., ZHOU, B. & LIU, J. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. **Landscape and Urban Planning**, v. 144, p. 142-150, 2015.

ZHANG, Z., SZOTA, C., FLETCHER, T. D., WILLIAMS, N. S., WERDIN, J., & FARRELL, C. Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention. **Science of The Total Environment**, v. 625, p. 775-781, 2018a.

ZHANG, W., VILLARINI, G., VECCHI, G. A., & SMITH, J. A. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston. **Nature**, v. 563, n. 7731, p. 384-388, 2018.

ZIOGOU, I., MICHPOULOS, A., VOULGARI, V., & ZACHARIADIS, T. Implementation of green roof technology in residential buildings and neighborhoods of Cyprus. **Sustainable cities and society**, v. 40, p. 233-243, 2018.

ZIRKELBACH, D., MEHRA, S. R., SEDLBAUER, K. P., KÜNZEL, H. M., & STÖCKL, B. A hygrothermal green roof model to simulate moisture and energy performance of building components. **Energy and Buildings**, 145, 79-91. 2017.

CAPÍTULO II

VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE PREDIÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE

RESUMO:

Objetivou-se com este estudo validar um modelo de desempenho térmico de telhado verde, obtido pelo estabelecimento do balanço de energia e ajustado pela determinação da evapotranspiração de referência, comparando a dados reais proveniente da instalação predial. O estudo consistiu na validação do modelo proposto por Da Silva Omar et al. (2018) a partir de dados meteorológicos registrados em um telhado verde extensivo, sobre o edifício garagem do empresarial Charles Darwin, Rio Ave Empreendimentos, Recife-PE, no período de maio de 2017 a maio de 2019. Para o monitoramento meteorológico foi utilizada uma plataforma automática de registro de dados na laje externa do edifício, para o registro da radiação solar global (Q_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), do saldo de radiação (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), do albedo (α), da precipitação (PREC, mm), da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e da umidade relativa do ar (%), obtidos em dois níveis acima da superfície (0,20 e 1,60 m). Para validação do modelo de simulação foi realizado a relação funcional do fluxo de calor no solo (G , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), do fluxo de calor sensível (H , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), do saldo de radiação (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), do fluxo de calor latente (LE , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e da razão de Bowen, real e simulada. A verificação do desempenho do modelo foi por meio dos índices de Willmott, índice "C", percentual de tendência bias (BIAS), da razão entre o RMSE, do desvio padrão das observações (RSR) e de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). O coeficiente de determinação foi elevado para todas variáveis analisadas, saldo de radiação ($R^2=0,997$), fluxo de calor no solo ($R^2=0,997$), fluxo de calor latente ($R^2=0,994$), fluxo de calor sensível ($R^2=0,947$) e razão de Bowen ($R^2=0,713$). Os índices de classificação e desempenho tiveram resultados classificados como ótimos, indicando que o modelo de simulação térmico do telhado verde prevê adequadamente os fluxos de energia no ambiente em estudo.

Palavras-chave: coberturas verdes, evapotranspiração de referência, saldo de radiação, isolamento térmico.

VALIDATION OF THE PREDICTION MODEL OF THE GREEN ROOF ENERGY BALANCE

ABSTRACT:

The objective of this study was to validate a green roof thermal performance model, obtained by establishing the energy balance and adjusted by the determination of the reference evapotranspiration, comparing the actual data from the building installation. The study consisted of the validation of the model proposed by Da Silva Omar et al. (2018) from meteorological data recorded on an extensive green roof, on the garage building of the business Charles Darwin, Rio Ave Empreendimentos, Recife-PE, from May 2017 to May 2019. For meteorological monitoring, an automatic data recording platform was used in the external slab of the building, for the recording of global solar radiation (Q_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), radiation balance (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), albedo (α), precipitation (PREC, mm), air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and relative humidity (%), obtained at two levels above the surface (0.20 and 1.60 m). For validation of the simulation model, the functional relationship of soil heat flux (G , $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), sensitive heat flux (H , $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), radiation balance (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), latent heat flux (LE , $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and Bowen ratio, real and simulated, was performed. The performance of the model was verified by means of the Willmott indexes, index "C", bias trend percentage (BIAS), the ratio between the RMSE, the standard deviation of the observations (RSR) and the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). The coefficient of determination was high for all variables analyzed, radiation balance ($R^2=0.997$), soil heat flux ($R^2=0.997$), latent heat flux ($R^2=0.994$), sensitive heat flux ($R^2=0.947$) and Bowen ratio ($R^2=0.713$). The classification and performance indexes had results classified as optimal, indicating that the green roof thermal simulation model adequately predicts energy flows in the study environment.

Keywords: green toppings, reference evapotranspiration, net radiation, thermal insulation.

INTRODUÇÃO

Com a crescente urbanização, áreas verdes foram suprimidas e muitas superfícies naturais impermeabilizadas para dar suporte a infraestrutura das cidades, como consequência, verifica-se a ampliação de ilhas de calor, aumento na ocorrência de enchentes, intensificação dos efeitos da poluição urbana e aumento no consumo de energia elétrica. A substituição da cobertura natural altera o balanço de energia, devido às diferentes propriedades térmicas dos materiais empregados, prejudicando o conforto e modificando a qualidade de vida da população (YAGHOUBIAN e SREBRIC 2015; PENDIUK et al., 2017).

O fenômeno ilhas de calor afeta inúmeras cidades pelo mundo, alguns autores indicam que Recife já apresenta esse fenômeno (NÓBREGA, SANTOS & MOREIRA, 2016; DE LIMA MENDES et al., 2019). Como alternativa, transformar superfícies de telhados em áreas verdes torna-se uma escolha sustentável (DE OLIVEIRA et al., 2017), tanto para minimização do consumo energético como na atenuação das ilhas de calor, economia de água, aumento da biodiversidade e minimização de poluentes urbanos (RAZZAGHMANESH et al., 2014; FOUSTALIERAKI et al., 2017).

O telhado verde é um sistema construtivo que consiste na utilização de uma cobertura vegetal instalada em laje ou sobre telhados inclinados. Os efeitos da camada de solo e da vegetação são complexos e difíceis de manipular, no entanto, com a crescente importância dos telhados verdes na última década, muitos modelos de cálculo vêm sendo desenvolvidos (TABARES-VELASCO et al., 2012; ZIRKELBACH et al., 2017).

Na cidade do Recife, estado de Pernambuco, a Lei Nº 18.112/2015, regulamenta sobre a obrigatoriedade do emprego do telhado verde, respaldada na melhoria da qualidade ambiental das edificações. Após a sanção da lei, todos os projetos de edificações multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400 m² de área, devem prever a implantação de telhado verde como condição para aprovação de projetos construtivos (RECIFE, 2015).

Os benefícios dos telhados verdes são inquestionáveis do ponto de vista térmico, pois, o maior benefício é a redução da radiação solar incidente nas lajes (REFAHI e TALKHABI, 2015). O telhado com vegetação apresenta proteção extra a superfície de cobertura, devido a estratificação promovida pela sua implantação,

que pode reduzir a carga térmica aplicada a edifícios, pois, a vegetação e o substrato atenuam a transmissão de calor, transformam parte da energia incidente e protegem a cobertura contra a ação dos raios ultravioletas e extremos de temperatura.

A modelagem em telhados verdes é uma abordagem recente, com estudos desenvolvidos principalmente a partir da segunda metade da década de 2000, porém, ainda não se tem registro da validação desses modelos para condições tropicais com dados experimentais, incluindo dados meteorológicos. Os modelos existentes se concentram no índice de área foliar para descrever a quantidade de sombreamento, variáveis ambientais, efeitos da radiação e trocas de calor são desconsideradas (OULDBOUKHITINE et al., 2011).

Quando não são encontrados na literatura dados para uma determinada região, a solução é monitorar a estrutura e calibrar parâmetros preditores, almejando avaliar o desempenho, além disso, a modelagem possibilita analisar a eficiência dos telhados verde em diferentes escalas espaciais (VIOLA, HELLIES e DEIDDA 2017).

No desenvolvimento de novos modelos a validação é uma etapa importante para garantir a confiabilidade do mesmo. No entanto, a validação do modelo para um telhado verde específico (tipo e profundidade do substrato, vegetação) associado ao clima da região, não pode garantir o desempenho do modelo em diferentes condições do qual foi modelado (VERA et al., 2018).

Nesse contexto, objetivou-se com este estudo validar um modelo de desempenho térmico de telhado verde, obtido pelo estabelecimento do balanço de energia e ajustado pela determinação da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos reais do monitoramento na instalação predial.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida a partir do registro dos dados meteorológicos na superfície externa de um telhado verde sobre o Edifício Garagem do Empresarial Charles Darwin, Rio Ave Empreendimentos, situado em Recife, região da Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil, (8° 04' 03" S e 34° 55' 00" O e altitude média 4 m).

O clima da região é do tipo As', tropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen (PEREIRA et al., 2002). A temperatura média anual é de 25,91 °C, com máxima de 27,27 °C e mínima de 24,10 °C. A média da precipitação acumulada anual é de 2263,40 mm (CLIMATEMPO, 2019; INMET, 2019).

A estratificação do telhado verde consistiu em uma camada de grama da espécie *Zoysia japonica*, uma camada de substrato de 7,5 cm, uma manta geotêxtil para drenagem (1 mm), uma camada de 2,5 cm de espessura composta por agregados provenientes de reciclados de concreto obtidos na construção do edifício, outra camada de manta geotêxtil de drenagem, impermeabilização de manta asfáltica (1,2 mm) e laje de concreto armado (12 cm). Para irrigação do telhado verde foi utilizado um sistema de irrigação por aspersão escamoteável em toda área, acionado duas vezes ao dia, aplicando uma lâmina de 4,6 mm por dia.

O substrato utilizado foi a base de lodo de esgoto tratado com densidade de 781,35 kg m⁻³ seco e densidade no nível máximo de retenção de água de 1130 kg m⁻³. A área total do telhado verde era de 2.800 m². A visualização da cobertura antes e após a instalação do telhado verde encontra-se na Figura 1.

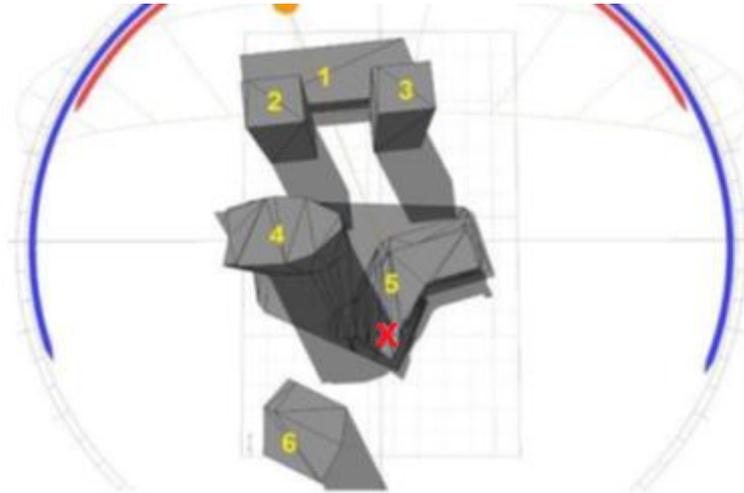


Figura 1 - Antes e após a instalação do telhado verde, Empresarial Charles Darwin, Rio Ave Empreendimentos. Fonte: Arquivo pessoal, 2020.

Para a campanha de monitoramento foi utilizada uma plataforma automática de registro de dados meteorológicos CAMPBELL® SCIENTIFIC modelo CR800, instalada na laje externa do edifício, equipada com sensores de Radiação solar global (Q_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), saldo de radiação (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), albedo (α), precipitação (PREC, mm), velocidade dos ventos (V_v , m s^{-1}) e pressão atmosférica (P_{atm} , kPa).

A temperatura (T_{ar} , °C) e umidade relativa do ar (UR, %) foram obtidas em dois níveis acima da superfície (0,20 m e 1,60 m). Os dados foram aferidos a cada segundo e registrados em intervalos de 10 em 10 min. A série de dados utilizados compreendeu o período de maio de 2017 a maio de 2019.

O telhado verde do edifício garagem se encontra em cota inferior as construções do entorno, por isso em uma parte do tempo as mesmas fazem sombra sobre a estação meteorológica, no entanto, para que a estação ficasse o maior tempo possível exposta à radiação solar e a sombra não interferisse na qualidade dos dados registrados, foi necessário realizar uma avaliação da sombra ao longo ano. O estudo de sombra do cenário proposto foi realizado por meio de simulações computacionais nos horários das 12h00min, 15h00min e 17h00min, em 3 dias de cada mês, nos 12 meses do ano, o que gerou 36 imagens e indicou a localização ideal para instalação da estação meteorológica (Figura 2).



- | | |
|--|--|
| 1. Edf. Garagem do Isaac Newton e Alfred Nobel | 5. Edf. Garagem do Charles Darwin |
| 2. Isaac Newton | 6. Futuras instalações do Charles Darwin |
| 3. Alfred Nobel | X. Localização da estação meteorológica |
| 4. Charles Darwin | |

Figura 2 - Estudo da sombra no empresarial Charles Darwin para identificação da melhor localização da estação metrológica. Fonte: Rio Ave Empreendimentos.

De posse dos dados foi realizado a determinação do balanço de energia no telhado verde (Real) obtida em função dos elementos meteorológicos registrados pela estação (R_n , VV , U_R , T_{ar}). Para cálculo do balanço de energia foi utilizada a Equação 1, que se trata da soma do fluxo de calor latente (LE), sensível (H) e do solo (G). Para os valores do fluxo de calor no solo (G , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) foi considerado 3% do valor do saldo de radiação (R_n) utilizando a recomendação de Pereira et al. (2002).

$$R_n - H - LE - G = 0 \quad (1)$$

Em que,

R_n = saldo de radiação ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)

H = fluxo de calor sensível ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)

LE = fluxo de calor latente ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)

Para determinação do LE , a simulação da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith (ET_o) foi considerada como curva característica

da dissipação de calor latente, dessa forma, considerou-se ETo igual a LE, obtido em função dos elementos meteorológicos: Rn, G, Tar, VV, UR e α .

A evapotranspiração de referência (ETo, mm) foi calculada por meio do modelo Penman-Monteith (FAO 56), conforme a Equação 2.

$$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T_{ar} + 273} vv (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 vv)} \quad (2)$$

Em que,

Eto = evapotranspiração de referência (mm)

Rn = saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹)

G = fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹)

Tar = temperatura média diária do ar (°C)

vv = velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s⁻¹)

es = pressão de saturação do vapor média diária (kPa)

ea = pressão atual de vapor média diária (kPa)

Δ = declividade da curva de pressão de vapor no ponto correspondente a temperatura (kPa °C⁻¹)

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

A pressão de vapor de água saturada de ar (es, kPa) foi calculada de acordo com a Equação 3.

$$es = 0,6108 * 10^{\left(\frac{7,5t_{ar}}{237,3 + t_{ar}}\right)} \quad (3)$$

Em que,

es = pressão de vapor d'água saturada de ar (kPa)

Tar = temperatura do ar (°C)

A pressão de ar de vapor de água (ea, kPa) foi calculada de acordo com a Equação 4.

$$ea = (es \times UR) / 100 \quad (4)$$

Em que,

e_a = pressão de ar de vapor de água (kPa)

e_s = pressão de vapor d'água saturada de ar (kPa)

UR = a umidade relativa do ar (%)

A declividade da curva de pressão de vapor (Δ , kPa °C⁻¹) foi obtida em função das Equações 5 e 6, e a constante psicrométrica (Y , kPa °C⁻¹), de acordo com a Equação 7.

$$\Delta = \left(\frac{40,98 \times e_s}{237 + T} \right)^2 \quad (5)$$

$$T = \frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} \quad (6)$$

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{\text{atm}} \quad (7)$$

Em que,

Δ = declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹)

e_s = pressão de saturação do vapor média diária (kPa)

Y = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

T_{\max} = temperatura do ar máxima (°C)

T_{\min} = temperatura do ar mínima (°C)

P_{atm} = pressão atmosférica (kPa)

O valor do calor sensível (H) foi obtido em função da Equação 8, que leva em consideração o saldo de radiação, o fluxo de calor latente e o fluxo de calor no solo.

$$H = R_n - LE - G \quad (8)$$

Em que,

H = fluxo de calor sensível (MJ m⁻² dia⁻¹)

R_n = saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹)

LE = fluxo de calor latente (MJ m⁻² dia⁻¹)

G = fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹)

Calculou-se também o balanço de energia por meio do método da razão de Bowen (β) (Equação 9), que consiste na relação entre os fluxos de calor sensível (H , MJ m⁻² dia⁻¹) e latente (LE , MJ m⁻² dia⁻¹).

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (9)$$

A fim de comparar o balanço de energia (Real) obtido com os dados da estação meteorológica, foi então simulado o balanço de energia conforme Da Silva Omar et al. (2018) para o mesmo período, conforme descrito a seguir.

O saldo de radiação (R_n) foi calculado pela Equação 10.

$$R_n = BOC + BOL \quad (10)$$

Em que,

R_n = saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹)

BOC = balanço de ondas curtas (MJ m⁻² dia⁻¹)

BOL = balanço de ondas longas (MJ m⁻² dia⁻¹)

O balanço de ondas curtas (BOC) foi calculado pela Equação 11.

$$BOC = Q_g (1 - r) \quad (11)$$

Em que,

BOC = balanço de ondas curtas (MJ m⁻² dia⁻¹)

Q_g = radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹)

r = albedo da grama

O balanço de ondas longas (BOL) foi calculado pela Equação 12.

$$BOL = - [4,903 \times 10^{-9} \times T^4 \times (0,56 - 0,25 \sqrt{ea}) \times (0,1 + 0,9 n/N) \quad (12)$$

Em que,

BOL = balanço de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

T = temperatura média diária do ar (K)

ea = pressão atual de vapor média diária (kPa)

n = insolação (h)

N = fotoperíodo (h)

A pressão do ar de vapor d'água (ea, kPa) foi calculada de acordo com a Equação 4 e pressão de vapor de água saturada de ar (es, kPa) foi calculada de acordo com a Equação 3. O fotoperíodo (N) foi calculado a partir da Equação 13.

$$N = 0,134 \times hn \quad (13)$$

Em que,

N = fotoperíodo (h)

hn = ângulo horário ($^{\circ}$)

E ângulo horário (hn) foi calculado em função da declinação solar (δ), como mostra as Equações 14 e 15.

$$hn = \arcsin[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \quad (14)$$

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (NDA - 80) \right] \quad (15)$$

Em que,

hn = ângulo horário do nascer do sol ($^{\circ}$)

ϕ = latitude ($^{\circ}$)

δ = declinação solar ($^{\circ}$)

NDA = número de dia do ano

As comparações entre o modelo de simulação e os dados reais do fluxo de calor no solo (G , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fluxo de calor sensível (H , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), saldo de radiação (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fluxo de calor latente (LE , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e da razão de Bowen, foram obtidas por meio dos coeficientes de determinação (R^2) e angulares dos modelos de regressão linear, sendo as retas forçadas a passar pela origem, foi

realizado também o cálculo do coeficiente de Pearson, r ($p < 0,05$) para obtenção do grau da correlação e a direção da correlação, se positiva ou negativa entre duas variáveis de escala métrica (-1 a 1).

Foram empregados os índices de exatidão e desempenho a partir das correlações entre os valores medidos e estimados, índice de Willmott “d” e de confiança ou desempenho “C”. A exatidão relaciona-se ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, é dada estatisticamente pelo índice de concordância “d” proposto por Willmott et al. (1985). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice é dado pela Equação 19.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (19)$$

Em que,

P_i = valor estimado

O_i = valor observado

O = média dos valores observados

O índice de desempenho “C” avaliou a concordância dos diferentes métodos de estimativa. Este índice reúne os índices de precisão dado pelo coeficiente de correlação (r), que indica o grau de dispersão dos dados, obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório e o de concordância “d”. O índice “c” é calculado conforme Equação 20.

$$c = r \times d \quad (20)$$

Camargo & Sentelhas (1997) propuseram um critério para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice “C”, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do desempenho da simulação pelo índice “C”

Valores de c	Desempenho
--------------	------------

>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤0,40	Péssimo

Fonte: Camargo & Sentelhas (1997)

Para consolidar a validação dos resultados, optou-se também por fazer análises dos coeficientes empregados como critério de ajuste, por meio do percentual de tendência bias (BIAS), da razão entre o RMSE, do desvio padrão das observações (RSR) e de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE).

O índice de Nash, trata-se de estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual, quando comparado com a variação dos dados de medição. Os valores representam o ajuste dos dados simulados aos observados, podendo variar de $-\infty$ a 1 (CIPOLLA, MAGLIONICO & STOJKOV, 2016).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Nobs - Ncalc)^2}{\sum(Nobs - Ncalc,med)^2} \quad (21)$$

Em que,

Nobs = número observado

Ncalc = número calculado

Ncalc,med = média do número calculado

O índice BIAS (Equação 22) é a medida percentual da tendência dos valores simulados serem maiores ou menores que os observados, onde são indicadas boas simulações quando os valores são próximos de zero (ZENG et al., 2017).

$$BIAS = \frac{\sum(Ncalc - Nobs) * 100}{\sum Nobs} \quad (22)$$

Em que,

Ncalc = número calculado

Nobs = número observado

O coeficiente RSR (Equação 23) é a normalização da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) por meio da divisão pelo desvio padrão dos valores observados, tornando o coeficiente adimensional e permitindo que seja usado mais facilmente para comparar os resultados das simulações (SKALA et al., 2020).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum(Nobs-Ncalc)^2}}{\sqrt{\sum(Nobs-Ncalc,med)^2}} \quad (23)$$

Em que,

Nobs = número observado

Ncalc = número calculado

Ncalc,med = média do número calculado

A relação de valores classificados como muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório para os coeficientes NSE, BIAS e RSR utilizados na calibração é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das simulações

Classificação	NSE	BIAS	RSR
Muito Boa	0,75 a 1,00	< ± 10	0,00 ≤ RSR ≤ 0,50
Boa	0,65 a 0,75	± 10 < BIAS < ± 15	0,50 < RSR ≤ 0,60
Satisfatória	0,50 a 0,65	± 15 < BIAS < ± 25	0,60 < RSR ≤ 0,70
Insatisfatória	< 0,50	BIAS > ± 25	RSR > 0,70

Fonte: Adaptado de Moriasi et al., 2007.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 verifica-se a identificação de anos atípicos ou não, quando comparado com as normais climatológicas de 1981-2010 (INMET, 2019), por meio das médias mensais e anuais da temperatura média do ar (Tar), radiação solar global (Rn), precipitação pluviométrica acumulada (PREC), e da umidade relativa do ar (UR).

A temperatura média do ar (Tar) apresentou baixa variação em relação a normal climatológica. O mês com menor valor de temperatura tanto para a normal climatológica, como para os anos analisados foi junho (24,10 e 23,89 °C), entretanto, a temperatura média do mês com maior valor na normal climatológica foi março (27,27 °C), já nos anos estudados esse valor foi observado no mês de dezembro (27,39 °C). A variação média anual da temperatura foi de 0,1 °C, o que representa 0,37% de variação, percentual considerado baixo (CAPUCHINHO et al., 2019).

A radiação solar global no período estudado variou de 24,32 a 10,93 MJ m⁻² d⁻¹, enquanto que para a normal climatológica essa variação foi de 23,00 a 14,50 MJ m⁻² d⁻¹. Os meses com menor valor de Rn foram junho e julho, isso porque são os meses de maior precipitação na região (DE ALBUQUERQUE WANDERLEY et al., 2018), a média do ano para a normal foi de 19,50 MJ m⁻² d⁻¹, já a média anual de Rn para o período estudado foi de 17,73 MJ m⁻² d⁻¹, diferença de 1,77 MJ m⁻² d⁻¹ entre a normal climatológica e o período de estudo, variação de 9,07%.

A precipitação acumulada anual no período do estudo foi de 2049,55 mm e a normal climatológica indica valor da ordem de 2263,40 mm, apresentando diferença de 213,85 mm, que corresponde a variação de 9,44%. Na normal climatológica o mês com maior ocorrência de precipitação foi junho, porém, no período de estudo o mês observado foi abril (387,20 mm), padrão encontrado nos últimos anos. O mês com menor valor de precipitação tanto no período de estudo (26,30 mm) quanto na normal (38,70 mm) foi novembro.

Os meses de estudo com o registro da maior umidade relativa do ar foram abril (85,76%) e junho (85,10%), isso ocorreu devido a maior precipitação nesses dois meses, já os menores valores foram observados em novembro (71,35%) e dezembro (72,23%). A média da umidade relativa do ar no período de estudo foi

79,08 e 78,30% para a normal climatológica, perfazendo diferença de 0,78, o que resulta em uma diferença de 0,99% em relação ao período.

Ao comparar as variáveis meteorológicas registradas durante a pesquisa com a normal climatológica observou-se que houve um baixo desvio climático em relação a normal, classificando assim como um período típico, portanto, sem influência direta no desempenho do modelo de simulação.

Tabela 3 - Variação média mensal da radiação solar global (Qg), temperatura média do ar (Tar), umidade relativa do ar (UR) e acumulado mensal da precipitação pluviométrica (PREC) e normal climatológica (INMET, 2020)

MESES	Tar Normal	Tar	Rn Normal	Rn	Prec Normal	Prec	UR Normal	UR%
	(°C)	(°C)	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
Janeiro	26,9	27,1	22,3	21,0	106,10	147,4	74,4	74,9
Fevereiro	27,1	27,1	21,5	16,3	132,40	131,1	75,1	78,8
Março	27,2	27,2	20,2	17,8	210,60	140,2	77,2	79,5
Abril	26,5	26,2	17,7	15,3	290,50	387,2	81,3	85,7
Maio	25,7	25,7	15,9	15,9	311,80	315,5	83,7	83,0
Junho	24,7	24,7	14,5	14,4	391,10	316,4	84,8	85,1
Julho	24,1	23,8	14,6	10,9	353,70	312,9	84,2	84,2
Agosto	24,2	24,2	18,5	17,3	217,80	105,2	81,3	81,5
Setembro	25,1	25,0	20,5	17,7	100,20	71,3	77,5	78,4
Outubro	25,9	26,2	22,2	18,7	55,20	43,4	74,1	74,0
Novembro	26,6	27,1	23,0	22,6	38,70	26,3	72,7	71,3
Dezembro	26,9	27,3	21,9	24,3	55,30	52,4	73,3	72,2
Ano	25,9	26,0	19,5	17,7	2263,40	2049,5	78,3	79,0

Os valores máximos, médios e mínimos do saldo de radiação (Rn), calor latente (LE), calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G) e da razão de Bowen indicaram que o modelo de simulação subestimou os valores reais (Figura 3).

O valor médio do fluxo de calor no solo real foi 0,43 MJ m⁻² d⁻¹ e do modelo de simulação foi 0,36 MJ m⁻² d⁻¹, diferença de 0,068 MJ m⁻² d⁻¹ o que representa um decréscimo de 15,89%. A diferença do fluxo de calor latente foi de 11,6 MJ m⁻² d⁻¹ real e 10,19 MJ m⁻² d⁻¹ no simulado, apresentando diferença de 1,40 MJ m⁻² d⁻¹, variação de 12,13 %.

Para o fluxo de calor sensível o valor real foi 2,37 MJ m⁻² d⁻¹, enquanto o valor simulado foi 1,56 MJ m⁻² d⁻¹, o que representa diferença de 0,81 MJ m⁻² d⁻¹, com variação de 34,32%. Para a razão de Bowen o valor real encontrado foi de

0,20 MJ m⁻² d⁻¹ e o valor simulado de 0,13 MJ m⁻² d⁻¹, diferença de 0,06 MJ m⁻² d⁻¹, o que resulta em uma variação de 33,4%.

Para o saldo de radiação (Rn) a média no período experimental medida pelo sensor foi de 14,40 MJ m⁻² d⁻¹, já o Rn médio calculado pelo modelo de simulação foi de 12,11 MJ m⁻² d⁻¹, o que representa um decréscimo de 2,28 MJ m⁻² d⁻¹, resultando em uma variação de 15,89 % (Figura 3).

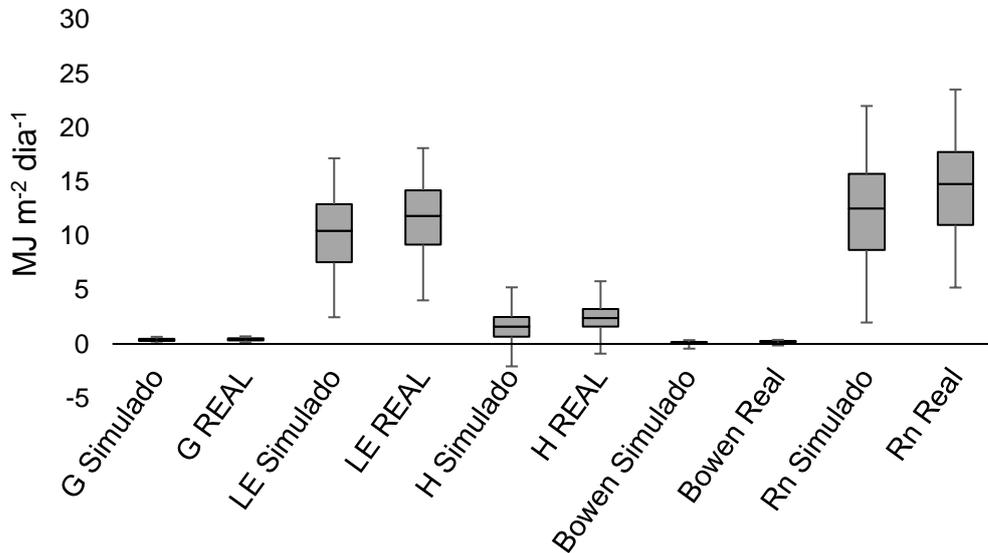


Figura 3 - Saldo de radiação (Rn), calor latente (LE), calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G) e razão de Bowen real e simulada, ao longo do período experimental.

A Figura 4 A, B, C, D e E apresentam a relação funcional entre os dados obtidos (real) e calculados pelo modelo de simulação, do saldo de radiação (Rn), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G) e razão de Bowen.

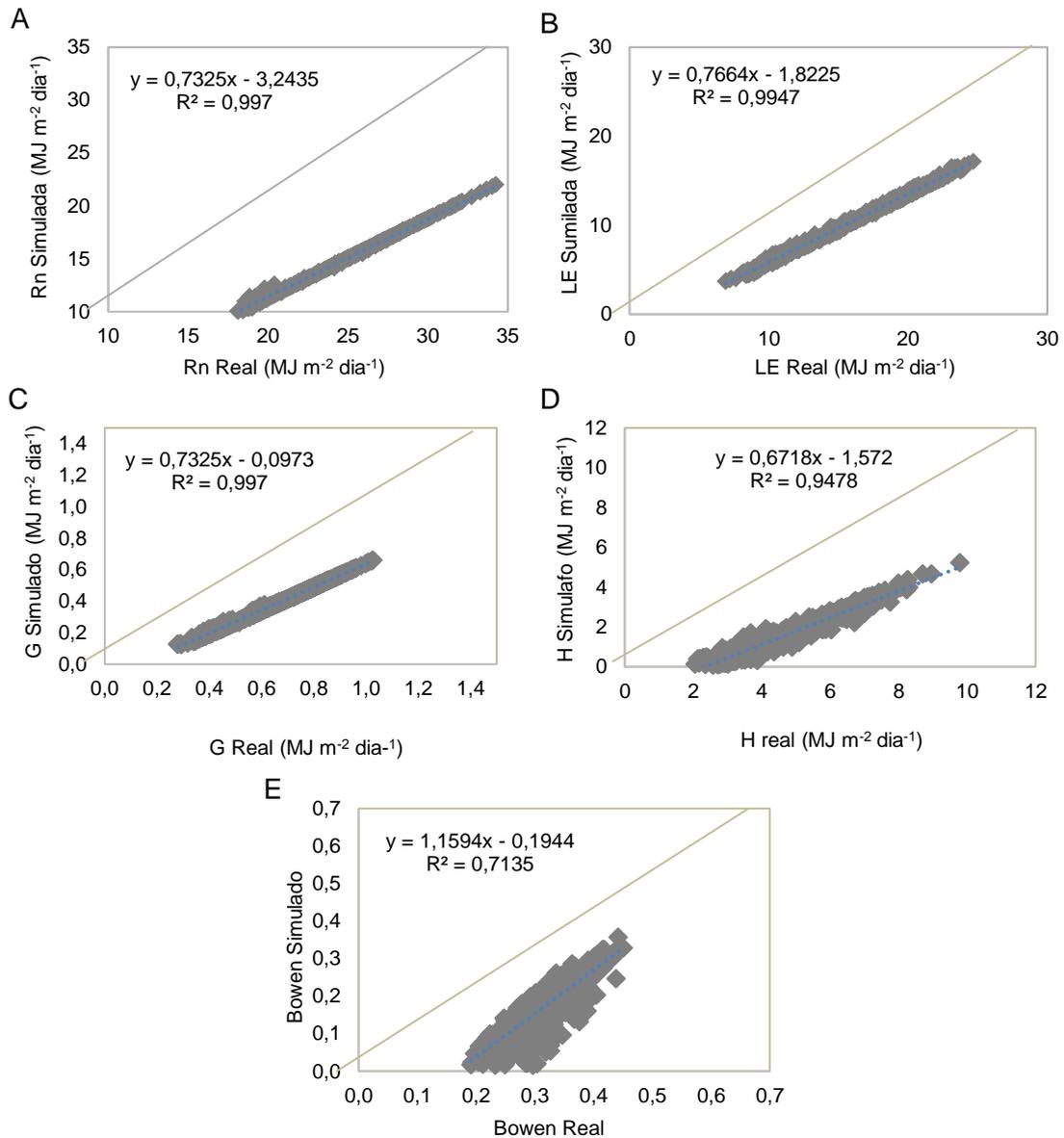


Figura 4 - Relação entre os valores real e simulado do saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível e razão de Bowen.

Nota-se que o coeficiente de determinação foi elevado para o saldo de radiação ($R^2=0,997$), o fluxo de calor no solo ($R^2=0,997$), o fluxo de calor latente ($R^2=0,994$) e o fluxo de calor sensível ($R^2=0,947$) o que indica boa associação linear entre o modelo de simulação e os dados reais (Figura 4).

O coeficiente angular das equações denotam que os valores reais foram superiores aqueles encontrados pelo modelo de simulação, isso se deve ao fato do modelo de simulação ter superestimado os valores de albedo, pois na simulação foi utilizado o albedo padrão da grama de 0,25 (DA SILVA OMAR et al., 2018) enquanto que o albedo médio medido pelo sensor foi de 0,12, tal fato pode ter

ocorrido devido à alta presença de água, pois, o sistema de irrigação no telhado verde era acionado duas vezes ao dia. Segundo Allen et al. (1998) o albedo da grama é 0,23 com uma altura uniforme de 0,12 m em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrição hídrica, porém, segundo Brutsaert (2005) o albedo de um gramado pode variar de 0,15 a 0,25.

Os valores de LE real variaram de 5,47 a 24,70 MJ m⁻² d⁻¹, com valor médio de 15,65 MJ m⁻² d⁻¹, já os valores da simulação apresentaram variação de 2,47 a 17,17 MJ m⁻² d⁻¹, com média de 10,19 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 2 B). Os valores de G real tiveram variação de 0,23 a 1,03 MJ m⁻² d⁻¹, com valor médio de 0,63 MJ m⁻² d⁻¹, já os valores da simulação variaram de 0,06 a 0,66 MJ m⁻² d⁻¹, com valor médio de 0,36 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 2 C). Os valores de H real variaram de 0,11 a 9,80 MJ m⁻² d⁻¹, com valor médio de 4,69 MJ m⁻² d⁻¹ e, da simulação variaram de -2,07 a 5,24 MJ m⁻² d⁻¹, com média de 1,56 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 2 D).

Observa-se na Figura 2 E a razão de Bowen real e o obtido pela simulação, com um coeficiente de determinação inferior aos obtidos nas demais variáveis analisadas, porém, considerado satisfatório ($R^2=0,713$), os valores de Bowen real variaram de 0,01 a 0,45 MJ m⁻² d⁻¹, com valor médio de 0,3 MJ m⁻² d⁻¹, já os valores da simulação variaram de -0,43 a 0,36 MJ m⁻² d⁻¹, com média de 0,13 MJ m⁻² d⁻¹.

Na Tabela 4 nota-se os valores dos coeficientes de correlação de Pearson, de exatidão de Willmontt e o índice de desempenho “C” proposto por Camargo e Sentelhas (1997). Os valores da correlação de Pearson foram muito bons ($R>0,87$) indicando ótima correlação entre o modelo de simulação proposto e os dados reais obtidos. Analisando os valores do índice de exatidão de Willmontt é possível observar baixa dispersão dos dados, pois, os resultados obtidos foram maiores de 0,99.

Segundo a classificação de desempenho Camargo e Sentelhas “C” os resultados de fluxo de calor no solo, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e radiação solar global foram considerados ótimos e a razão de Bowen muito bom.

Tabela 4 - Valores da correlação de Pearson, índice de exatidão de Willmontt e o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas “C” para o saldo de radiação (Rn), calor latente (LE), calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G) e razão de Bowen real e simulada

	G	LE	H	Bowen	Rn
Pearson	0.9987	0.9976	0.9804	0.8744	0.9987
Willmont	0.9995	0.9996	0.9994	0.9993	0.9995
C	0.9982	0.9972	0.9798	0.8737	0.9982

De posse da série total de dados foram calculados os valores médios dos indicadores de tendência bias (BIAS), da razão entre o RMSE, do desvio padrão das observações (RSR) e de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) para os dias do período em estudo.

A Tabela 5 compara os resultados de cada indicador separadamente. Quanto ao NSE verifica-se que para os valores de G, H e Rn a classificação foi muito boa (0,75 a 1,00), já para LE e Bowen os resultados se enquadram em bom (0,65 a 0,75), o que denota bom ajuste entre o balanço de energia real e o estimado pelo modelo de simulação.

CONCLUSÕES

O estudo permitiu a validação do modelo de simulação proposto, sendo que o modelo conseguiu prever adequadamente os fluxos de energia no telhado verde, apresentando alta convergência em todos os índices estatísticos avaliados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, G., LEONARDO, J., & SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.

ATLÂNTICA, SOS Mata. INPE (2014) Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2012-2013. SOS Mata Atlântica, São Paulo Google Scholar, 2014.

CHANG, Ni-Bin; RIVERA, Brian John; WANIELISTA, Martin P. Optimal design for water conservation and energy savings using green roofs in a green building under mixed uncertainties. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 11, p. 1180-1188, 2011.

CIPOLLA, S. S., MAGLIONICO, M., & STOJKOV, I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 876-887, 2016.

DA SILVA OMAR, A. J., VIGODERIS, R. B., PANDORFI, H., DE ALBUQUERQUE MOURA, G. B., & GUISELINI, C. Telhado verde: simulação dos componentes do balanço de energia. *Engenharia Agrícola*, v. 38, n. 3, 2018.

DE OLIVEIRA, Tiago Henrique; DE MENDONÇA PIMENTEL, Rejane Magalhães; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. Vegetation fragment influence over urban climate. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 1, p. 72-86, 2017.

GONÇALVES, Adriana Maldonado. O IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DA CIDADE DE FRANCA A PARTIR DO SÉCULO XIX FRANCA 2017. *Revista Eletrônica de Debates em Economia*, v. 6, n. 1, 2018.

GOUDIE, Andrew S. Human impact on the natural environment. John Wiley & Sons. E. Alexandri, P. Jones, Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: comparison with experimental results, *Build. Environ.* (2007), pp. 2835-2849.[28] S.-E.

FOUSTALIERAKI, M., ASSIMAKOPOULOS, M. N., SANTAMOURIS, M., & PANGALOU, H. Energy performance of a medium scale green roof system installed on a commercial building using numerical and experimental data recorded during the cold period of the year. **Energy and Buildings**, v. 135, p. 33-38, 2017.

KYRIAKODIS, G. E.; SANTAMOURIS, M. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates-results from a large scale urban mitigation project. **Urban Climate**, v. 24, p. 326-339, 2018.

MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., & VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of

accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

OULDBOUKHITINE, S. E., BELARBI, R., JAFFAL, I., & TRABELSI, A. Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. **Building and environment**, 46(12), 2624-2631. (2011).

P.C. TABARES-VELASCO, J. SREBRIC, A heat transfer model for assessment of plantbased roofing systems in summer conditions, **Building and environment**. 49 (2012), pp.310-323.

PENDIUK, FÁBIO; MOISÉS, IZABELA CRISTINA; PEREIRA, MATHEUS PEDRON. Telhado verde: a evolução da tecnologia e suas funcionalidades. Gestão. Tecnologia e Inovação. **Revista Eletrônica dos cursos de engenharia**. Vol.01 n.3, 2017.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

RAZZAGHMANESH, MOSTAFA; BEECHAM, S.; KAZEMI, F. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment. **Science of the Total Environment**, v. 470, p. 651-659, 2014.

RIBEIRO, Laura Alvarenga Costa. Considerações do humano e do ambiental no contexto antropocêntrico moderno. **Dignidade Revista**, v. 3, n. 5, p. 86-95, 2018.

SANTAMOURIS, Mat; KOLOKOTSA, Denia (Ed.). Urban climate mitigation techniques. Routledge, 2016.

SKALA, V., DOHNAL, M., VOTRUBOVA, J., VOGEL, T., DUSEK, J., SACHA, J., & JELINKOVA, V. Hydrological and thermal regime of a thin green roof system evaluated by physically-based model. **Urban Forestry & Urban Greening**, p. 126582, 2020.

TRINDADE, Patricia Michele Pereira; SALDANHA, Dejanira Luderitz; PEREIRA FILHO, Waterloo. Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, 2017.

ZENG, C., BAI, X., SUN, L., ZHANG, Y., & YUAN, Y. Optimal parameters of green roofs in representative cities of four climate zones in China: A simulation study. **Energy and Buildings**, v. 150, p. 118-131, 2017.

CAPUCHINHO, F. F., SIQUEIRA, M. P., CRUZ, G. H. T., DA COSTA SANTOS, L., & DOS REIS, E. F. Coordenadas geográficas e altitude na estimativa da temperatura do ar no estado de goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 13, n. 2, p. 3346-3357, 2019.

DE ALBUQUERQUE WANDERLEY, L. S., NÓBREGA, R. S., MOREIRA, A. B., DOS ANJOS, R. S., & DE ALMEIDA, C. A. P. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

BRUTSAERT, Wilfried et al. Hydrology: an introduction. Cambridge University Press, 2005.

CAPÍTULO III

VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM TELHADO VERDE EXTENSIVO

VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM TELHADO VERDE EXTENSIVO

RESUMO:

Com a crescente demanda por energia elétrica nas edificações, com ênfase na melhoria do conforto térmico de seus ocupantes, torna-se importante encontrar uma maneira de alterar o ambiente a fim de obter soluções que promovam a economia energia. Para tanto, realizou-se essa pesquisa com o objetivo de avaliar a relação custo-benefício do telhado verde em função da redução do consumo de energia elétrica e identificar o ponto de equilíbrio econômico. Foi realizado um levantamento de dados no telhado verde do Edifício Garagem do Empresarial Charles Darwin da construtora Ria Ave, Recife, Pernambuco, onde a série de dados utilizados compreendeu o período de janeiro a dezembro de 2016, antes da instalação do telhado verde e de janeiro a dezembro de 2017, após a instalação do telhado verde. A área total do telhado coberta por vegetação foi de 2.800 m². Para o monitoramento meteorológico foi utilizada uma plataforma automática de registro de dados na laje externa do edifício, equipada com sensores de radiação solar global (Q_g), saldo de radiação (R_n), pluviômetro (PREC; mm), pressão atmosférica (P_{atm}, kPa), temperatura do ar (T_{ar,ext}, °C) e a umidade relativa do ar (UR,ext, %). O outro local de monitoramento foi uma sala constituída por vedação de alvenaria revestida com argamassa, laje com forro de gesso, piso de concreto armado, onde foram registrados os dados de temperatura do ar interna (T_{ar,int}, °C) e umidade relativa do ar interna (UR,int) utilizados para obtenção da carga térmica. Para a análise técnico-econômica foi aplicada a análise de custo, utilizando o indicador Payback (retorno de capital). Para realização dos cálculos da carga térmica total foi definido o dia crítico de maior temperatura interna. O custo para implantação do telhado verde foi de 140,85 reais m². A carga térmica após a instalação do telhado verde teve uma redução de 65,64%, promovendo economia de 13.217,77 reais por mês. O retorno do capital investido se deu em 31 meses. Do ponto de vista energético o telhado verde apresentou relação custo-benefício positiva, pois, após sua instalação ocorreu uma economia mensal de 31.939,07 kWh⁻¹.

Palavras-chave: coberturas verdes, economia de energia, performance térmica, isolamento térmico.

TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY OF IMPLEMENTING AN EXTENSIVE GREEN ROOF IN RECIFE-PE

ABSTRACT:

With the growing demand for electricity in buildings, with an emphasis on improving the thermal comfort of its occupants, it is important to find a way to change the environment in order to obtain solutions that promote energy savings. To this end, this research was carried out with the objective of evaluating the cost-benefit ratio of the green roof as a function of reducing the consumption of electricity and identifying the economic equilibrium point. A data collection was carried out on the green roof of the Charles Darwin Business Garage Building of ria ave construction company, Recife, Pernambuco, where the data series used comprised the period from January to December 2016, before the installation of the green roof and from January to December 2017, after the installation of the green roof. The total area of the roof covered by vegetation was 2,800 m². For meteorological monitoring, an automatic data recording platform was used in the external slab of the building, equipped with global solar radiation (Q_g) sensors, radiation balance (R_n), rain gauge (PREC; mm), atmospheric pressure (P_{atm}, kPa), air temperature (T_{ar,ext}, °C) and relative humidity (UR_{ext}, %). The other monitoring site was a room consisting of sealing masonry coated with mortar, slab with plaster lining, reinforced concrete floor, where the internal air temperature data (T_{ar,int}, °C) and relative humidity of the internal air (UR_{int}) used to obtain the thermal load were recorded. For the technical-economic analysis, the cost analysis was applied, using the Payback indicator (return on capital). To perform the calculations of the total thermal load, the critical day of highest internal temperature was defined. The cost for implementing the green roof was 140.85 reais m⁻². The thermal load after the installation of the green roof had a reduction of 65.64%, promoting savings of 13,217.77 reais per month. The return of the invested capital occurred in 31 months. From the energy point of view, the green roof presented a positive cost-benefit ratio, because after its installation there was a monthly savings of 31,939.07 kWh⁻¹.

Keywords: green toppings, energy saving, thermal performance, thermal insulation.

INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente 50% da eletricidade é consumida por edifícios comerciais e residenciais, segundo a estimativa do Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (PROCEL, 2019). O telhado verde consiste em um sistema de cobertura especializado, que suporta a vida vegetal com o propósito de proporcionar satisfação ao homem, economia energética e melhorias ambientais (WANG, TIAN & ZHAO, 2017).

Além dos benefícios ambientais, a viabilidade econômica da construção torna-se uma ferramenta necessária para convencer proprietários e construtoras a instalar telhados verdes. Segundo Rosato et al. (2016) o custo de um telhado verde é maior do que um telhado típico, no entanto, deve-se considerar sua relação custo-benefício para viabilização dos projetos de construção.

Apesar das dificuldades construtivas, a demanda por telhados verdes está aumentando gradualmente. Em muitas cidades brasileiras, o telhado verde tornou-se uma medida obrigatória e com respaldo legislativo (SETTA, 2017).

A redução no consumo de energia elétrica, geralmente é o fator mais convincente para que os proprietários de edifícios e empresariais instalem telhados verdes (REFAHI & TALKHABI, 2015). A redução da temperatura interna das edificações promovidas pelo telhado verde, minimiza o consumo de energia elétrica, devido a ampliação do tempo de intermitência no funcionamento do condicionador de ar (RAN & TANG, 2017).

O estudo sobre a viabilidade econômica da implantação do telhado verde, busca a aplicabilidade da técnica associado à projeção do retorno e da amortização do investimento. Isso oferece maior segurança e orientação ao investimento de forma estratégica, para que a empresa priorize quais técnicas devem ser implementadas e quais áreas têm maior potencial para cada segmento (ZIOGOU et al., 2018).

A estética é um benefício geralmente deixado de lado nas análises de custo-benefício, devido à dificuldade de quantificação monetária. No entanto, é uma prática comum pagar um preço mais alto em propriedades próximo a áreas verdes, podendo ser usado como um método para atribuir valor monetário as características qualitativas (FENG & HEWAGE, 2018). Segundo Bianchini e

Hewage (2012) um telhado verde gera incrementos de 5 a 8% no valor do imóvel, levando-se em consideração apenas valores estéticos.

A manutenção do telhado verde gera uma desvantagem quando comparados aos telhados convencionais, pois, são necessárias visitas periódicas para pequenos reparos. No entanto, apesar dos telhados convencionais serem mais empregados, o telhado verde possui maior durabilidade, tornando o custo de reparo e reforma menor (WILLIAM et al. 2016).

Pesquisa realizada no Canadá permitiu verificar que um telhado verde extensivo pode reduzir os ganhos de calor em 95% e as perdas em 26%, quando comparado ao telhado convencional. Nessa construção a demanda por energia foi de 6,0 a 7,5 kWh (20.500 a 25.600 BTU). Entretanto, o meio de cultivo e as plantas modificaram os fluxos de calor e reduziram a demanda diária de energia para menos de 1,5 kWh (5.100 BTU), correspondendo a uma redução de mais de 75% (LIU, 2002).

O benefício econômico e energético com a intermitência no funcionamento de condicionadores de ar foi quantificado por Bianchini e Hewage (2012), no qual o telhado verde promoveu economia de US\$ 0,68 por m^{-3} de ar, anualmente. No Canadá o custo de implantação de um telhado verde extensivo padrão varia de US\$ 130 m^{-2} a US\$ 165 m^{-2} , nessa mesma pesquisa foi identificado que o retorno do capital investido pode ser de até 10 anos.

Na China o preço médio de um telhado verde obtido em três províncias foi entre US\$ 48.00 e US\$ 76.00 m^{-2} (LIU & HONG, 2012). Na Alemanha, os custos médios do telhado verde variam de US\$ 15.00 a US\$ 45.00 m^{-2} . No entanto, segundo Boni (2015) o telhado verde possui uma variação de preço entre US\$ 23,20,00 a US\$ 34,79,00 m^{-2} , dependendo do tipo e região onde será instalado.

Os telhados verdes surgem como um produto para incentivar a construção sustentável e sua popularidade está aumentando devido aos seus benefícios ambientais, no entanto, o elevado custo de instalação têm sido um entrave a sua penetração no mercado (SHAFIQUE et al., 2018).

Para tanto, realizou-se essa pesquisa com o objetivo de avaliar a relação custo-benefício da implantação do telhado verde em função da redução do consumo de energia elétrica e identificar o ponto de equilíbrio econômico.

MATERIAL E MÉTODOS

O levantamento de dados foi realizado no telhado verde do Edifício Garagem do Empresarial Charles Darwin da construtora Ria Ave Empreendimentos em Recife, situado na região da Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil (8° 04' 03" S e 34° 55' 00" O e altitude média 4 m) (Figura 1).

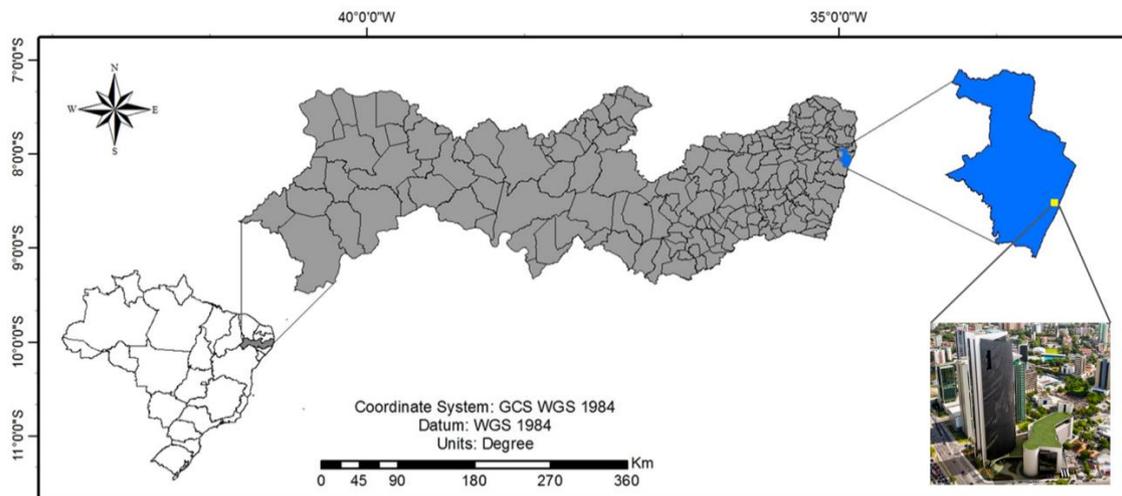


Figura 1 - Esquema da localização geográfica da área experimental. Fonte: Arquivo pessoal, 2020.

O clima da região é do tipo As', tropical chuvoso, de acordo com a classificação de Köppen (PEREIRA et al., 2002). A temperatura média anual no Recife é de 25,8 °C e temperatura máxima de 29,4 °C. No mês de julho registra-se os maiores índices pluviométricos (380,02 mm) e menores temperaturas (19,5 °C) na capital pernambucana (CLIMATEMPO, 2019; INMET, 2019).

A área total do telhado coberta por vegetação é 2.800 m². A visualização da área do edifício garagem antes (2016) e após a implantação do telhado verde (2017) encontra-se na Figura 2.



Figura 2 - (A) Antes e (B) após a instalação do telhado verde, Empresarial Charles Darwin, Rio Ave Empreendimentos, em Recife, PE, Brasil. Fonte: Arquivo pessoal, 2020.

A estratificação do telhado verde consistiu em uma camada de grama da espécie de *Zoysia japonica*, uma camada de substrato de 7,5 cm, uma manta de drenagem (manta de bidim), uma camada de 2,5 cm de espessura composta por agregados provenientes de concreto reciclados obtidos na construção do edifício, outra manta de drenagem, uma impermeabilização de manta asfáltica e uma laje de concreto armado (Figura 3).

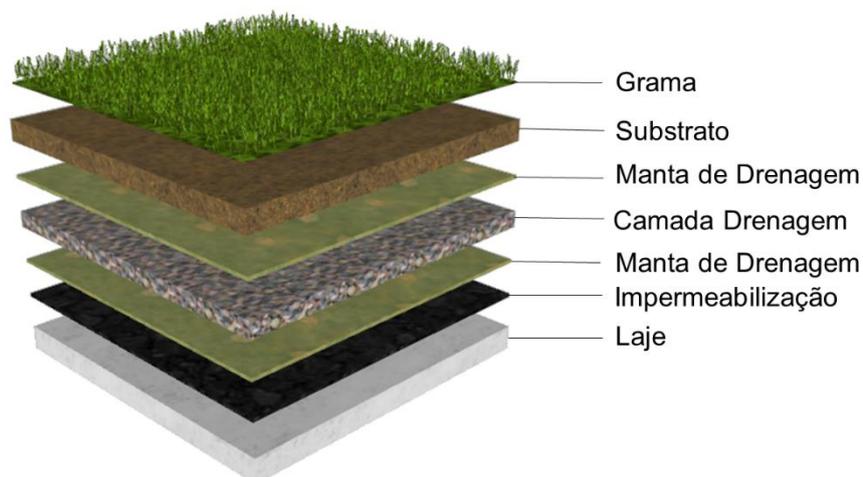


Figura 3 - Detalhamento dos componentes do telhado verde, conforme as camadas utilizadas no projeto. Fonte: Arquivo pessoal, 2020.

O substrato utilizado foi proveniente de lodo de esgoto tratado com densidade seca de $781,35 \text{ kg m}^{-3}$, densidade no nível máximo de retenção de água 1130 kg m^{-3} e retenção volumétrica máxima de 49,6%, na Tabela 1 encontra-se a composição química do substrato utilizado.

Tabela 1 - Composição química do substrato utilizado no telhado verde

Característica	Valor	Característica	Valor
pH (água 1:2,5)	7	Cu (mg kg ⁻¹)	135,23
N (g kg ⁻¹)	21,5	Ni (mg kg ⁻¹)	49,08
Carbono (g kg ⁻¹)	326,7	Pb (mg kg ⁻¹)	29,2
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	563,2	Cr (mg kg ⁻¹)	50,4
Relação C/N	15,2	Ba (mg kg ⁻¹)	523,65
P (g kg ⁻¹)	16,75	Sb (mg kg ⁻¹)	2,38
K (g kg ⁻¹)	2,27	Co (mg kg ⁻¹)	121,45
Na (g kg ⁻¹)	2,64	Mo (mg kg ⁻¹)	5,13
Ca (g kg ⁻¹)	29,34	Mn (mg kg ⁻¹)	382,08
Mg (g kg ⁻¹)	2,83	V (mg kg ⁻¹)	18,55
Al (g kg ⁻¹)	22,15	Ag (mg kg ⁻¹)	2,48
Fe (g kg ⁻¹)	24,27	Hg (mg kg ⁻¹)	1,8
Zn (g kg ⁻¹)	7,89	As (mg kg ⁻¹)	1,31
Cd (mg kg ⁻¹)	0,2	Se (mg kg ⁻¹)	0,33

Para o monitoramento meteorológico foi utilizada uma plataforma automática de registro de dados CAMPBELL SCIENTIFIC®, modelo CR800, na laje externa do edifício, equipada com sensores de radiação solar global (Qg), saldo de radiação (Rn), pluviômetro (PREC; mm), anemômetro (Vv, m s⁻¹) e pressão atmosférica (Patm, kPa), temperatura do ar (Tar, ext, °C) e a umidade relativa do ar (UR,ext, %). Os dados foram aferidos a cada segundo e registrados em intervalos de 10 min. A série de dados utilizados compreendeu o período de janeiro de 2016 a dezembro de 2017.

Na área interna do edifício foi instalada uma sala com porta de vidro, constituída por vedação de alvenaria revestida com argamassa, laje com forro de gesso, piso de concreto armado, sem ventilação, com as seguintes dimensões: 3,20 m de pé direito, 5,40 m de comprimento e 5,90 m de largura (Figura 4). No centro geométrico da sala foi instalado um mini datalogger HOBO U12-012, que permitiu o registro da temperatura do ar interna (Tar, int, °C) e da umidade relativa do ar interna (UR,int) a cada 10 min.



Figura 4 - Vista frontal da sala de alvenaria com portas de vidro. Fonte: Arquivo pessoal, 2020.

Para a análise técnico-econômica foi aplicada a análise de custo, determinada pelo indicador de Payback (retorno de capital), a fim de avaliar a sustentabilidade econômica do telhado verde. Os custos de implantação e manutenção do telhado verde foram disponibilizados pela construtora Rio Ave Empreendimentos, que permitiu a planificação dos dados fornecidos pelo setor contábil da empresa. De posse dos dados foi verificado o ponto de equilíbrio econômico do capital investido.

O custo inicial considerado foi o investimento na instalação do telhado verde, impermeabilização, cascalho, sistema de drenagem, sistema de irrigação, manta de drenagem, substrato, vegetação e mão-de-obra.

Os custos fixos mensais foram o corte e limpeza da vegetação, consumo de energia para irrigação e corte da grama. Os custos variáveis foram considerados as trocas de plantas mortas, substituição e limpeza do sistema de irrigação, fertilização, controle de pragas e limpeza do sistema de drenagem.

Após a obtenção dos custos foi realizado o cálculo da economia de energia elétrica gerada, levando em consideração a economia inicial e mensal. A economia inicial foi considerada a diferença na aquisição e instalação dos equipamentos de climatização e a mensal foi determinada por meio do menor consumo de energia elétrica gerado (KW h^{-1}). Para o cálculo de ambas foi necessário realizar o balanço dos dois cenários antes e após a instalação do telhado verde, para isso calculou-se a carga térmica total e o consumo de energia de acordo com as equações

propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16401 (ABNT, 2008).

Para os cálculos da carga térmica total foi verificado o dia crítico de maior temperatura. A carga térmica total é obtida pela soma de todas as cargas térmicas (condução, insolação, pessoas, equipamentos, iluminação e infiltração). Como medida de segurança para atender às penetrações eventuais de calor no recinto, adotou-se o acréscimo de 10% aos cálculos. A carga térmica por condução Q foi calculada em função da Equação 1.

$$Q = (A \times U \times \Delta T) \quad (1)$$

Em que;

Q = fluxo de calor em kcal h⁻¹

A = área em m²

U = coeficiente global de transmissão de calor em kcal h⁻¹ m⁻² °C⁻¹

ΔT = diferença de temperatura entre o ambiente externo e interno em °C

O coeficiente global de transferência de calor foi calculado com base na equação 2.

$$U = \left(\frac{1}{R_{\text{totA}}} \right) = \left(\frac{1}{(1+h1)+(La+Ka)+(Lb+Kb)+(Lc+Kc)+(1+h4)} \right) \quad (2)$$

Em que;

U = coeficiente global de transmissão de calor (kcal h⁻¹ m⁻² °C⁻¹)

R_{totA} = Resistência térmica total

h1 = condutância superficial para o ar a 12 km/h ou 24 km/h (kcal h⁻¹ * m⁻² °C)

La = espessura da primeira camada de revestimento da parede (mm)

Ka = valor de condutividade térmica da primeira camada da parede

Lb = espessura da parede (mm)

Kb = valor de condutividade térmica do material da parede

Lc = espessura da segunda camada de revestimento da parede dado (mm)

Kc = valor de condutividade térmica da segunda camada da parede

h4 = Condutância superficial para o ar parado (kcal h⁻¹ m⁻² °C⁻¹)

A carga térmica devido a presença de ocupantes na instalação, decorre da energia térmica dissipada por eles no ambiente climatizado. O corpo humano emite calor sensível e calor latente que variam de acordo com o estado em que se encontram (DE SOUSA & LEDER, 2019). Para calcular a carga térmica sensível e latente presentes no ambiente foi utilizada as Equações 3 e 4.

$$Q_{\text{latente}} = N \times S1 \quad (3)$$

$$Q_{\text{sensível}} = N \times S2 \quad (4)$$

Em que,

Q_{latente} = Carga térmica de calor sensível devido as pessoas no ambiente

$Q_{\text{sensível}}$ = Carga térmica de calor latente devido as pessoas no ambiente

N = Número de pessoas

$S1$ = Calor latente liberado pelas pessoas presente no ambiente

$S2$ = Calor sensível liberado pelas pessoas presente no ambiente

Os valores considerados na obtenção do calor sensível ($S1$) e latente ($S2$) de cada indivíduo presente no ambiente estão contidos na Tabela 2, de acordo com Creder (2004).

Tabela 2 - Calor Liberado pelas Pessoas

Temperatura Ambiente		Pessoa Sentada ou em Movimento Lento					
		Calor Sensível		Calor Latente		Calor Total	
°C	°F	Kcal/h	BTU/h	Kcal/h	BTU/h	Kcal/h	BTU/h
24	75,2	66	262	34	135	100	397
23	73,4	69,1	274	31	123	100	397
22	71,6	72,1	286	28	111	100	397

Fonte: Adaptado de Creder (2004).

A determinação da carga térmica total emitida pelas pessoas foi obtida conforme a Equação 5, que indica que a carga térmica total da presença dos ocupantes no ambiente é o somatório entre a carga térmica de calor sensível e a carga térmica de calor latente.

$$Q_{\text{pessoas}} = Q_{\text{latente}} + Q_{\text{sensível}} \quad (5)$$

Em que,

Q_{pessoas} = Carga térmica total devido as pessoas presentes no ambiente

Q_{latente} = Carga térmica de calor sensível devido as pessoas no ambiente

$Q_{\text{sensível}}$ = Carga térmica de calor latente devido as pessoas no ambiente

Os motores elétricos que estão no interior do ambiente adicionam carga térmica devido às perdas nos enrolamentos, sendo que essa carga deve ser retirada pelo condicionador de ar. Para motores que permaneçam no recinto condicionado e não interferem na corrente de ar, tem-se a Equação 6 e para equipamentos que causam interferência na corrente de ar foi utilizada a Equação 7.

$$Q = (P/n - P) \times 2490 \quad (6)$$

$$Q = (P/n) \times 2490 \quad (7)$$

Em que,

Q = fluxo de calor em BTU/h

P = Potência em HP

n = rendimento

Para o cálculo da carga térmica devido à iluminação foi utilizada a Equação 8.

$$Q = P \times 1,2 \times 860 \quad (8)$$

Em que,

Q = Fluxo de calor em Kcal/h

P = Potência em Watts

Para se ter a carga térmica em kcal/h utilizou-se a relação: 1 kW/h = 860 kcal/h, em que todo fluxo ou movimento de ar externo para dentro do ambiente a ser climatizado através de frestas e outras aberturas não intencionais,

caracterizam-se por infiltrações no ambiente climatizado. Para cálculo foi utilizada a Equação 9.

$$q_s = Q \times 0,29 (T_{ar,ext} - T_{ar,int}) \quad (9)$$

Em que,

q_s = calor sensível de troca de ar em kcal/h

Q = fluxo de ar em m³/h

$T_{ar,ext}$ = temperatura do ar externa em °C

$T_{ar,int}$ = temperatura do ar interna em °C

O cálculo do Q (fluxo de ar) se deu pela Equação 10, para identificar as trocas de ar por hora foi utilizada a Tabela 3.

$$Q = \text{trocas de ar por hora} \times \text{volume do ambiente} \quad (10)$$

Tabela 3 - Trocas de ar por hora

Janelas Existentes	Trocas por hora
Nenhuma janela ou porta para o exterior	$\frac{3}{4}$
Janelas ou portas em 1 parede	1
Janelas ou portas em 2 paredes	1 $\frac{1}{2}$
Janelas ou portas em 3 paredes	2
Lojas	2

Fonte: Adaptado de CREDER, (2004).

Para calcular se a tecnologia possui melhor eficiência energética é necessário a realização de um cálculo como mostra a Equação 11. Foi utilizado uma carga horária de 44 horas semanais, para simulação do consumo. O cálculo da economia gerada no andar, utilizou-se a simulação de que toda área fosse dividida em salas de 31,86 m².

$$C = \left(\frac{P \times T \times d}{1000} \right) \quad (11)$$

Em que,

C = Consumo de energia em KW h⁻¹

P = Potência do equipamento em W

T = Tempo de funcionamento do equipamento dado em horas

d = Dias de funcionamento do equipamento

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 verifica-se a identificação de anos atípicos ou não (2016-2017), quando comparado com a normal climatológica de 1981-2010 (INMET, 2019), por meio das médias mensais e anuais da temperatura do ar (Tar), radiação solar global (Qg), precipitação pluviométrica acumulada (PREC) e da umidade relativa do ar (UR).

Tabela 4 - Variação média mensal da radiação solar global (Qg), temperatura média do ar (Tar), umidade relativa do ar (UR) e acumulado mensal da precipitação pluviométrica (PREC) da normal climatológica em relação aos anos de 2016 e 2017 (INMET, 2020)

MESES	Tar Normal	Tar 2016	Tar 2017	Qg Normal	Qg 2016	Qg 2017	Prec Normal	Prec 2016	Prec 2017	UR Normal	UR 2016	UR 2017
Janeiro	26,9	27,5	27,5	22,3	15,8	22,0	106,1	124,0	28,7	74,4	74,3	69,1
Fevereiro	27,1	27,5	28,0	21,5	17,8	19,9	132,4	70,0	21,1	75,1	74,0	67,8
Março	27,3	27,5	27,5	20,2	18,6	18,9	210,6	268,7	156,2	77,2	75,9	74,3
Abril	26,5	26,9	26,7	17,7	17,5	19,1	290,5	292,4	289,9	81,3	79,4	80,4
Maio	25,7	25,7	25,8	15,9	17,0	13,6	311,8	478,9	399,4	83,7	81,9	83,5
Junho	24,7	25,0	25,0	14,5	21,0	10,8	391,1	148,5	489,8	84,8	81,0	86,9
Julho	24,1	24,4	23,8	14,6	18,8	8,6	353,7	110,3	490,5	84,2	80,4	86,8
Agosto	24,2	24,7	24,1	18,5	19,2	15,6	217,8	57,5	112,1	81,3	77,2	82,2
Setembro	25,1	25,7	24,9	20,5	21,9	16,5	100,2	57,4	84,1	77,5	73,7	78,7
Outubro	25,9	26,8	25,8	22,2	23,5	14,5	55,2	14,1	63,1	74,1	70,1	76,0
Novembro	26,6	27,4	27,0	23	22,3	23,3	38,7	17,8	14,8	72,7	69,8	70,7
Dezembro	26,9	27,4	27,5	21,9	21,2	24,1	55,3	68,0	30,3	73,3	70,9	72,4
Ano	25,9	26,4	26,1	19,4	19,6	17,2	2.263	1.708	2.180	78,3	75,7	77,4

A temperatura média do ar (Tar) apresentou baixa variação em relação a normal climatológica (0,5 e 0,2 °C). O mês com o registro dos menores valores de temperatura foi julho em ambos os anos e para a normal climatológica, (24,10, 24,4 e 23,8 °C), respectivamente. Já o mês dos maiores registros de temperatura média foi março tanto para a normal (27,3 °C) como para os anos em estudo apresentando o mesmo valor de 27,5 °C. A variação média anual da temperatura entre os anos

estudados foi de 0,3 °C, o que representa 1,13% de variação, percentual considerado baixo (CAPUCHINHO et al., 2019).

A precipitação acumulada anual no período do estudo foi de 1.708 em 2016 e 2.180 mm em 2017 correspondendo uma variação de 21,65 %. A menor precipitação em 2016 repercutiu em maior radiação solar global no período estudado. A normal climatológica indica um valor de 2263,40 mm, sendo superior aos anos estudados.

A radiação solar global variou de 24,32 a 10,93 MJ m⁻² d⁻¹, enquanto que para a normal climatológica essa variação foi de 23,00 a 14,50 MJ m⁻² d⁻¹. Os meses com menor valor de Q_g foram junho e julho, isso porque são os meses de maior precipitação na região (DE ALBUQUERQUE WANDERLEY et al., 2018). A média anual para a normal foi de 19,50 MJ m⁻² d⁻¹, já a média anual de Q_g para o período estudado foi de 17,73 MJ m⁻² d⁻¹, proporcionando uma diferença entre a normal climatológica e o período do estudado de 1,77 MJ m⁻² d⁻¹, apresentando uma diferença de 9,07 %.

Os meses de estudo com o registro da maior umidade relativa do ar foram abril (85,76%) e junho (85,10%), isso ocorreu devido a maior precipitação nesses dois meses, já os menores valores foram observados em novembro (71,35%) e dezembro (72,23%). A média da umidade relativa do ar no período de estudo foi 79,08 e 78,30% para a normal climatológica, perfazendo diferença de 0,78, o que resulta em uma diferença de 0,99% em relação ao período.

Ao comparar as variáveis meteorológicas registradas durante a pesquisa com a normal climatológica observou-se que houve um baixo desvio climático em relação a normal, classificando os anos assim como um período típico. Caso os anos fossem classificados como atípicos poderia causar um baixo desempenho da análise técnico-econômica.

A Tabela 5 ilustra a diferença entre a temperatura do ar na estação do INMET localizada próxima ao monitoramento e na estação presente na laje superior do edifício. É possível observar que antes da instalação do telhado verde a diferença entre elas foi de 0,7 °C, no entanto, após a implantação do telhado verde a variação foi de 0,21 °C, isso representa que o telhado verde promoveu redução de 0,49 °C na temperatura do ar com a implantação do telhado verde.

Tabela 5 - Média da temperatura do ar na estação de referência (Tar Ref., °C) e na laje externa (Tar Ext., °C), diferença de temperatura do ar (Δ e %) em 2016 e 2017.

Período	Tar Ref. (°C)	Tar Ext. (°C)	Δ (°C)	Δ (%)
2016 - Sem telhado verde	26,48	27,18	0,70	2,58
2017 - Com telhado verde	26,19	26,40	0,21	0,80

A diferença entre a temperatura do ar na estação do INMET e a temperatura do ar do ambiente interno em estudo encontram-se na Tabela 6. É possível observar que antes da instalação do telhado verde a diferença na temperatura do ar foi de - 0,99 °C (-3,73%), após a implantação a redução da temperatura foi da ordem de -1,87 °C (-7,14%), isso representa que o telhado verde promoveu redução de 0,88 °C na média do ambiente interno estudado.

Tabela 6 - Média da temperatura do ar na estação de referência (INMET) (Tar Ref., °C) e no ambiente interno (Tar Int., °C), diferença de temperatura do ar (Δ e %) em 2016 e 2017

Período	Tar Ref. (°C)	Tar Int. (°C)	Tar Max (°C)	Δ (°C)	Δ (%)
2016 - Sem telhado verde	26,48	25,49	25,67	-0,99	-3,73
2017 - Com telhado verde	26,19	24,32	24,77	-1,87	-7,14

A temperatura do ar máxima no interior do ambiente estudado antes da instalação do telhado verde (2016) foi de 25,67 °C, após a instalação do telhado verde (2017) esse valor passou para 24,77 °C, isso representa redução de 0,9 °C. Nos Quadros 1 e 2 encontram-se a demonstração dos cálculos das cargas térmicas antes e após a instalação do telhado verde.

Quadro 1 - Carga térmica da sala de alvenaria antes da instalação do telhado verde segundo a NBR5858 da ABNT.

Procedência do calor	Unidades			Fatores			Btu
	Largura	Altura	Total	S/P	P Int.	P Ext.	
Tipo I - Janelas c/ isolamento							0
Tipo II - Janelas Transmissão							210
2.1 - Vidro comum	1,00	1,00	1,00		210		210
Tipo III – Paredes							2802
3.1 - Externas voltadas p/ o sul	5,9	3,2	18,88	55		42	1038
3.2 - Externas outras orientações	0	0	0,00	84		50	0
3.3 - Interna	16,7	3,2	53,44		33		1764
Tipo IV – Teto							10036
4.1 – Laje	5,4	6	31,86		315		10036
4.2 - Em laje, c/2,5 cm de isolamento			0,00		125		0

4.3 - Entre andares			0,00		52		0
4.4 - Sob telhado isolado			0,00		72		0
Tipo V – Piso	Compr.	Largura	Total				1657
Piso não colocado sobre o solo	5,40	5,90	31,86		52		1657
Tipo VI – Pessoas							2520
Em Atividade Normal		4			630		2520
Tipo VII - Iluminação e aparelhos							5313,12
Lâmpadas (Fluorescentes)		500		W	2		1000
Aparelhos Elétricos		2		KW	860		1720
Número de Computadores		2		W	3,412		2593,12
Tipo VIII - Portas ou vãos	Largura	Altura	Total				0
Abertos constantemente			0		630		0
TOTAL							22538

Quadro 2 - Carga térmica da sala de alvenaria após a instalação do telhado verde segundo a NBR5858 da ABNT.

Procedência do calor	Unidades			Fatores			Btu
Tipo I - Janelas c/ isolamento	Largura	Altura	Total	S/P	P Int.	P Ext.	0
Tipo II - Janelas Transmissão	Largura	Altura	Total				210
2.1 - Vidro comum	1,00	1,00	1,00		210		210
Tipo III – Paredes	Largura	Altura	Área	Leve	Pesada		2802
3.1 - Externas voltadas p/ o sul	5,9	3,2	18,88	55	42		1038
3.2 - Externas outras orientações	0	0	0,00	84	50		0
3.3 – Interna	16,7	3,2	53,44		33		1764
Tipo IV – Teto	Compr.	Largura	Total				2294
4.1 – Laje			0,00		315		0
4.2 - Em laje, c/2,5 cm de isolamento			0,00		125		0
4.3 - Entre andares			0,00		52		0
4.4 - Sob telhado isolado	5,4	5,9	31,86		72		2294
Tipo V – Piso	Compr.	Largura	Total				1657
Piso não colocado sobre o solo	5,40	5,90	31,86		52		1657
Tipo VI – Pessoas							2520
Em Atividade Normal		4			630		2520
Em Atividade Física					1000		0
Tipo VII - Iluminação e aparelhos							5313,12
Lâmpadas (Fluorescentes)		500		W	2		1000
Aparelhos Elétricos		2		KW	860		1720
Número de Computadores		2		W	3,412		2593,12
Tipo VIII - Portas ou vãos	Largura	Altura	Total				0
Abertos constantemente			0		630		0
TOTAL							14796

A alteração na carga térmica antes e após a instalação do telhado verde foi de 22538 para 14796 Btus, o que repercutiu em uma economia de 65%, alguns

autores encontraram redução de até 75% (LIU, 2002), essa alteração ocorreu principalmente devido a alteração na carga térmica incidente no teto que mudou de 10036 para 2294 Btus, essa alteração gerou economia de 7742 Btus. Para o cálculo da economia gerada na área total utilizou-se o tempo de 44 horas semanais, isso permitiu alcançar redução no custo com energia elétrica de US\$ 3065,91 por mês.

A Tabela 7 ilustra os custos que foram gerados para implantação do telhado verde, observa-se que o custo total foi de US\$ 91.477,08, o que resulta em um valor médio de US\$ 32,67 m², tais resultados ficaram próximo aos encontrados por outros autores, de US\$ 23,20 a US\$ 34,79 (Boni, 2015); de US\$ 31,57 (Shan et al., 2019); e US\$ 44,59 (DE SOUZA LIMA et al., 2019).

Tabela 7 - Custo de implantação do telhado verde

CUSTO IMPLANTAÇÃO	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO	TOTAL
Sistema de Drenagem	2800	R\$ 5,35	R\$ 15.000,00
Camada de Drenagem	280	R\$ 70,00	R\$ 19.600,00
Impermeabilização	2800	R\$ 90,00	R\$ 252.000,00
Manta de Bidim	2800	R\$ 4,50	R\$ 12.600,00
Mão-de-obra	2800	R\$ 1,50	R\$ 4.200,00
Gramma	2800	R\$ 7,00	R\$ 19.600,00
Substrato	2800	R\$ 8,92	R\$ 24.976,00
Mão-de-obra	2800	R\$ 3,00	R\$ 8.400,00
Irrigação			R\$ 38.000,00
		Custo Total	R\$ 394.376,00 ou US\$ 91477,08
		Custo m ²	R\$ 140,85 ou US\$ 32,67

Os custos fixos mensais para manutenção do telhado verde foram: Mão-de-obra (um jardineiro US\$ 463,91), energia para corte e irrigação (US\$ 10,02) e custos com adubação e calagem (US\$ 16,19) perfazendo um custo total mensal de (US\$ 490,12). Realizando os cálculos do custo de instalação e economia mensal gerada ao longo dos meses, identificou-se que o prazo de retorno do capital investido aconteceu em 31 meses, tais resultados corroboram aos encontrados por Mahdiyar et al. (2016), que afirmaram que o telhado verde é um investimento de longo prazo com retorno de curto prazo e o período de retorno pode ser de até dois anos.

CONCLUSÕES

A implantação do telhado verde promoveu relação custo-benefício positiva e gerou redução no consumo de energia elétrica de $31939,07 \text{ Kwh}^{-1}$, correspondendo a uma economia mensal de US\$ 3065,91.

A amortização do investimento necessário para a implantação do telhado verde foi de 31 meses, o que o caracteriza como um investimento de curto prazo, após esse período já é possível obter lucro líquido devido a utilização da técnica.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5858: **condicionador de ar doméstico**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR. 16401. **Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários**. Primeira edição, v. 4, 2008.

BIANCHINI, F., & HEWAGE, K. How green are the green roof? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, v. 48, p. 57-65, 2012.

BONI, Filipe. Telhado verde: Uma opção sustentável? Disponível em: <<http://2030studio.com/category/artigos>>. Acesso em: Jan de 2019.

CAPUCHINHO, F. F., SIQUEIRA, M. P., CRUZ, G. H. T., DA COSTA SANTOS, L., & DOS REIS, E. F. Coordenadas geográficas e altitude na estimativa da temperatura do ar no estado de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 13, n. 2, p. 3346-3357, 2019.

CLIMATEMPO, Climatologia Recife, Disponível em. <https://www.climatempo.com.br/climatologia/4119/recife-pe>. Acesso em 25 de julho de 2019.

CREDER, HÉLIO. **Instalações de ar condicionado** - 6ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 318p.

DE ALBUQUERQUE WANDERLEY, L. S., NÓBREGA, R. S., MOREIRA, A. B., DOS ANJOS, R. S., & DE ALMEIDA, C. A. P. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

DE SOUSA, M. C. B., & LEDER, S. M. (2019) Reflexões sobre terminologias utilizadas para definir o conforto térmico humano. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019028-e019028, 2019.

DE SOUZA LIMA, C. A., DA SILVA, J. R. A., & FONTINELES, F. H. S. Telhados verdes e telhados convencionais: uma análise comparativa sob a ótica da relação de custo-benefício. **Revista Artigos. Com**, v. 10, p. e2050-e2050, 2019.

FENG, H., & HEWAGE, K. N. Economic Benefits and Costs of Green Roofs. **Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability**. p. 307-318, 2018.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2018) Banco de dados meteorológicos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/gráfico>> Acesso em: 16 março, 2019.

MAHDIYAR, A., TABATABAEE, S., SADEGHIFAM, A. N., MOHANDÉS, S. R., ABDULLAH, A., & MEYNAGH, M. M. Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A Monte Carlo simulation approach. **Urban forestry & urban greening**, 20, 317-327. 2016.

LIU, K. K. Y. Energy efficiency and environmental benefits of rooftop gardens. **Construction Canada**, v. 44, n.2, p. 17-23, 2002.

LIU, L. P & HONG, G. X. Popularizing path research on green roof project in China rural region: cost-effectiveness assessment. **World Automation Congress, WAC 2012**.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PROCEL, I. (2018). Etiqueta em Edificações. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/>>. Acesso em, 11 de novembro de 2019.

RAN, J., & TANG, M. Effect of green roofs combined with ventilation on indoor cooling and energy consumption. **Energy Procedia**, v. 141, p. 260-266, 2017.

REFAHI, A. H., & TALKHABI, H. Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. **Renewable Energy**, v. 80, p. 595-603, 2015.

ROSATO, P., VALCOVICH, E., STIVAL, C. A., BERTO, R., & CECHET, G. Horizontal extensive green roofs. **Existing buildings**. Part Two-Economic features, p. 3-24. 2016.

SETTA, B. R. S. Telhados Verdes Como Políticas Públicas Ambientais Para O Município De Volta Redonda–RJ. **Revista LABVERDE**, 8(1), 13-35. 2017.

SHAFIQUE, MUHAMMAD; KIM, REEHO; RAFIQ, MUHAMMAD. Green roof benefits, opportunities and challenges - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 757-773, 2018.

SHAN, V. L. X. S., NETO, P. D. S. G., CALCADO, G. C. D. S. C., DA MOTTA, A. L. T. S., & VAZQUEZ, E. G. Telhados verdes como proposta de jardim terapêutico em unidades hospitalares/Green roofs as a therapeutic garden proposal in hospital units. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 16513-16532, 2019.

WANG, X., TIAN, Y., & ZHAO, X. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. **Science of the Total Environment**, v. 592, p.465-476, 2017.

WILLIAM, R., GOODWELL, A., RICHARDSON, M., LE, P. V., KUMAR, P., & STILLWELL, A. S. An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. **Ecological engineering**, v. 95, p.1-9, 2016.

ZIOGOU, I., MICHPOULOS, A., VOULGARI, V., & ZACHARIADIS, T. Implementation of green roof technology in residential buildings and neighborhoods of Cyprus. **Sustainable cities and society**, v. 40, p. 233-243, 2018.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa contribuiu cientificamente com informações da predição dos benefícios energéticos do telhado verde. A análise técnico-econômica aqui apresentada visa melhorar a tomada de decisão quanto a instalação do mesmo, o que permite auxiliar na utilização de ferramentas que permitam atender uma demanda de sustentabilidade crescente, garantindo o uso racional da técnica de um modo geral.

Os telhados verdes apresentam-se como uma alternativa viável para reintrodução de áreas verdes no centro da cidade, pois, além de apresentar inúmeros benefícios sociais e ambientais, trazem benefícios econômicos, já que o mesmo se apresenta como um investimento de curto prazo e a probabilidade de lucro dessa tecnologia é maior do que as possíveis perdas financeiras.

Além de fornecer serviços ambientais nas áreas urbanas, incluindo melhor gerenciamento das águas pluviais, melhor regulação da temperatura das construções, redução do consumo energético e redução dos efeitos urbanos das ilhas de calor. Pesquisas adicionais sobre a tecnologia do telhado verde devem avaliar sua eficácia em comparação com outras tecnologias com fins semelhantes e focar em estimativas de benefícios agregados em grande escala.