



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILLA MAHON CAMPELLO DE SOUZA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E FINANCEIRO DE TELHADOS
VERDES E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS, CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE
VARIÁVEIS CLIMÁTICAS**

Recife

2019

CAMILLA MAHON CAMPELLO DE SOUZA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E FINANCEIRO DE TELHADOS
VERDES E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS, CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE
VARIÁVEIS CLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Pernambuco como parte
dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientadora: Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- S729a Souza, Camilla Mahon Campello de.
Análise do desempenho energético e financeiro de telhados verdes e painéis fotovoltaicos, considerando a influência de variáveis climáticas / Camilla Mahon Campello de Souza. - 2019.
85 folhas, il., tab., abr. e sigl.
- Orientadora: Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos.
- TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Telhados verdes. 3. Energia. 4. Painéis fotovoltaicos.
5. Sustentabilidade em edificações. 6. Clima. I. Souza, Camilla Mahon Campello de (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-366

CAMILLA MAHON CAMPELLO DE SOUZA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E FINANCEIRO DE TELHADOS
VERDES E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS, CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE
VARIÁVEIS CLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
graduação de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Pernambuco como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 13/08/2019.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ricardo Menezes Campello de Souza e Marcia Mahon Campello de Souza, professores por profissão, e para mim, os primeiros e mais importantes professores da minha vida. Agradeço por todo o incentivo e apoio em toda a minha trajetória e por fazerem parte de todas as minhas conquistas.

À minha professora orientadora, Sylvana Melo dos Santos, por toda a orientação necessária, pelas conversas motivadoras e por todo o incentivo e assistência durante a realização deste trabalho.

Agradeço também a Matheus Bezerra de Alencar Barros, por todo o apoio técnico e emocional, fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos os professores que participaram da minha trajetória acadêmica, por todos os ensinamentos.

Aos meus colegas de curso de Engenharia Civil e da Eólica Tecnologia, que contribuíram e ainda contribuem para o meu crescimento profissional e pessoal.

Aos amigos, familiares e a todos que de algum modo contribuíram para a conclusão deste ciclo.

RESUMO

Com a crescente preocupação mundial acerca das questões ambientais e do consumo de energia, o modelo de desenvolvimento sustentável vem sendo implementado cada vez mais nas cidades, buscando suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender às futuras gerações. Nesse sentido, um dos setores que geram maior impacto é o de edificações, devido ao elevado consumo de energia. Nesse contexto, telhados verdes e painéis fotovoltaicos são tecnologias que podem contribuir com o desenvolvimento de edifícios sustentáveis. Já é comprovado que as coberturas vegetais promovem inúmeros benefícios ambientais, como a redução das ilhas de calor e a melhoria na qualidade do ar, entre outros. Quanto ao consumo de energia, elas se mostram bastante eficazes na diminuição da temperatura interna do ambiente, promovendo maior conforto térmico e menos gasto com energia para arrefecimento. Já a implantação de painéis fotovoltaicos vem apresentando um crescimento exponencial em todo o mundo, pois estão se tornando cada vez mais baratos e eficientes, além de apresentarem uma ótima alternativa para a geração distribuída. Nesse sentido, o presente trabalho realizou um estudo comparativo entre módulos fotovoltaicos e telhados verdes (com vegetação Coroa-de-Frade e Babosa) na cidade de Caruaru. Foram comparados a economia e a produção de energia, bem como os custos necessários à instalação. Foi verificado que os telhados verdes economizam mais energia do que é produzido pelos módulos, além de apresentarem um maior retorno financeiro. Além disso, também foi analisada a influência das variáveis climáticas no desempenho térmico dos telhados verdes e energético dos painéis fotovoltaicos, o que possibilitou a criação de modelos para previsão do comportamento dos telhados. Os modelos mostraram boa aproximação com a realidade e revelaram que o retorno financeiro do telhado verde com Coroa-de-Frade, durante sua vida útil, é de pelo menos dez vezes maior que o investimento necessário para a sua implantação.

Palavras-chave: Telhados verdes. Energia. Painéis fotovoltaicos. Sustentabilidade em edificações. Clima.

ABSTRACT

With the growing concern about environmental and energy issues, the sustainability model has been applied more each day in the big cities, aiming to meet the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. The buildings section has a great impact on it, due to its large energy consumption. In this context, green roofs and solar photovoltaic systems are technologies that can contribute to sustainable building development. It is well known that green coverages provide countless environmental benefits, such as decrease the heat island effect and improve air quality. Regarding energy consumption, they are very efficient in cooling indoor temperature, contributing to thermal comfort and decreasing power consumption for air conditioning. With concern to photovoltaic systems, they have been on exponential growth worldwide, since they are becoming even more cheaper and efficient, and also represent a good alternative to distributed generation. In this sense, the present work performed a comparative study between photovoltaic modules and two types of green roofs, one with *Coroa-de-Frade*, and the other one with *Babosa*, located in the city of Caruaru. It was compared the energy savings from the green roofs and energy production from the panels, as well as the costs of installation of the systems. It can be concluded that green roofs save more energy than what it is generated by the modules, and also give a larger financial return. Moreover, the influence of climate variables on thermal performance of the green roofs and on the solar cell efficiency was analysed. This made it possible the creation of models to predict the roofs behaviour. The models showed good agreement with reality and revealed that the financial return of the green roof with *Coroa-de-Frade* is at least ten times the cost of its installation, during its life cycle.

Keywords: Green roofs. Energy. Photovoltaic panels. Sustainable edifications. Climate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Capacidade total instalada de energias renováveis no planeta, entre 2010 e 2018.....	16
Figura 2 -	Esquema das camadas de um telhado verde.....	20
Figura 3 -	Troca de calor e escoamento de água de um telhado verde versus um telhado convencional.....	23
Figura 4 -	Fluxo de calor que atravessa uma parede.....	25
Figura 5 -	Faixa espectral da radiação solar no espectro eletromagnético.....	27
Figura 6 -	Esquema do efeito fotoelétrico.....	28
Figura 7 -	Camadas do semicondutor.....	29
Figura 8 -	Ilustração esquemática de um módulo fotovoltaico de silício.....	29
Figura 9 -	Localização do Estado de Pernambuco, com destaque para a região do Agreste e para o município de Caruaru.....	39
Figura 10 -	Vegetações utilizadas nos telhados verdes investigados.....	40
Figura 11 -	Estrutura de telhados verdes e cerâmico existente nas instalações do IPA.....	41
Figura 12 -	Aparelhos utilizados no experimento.....	42
Figura 13 -	Disposição dos sensores de temperatura e umidade.....	43
Figura 14 -	Localização do IPA e INMET.....	45
Figura 15 -	Média anual da radiação global em Pernambuco.....	47
Figura 16 -	Radiação solar (kWh/m ²) em Caruaru, nos dias mais críticos do período em estudo.....	48
Figura 17 -	Comparação da energia produzida pelo painel fotovoltaico e a energia economizada pelo Telhado com Coroa-de-Frade e Telhado com Babosa.....	55
Figura 18 -	Energia, em Wh, poupada pelos telhados verdes em comparação com a gerada pelo painel fotovoltaico, em cada dia.....	57
Figura 19 -	Fluxo de calor do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e radiação solar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.....	59
Figura 20 -	Fluxo de calor do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e umidade relativa do ar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.....	60

Figura 21 -	Fluxo de calor do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e temperatura externa, nos dez primeiros dias de janeiro.....	61
Figura 22 -	Temperatura interna do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e radiação solar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.....	63
Figura 23 -	Temperatura interna do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e umidade relativa do ar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.....	64
Figura 24 -	Temperatura interna do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e temperatura externa do ar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.....	65
Figura 25 -	Produção de energia de um painel sobre um telhado convencional e sobre um telhado verde no dia 26/11/2015, no período de insolação.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação de telhados verdes segundo o tipo de uso, fatores construtivos e manutenção de acordo com o IGRA.....	21
Tabela 2 -	Limites estabelecidos para promover a sensação de conforto térmico.....	26
Tabela 3 -	Valores para transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para paredes e coberturas.....	26
Tabela 4 -	Configuração do Datalogger IP-747RH, medição de temperatura e umidade..	42
Tabela 5 -	Configuração do sensor de temperatura Datalogger Escort iMINI MX-IN-S-8-L.....	42
Tabela 6 -	Radiação global em cada dia (kWh/m ² dia).....	49
Tabela 7 -	Custos de cada cobertura para ambientes de 20 m ²	50
Tabela 8 -	Preços nacionalizados de equipamentos fotovoltaicos.....	50
Tabela 9 -	Preço do Watt-Pico instalado.....	50
Tabela 10 -	Carga térmica necessária e custo de resfriamento por metro quadrado, no intervalo de oito horas dos dias 04/11, 10/11, 26/11 e 27/11 de 2015.....	51
Tabela 11 -	Características do painel fotovoltaico utilizado, modelo RSM36-6-150P, em Condições Padrão de Teste (STC), massa de ar de 1,5, irradiância 1000W/m ² , temperatura da célula de 25°C.....	55
Tabela 12 -	Características do painel fotovoltaico utilizado, modelo CSI CS6P-255P, em condições padrão de teste (STC), massa de ar de 1,5, irradiância 1000W/m ² , temperatura da célula de 25°C.....	56
Tabela 13 -	Custos do sistema fotovoltaico e da implantação dos telhados verde.....	57
Tabela 14 -	Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, do fluxo de calor de cada telhado em relação à radiação solar.....	59
Tabela 15 -	Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, da umidade relativa do ar em relação ao fluxo de calor de cada telhado.....	62
Tabela 16 -	Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, da temperatura do ar externo em relação ao fluxo de calor de cada telhado.....	62
Tabela 17 -	Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, da temperatura interna de cada telhado em relação à radiação solar, umidade relativa e temperatura externa.....	65

Tabela 18 -	Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as variáveis externas e internas para o telhado cerâmico.....	66
Tabela 19 -	Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as variáveis externas e internas para o telhado com Coroa-de-Frade.....	66
Tabela 20 -	Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as variáveis externas e internas para o telhado com Babosa.....	67
Tabela 21 -	RMSE entre os valores previstos de temperatura interna em cada modelo e os observados para o telhado cerâmico, telhado com Coroa-de-Frade e telhado com Babosa.....	68
Tabela 22 -	Valores da temperatura interna do telhado cerâmico previstos e observados...	69
Tabela 23 -	Valores da temperatura interna do telhado com Coroa-de-Frade previstos e observados.....	70
Tabela 24 -	Valores da temperatura interna do telhado com Babosa previstos e observados.....	70
Tabela 25 -	Carga térmica necessária para se atingir o conforto térmico por m ² e para uma edificação de 20 m ² , no período de 23 de outubro de 2018 a 6 de abril de 2019, para os três tipos de telhados.	71
Tabela 26 -	Economia na conta de energia pelo uso dos telhados verdes, no período de 23 de outubro de 2018 a 6 de abril de 2019.....	72
Tabela 27	Produção de energia e tempo de retorno do investimento para cada configuração.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
BSh	<i>Hot semi-arid (steppe) climate</i>
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
COP21	21ª Conferência das Partes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGRA	<i>International Green Roof Association</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPA	Instituto Agrônomo de Pernambuco
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
MERRA-2	<i>Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NBR	Norma brasileira
PE	Pernambuco
PVPS	<i>Photovoltaic Power Systems Programme</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
UETV	Unidade Experimental de Telhados Verdes
UR	Umidade Relativa
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	17
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	17
1.2.1	Objetivos gerais.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	TELHADOS VERDES.....	19
2.1.1	Componentes.....	19
2.1.2	Classificação.....	20
2.2	TELHADOS VERDES, ILHAS DE CALOR E CONFORTO TÉRMICO.....	21
2.3	DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES.....	23
2.4	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	27
2.5	INTEGRAÇÃO TELHADO VERDE – PAINEL SOLAR.....	31
2.6	INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO.....	32
2.6.1	Influência nos telhados verdes.....	32
2.6.2	Influência nos módulos fotovoltaicos.....	34
2.6.3	Métodos para avaliar a relação entre variáveis.....	35
2.6.4	Regressão linear para criação de modelos.....	36
2.6.5	Métodos para comparação e validação de modelos.....	36
2.7	CÁLCULO DE ORÇAMENTO.....	37
2.8	<i>PAYBACK</i>	38
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	39
3.2	OBTENÇÃO DE DADOS.....	40
3.2.1	Dados de temperatura do ar e da umidade da UETV.....	40
3.2.2	Dados externos à UETV.....	44
3.2.3	Radiação solar em Caruaru.....	45
3.3	CÁLCULO DO ORÇAMENTO PARA INSTALAÇÃO DE TELHADOS VERDES E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	49

3.4	CÁLCULO DA ENERGIA ECONOMIZADA COM O USO DOS TELHADOS VERDES.....	51
3.5	ESCOLHA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	52
3.6	ANÁLISE DE DADOS E OBTENÇÃO DOS MODELOS.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E FINANCEIRO DE COBERTURAS VEGETAIS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	54
4.1.1	Análise energética de sistemas financeiramente semelhantes.....	54
4.1.2	Análise financeira considerando sistema de mesma ordem energética	56
4.2	INFLUÊNCIAS DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO.....	58
4.2.1	Análise de parâmetros climáticos no desempenho térmico dos telhados .	58
4.2.1.1	Inspeção visual.....	58
4.2.1.2	Previsão do desempenho dos telhados a partir de variáveis climáticas.....	66
4.2.2	Análise da eficiência de um painel fotovoltaico sobre a cobertura vegetal.....	72
5	CONCLUSÕES.....	75
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos da sociedade consiste em produzir energia de forma segura e sustentável, uma vez que esta é uma propulsora indispensável ao desenvolvimento econômico e social. Em um relatório publicado pela IEA (*International Energy Agency*), em 2005, estimava-se que o mundo iria requerer 50% a mais de energia em 2030 do que no referido ano e que a emissão de gases do efeito estufa iria ser 55% maior, considerando as políticas de utilização de combustíveis fósseis vigentes na época. Em um relatório mais atual (IEA, 2017), as estimativas são de que a demanda total de energia no mundo em 2040 será 34% maior do que em 2015, e que a emissão de gás carbônico será em torno de 12% maior. Isso mostra que a eficiência energética e o uso de tecnologias favoráveis ao meio ambiente vêm aumentando, em decorrência da preocupação mundial acerca do desenvolvimento sustentável. O Acordo de Paris, por exemplo, que selou as negociações da COP21 (Conferência das Partes) em 2015, estabeleceu que o aumento da temperatura global média deveria se deter até 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (SOUZA & CORAZZA, 2017).

Com a crescente preocupação global a respeito de questões energéticas e ambientais, as edificações podem desempenhar um papel fundamental na economia de energia (THAPA & PANDA, 2015). Apesar do consumo depender de alguns fatores, como diferenças sociais, clima, localização geográfica e hábitos culturais, é estimado que 40% do consumo anual de energia do mundo provenha de edifícios (HARPUTLUGİL, 2017). Os principais usos de energia em uma edificação correspondem ao resfriamento, ventilação, aquecimento, iluminação, entre outros; além do gasto energético inerente ao processo construtivo. Assim, a preservação dos recursos inclui a diminuição do consumo de energia durante a construção e manutenção de uma casa, através da criação de um projeto adequado, que saiba aliar as condições climáticas com os materiais empregados. Além disso, é importante que se faça uso de tecnologias alternativas, visando o aproveitamento dos recursos naturais para o fornecimento de energia e otimização do conforto térmico. Segundo a norma 55-2004, da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), o conforto térmico pode ser definido como “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. A criação de um clima interno adequado na edificação é muito importante, pois além de fazer com que os ocupantes se sintam confortáveis, é decisivo para o consumo de energia (THAPA & PANDA, 2015).

Neste contexto, se inserem os telhados verdes, que são sistemas tecnológicos complexos que adotam a vegetação como parte integrante do envelope da edificação. Tais coberturas

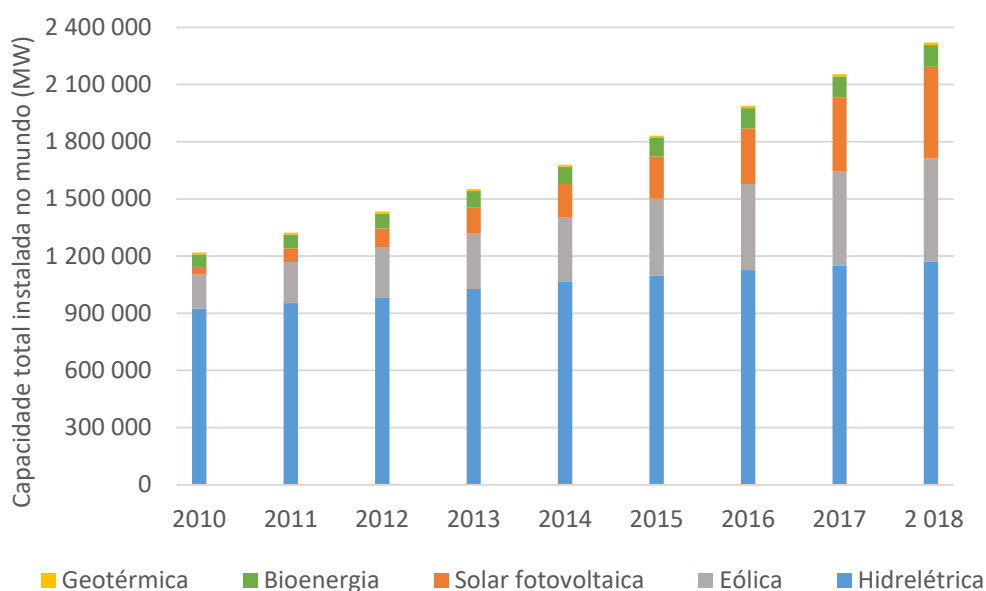
melhoram a hidrologia urbana, reduzem o consumo de energia, melhoram a qualidade do ar e favorecem a estética do ambiente. Os benefícios ambientais dos telhados verdes podem ser subdivididos em melhorias na qualidade ambiental e na conservação ecológica (ROWE, 2011). Em relação à qualidade ambiental, o telhado verde (antes um espaço sem utilização) é transformado em um local que irá reduzir o volume de escoamento e retardar o pico do fluxo das chuvas (MENTENS *et al.*, 2006; SPOLEK, 2008; CARTER & JACKSON, 2007). Com as mudanças climáticas tornando-se cada vez mais proeminentes, algumas das consequências que são observadas são verões e invernos mais rigorosos, com maior ocorrência de tempestades e chuvas torrenciais, resultando em inundações e deslizamentos de terra. Quando comparado a uma superfície impermeável, o solo tem a vantagem de reter parte da água da chuva e, conseqüentemente, reduzir a ocorrência de inundações. Assim sendo, aumentar o uso de telhados verdes contribui para a diminuição de inundações, entupimentos e sobrecargas dos sistemas de esgoto em áreas urbanas (SIMMONS *et al.*, 2008). Além disso, segundo Currie & Bass (2008), substituir uma cobertura comum por uma cobertura vegetal reduz a poluição do ar (pois a vegetação “sequestra” gás carbônico), e conseqüentemente ajuda a mitigar o efeito estufa. O uso de superfícies vegetais pode mudar significativamente valores do albedo e diminuir o fluxo de calor nas edificações (TSANG & JIM, 2011). Dessa forma, a temperatura do prédio é diminuída e os efeitos das ilhas de calor são reduzidos (TAKEBAYASHI & MORIYAMA, 2007). De acordo com Renterghem & Botteldooren (2009), o aumento de espaços verdes em áreas urbanas pode atenuar os ruídos provenientes da cidade. Em termos de conservação ecológica, telhados verdes criam habitats que ajudam a compensar a perda de ecossistemas (LUNDHOLM *et al.*, 2010).

Em relação ao seu uso, segundo Pendiuk *et al.* (2017), os países que mais aderiram a este tipo de cobertura foram Áustria, Suíça e Alemanha, principalmente para prevenir incêndios após a Segunda Guerra Mundial. Desses países, a Alemanha foi basicamente o responsável por tornar o telhado verde mais visível para o mundo, reconhecendo sua importância; mas isso aconteceu apenas nas últimas décadas do século XX (CANERO & REDONDO, 2010). No Brasil, o primeiro telhado verde foi construído no Palácio Gustavo Capanema, no Rio de Janeiro, em 1947, pelo arquiteto Lucio Costa (CANERO & REDONDO, 2010). Apesar disso, essa tecnologia ainda é escassamente propagada no Brasil, embora inúmeras espécies vegetais sejam propícias às condições climáticas do país (PENDIUK *et al.*, 2017).

No âmbito das tecnologias sustentáveis, dentre as fontes de energias renováveis, a energia fotovoltaica destaca-se por ser autônoma, por não poluir o meio ambiente, por ser uma fonte considerada inesgotável e renovável, por oferecer grande confiabilidade e por reduzir

custos de consumo no longo prazo (DUTRA *et al.*, 2013). A participação da energia solar na matriz energética global vem crescendo ao longo dos anos, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Capacidade total instalada de energias renováveis no planeta, entre 2010 e 2018.



Fonte: Irena (2018).

De 2010 a 2018, a capacidade instalada de energia fotovoltaica teve um aumento de 1113%, sendo a fonte renovável que apresentou o maior crescimento no período. Apesar disso, sua participação na matriz elétrica mundial ainda é discreta, com um total de 2,6% em 2018 (IEA – PVPS, 2019). No Brasil, esse percentual é ainda menor, com 0,1% em 2017 (BEN, 2018). Contudo, esse cenário deve mudar ao longo do tempo, visto que pesquisas envolvendo placas de silício mais eficientes podem baratear ainda mais sua fabricação. Estima-se que o valor das células de silício era em torno de US\$77/W em 1977 e, em 2017, o preço era de US\$ 0.21/W, ou seja, aproximadamente 370 vezes menor (U.S. Solar, 2017). Neste contexto, o Brasil seria bastante beneficiado devido a sua abundância de radiação solar (OLIVEIRA *et al.*, 2018). A grande extensão territorial e a expressiva área de telhados em unidades residenciais e comerciais, representam um enorme potencial para a geração solar centralizada e distribuída no país (BEZERRA, 2018). Para a geração distribuída, modalidade em que os consumidores residenciais, comerciais, industriais e rurais produzem a sua própria energia, se prevê um crescimento médio de 46,1% a.a. no uso de sistemas fotovoltaicos de 2016 até 2026 – ano em que deverá alcançar 3,3 GWp e 770 mil unidades consumidoras (MME & EPE, 2017).

De acordo com Lamnatou & Chemisana (2015), ao combinar telhados verdes e painéis fotovoltaicos tem-se uma melhoria na eficiência dos painéis, aliada à proteção da vegetação à exposição direta do sol, além de permitir o cultivo de uma maior variedade de espécies e o melhor aproveitamento do espaço disponível no telhado.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Considera-se que a investigação de tecnologias que colaborem cada vez mais para um desenvolvimento sustentável, visando a otimização dos recursos, é bastante relevante. Segundo Hui & Chan (2011), telhados verdes e painéis fotovoltaicos são tecnologias que podem contribuir para o desenvolvimento de edificações sustentáveis e na redução de gases do efeito estufa.

Nesse contexto, o Brasil, país de clima tropical e que possui elevada incidência solar, é bastante propício para a instalação dessas tecnologias. O incentivo desses sistemas deve, portanto, ser promovido, visto que traria muitos benefícios ao meio ambiente e, consequentemente, à população.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

São apresentados a seguir os objetivos gerais e específicos.

1.2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem por objetivo investigar o desempenho energético de telhados verdes e painéis fotovoltaicos instalados na cidade de Caruaru-PE, a partir de dados meteorológicos e dados coletados em protótipos de coberturas vegetais, analisando os custos necessários à instalação. Além disso, visa analisar a influência de variáveis climáticas no desempenho térmico dos telhados e energético dos módulos fotovoltaicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar o desempenho energético e financeiro com o uso de módulos solares e a economia resultante do emprego de telhados verdes, para o município de Caruaru, considerando sistemas financeiramente semelhantes;
- Relacionar variáveis climáticas, temperatura ambiente abaixo dos telhados e fluxo de calor;

- Analisar a influência da temperatura ambiente em uma placa solar, quando esta é instalada sobre uma cobertura vegetal.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Segue abaixo o referencial teórico utilizado para o embasamento das análises do presente trabalho.

2.1 TELHADOS VERDES

O telhado verde consiste em um sistema de construção de coberturas de edificações, sobre as quais se implantam solo e vegetação em uma camada impermeabilizada, com o objetivo de se aproveitar dos seus benefícios com relação às questões ambientais, arquitetônicas, estéticas, energéticas, entre outros. Não se sabe ao certo o local e a época de ocorrência da primeira cobertura verde. O primeiro exemplo documentado diz respeito aos jardins suspensos da Babilônia, mencionado na história de Heródoto, no século V antes de Cristo (ASCIONE, 2013). Ainda segundo Ascione (2013), mais de doze séculos depois, os telhados verdes foram utilizados também pelos Vikings, que viviam no norte da Europa, com a finalidade de proteger o envelope da edificação contra dispersões de calor, contra o vento e a chuva. A primeira tentativa de quantificar os benefícios energéticos ocorreu na Alemanha, por volta de 1960, quando a cobertura verde foi amplamente aplicada em prédios do setor terciário, graças a novas possibilidades estruturais oferecidas pelo concreto armado (ASCIONE, 2013).

2.1.1 Componentes

O telhado verde é composto por muitos materiais do seu topo até sua base: vegetação (parte que ficará visível na paisagem), substrato, filtro, camada drenante, barreira para as raízes, camada de isolamento, membrana à prova d'água e a estrutura. A Figura 2 ilustra um exemplo típico da disposição de camadas. Além destas podem existir componentes adicionais a depender das condições climáticas (CASTLETON *et al.* 2010). Um exemplo disso são os sistemas de irrigação, necessários em lugares com clima seco e árido, mas dispensáveis em locais úmidos e temperados.

Figura 2 – Esquema das camadas de um telhado verde.



Fonte: Adaptado de Vijayaraghavan (2016).




Cada camada apresenta funções diferentes, descritas a seguir:

- vegetação: fornece oxigênio ao ambiente, diminui a temperatura do telhado, ajuda na biodiversidade e na estética do ambiente;
- substrato: fornece nutrientes à vegetação e cria um meio adequado ao seu crescimento. Deve ser composto por uma mistura variada de materiais orgânicos e agregados;
- filtro de tecido: evita que drenos fiquem entupidos com material orgânico ou outras partículas;
- camada drenante: garante a drenagem de qualquer excesso de água do telhado, evitando um sistema encharcado e com peso excessivo;
- barreira para as raízes: protege o telhado de qualquer penetração de raiz ou material orgânico que possa vir a danificá-lo.

2.1.2 Classificação

Classificam-se os telhados verdes em extensivo, intensivo e semi-intensivo de acordo com o peso, substrato, manutenção, custo, vegetação e irrigação, como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de telhados verdes segundo o tipo de uso, fatores construtivos e manutenção de acordo com o IGRA.

			
	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Manutenção	Baixa	Periódica	Elevada
Irrigação	Nenhuma	Periódica	Regularmente
Vegetação	Musgo, Sedum, Ervas e Grama	Grama, Ervas, Arbustos	Relva, Arbustos e Árvores
Custo	Baixo	Intermediário	Alto
Peso	60 - 150kg/m ²	120 - 200kg/m ²	180 - 500kg/m ²
Uso	Camada de proteção ecológica	Telhado verde projetado	Parque/Jardim
Altura de construção	60 - 200mm	120 - 250mm	150 - 400mm

Fonte: Adaptado de Raji *et al.* (2015).

Devido ao pequeno acréscimo de carga, os telhados extensivos são adequados para o *retrofitting* de prédios (ou seja, o aumento da eficiência energética) já construídos, visto que em geral não requerem nenhum reforço adicional na estrutura (JAFFAL *et al.*, 2012). Além disso, são ideais para um eficiente manejo de águas pluviais com baixa necessidade de manutenção. Para Gargari *et al.* (2016), os telhados do tipo intensivo oferecem potencial para o aumento da biodiversidade. Além disso, segundo os autores, a qualidade do substrato influencia no desempenho da cobertura verde, visto que esta é exposta a condições adversas, como radiação solar, altas temperaturas, vento, chuva, etc. Assim, um substrato mal empregado pode comprometer a performance confiável e duradoura desses telhados, com relação à drenagem, impermeabilização, isolamento térmico e acústico e custos de manutenção.

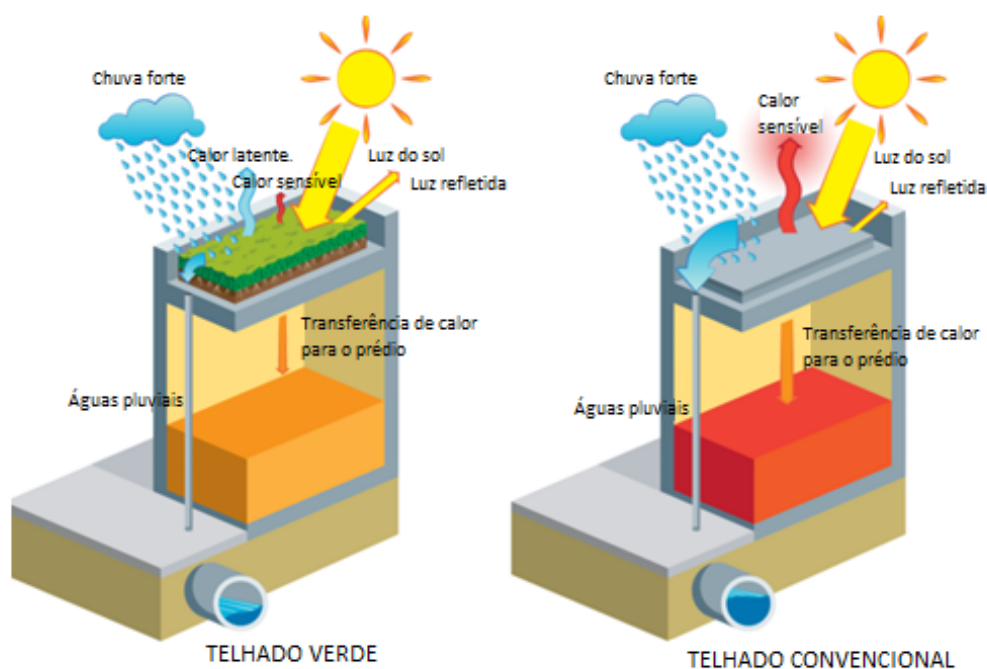
2.2 TELHADOS VERDES, ILHAS DE CALOR E O CONFORTO TÉRMICO

Estudos mostram que telhados verdes ajudam a mitigar as chamadas ilhas de calor, fenômeno bastante frequente nas grandes cidades (YANG, *et al.*, 2018; HERATH, *et al.*, 2018; DWIVEDI & MOHAN, 2018). Estas são causadas principalmente pelo calor advindo da atividade humana: veículos, centrais termelétricas, ar-condicionados, entre outras fontes

(RIZWAN *et al.*, 2007). Grandes cidades sofrem com altas temperaturas se comparadas ao ambiente rural, visto que tipicamente as superfícies urbanas possuem baixo albedo e elevada absorção de radiação solar (BEVILACQUA *et al.*, 2017). Além disso, a crescente industrialização e urbanização nos últimos anos tem afetado drasticamente a quantidade de edifícios urbanos, impactando assim o consumo de energia deste setor (SANTAMOURIS *et al.*, 2007). Áreas com alta temperatura durante o verão, alta densidade populacional, tráfego intenso, elevada industrialização e a presença de poucos espaços verdes, usam cada vez mais energia para ar-condicionados, além dos gastos com iluminação (SANTAMOURIS *et al.*, 2007). Dessa forma, o fenômeno das ilhas de calor tem sido amplamente estudado, sendo constatada a sua influência negativa sobre a saúde, o meio ambiente e o consumo de energia (SANTAMOURIS *et al.*, 2014; SUN & AUGENBROE, 2014).

Em climas tropicais e subtropicais, onde as ilhas de calor requerem um resfriamento artificial durante praticamente todo o ano para manter a temperatura interna de um ambiente em níveis aceitáveis, o estudo acerca da mitigação desse problema é ainda mais importante (LI & NORFORD, 2016). Por exemplo, estima-se que na Malásia, 45% do consumo de energia em casas residenciais está relacionado ao resfriamento e ao uso de ar-condicionados (ELIAS & LIN, 2015). O uso de coberturas e fachadas verdes se provaram eficientes na redução da temperatura interna do ambiente e a consequente economia no consumo de energia (CASTLETON *et al.*, 2010; ASCIONE *et al.*, 2013; CARPENTER & ZHOU, 2013). Em um estudo realizado por Stone *et al.* (2012) nas cidades de Boston, Chicago, Los Angeles, Nova Iorque e Portland, foi observado que o fenômeno das ilhas de calor foi mitigado devido ao aumento de cobertura vegetal nas cidades, com a construção de telhados verdes e plantio de árvores. De acordo com Niachou *et al.* (2001), a cobertura vegetal protege as edificações da radiação, controla a temperatura e a umidade do ambiente interno. Em ambientes fechados com vegetação plantada sob o teto, a temperatura abaixo da planta é menor do que a do ar que está acima. Ainda segundo os autores, o processo da transferência do calor em telhados verdes é completamente diferente do que ocorre nos telhados considerados “nus” (Figura 3). As plantas, com suas funções biológicas como fotossíntese, respiração, transpiração e evaporação absorvem uma parcela significativa da radiação solar. A radiação restante, transformada em carga térmica, influencia o ambiente interno ao passar pela cobertura vegetal e pela estrutura de contenção do telhado.

Figura 3 – Troca de calor e escoamento de água de um telhado verde versus um telhado convencional.



Fonte: Adaptado de EPA (2018).

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Um dos atributos mais importantes de uma edificação, além de garantir estabilidade e segurança para os seus ocupantes, é que ela proporcione boas condições de conforto térmico, respeitando o clima e o ambiente em que se insere (NICOL *et al.*, 2012). As variáveis de conforto térmico para o organismo são função da atividade física (metabolismo), da resistência térmica oferecida pela vestimenta e de parâmetros ambientais, como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (LAMBERTS, 2014). Estes por sua vez são função do clima do local, que varia de região para região, de acordo com as características geográficas. Uma parcela significativa da energia gasta com a climatização de um ambiente se deve às trocas térmicas entre os meios externo e interno (FOGIATTO, 2015). Os mecanismos de troca de calor entre um corpo/objeto e o ambiente se dão através de:

- trocas secas: condução, convecção e radiação;
- trocas úmidas: evaporação e condensação.

O calor perdido para o ambiente através de trocas secas é denominado calor sensível e é função das diferenças de temperatura entre o corpo e o ambiente. O calor perdido através das

trocas úmidas é denominado calor latente e envolve mudanças de fase (LAMBERTS, 2014). Neste trabalho, são consideradas apenas as trocas de calor secas. Tais conceitos são brevemente explanados a seguir.

- A **condução** pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas, devido às interações entre partículas. É possível quantificar processos de transferência de calor em termos de equações de taxa apropriadas. Para a condução térmica, a equação da taxa é conhecida como lei de Fourier (INCROPERA *et al.*, 2008). Para uma parede plana, unidimensional, a equação da taxa é representada na forma da Equação (1).

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

Onde: q_x é o fluxo térmico, em W/m², sendo a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área; $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura na direção x , em K/m, e k é o parâmetro condutividade térmica, em W/m.K, que é uma característica do material da parede (INCROPERA *et al.* 2008).

Nas condições de estado estacionário, com a distribuição de temperaturas linear, o gradiente de temperatura pode ser representado pela Equação (2) (INCROPERA *et al.* 2008).

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}, \quad (2)$$

Em que: L é a espessura da parede, T_1 é a temperatura em uma extremidade da parede e T_2 é a temperatura na outra extremidade. Assim combinando as Equações (1) e (2), o fluxo térmico é, então, determinado pela Equação (3).

$$q_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = -k \frac{\Delta T}{L}. \quad (3)$$

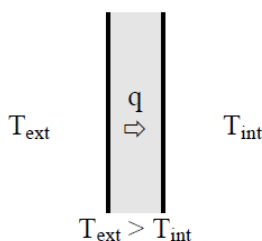
- A **convecção** se verifica quando os corpos estão em contato molecular e um deles, pelo menos, é um fluido. O processo possui duas fases: na primeira, o calor se transmite por

condução; na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo (LAMBERTS, 2014).

- A **radiação** ocorre mediante uma dupla transformação da energia: uma parte do calor do corpo com maior temperatura se converte em energia radiante que chega até o corpo com menor temperatura, onde é absorvida numa proporção que depende das propriedades da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor (LAMBERTS, 2014).

Para avaliar a troca de calor entre coberturas/paredes e o meio externo considerando condução, convecção e radiação, será utilizado um parâmetro denominado transmitância térmica. A transmitância térmica (U) pode ser definida como o inverso da resistência térmica total e é dependente de todas as formas de transferência de calor (FOGIATTO, 2015). A transmitância térmica é uma propriedade dos componentes construtivos relacionada à permissão da passagem de energia, medida em W/m^2K , estando relacionada à espessura do componente e à condutividade térmica dos materiais constituintes (LAMBERTS *et al.*, 2010). Ou seja, representa sua capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de energia por unidade de área e de diferença de temperatura. De forma ilustrativa o que ocorre está apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxo de calor que atravessa uma parede.



Fonte: Lamberts (2014).

A Equação (4) apresenta o fluxo de calor que atravessa a parede da Figura 4 (Lamberts, 2014).

$$q = U(T_{ext} - T_{int}) = U\Delta T, \quad (4)$$

Onde: U é a transmitância térmica (W/m^2K); ΔT é a diferença de temperatura entre os meios externo e interno (K); e q é o fluxo de calor por unidade de área (W/m^2).

A NBR 16401-2 (ABNT, 2008) estipula os parâmetros ambientais suscetíveis de produzir sensação aceitável de conforto térmico em 80% ou mais das pessoas. Os parâmetros

estipulados na Tabela 2 são válidos para grupos homogêneos de pessoas, usando roupa típica da estação e em atividade sedentária ou leve.

Tabela 2 – Limites estabelecidos para promover a sensação de conforto térmico.

Estação climática	Temperatura	Umidade Relativa	Velocidade média do ar
Verão	22,5°C a 25,5°C 23°C a 26°C	65% 35%	0,2m/s ¹ e 0,25m/s ²
Inverno	21°C a 23,5°C 21,5°C a 24°C	60% 30%	0,15m/s ¹ e 0,2m/s ²

¹Distribuição de ar convencional com grau de turbulência de 30% a 50%.

² Distribuição de ar convencional com grau de turbulência inferior a 10%.

Fonte: NBR 16401-2 (ABNT, 2008).

A NBR 15220-2 (ABNT, 2005) descreve procedimentos para determinação da transmitância térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. O atraso térmico (ϕ) pode ser definido como o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor. Um exemplo de atraso térmico é o tempo transcorrido entre a temperatura máxima externa e a temperatura máxima em um ambiente interno. Já o Fator Solar (FSO) é a razão entre a radiação solar incidente e a energia transmitida para o interior da edificação. A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) apresenta diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social quanto ao conforto térmico. Os valores admissíveis para a transmitância térmica, atraso térmico e fator solar de acordo com a vedação externa são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores para transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para paredes e coberturas.

Vedações Externas		Transmitância Térmica – U (W/m ² K)	Atraso Térmico – ϕ (Horas)	Fator Solar – FSO (%)
Paredes	Leve	$U \leq 3,0$	$\phi \leq 4,3$	$FSO \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,6$	$\phi \leq 4,3$	$FSO \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,2$	$\phi \leq 6,5$	$FSO \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,0$	$\phi \leq 3,3$	$FSO \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,3.FT^1$	$\phi \leq 3,3$	$FSO \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,0$	$\phi \leq 6,5$	$FSO \leq 6,5$

¹FT = $1,17 - 1,07.h^{-1,04}$, em que FT é o fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da zona bioclimática 8 e h é a abertura em dois beirais opostos, em cm.

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Um importante conceito para o controle do conforto térmico é a carga térmica, que pode ser definida como a quantidade total de calor retirada (resfriamento) ou colocada (aquecimento) em um recinto para proporcionar condições desejadas de temperatura e umidade no ambiente (MATOS, 2010). A carga térmica pode ser calculada de acordo com a Equação (5), segundo a NBR 16401-1 (ABNT, 2008). Neste trabalho levou-se em conta a penetração de calor por condução, convecção e radiação, desprezando-se a contribuição de calor por pessoas e equipamentos.

$$Q = UA\Delta T, \quad (5)$$

Onde: Q é a carga térmica (em W), U é a transmitância térmica (em W/m²K), A é a área (em m²) e ΔT é a diferença entre a temperatura interna do ambiente (em K) e a temperatura desejada para o conforto térmico. Nas Equações (1) a (5) também pode ser usada como unidade de temperatura o °C.

2.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia proveniente do sol se propaga na forma de radiação eletromagnética, possuindo componentes com diferentes comprimentos de onda, como mostrado na Figura 5. Uma grande parcela da radiação solar está compreendida entre 150nm e 4000nm (MOURA, 2007), sendo a luz visível a faixa entre 400nm e 700nm.

Figura 5 – Faixa espectral da radiação solar no espectro eletromagnético.



Fonte: adaptado de Fondriest (2014).

Disponível em: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/solar-radiation>.

A teoria ondulatória explica uma parcela dos fenômenos ópticos. No entanto, para entender a relação entre a radiação incidente em um material e a energia transmitida a ele, deve-se considerar a luz como partícula (este é o chamado comportamento dual da luz; ora onda, ora partícula, como postulado por Albert Einstein em 1905). Neste modelo, considera-se que a

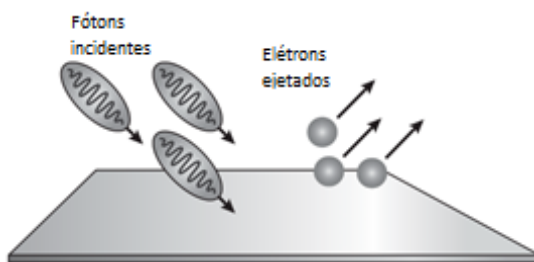
radiação é formada por pacotes quantizados (chamados de fótons) que carregam energia $h\nu$, Equação (6).

$$E = h\nu, \quad (6)$$

Onde: ν é a frequência da luz e h é a constante de Planck, igual a $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$ (proposta pelo cientista enquanto tentava explicar o fenômeno da radiação do corpo negro).

Com esta teoria foi possível explicar o efeito fotoelétrico, fenômeno aplicado amplamente na engenharia e que serviu de auxílio para o estudo do efeito fotovoltaico. O efeito fotoelétrico ocorre quando uma luz incide em uma placa metálica, e dela, consegue extrair elétrons (Figura 6). Para serem arrancados do material, os elétrons precisam que os fótons incidentes possuam uma energia mínima, equivalente ao *gap* de energia necessário para que os arranque.

Figura 6 – Esquema do efeito fotoelétrico.

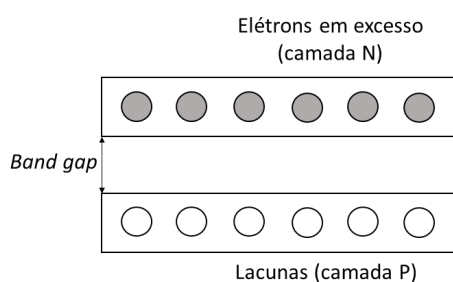


Fonte: Bembenek (2017).

O efeito fotoelétrico ocasiona a remoção de elétrons do material, mas não é capaz de criar uma tensão elétrica, diferentemente do fotovoltaico. O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, sobre uma célula formada por materiais semicondutores (VILLALVA, 2017). O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (BECQUEREL, 1839 *apud* VALLÊRA & BRITO, 2005). A história da energia fotovoltaica teve de esperar os desenvolvimentos científicos da primeira metade do século XX, como a explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein em 1905, o advento da mecânica quântica e, em particular, a teoria de bandas e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício (VALLÊRA & BRITO, 2005).

Para transformação de radiação em eletricidade, uma célula formada pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo N (possui excedente de elétrons) e outra do tipo P (possui lacunas ou “buracos”) é utilizada. A condutividade elétrica desses materiais se situa entre a dos metais (bons condutores) e a dos isolantes (CARNEIRO, 2010). A separação entre essas bandas é chamada de *band gap*. Uma ilustração simplificada é mostrada na Figura 7.

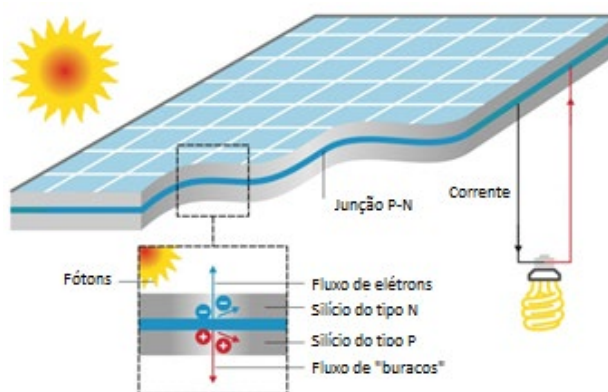
Figura 7 – Camadas do semicondutor.



Fonte: A autora (2019).

A conversão fotovoltaica de energia depende da natureza quântica da luz, que possui energia segundo a Equação (6). Ou seja, somente parte dos fótons incidentes (os que possuírem energia superior à do *gap*) pode ser convertida em eletricidade pela célula solar. No processo de conversão, a energia da luz incidente faz com que os elétrons vençam a separação, e ocupem as lacunas. Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá uma tensão elétrica sobre eles. Se houver um caminho elétrico entre os dois eletrodos, surgirá uma corrente elétrica. Um esquema é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Ilustração esquemática de um módulo fotovoltaico de silício.



Fonte: Adaptado de IEA (2011).

A radiação solar que atinge a superfície horizontal terrestre é composta por raios que incidem de várias direções, sendo absorvidos, refletidos e espalhados por moléculas de ar, poeira, vapor, etc. A radiação global é a soma da radiação direta e da radiação difusa. A primeira corresponde aos raios que chegam diretamente do sol em linha reta e incidem sob um plano horizontal com uma inclinação que depende do ângulo zenital do sol (sendo este zero quando o sol se encontra exatamente acima do objeto). Já a radiação difusa corresponde aos raios que chegam de forma indireta, resultado da difração na atmosfera e da reflexão da luz na poeira, nas nuvens e em outros objetos. Uma grandeza empregada para quantificar a radiação é a irradiância, geralmente medida em W/m^2 . Na superfície terrestre a irradiância solar é tipicamente em torno de 1000 W/m^2 , sendo este valor adotado como padrão na indústria para especificação e avaliação de módulos fotovoltaicos (VILLALVA, 2017). Ainda segundo o autor, a grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de um determinado intervalo de tempo é denominado insolação, cuja unidade é Wh/m^2 .

Um dos métodos utilizados para o cálculo da energia produzida pelo módulo fotovoltaico é o método da insolação, empregado quando se tem informação sobre a radiação solar diária. Este método é válido quando se considera o uso de controladores de carga com o recurso do MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), em que em cada instante o painel solar tem seu ponto máximo de aproveitamento (ABDELILAH *et al.*, 2018). Neste caso, a potência de saída de um painel fotovoltaico (em W) é dada pela Equação (7) (BETT & THORNTON, 2016).

$$P_G = A \cdot G \cdot \eta_{rel}(G, T) \cdot \eta_{STC} \cdot \eta_e \quad (7)$$

Onde: A é a área total do painel (em m^2), G é a radiação incidente global no plano inclinado (em W/m^2), $\eta_{rel}(G, T)$ é a eficiência que considera o desempenho do módulo de acordo com as condições climáticas, η_{STC} é a eficiência nas Condições Padrão de Teste (*Standard Test Conditions*) e η_e é a eficiência de outros equipamentos, como os inversores.

As Condições Padrão de Teste se referem à radiação $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$ e a temperatura do módulo de $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$, na qual o módulo gera uma potência P_{STC} . Assim, a eficiência nas

Condições Padrão de Teste, η_{STC} , informada no *datasheet* do módulo fotovoltaica é dada pela Equação (8).

$$\eta_{STC} = \frac{P_{STC}}{A \cdot G_{STC}} \quad (8)$$

2.5 INTEGRAÇÃO TELHADO VERDE – PAINEL SOLAR

Uma forma efetiva de melhorar a eficiência e reduzir a degradação causada pela temperatura é diminuir a temperatura do módulo fotovoltaico (MERAL & DINÇER, 2011). Uma possibilidade é através da integração de telhados verdes com painéis fotovoltaicos. Estima-se que isso foi feito pela primeira vez na Alemanha. Segundo Köhler *et al.* (2002), vários painéis solares foram instalados sobre uma superfície de vegetação de aproximadamente 4000 m² em uma fábrica em Berlim, no ano de 1998. Muitos trabalhos investigam a combinação de sistemas fotovoltaicos e telhados verdes, como Hui & Chan (2011), Chemisana & Lamnatou (2015), Ramshani *et al.* (2018), Movahhed *et al.* (2019), Osma-Pinto & Ordóñez-Plata (2019), entre outros.

Hui & Chan (2011) investigaram o comportamento de dois painéis fotovoltaicos idênticos instalados na cidade de Hong Kong; um sobre um telhado de concreto e outro sobre um telhado verde intensivo. Eles analisaram a eletricidade gerada para cada um desses cenários, das 11h às 14h de um dia ensolarado. O resultado obtido foi que, na média, o sistema integrado produziu em torno de 4,3% mais energia do que o painel sobre o telhado de concreto.

Chemisana & Lamnatou (2014) avaliaram experimentalmente a integração de painéis fotovoltaicos com telhados verdes através de protótipos instalados na Universidade de Lleida, na Espanha. Nesse estudo, dois painéis foram instalados sobre dois telhados verdes: um sobre a vegetação *Gazania* e o outro sobre *Sedum* e comparados com um painel solar instalado sobre cascalho. A conclusão da pesquisa foi que a sinergia da vegetação com o painel melhora a eficiência deste: houve aumento de 1,29% e de 3,33% na potência com o uso da *Gazania* e *Sedum*, respectivamente.

A integração de painéis fotovoltaicos e telhados verdes foi analisada de forma experimental por Osma-Pinto & Ordóñez-Plata (2019). O estudo investigou a influência de três fatores: altura de instalação da placa (25, 50, 75 e 100 cm), tipo de telhado (concreto e telhado verde) e velocidade do vento (0, 1,15 e 2,10 m/s) na geração de energia solar em dois prédios na Colômbia. A conclusão é que o tipo de telhado afeta a temperatura ao redor da placa e essa

influência é mais crítica para alturas de instalação mais baixas. No entanto, este efeito não foi observado para alturas maiores que 100 cm. No geral, o sistema integrado produz $1 \pm 0,4\%$ e $1,3 \pm 0,4\%$ mais energia do que um painel fotovoltaico instalado sobre o telhado de concreto.

2.6 INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO

A informação climática é de fundamental importância na atualidade para as atividades antropogênicas, servindo para a previsão de fenômenos meteorológicos, no planejamento e na simulação da produção de energia de fontes renováveis, no auxílio e na otimização da produção agropecuária, dentre outras inúmeras aplicabilidades. Analisar como os fatores climáticos influenciam nesses sistemas permite o gerenciamento e planejamento antecipados, de modo a otimizar seu desempenho, permitindo um melhor aproveitamento dos recursos naturais, financeiros e humanos.

2.6.1 Influência nos telhados verdes

O desempenho térmico de telhados verdes está bastante relacionado com o clima (LIN *et al.*, 2013). Algumas pesquisas realizadas na Europa e na América do Norte mostraram que o desempenho da cobertura vegetal e de edificações varia para diferentes ambientes, indicando que para analisar os benefícios de um telhado verde é necessário fazer estudos na região específica onde o mesmo está instalado (TAN & SIA, 2009; LUNDHOLM *et al.*, 2010).

Lin *et al.* (2013) analisaram o desempenho térmico de telhados verdes extensivos em diferentes condições climáticas. Os sistemas foram construídos em Taipei (ilha com o clima subtropical) e em Chiayi (ilha de clima tropical). O microclima foi monitorado nas duas ilhas concomitantemente e a longo prazo. As diferenças e semelhanças do desempenho térmico em ambos os locais, em diferentes horas do dia, e ao longo de estações diferentes, bem como o impacto desses fatores foram analisados. Os resultados mostraram que a eficácia no resfriamento é relativamente alta no clima tropical no verão, e que a eficiência no isolamento é mais pronunciada no clima subtropical. A chuva reduziu a eficácia do isolamento no telhado verde extensivo. Os estudos confirmaram que a efetividade térmica está significativamente relacionada ao clima.

Getter *et al.* (2011) investigaram como a temperatura de um telhado (tanto na superfície quanto a um metro acima) e o fluxo de calor são influenciados por uma vegetação extensiva

durante diferentes estações do ano na cidade de Michigan. Os valores foram comparados com um telhado de pedra, que serviu como referência. Os resultados mostraram que o maior impacto ocorreu no verão. O envelope vegetal reduziu o fluxo de calor em 167% no verão e em 13% no inverno. Quanto à temperatura, o telhado de pedra registrou temperaturas bem mais elevadas, estando até 20°C mais quente do que o telhado verde, no verão. Para Alexandri & Jones (2006), além da temperatura elevada, a umidade reduzida também contribui para o aumento da eficiência dos telhados verdes, visto que a vegetação libera vapor d'água quando necessário para manter a temperatura abaixo de um certo nível e isso é feito com muito mais eficiência em um ar insaturado.

Em um estudo realizado por Meneses (2015), o desempenho térmico de um telhado semi-extensivo foi investigado durante o verão, em Portugal. Foram analisadas quatro bandejas com diferentes vegetações e substratos, acima de pequenas câmaras, e foram monitorados temperaturas (temperaturas ambiente externa e interna, temperatura da superfície do telhado verde e do substrato), umidades relativa do ar externa e interna, fluxo de calor e radiação solar. Os principais resultados e conclusões são listados a seguir:

- as temperaturas no interior das bandejas, quando comparadas à temperatura externa, apresentaram menor variação;
- apesar da radiação solar ter se mantido praticamente constante durante todo o período, as temperaturas interna e externa às bandejas apresentaram um comportamento mais irregular. Assim, conclui-se que a máxima radiação solar não representa a máxima temperatura, mostrando que a temperatura varia com outros fatores, além da radiação;
- nos dias em que houve redução da temperatura ambiente e da radiação (30% e 40%, respectivamente), não houve mudança significativa no comportamento das temperaturas do telhado verde (temperatura da superfície e no substrato). No entanto, essa diminuição influenciou o fluxo de calor ao longo do dia, causando reduções de 60-80%. Durante a noite, o fluxo de calor não foi afetado;
- associado à redução da temperatura e da radiação solar, houve um aumento da umidade relativa do ar em 20% no interior da câmara;
- o tipo de vegetação e do substrato exercem influência no fluxo de calor. Diferentes substratos possuem diferentes condutividades térmicas. Além disso, um parâmetro específico de cada vegetação denominado LAI (do inglês *Leaf Area Index*, ou Índice de Área Foliar) também afeta o isolamento. O LAI é a razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo.

2.6.2 Influência nos módulos fotovoltaicos

Em relação à energia solar fotovoltaica, a potência de saída do módulo não apenas está relacionada com a radiação incidente, mas também com a temperatura do mesmo. Segundo HULD *et al.* (2008), a variação geográfica da temperatura ambiente e da radiação solar anual, causa uma diminuição anual da performance do painel fotovoltaico de 3% a 13% em relação ao desempenho nas Condições Padrão de Teste. A alta temperatura nos telhados aumenta um pouco a condutividade no semicondutor cristalino, mas diminui a voltagem da célula (HUI & CHAN, 2011), reduzindo sua potência. A temperatura do módulo está empiricamente relacionada à temperatura ambiente através da Equação (9) (KENNY *et al.*, 2006).

$$T_{\text{mod}} = T_{\text{amb}} + (T_{\text{NOCT}} - T_0) \cdot \frac{G}{G_0}, \quad (9)$$

Onde: T_{mod} é a temperatura do módulo (em °C); T_{amb} é a temperatura ambiente (em °C); G é a radiação incidente (em W/m²); T_{NOCT} é a temperatura nominal de operação da célula (usualmente adota-se um valor de $T_{\text{NOCT}} = 48^\circ\text{C}$); T_0 e G_0 são valores de referência, em que $T_0 = 20^\circ\text{C}$ e $G_0 = 800 \text{ W/m}^2$. Com a temperatura do módulo, pode-se determinar a eficiência relativa $\eta_{\text{rel}}(G, T)$, dada pela função empírica apresentada na Equação (10) (HULD *et al.*, 2008). Através dessa eficiência avalia-se a influência da temperatura externa sobre o desempenho da placa.

$$\eta_{\text{rel}}(G, T) = (1 + \alpha \Delta T_{\text{mod}}) \cdot (1 + c_1 \ln G' + c_2 \ln^2 G' + \beta \Delta T_{\text{mod}}), \quad (10)$$

Sendo: $G' = \frac{G}{G_{\text{STC}}}$ e $\Delta T_{\text{mod}} = T_{\text{mod}} - T_{\text{STC}}$. As constantes são $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,

$\beta = -4,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $c_1 = 0,033$ e $c_2 = -0,0092$. Atentar que nas Condições Padrão de teste,

$\eta_{\text{rel}} = 1$.

2.6.3 Métodos para avaliar a relação entre variáveis

Existem inúmeras formas de avaliar a relação entre variáveis distintas. Uma delas é através de inspeção visual, em que dados reais medidos concomitantemente podem ser plotados, permitindo-se investigar o perfil através do tempo (HOICKA & ROWLANDS, 2011). Assim, através da representação gráfica é possível analisar tendências de comportamento e tirar conclusões preliminares a respeito da relação entre os parâmetros. É um tipo de avaliação qualitativa.

Outra forma é através do coeficiente de correlação de Pearson (representado por r), que mede o grau de associação linear entre duas variáveis aleatórias X e Y (PETERNELLI, 2004). Trata-se de uma métrica para variáveis quantitativas. Pode ser utilizado para confirmar que existe uma relação entre parâmetros após avaliação visual preliminar, por exemplo. O coeficiente de correlação varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o valor de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o valor da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis (FIGUEIREDO & SILVA, 2009). A Equação (11) pode ser utilizada para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (11)$$

Em que: x_1, x_2, \dots, x_n e y_1, y_2, \dots, y_n são os valores medidos de ambas as variáveis. Diferentes interpretações da magnitude dos coeficientes são sugeridas na literatura. Para Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; escores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Já segundo Dancey e Reidy (2005), a classificação é ligeiramente diferente: $r = 0,10$ até $0,30$ (fraco); $r = 0,40$ até $0,6$ (moderado); $r = 0,70$ até 1 (forte).

2.6.4 Regressão linear para criação de modelos

A análise de regressão consiste na realização de uma análise estatística com o objetivo de verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes. Em outras palavras, consiste na obtenção de uma equação que tenta explicar a variação da variável dependente pela variação do(s) nível(is) da(s) variável(is) independente(s) (PETERNELLI, 2004).

O modelo de regressão linear com duas ou mais variáveis explicativas corresponde ao Modelo de Regressão Linear Múltipla. Admitindo que a_1, a_2, \dots, a_k sejam as variáveis supostas independentes e f a variável dependente. Dada uma amostra de n observações $\{a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ki}, f_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, o modelo de regressão linear múltipla é dado pela Equação (12).

$$f_i = \beta_0 + \beta_1 a_{1i} + \beta_2 a_{2i} + \dots + \beta_k a_{ki} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

Em que: $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ são os coeficientes da equação e ε_i é o erro do modelo em relação aos valores observados. Este erro deve ser minimizado. Para determinar os estimadores de mínimos quadrados de $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ deve-se minimizar o erro quadrático total $\sum \varepsilon_i^2$, conforme a Equação (13).

$$S(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (f_i - \beta_0 - \beta_1 a_{1i} - \dots + \beta_k a_{ki})^2. \quad (13)$$

O mínimo da função $S(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ é obtido derivando-a em relação a $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$, e igualando o resultado a zero. Com a função minimizada, encontram-se os coeficientes e, por conseguinte, a equação de regressão.

2.6.5 Métodos para comparação e validação de modelos

Um parâmetro utilizado para validação de modelos de regressão é a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*). De acordo com Chai & Draxler (2014), é uma métrica estatística padrão muito utilizada para mensurar a performance

de um modelo no campo de estudo da meteorologia. A raiz quadrada do erro quadrático médio é apresentado pela Equação (14).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{prev_i} - V_{ref_i})^2}{N}}, \quad (14)$$

Onde: V_{prev_i} é o i ésimo valor previsto, V_{ref_i} é o i ésimo valor de referência e N é o tamanho da amostra. Segundo Swalin (2018), o RMSE é mais apropriado para comparação de modelos do que para validação deles em si, visto que seu valor absoluto não indica o quão próximo da realidade é um modelo.

Outra métrica bastante utilizada na literatura é o coeficiente de determinação (usualmente referido como r^2). Ele é uma medida do quanto o modelo consegue explicar os valores observados (GRUE, 2018). Caso o modelo tenha sido obtido através da regressão linear simples, o coeficiente de determinação nada mais é do que o coeficiente de Pearson elevado ao quadrado. Por variar de 0 a 1, indica a força da correlação, mas não a direção.

Outra forma bastante intuitiva de validar se um modelo se ajusta aos pontos observados se dá através do erro relativo percentual, dado pela Equação (15).

$$\text{Erro \%} = \frac{V_{prev} - V_{ref}}{V_{ref}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

Sendo: V_{prev} o valor previsto segundo a modelagem e V_{ref} o valor de referência (medido in loco). Quanto aos valores de erros relativos percentuais admissíveis, alguns autores adotam um erro percentual aceitável de 10% (POMPEU & NATALE, 2014; SILVA *et al.*, 2003; MICHEREFF *et al.*, 2008).

2.7 CÁLCULO DE ORÇAMENTO

O orçamento é considerado uma etapa básica no planejamento, controle e programação de obras da construção civil (KNOLSEISEN, 2003). Para Coêlho (2001), o orçamento para obras de construção civil compreende o levantamento da quantidade de materiais e serviços, seus respectivos preços unitários e os preços globais do investimento. Segundo Knolseisen (2003), o orçamento como uma estimativa de custo de uma obra visa prover bases para ações decisivas e chegar a conclusões a respeito da viabilidade econômico-financeira de um projeto.

Quanto aos custos dos telhados verdes, Minke (2004) sugere que a variação dos custos é muito alta, a depender do sistema adotado, podendo variar em torno de 80% o custo de um para outro tipo de cobertura verde. Quando a obra é planejada com o uso de telhados verdes, o custo fica mais próximo ao telhado convencional, enquanto que reformas de telhados possuem o custo mais elevado (SAVI, 2012). Esse custo elevado está em maior parte relacionado a sobrecarga na estrutura, de acordo com Hewage & Bianchini (2011).

No que se refere aos custos dos módulos fotovoltaicos, estes são geralmente expressos em reais por Watt-pico (R\$/Wp), índice este que depende de sua tecnologia de fabricação, e geralmente também da sua eficiência de conversão. No caso do Brasil, de acordo com Galdino (2012), o mercado é amplamente dominado pelos módulos de silício cristalino. Ainda segundo o autor, o custo total de implantação do sistema fotovoltaico isolado inclui, além do custo do sistema (equipamentos e demais materiais), todos os custos de serviços, os quais, por sua vez, incluem mão-de-obra e logística (transporte).

2.8 PAYBACK

O *payback* é um parâmetro econômico simples, utilizado para avaliar a atratividade de um investimento, uma vez que determina o prazo de recuperação do mesmo (MARQUEZAN & BRONDANI, 2006). O *payback* é um indicador do tempo de retorno do investimento, em anos (ou ainda meses), podendo ser obtido pela fração do investimento realizado sobre o custo anual de energia economizada, como mostrado na Equação (16) (*payback* simples). Este parâmetro possibilita analisar o tempo de recuperação do investimento e sua principal vantagem é a facilidade de cálculo (CUNHA *et al.*, 2017). Entretanto, não considera o efeito da inflação ao longo do tempo.

$$Payback \text{ simples} = \frac{I}{C}, \quad (16)$$

Em que: I é o investimento realizado (em R\$) e C é o custo anual da energia economizada (R\$/ano).

Segundo Cunha *et al.* (2017), para que a medida apresentada seja vantajosa, o *payback* deve ser inferior à vida útil da tecnologia proposta.

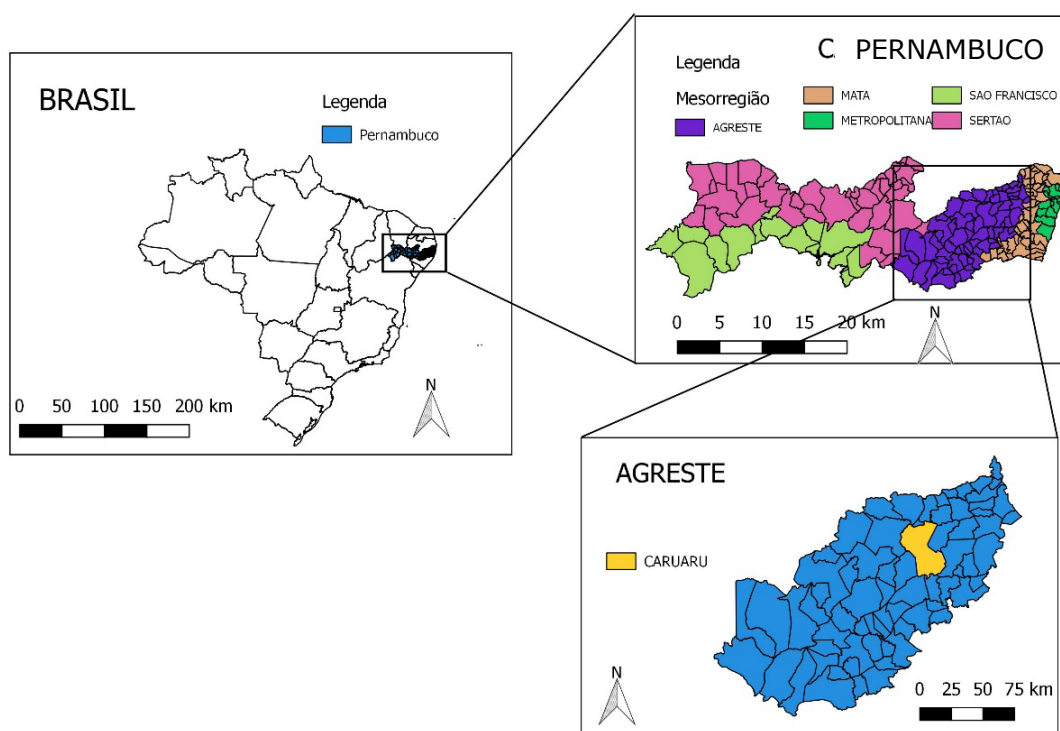
3 METODOLOGIA

Segue abaixo a metodologia utilizada no presente trabalho.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é no município de Caruaru (Figura 9), que está localizado no estado de Pernambuco, situado geograficamente entre a latitude sul $8^{\circ}16'53''$ e a longitude oeste $35^{\circ}58'25''$ (IBGE, 2019). Está inserido na mesorregião do Agreste Pernambucano e na microrregião do Vale do Ipojuca, possuindo uma população de 356.872 habitantes, segundo o censo de 2018, sendo a cidade mais populosa do interior pernambucano. O município se localiza a oeste da capital, Recife, distando aproximadamente 140 km.

Figura 9 – Localização do Estado de Pernambuco, com destaque para a região do Agreste e para o município de Caruaru.



Fonte: A autora (2019).

O clima de Caruaru segundo a classificação *Köppen-Geiger* é do tipo semiárido (BSH – Semiárido Quente), possuindo verões quentes e secos e invernos amenos e chuvosos, de acordo com Alvares *et al.* (2014). A quadra chuvosa se inicia em fevereiro com chuvas de pré-estação

(chuvas que ocorrem antes da quadra chuvosa), com seu término ocorrendo no final do mês de agosto (MEDEIROS, 2018). No entanto, o semiárido do Nordeste apresenta redução da oferta hídrica em função da alteração nos padrões pluviométricos com diminuição da frequência e intensidade das chuvas (ASSIS *et al.*, 2015). Ainda segundo os autores, a região também tem como características um alto potencial para evaporação da água, em função da grande disponibilidade de energia solar, temperaturas do ar elevadas e baixa umidade do ar. A estação seca de Caruaru ocorre geralmente entre agosto e dezembro e a temperatura média diária do ar é em torno de 30°C (SANTOS & FARIAS, 2017). A vegetação predominante no município é a caatinga, tendo como árvores típicas: juazeiro, baraúna, mulungú, arbustos do tipo velameiro, marmeleiro e urtiga, broméliaceas do tipo macambira, gravatá e as cactáceas do tipo facheiro, xique-xique, mandacará, Coroa-de-Frade e palmatória (MEDEIROS, 2018).

3.2 OBTENÇÃO DE DADOS

A obtenção dos dados de temperatura interna do ar e da umidade interna, além dos dados de radiação solar, umidade externa e temperatura externa do ar é explanada a seguir.

3.2.1 Dados de temperatura do ar e umidade da UETV

Foram utilizados dados de temperatura e umidade da Unidade Experimental de Telhados Verdes (UETV), que corresponde a uma edificação cedida pela administração geral do IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), localizado na zona rural da cidade de Caruaru. Neste espaço foram implantados dois telhados verdes com vegetações diferentes: Babosa (*Aloe vera*), Figura 10a, e Coroa-de-Frade, Figura 10b.

Figura 10 – Vegetações utilizadas nos telhados verdes investigados.

a) Babosa.



b) Coroa-de-Frade.



Fonte: Mattos (2015).

Segundo Florêncio (2016), essas vegetações foram escolhidas por serem facilmente encontradas na região e possuírem resistência adequada a períodos de seca. Além disso, foi instalado também um telhado cerâmico para servir de referência para a análise de desempenho dos telhados verdes. Cada cobertura possui, aproximadamente, uma área de 4 m². Segundo Santos *et al.* (2009), a estrutura foi construída com alvenaria de tijolos cerâmicos e lajes nervuradas com blocos cerâmicos. No que se refere à ventilação, em cada ambiente interno (abaixo do respectivo telhado) existe uma abertura na parede com blocos cerâmicos vazados (cobogó) de 8 cm de largura e 6 cm de altura. O espaço com Coroa-de-Frade possui um cobogó com 40 furos, e os ambientes com Babosa e com o cerâmico convencional possuem cobogós com 64 furos cada. Há ainda uma tela no cobogó do local com Coroa-de-Frade e uma tela sobre metade dos furos do cobogó do ambiente com Babosa. Cada espaço possui pé direito máximo de 3,30 m, com declividade de 20% e pé-direito mínimo de 2,90 m. A estrutura descrita é ilustrada na Figura 11.

Figura 11 – Estrutura de telhados verdes e cerâmico existente nas instalações do IPA.



Fonte: Mattos (2015).

Foram realizadas medidas da temperatura das paredes de cada recinto, bem como da temperatura e umidade da superfície interna de cada cobertura. Esses dados, utilizados nos estudos de Santos (2016), foram coletados entre 8 de outubro de 2015 e 28 de abril de 2016, totalizando um período de pouco mais de seis meses. De acordo com o autor, as medições no teto foram efetuadas e registradas através do aparelho *Datalogger* IP-747RH, e para os dados

coletados na parede foi utilizado o *Datalogger* Escort iMINI MX-IN-S-8-L. Os aparelhos foram programados para medir e armazenar os parâmetros de forma simultânea e instantânea, no horário local, integralizando os dados a cada 30 minutos. Essa configuração foi realizada no intuito de observar a variabilidade dos parâmetros ao longo do dia. A Figura 12 apresenta os *Dataloggers* utilizados. As Tabelas 4 e 5 mostram respectivamente as configurações dos *Dataloggers* IP-747RH e Escort iMINI MX-IN-S-8-L.

Figura 12 – Aparelhos utilizados no experimento.

a) *Datalogger* IP-747RH.



b) *Datalogger* Escort iMINI MX-IN-S-8-L.



Fonte: Santos (2016).

Tabela 4 – Configuração do *Datalogger* IP-747RH, medição de temperatura e umidade.

Sensor	Faixa	Resolução	Precisão
Temperatura (°C/°F)	-40 a -10 e 40 a 70	0,1°C	±2°C
	-10 a 40	0,1°C	±1°C
Umidade (%)	0 a 20% e 80 a 100%	0,1°C	±5°C
	20 a 40% e 60 a 80%	0,1°C	±3,5°C
	40 a 60%	0,1°C	±3°C

Fonte: Santos (2016).

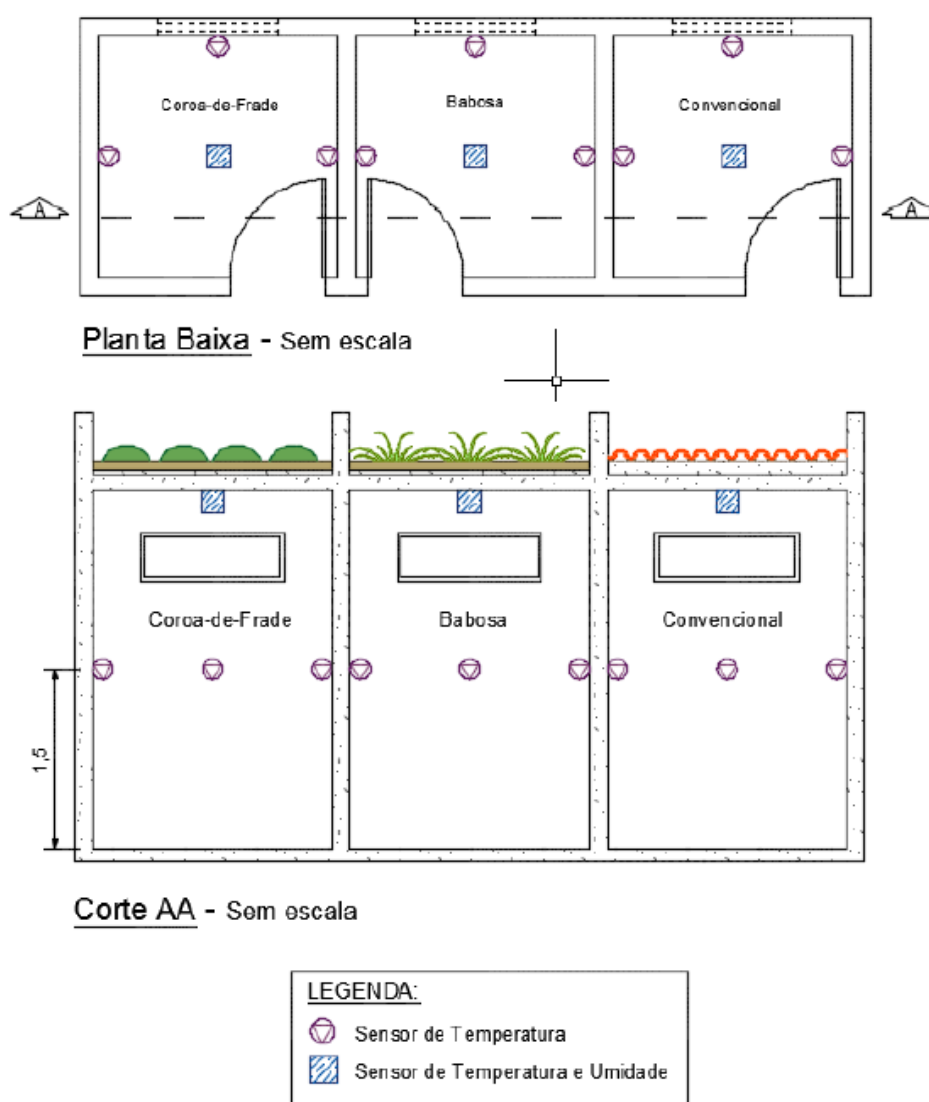
Tabela 5 – Configuração do sensor de temperatura *Datalogger* Escort iMINI MX-IN-S-8-L.

Variável	Valor
Resolução	0,5°C
Precisão	±0,5°C
Memória	1868 amostras
Intervalo de registro	1 – 255 min
Temperatura ambiente	-40°C – 70°C
Umidade ambiente	< 80% UR

Fonte: Santos (2016).

Segundo Santos (2016), os dados foram coletados quinzenalmente, em visitas *in loco*, armazenados em planilhas eletrônicas e posteriormente tratados. O autor ainda relata o posicionamento dos equipamentos: os *Dataloggers* das paredes internas foram instalados a 1,5 metros do chão, visando garantir a mesma condição em todos os ambientes, já que o telhado convencional possui azulejos até esta altura. Além disso, os sensores IP-747RH foram posicionados no centro do teto de cada ambiente. O esquema descrito é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Disposição dos sensores de temperatura e umidade.



Fonte: Mattos (2015).

Com o objetivo de investigar o comportamento das coberturas nos dias mais críticos, Santos (2016) analisou dados de temperatura externa dos meses de novembro de 2015 a março de 2016 em um gráfico do tipo *boxplot*, através do *software Statistica 7*. Nesta análise, o autor

pôde visualizar as médias de cada mês, bem como as temperaturas máximas e mínimas. O mês de novembro/2015 foi o que apresentou as maiores temperaturas do período. Sendo assim, o autor avaliou as temperaturas de cada dia desse mês. A partir dos dados diários do mês de novembro, observou-se que os menores valores de mediana da temperatura externa foram registrados nos dias 04 e 10/11, e os maiores nos dias 26 e 27/11.

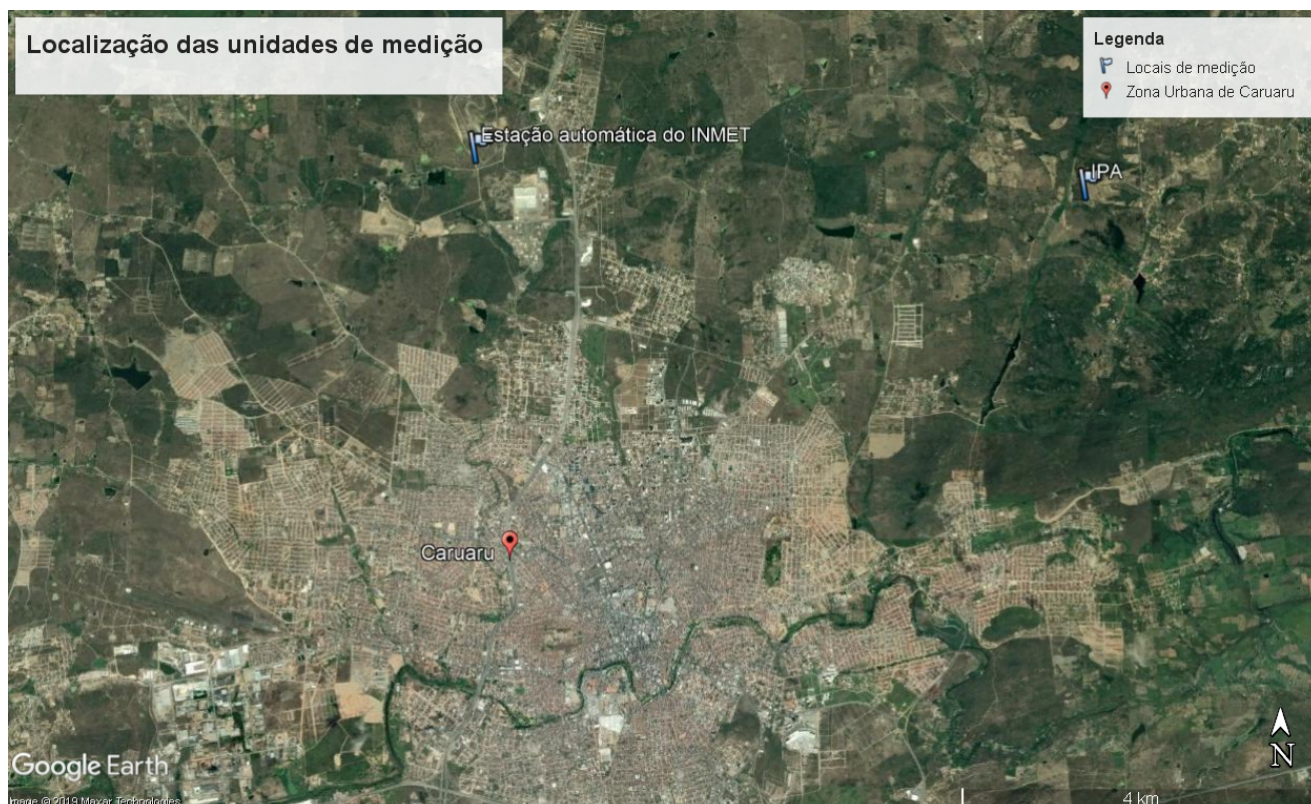
Nos estudos de Florêncio (2016) foi realizada uma análise comparativa do comportamento térmico dos telhados apresentados na Figura 11 nos dias mais críticos (04, 10, 26 e 27 de novembro), em um ambiente de 20 m². Em seu trabalho, o autor fez levantamentos do quanto seria economizado em um aparelho de ar-condicionado nestes dias caso a cobertura da edificação fosse coberta por vegetação (neste caso Coroa-de-Frade e Babosa), ao invés do telhado convencional cerâmico. Visto que no presente estudo dar-se-á uma comparação energética e financeira de painéis fotovoltaicos com os telhados verdes e cerâmicos, estudados por Florêncio (2016), os dias analisados serão os mesmos. Além disso, os dados de radiação utilizados para os cálculos de geração solar são do período concomitante aos dados de temperatura e umidade dos telhados.

3.2.2 Dados externos à UETV

Além dos dados da UETV, também foram obtidos dados de temperatura do ar, radiação solar e umidade de uma estação automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada próxima ao centro urbano de Caruaru. É importante ressaltar que o horário dos dados é em UTC (*Coordinated Universal Time* – Tempo Universal Coordenado), assim, o fuso horário é GMT 0. Dessa forma, é preciso deslocar os dados 3 horas para trás. Também é importante destacar que são fornecidos dados máximos e mínimos a cada hora. Nas análises do presente trabalho, foi realizada a média entre o valor mínimo e máximo a cada hora.

A Figura 14 indica a localização da UETV e da estação automática do INMET, em que se pode visualizar a posição de cada estação em relação a outra, e das estações em relação ao centro urbano da cidade. A distância entre as duas estações é de aproximadamente 7 km.

Figura 14 – Localização do IPA e INMET.



Fonte: Google Earth (2019).

Coordenadas - Estação automática do INMET: $-8,236069^\circ$, $-35,98550^\circ$.

UETV (instalações do IPA): $-8,240014^\circ$, $-35,920722^\circ$.

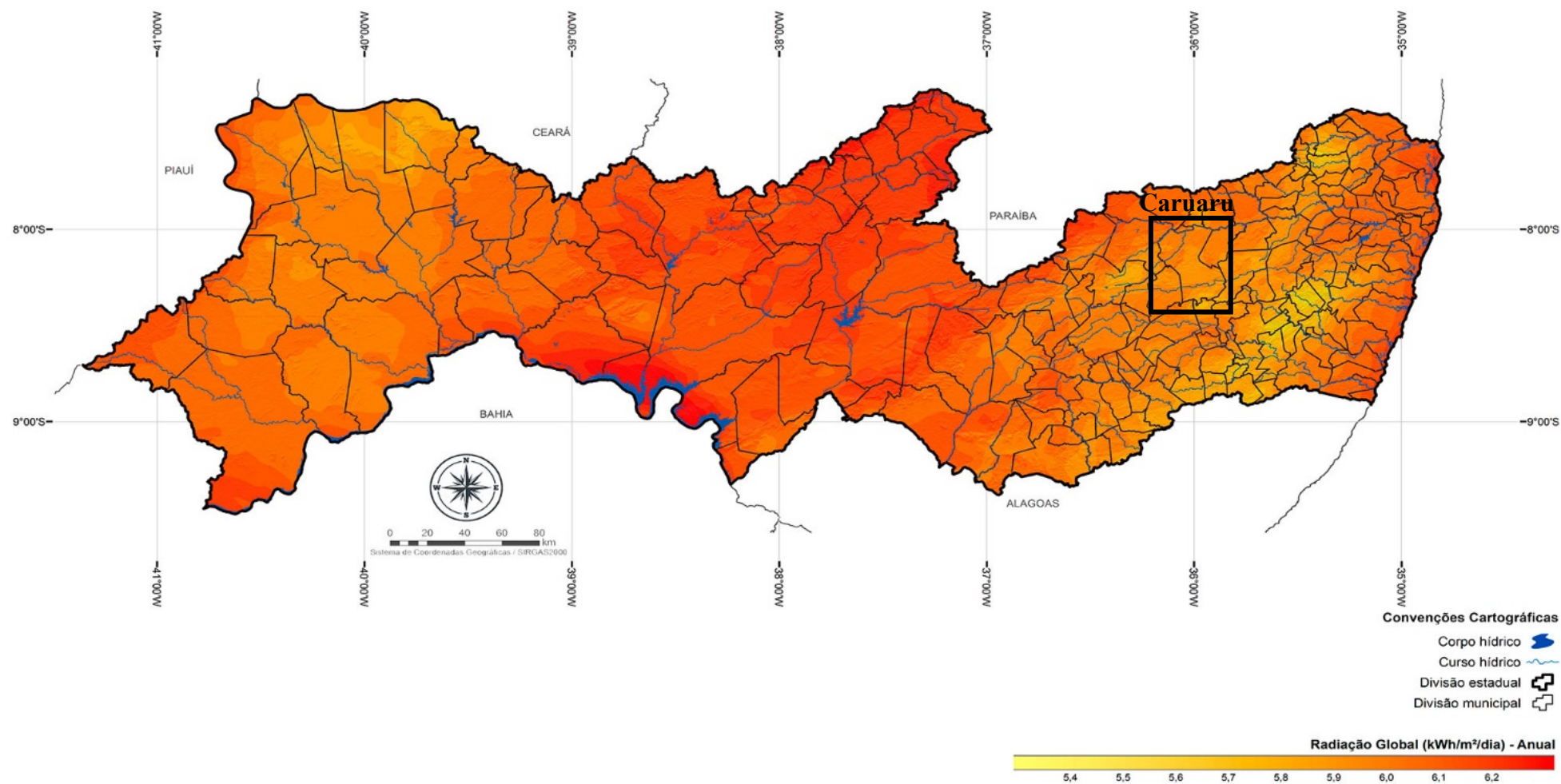
Segundo nota técnica do INMET, uma estação meteorológica de superfície automática é composta de uma unidade de memória central (*Datalogger*), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento), que integra os valores registrados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora. Para temperatura, umidade e radiação, a amostragem é feita a cada 5 segundos e o valor instantâneo usado em relatórios meteorológicos é a média em cada minuto (12 valores de amostragem). Para a velocidade do vento, a amostragem é realizada uma vez por segundo, e nos relatórios são usados valores médios de períodos de 10 minutos.

3.2.3 Radiação solar em Caruaru

Os parâmetros de radiação solar, obtidos no portal do INMET, são utilizados neste trabalho com intuito de estimar a potência de saída através da Equação (7) e, consequentemente,

a geração de energia por painéis fotovoltaicos no período considerado. O Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado em 2017 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, disponibiliza os valores médios anuais da irradiação solar no Brasil e, de acordo com esse estudo, o Nordeste é a região que possui os melhores parâmetros. A região apresenta o maior nível de irradiação no plano inclinado (média anual de 5,52 kWh/m²/dia) e menor variabilidade interanual durante o ano (PEREIRA *et al.*, 2017). Por essa razão, essa região, em particular sua porção semiárida, onde a elevada irradiação está associada à ocorrência de baixa precipitação e menor cobertura de nuvens ao longo do ano, é candidata a ser o destino prioritário de investimentos em geração de energia elétrica a partir da fonte solar, como já se observa nos leilões da ANEEL (BEZERRA, 2018). O estado de Pernambuco possui cerca de 87,6% de sua extensão territorial dentro do Semiárido (SANTOS, 2016), e a cidade de Caruaru está inserida neste cenário. Segundo o Atlas Eólico e Solar de Pernambuco realizado pela Aeroespacial (empresa de consultoria que atua no setor de energia) e publicado em 2017 pelo Governo do Estado de PE, o potencial instalável no estado é de 3 TW, com uma produção em torno de 6800 TW/ano, o que supera, em muito, o cenário futuro de demanda de energia elétrica do Brasil, como indica a Nota Técnica EPE 13/15 (EPE, 2015). A Figura 15 retrata a média anual da radiação global, em kWh/m²/dia, incidente em Pernambuco.

Figura 15 – Média anual da radiação global em Pernambuco.

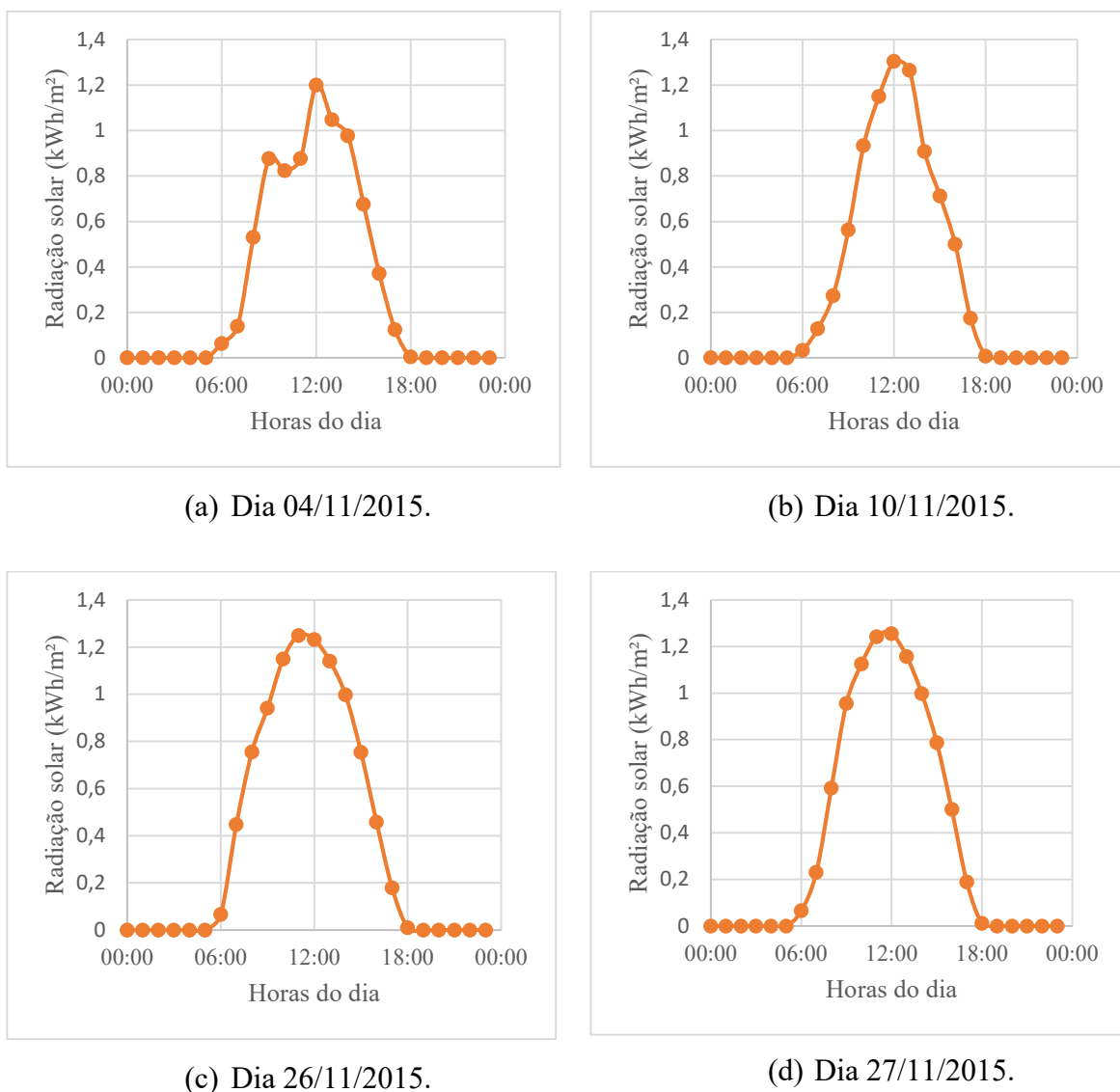


Fonte: Governo do Estado de Pernambuco (2017).

Como observado na Figura 15, embora Caruaru não receba tanta radiação quanto outras cidades do estado, ela ainda apresenta uma média anual de radiação global diária acima da média do Nordeste, com valores em torno de 5,9 kWh/m²dia, segundo a escala do mapa.

Os dados utilizados para o cálculo da produção de energia fotovoltaica correspondem à radiação solar dos dias 04, 10, 26 e 27 de novembro de 2015. Esses dados são da estação automática do INMET. A Figura 16 apresenta o perfil da radiação em cada um desses dias.

Figura 16 – Radiação solar (kWh/m²) em Caruaru, nos dias mais críticos do período em estudo.



Fonte: A autora (2019).

O valor da radiação global para cada um desses dias é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Radiação global em cada dia (kWh/m²dia).

Dia	Radiação solar (kWh/m²dia)
04/11/2015	7,71
10/11/2015	7,95
26/11/2015	9,39
27/11/2015	9,11

Fonte: Adaptado de INMET (2015).

Como apresentado na Tabela 6, os valores estão acima da média do município, caracterizando dias com elevada incidência de radiação.

O cálculo da potência de saída dos painéis será realizado com auxílio da teoria apresentada no referencial teórico deste trabalho, em que, em primeira análise, não será considerada a influência da temperatura na eficiência dos painéis. Além disso, visto que a radiação global é medida em uma superfície horizontal (por um piranômetro) e que para a estimativa do potencial solar necessitaríamos da radiação incidente em um plano inclinado, é estimado um ganho na produção. Esta é uma prática comum, visto que o alto custo instrumental e a necessidade de pessoal operacional dificultam a implantação e operação de uma rede de estações de radiometria solar com superfícies inclinadas. Neste trabalho adotou-se um ganho de 0,9%, de acordo com o modelo de Perez (1990). Também foi adotado um fator de aproveitamento da energia gerada de 75%, devido a perdas em geral (inversor, circuitos elétricos, perdas por sujeira e poluição, sombreamento, etc), com base nos estudos da EPE (2012).

3.3 CÁLCULO DO ORÇAMENTO PARA INSTALAÇÃO DE TELHADOS VERDES E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Florêncio (2016) realizou levantamentos de custos e prazos de execução para os telhados cerâmicos e para os telhados verdes com Coroa-de-Frade e com Babosa. O autor considerou que a edificação possui apenas uma laje de concreto para realizar a estimativa de custo das coberturas. Para o telhado tradicional, com telhas cerâmicas de capa e canal tipo paulista, foi utilizada a tabela do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) e a composição de custos da PINI para determinar os custos dos insumos. Para os telhados verdes, os custos e prazos de execução foram obtidos através de análise de informações fornecidas por empresas especializadas na execução destes tipos de telhado. Foram solicitados orçamentos de algumas empresas, sendo adotado o que melhor se adequou à

realidade da região. A Tabela 7 apresenta os valores encontrados pelo autor, em reais/m² e o valor total em reais para os ambientes de 20 m².

Tabela 7 – Custos de cada cobertura para ambientes de 20 m².

Cobertura	Custo por m² (R\$)	Custo total (R\$)
Telhado Cerâmico	144,25	2.885,06
Telhado com Coroa-de-Frade	168,19	3.363,76
Telhado com Babosa	198,19	3.963,76

Fonte: Florêncio (2016).

Para obtenção do investimento necessário à instalação dos painéis solares é utilizado como referência o trabalho de Nakabayashi (2015). Em sua pesquisa, o autor considerou preços internacionais de equipamentos (módulos e inversores), e adicionou custos com frete, seguro, taxas, tributos e importação, de onde obteve o custo nacionalizado. Além disso, foram levados em conta custos com cabeamento, materiais extras, projeto e instalação, resultando no preço por Watt-pico instalado. Tal valor é referente ao ano de 2015; assim, a comparação com os valores encontrados por Florêncio (2016) será coerente. As Tabela 8 e Tabela 9 mostram os valores de cada item para sistemas de pequeno porte (até 5 kW).

Tabela 8 – Preços nacionalizados de equipamentos fotovoltaicos.

Equipamentos	Módulos	Inversores (< 5 kW)
Preços internacionais dos equipamentos (€ /Wp)	0,56	0,25
Equipamentos + Frete + Seguro (€/Wp)	0,02	0,02
Impostos + Taxas + Importação (€/Wp)	0,16	0,20
Custo total (€/Wp)	0,74	0,47
Taxa de câmbio (BRL/EUR)	3,25	3,25
Preço nacionalizado (R\$/Wp)	2,42	1,52

Fonte: Nakabayashi (2015).

Tabela 9 – Preço do Watt-Pico instalado.

Instalação	Até 5 kW (R\$/Wp)
Cabos e proteções	0,75
Sistema de fixação	1,25
Demais custos (conexão e projeto)	1,25
Total (R\$/Wp)	3,25

Fonte: Nakabayashi (2015).

Somando os valores dos equipamentos e da instalação tem-se um investimento total de R\$7,19/Wp.

O período base para o cálculo dos custos dos painéis fotovoltaicos e dos telhados verdes é 2015/2016.

3.4 CÁLCULO DA ENERGIA ECONOMIZADA COM O USO DOS TELHADOS VERDES

Em relação à energia economizada pelos telhados verdes, são utilizados como referência os resultados obtidos por Florêncio (2016). Em seu estudo, o autor considerou a penetração de calor na edificação por condução, convecção e radiação. Para o cálculo da carga térmica necessária para se atingir a temperatura de conforto em cada ambiente, Florêncio (2016) utilizou a Equação (5). O autor adotou o valor de $1,84 \text{ W/m}^2\text{K}$ para o coeficiente de transmitância térmica (U) da cobertura com telha cerâmica e laje de concreto (ABNT 2005) e o valor de $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a cobertura verde (NIACHOU *et al.*, 2001). A temperatura tomada como referência para o conforto térmico foi de 24°C , pois está dentro dos limites estabelecidos pela NBR 16401-2:2008 (ABNT, 2008). O autor também admitiu que os aparelhos de resfriamento funcionam apenas durante as oito horas em que os valores de carga térmica são os mais críticos. Os dias utilizados para análise foram 04, 10, 26 e 27 de novembro de 2015. Após calcular a carga térmica necessária para se atingir o conforto térmico em cada ambiente, foi possível comparar a energia poupada com o uso dos telhados verdes e, conseqüentemente, o dinheiro economizado na conta de energia. Para o cálculo do custo do resfriamento, Florêncio (2016) utilizou a tarifa da classe de consumo residencial da CELPE (Companhia Energética de Pernambuco), homologada pela ANEEL, de $0,39524 \text{ R\$/kWh}$. Esta tarifa não inclui tributos e outros elementos que fazem parte da conta de luz, como ICMS, Taxa de Iluminação Pública e Encargo de Capacidade Emergencial. A vigência dessa tarifa é de 29/04/2015 a 28/04/2016, período coerente com a análise. Os resultados obtidos pelo autor são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Carga térmica necessária e custo de resfriamento por metro quadrado, no intervalo de oito horas dos dias 04/11, 10/11, 26/11 e 27/11 de 2015.

Data	Coroa-de-Frade		Babosa		Cerâmico	
	CTn (W/m ²)	CR (R\$/m ²)	CTn (W/m ²)	CR (R\$/m ²)	CTn (W/m ²)	CR (R\$/m ²)
04/11/2015	7,54	0,0030	7,43	0,0029	62,01	0,0245
10/11/2015	7,53	0,0030	8,44	0,0033	62,56	0,0247
26/11/2015	9,43	0,0037	10,37	0,0041	125,21	0,0495
27/11/2015	11,18	0,0044	11,03	0,0044	124,48	0,0492

Legenda: CTn = carga térmica necessária | CR = custo de resfriamento

Fonte: Florêncio (2016).

3.5 ESCOLHA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Primeiramente, é importante mencionar que para comparação dos custos de cada sistema, é considerado que as edificações possuem apenas a laje da cobertura, sendo necessário a construção de cada telhado. Para os telhados verdes, considera-se os custos necessários à construção de cada cobertura vegetal. Para o sistema fotovoltaico (cabe ressaltar que ele é hipotético, não havendo nenhum protótipo desse sistema), considera-se necessária a construção de um telhado cerâmico e em seguida, a instalação do painel, logo, existem custos associados ao telhado cerâmico e à instalação da placa.

Para comparação do desempenho energético e financeiro de telhados verdes e de painéis fotovoltaicos, foram adotadas duas placas: uma com potência de 150 Wp, da marca *Risen*, modelo RSM36-6-150P e outra com potência de 255 Wp, da marca *Canadian Solar*, modelo CSI CS6P-255P. A primeira, de 150 Wp, foi escolhida para o primeiro cenário (análise de sistemas financeiramente semelhantes), visto que seu custo de instalação mais o custo para construir um telhado cerâmico é similar ao custo de construção do telhado verde com Coroa-de-Frade ou com Babosa. O segundo painel, de 255 Wp, foi adotado para o segundo cenário (análise de sistemas de mesma ordem energética), visto que ele produz, aproximadamente, a mesma energia economizada pelo uso dos telhados verdes. Para escolha dessa placa foi preciso realizar o cálculo da energia produzida, de acordo com a Equação (7), de algumas placas, até por fim se obter a que melhor se adequou à situação.

3.6 ANÁLISE DE DADOS E OBTENÇÃO DOS MODELOS

Para avaliação qualitativa da relação entre as variáveis externas à cobertura (radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa) e a temperatura do ar logo abaixo dos telhados e o fluxo de calor, é realizada a inspeção visual do perfil das variáveis, em que dados dos dez primeiros dias de janeiro são plotados em gráficos. Os perfis de fluxo de calor por m² em cada ambiente, bem como a temperatura interna, são plotados para os primeiros dez dias de janeiro. O fluxo de calor foi calculado de acordo com a Equação (4). Cada perfil é comparado com a temperatura externa, umidade relativa do ar e radiação solar a fim de se verificar padrões a partir da inspeção visual.

De modo a quantificar essa relação é calculado o coeficiente de correlação de Pearson, em pares (para cada variável externa e interna), através da Equação (11).

Em seguida, com o objetivo de prever o comportamento térmico dos telhados a partir das variáveis externas, foi realizada uma análise de correlação. Os dados correspondentes aos dez primeiros dias de janeiro são utilizados para prever os nove dias seguintes, através de modelos que foram criados utilizando o método da regressão linear múltipla. As equações foram criadas com o auxílio do *software Excel*, baseadas nas Equações (12) e (13). Com as equações criadas é possível prever o comportamento térmico dos telhados a partir de informações de variáveis externas. Os modelos criados receberam o nome de RUT (a temperatura interna depende da radiação, umidade e temperatura externa), UT (a temperatura interna depende da umidade e da temperatura externa) e T (a temperatura depende apenas da temperatura externa).

Para verificar qual modelo se adequa melhor a realidade, é calculada a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), através da Equação (14), que fornece um valor absoluto permitindo comparar os modelos. O modelo que tiver o menor RMSE é adotado para representar a temperatura interna do respectivo telhado.

Para analisar e quantificar o quanto o modelo adotado se aproxima da realidade é calculado o erro percentual, utilizando a Equação (15).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos da análise energética e financeira realizada, bem como da avaliação da influência de parâmetros climáticos no desempenho dos telhados verdes e dos painéis fotovoltaicos.


4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E FINANCEIRO DE COBERTURAS VEGETAIS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Nesta seção são apresentados os resultados do estudo comparativo entre o desempenho energético e financeiro dos telhados com Coroa-de-frade e com Babosa em relação a módulos fotovoltaicos instalados sobre um telhado cerâmico. São comparadas a energia gerada pelo painel solar para acionar um sistema de condicionamento térmico com a economia de energia em sistemas de ar-condicionado proporcionada pelo uso dos telhados verdes. Além disso, foram analisados os custos necessários à instalação desses sistemas. Os custos de manutenção dos sistemas não são levados em consideração nessa análise.

4.1.1 Análise energética de sistemas financeiramente semelhantes

No intuito de comparar o desempenho energético de sistemas financeiramente equivalentes, o sistema fotovoltaico é definido de tal forma que os investimentos para os telhados verdes e para os painéis sejam semelhantes. Para subsidiar essa escolha, a Tabela 7, que traz os custos dos telhados verdes e do convencional, foi utilizada como referência. Visto que o sistema com painel solar necessita de uma cobertura, deve-se somar o custo do telhado cerâmico ao do módulo fotovoltaico. A placa adotada é de silício policristalino, da marca Risen, modelo RSM36-6-150P, com potência 150 Wp. As especificações do módulo são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Características do painel fotovoltaico utilizado, modelo RSM36-6-150P, em Condições Padrão de Teste (STC), massa de ar de 1,5, irradiância 1000W/m², temperatura da célula de 25°C.

	Máxima potência	150Wp
	Voltagem na máxima potência	18,3V
	Corrente na máxima potência	8,2A
	Voltagem de circuito aberto	22,3V
	Corrente de curto-circuito	8,81A
	Eficiência do painel	15,15%
	Área do painel	1,0064m ²
	Placa com 36 células	

Fonte: Neosolar (2019).

Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-risen-rsm36-6-150p-150wp.html>.

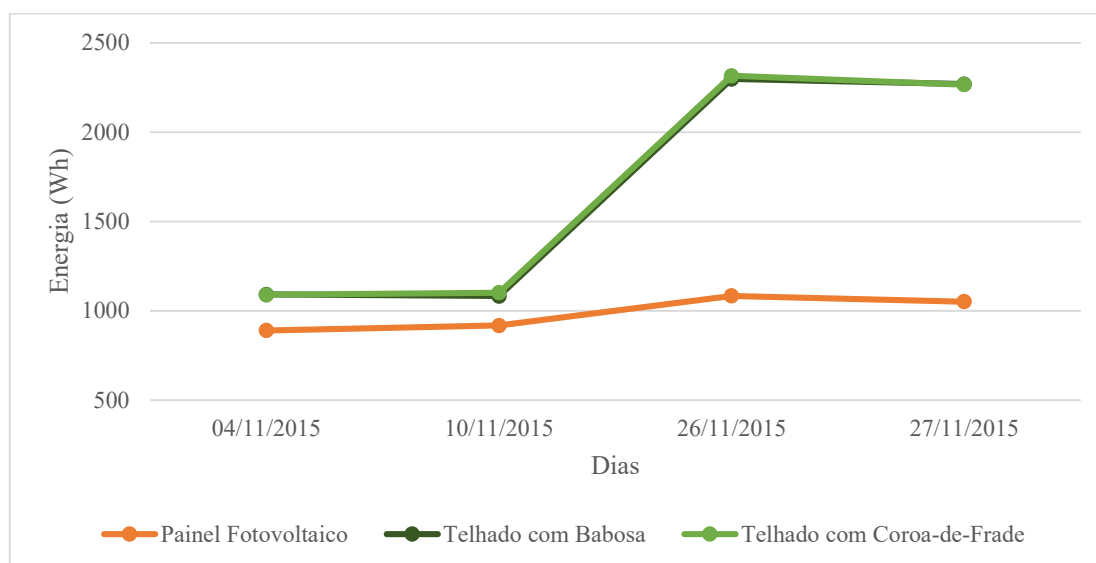
O custo do sistema de 150 Wp, calculado pela Equação (17) é R\$ 1.078,50.

$$150 \text{ Wp} \times \text{R\$ } 7,19/\text{Wp} = \text{R\$ } 1.078,50 \quad (17)$$

Somando o custo da placa fotovoltaica com o valor do telhado cerâmico (que custa R\$ 2.885,06), o valor total necessário ao investimento do sistema é de R\$ 3.963,56.

Através dos dados de radiação solar global fornecidos pela estação automática de Caruaru, do INMET, é calculada a produção de energia, em Wh, em cada dia, através da Equação (7). Os valores obtidos são comparados com a economia de energia gerada pelos telhados verdes, encontradas por Florêncio (2016). Os resultados são esquematizados na Figura 17.

Figura 17 – Comparação da energia produzida pelo painel fotovoltaico e a energia economizada pelo Telhado com Coroa-de-Frade e Telhado com Babosa.




Fonte: A autora (2019).

Como pode ser observado, a energia economizada pelos telhados verdes é superior à produzida pelo painel, especialmente nos dias 26 e 27 de novembro de 2015. Isto pode ser explicado pelo fato de que a temperatura do ar abaixo do telhado cerâmico atingiu picos de 32,7°C no dia 26 e 32,6°C no dia 27, passando a maior parte do dia com temperaturas superiores ao da cobertura vegetal. A diferença das temperaturas entre os telhados resultou que a carga térmica necessária para atingir a temperatura de conforto térmico do telhado cerâmico em relação aos telhados verdes fosse em torno de treze vezes maior no dia 26 e onze vezes maior no dia 27. Isso proporcionou uma grande economia de energia nesses dias com o uso dos telhados verdes ao invés do convencional. Embora a radiação tenha sido maior nos dias 26 e 27 do que nos dias 4 e 10, o aumento não foi tão significativo a ponto de competir com os telhados verdes.

4.1.2 Análise financeira considerando sistemas de mesma ordem energética

Neste tópico são avaliados os custos associados às configurações que economizem (no caso dos telhados verdes) ou produzam (no caso dos módulos fotovoltaicos) a mesma quantidade de energia. A placa adotada é de silício policristalino, da marca *Canadian Solar*, modelo CSI CS6P-255P, de potência nominal 255 Wp. As características dessa placa são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 – Características do painel fotovoltaico utilizado, modelo CSI CS6P-255P, em condições padrão de teste (STC), massa de ar de 1,5, irradiância 1000W/m², temperatura da célula de 25°C.

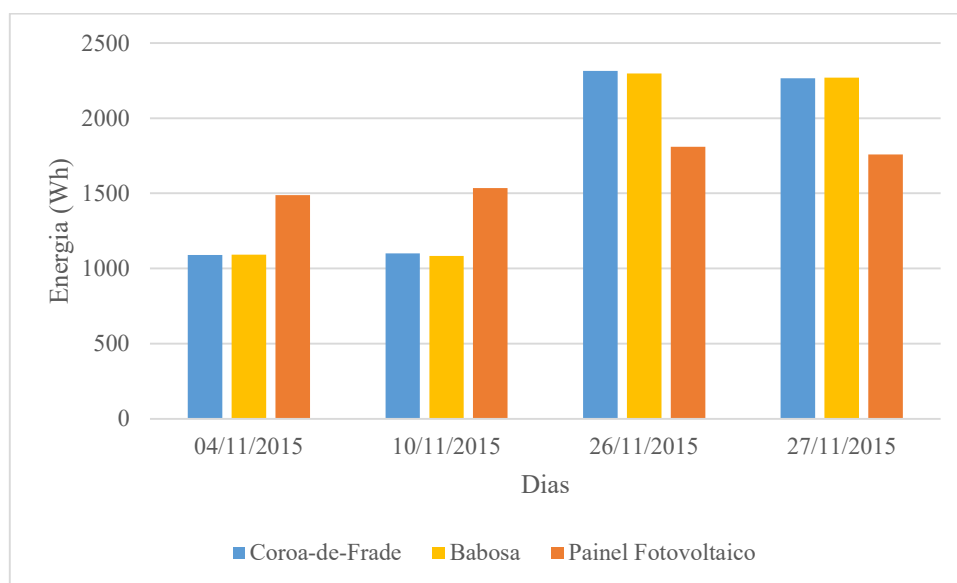
	Máxima potência	255Wp
	Voltagem na máxima potência	30,2V
	Corrente na máxima potência	8,53A
	Voltagem de circuito aberto	37,4V
	Corrente de curto-circuito	9A
	Eficiência do painel	15,85%
	Área do painel	1,6085m ²
	Placa com 60 células	

Fonte: Neosolar (2019).

Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-canadian-csi-cs6p-255p-255wp.html>

A Figura 18 apresenta a energia poupada pelos telhados verdes com Coroa-de-Frade e com Babosa e a produzida pelo painel, em Wh, para cada dia.

Figura 18 – Energia, em Wh, poupada pelos telhados verdes em comparação com a gerada pelo painel fotovoltaico, em cada dia.



Fonte: A autora (2019).

É observado que a placa solar gera mais energia do que o economizado pelos telhados verdes nos dias 4 e 10 de novembro; no entanto, gera menos nos dias 26 e 27. No geral, os sistemas são de mesma ordem energética, ou seja, as coberturas vegetais economizam aproximadamente a mesma quantidade de energia produzida pelos módulos solares. Em contrapartida os custos não são, como pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 – Custos do sistema fotovoltaico e da implantação dos telhados verdes.

	Sistema Fotovoltaico (255Wp) (Telhado Cerâmico + Placa)	Telhado com Coroa-de-Frade	Telhado com Babosa
Custo (R\$)	4718,51	3363,76	3963,76

Fonte: A autora (2019).

Da Tabela 13 pode-se verificar que, para sistemas de mesma ordem energética, a configuração com o painel solar possui um custo de instalação mais elevado. O telhado com Coroa-de-Frade tem um custo 28,7% inferior ao do sistema fotovoltaico, enquanto que o telhado com Babosa apresenta um custo 16% menor.

4.2 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO

Neste tópico será avaliado a influência das condições climáticas no desempenho energético dos telhados verdes e dos painéis fotovoltaicos.

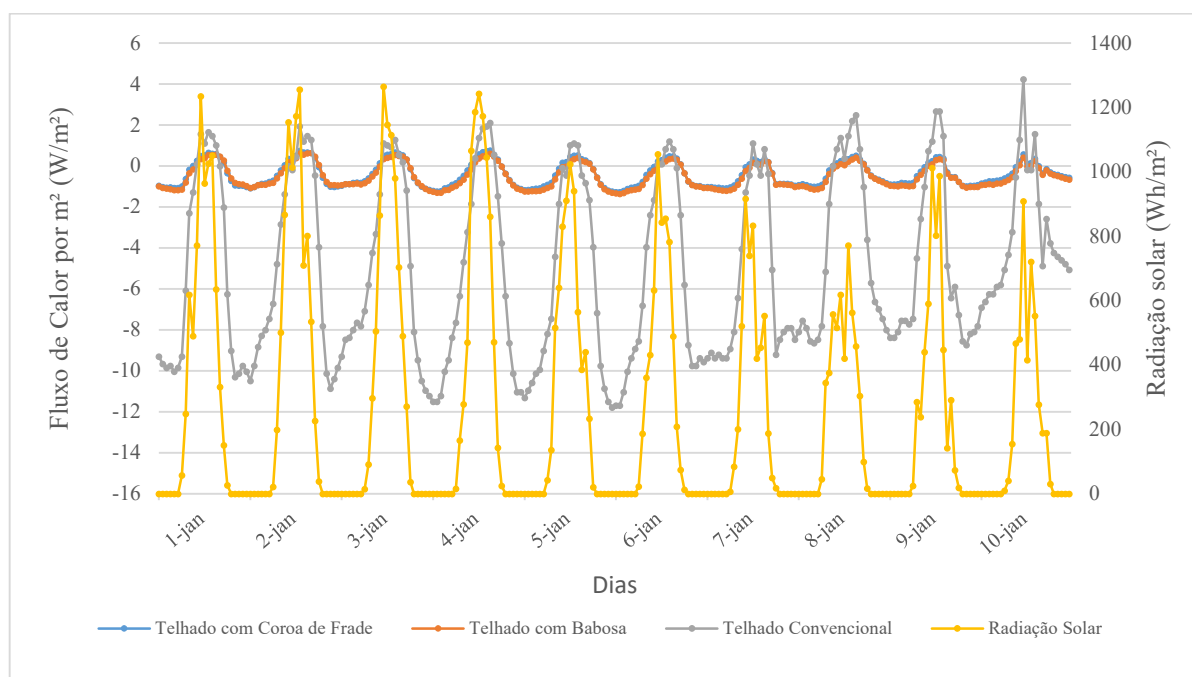
4.2.1 Análise de parâmetros climáticos no desempenho térmico dos telhados

Nesta seção, é avaliado o desempenho térmico dos telhados com Coroa-de-Frade e com Babosa e do telhado cerâmico durante o verão. São analisados a temperatura interna e o fluxo de calor durante dezenove dias em janeiro de 2016, bem como parâmetros externos (temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar) adquiridos da estação automática do INMET em Caruaru.

4.2.1.1 Inspeção visual

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam o perfil de fluxo de calor dos telhados, considerando condução, convecção e radiação, para os dez primeiros dias de janeiro. O fluxo de calor é plotado em conjunto com a radiação solar, umidade relativa do ar e temperatura externa do ar, respectivamente.

Figura 19 – Fluxo de calor do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e radiação solar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.



Fonte: A autora (2019).

Analisando a Figura 19, pode-se verificar que o fluxo de calor é negativo na maior parte do tempo. Fisicamente, isso quer dizer que a temperatura interna do ambiente é maior do que a externa, indicando que o calor está indo de dentro para fora da edificação. Além disso, percebe-se que, em geral, o pico da radiação solar (que ocorre em torno de 11/12h) coincide com o máximo fluxo de calor positivo para todos os telhados, indicando que para a energia solar máxima, há também o pico da transferência de energia para dentro do ambiente.

No entanto, em alguns dias, verificou-se que existe atraso térmico entre a radiação e o fluxo de calor. A Tabela 14 apresenta o valor médio no período de dez dias do atraso térmico do pico do fluxo de calor de cada telhado em relação ao pico da radiação solar.

Tabela 14 – Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, do fluxo de calor de cada telhado em relação à radiação solar.

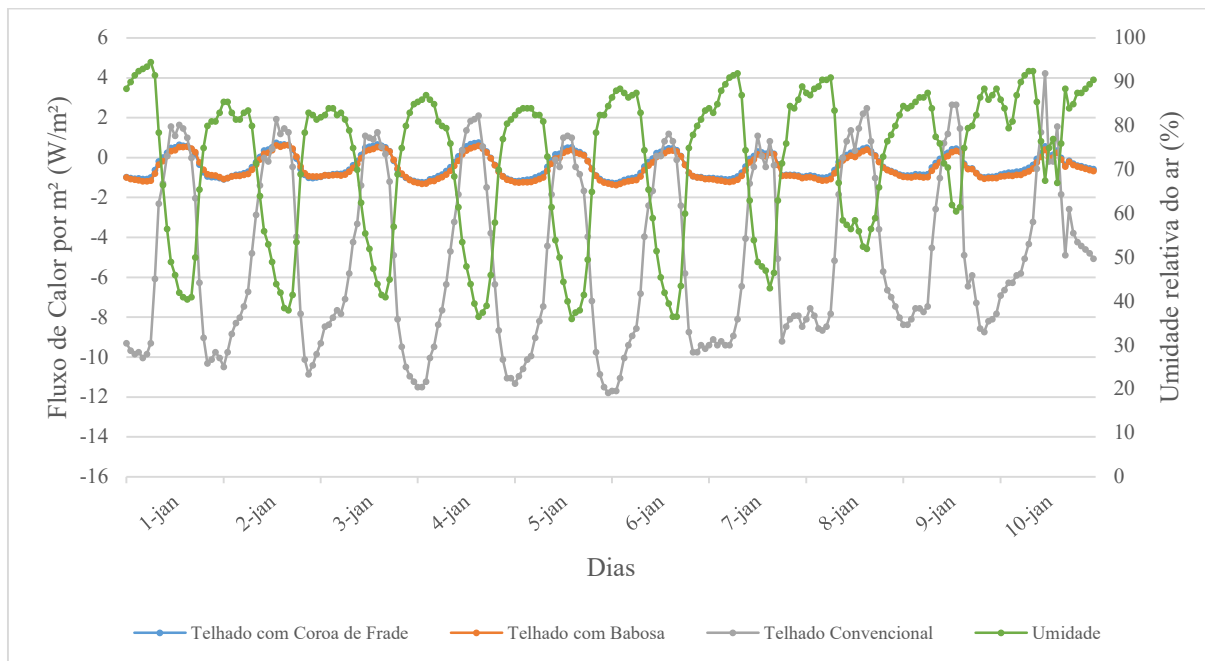
Atraso Térmico – ϕ (Horas)		
FC telhado Cerâmico – Radiação solar	F. C. telhado com Coroa-de-Frade – Radiação solar	F. C. telhado com Babosa – Radiação Solar
1,7	2,2	2,8

Legenda: FC = Fluxo de Calor.

Fonte: A autora (2019).

Ademais, verifica-se que o maior fluxo de calor negativo ocorre quando a radiação é zero. Ou seja, durante a noite ou de madrugada, a temperatura interna é maior do que a externa e o calor está saindo da edificação.

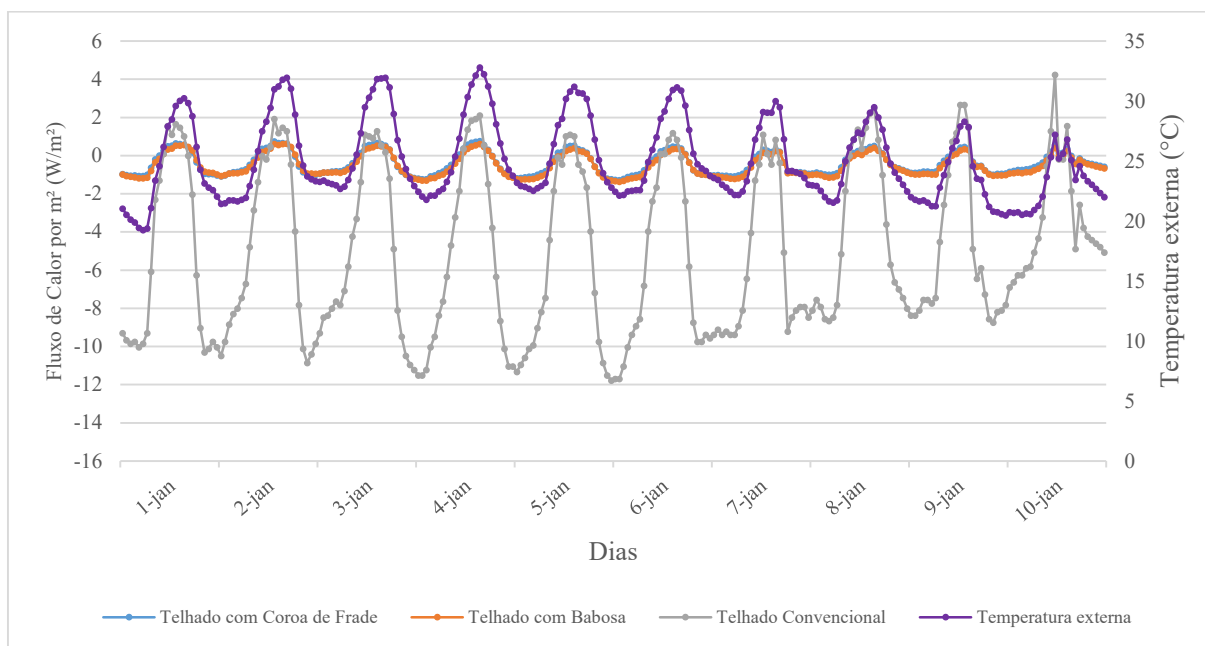
Figura 20 – Fluxo de calor do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e umidade relativa do ar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.



Fonte: A autora (2019).

Pela Figura 20 observa-se que, de modo geral, o valor máximo da umidade relativa (UR) do ar corresponde ao valor máximo negativo do fluxo de calor, e o valor mínimo da UR, ao valor máximo positivo do fluxo. Isso quer dizer que para uma umidade elevada, o calor está deixando a edificação, e para um ar mais seco, o fluxo do calor é de fora para dentro da edificação.

Figura 21 – Fluxo de calor do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e temperatura externa, nos dez primeiros dias de janeiro.



Fonte: A autora (2019).

Já na Figura 21, verifica-se que a temperatura ambiente máxima corresponde ao máximo fluxo de calor entrando na edificação e para a temperatura do ar mínima, tem-se o máximo fluxo de calor saindo da edificação. Este comportamento é o oposto ao que acontece no caso da umidade relativa, como esperado.

Visualmente é difícil saber se existe atraso térmico da umidade relativa e temperatura externa em relação ao fluxo de calor. Mas, ao analisar os dados, também foi verificado que existe atraso térmico em alguns dias. Nesse caso, no entanto, o atraso térmico é da temperatura externa do ar e da umidade relativa em relação ao fluxo de calor, ou seja, após ocorrer o pico do fluxo é que ocorre o pico da temperatura externa e o valor mínimo da umidade. As Tabelas 15 e 16 apresentam os valores de atraso de térmico da umidade relativa em relação ao fluxo de calor e da temperatura externa em relação ao fluxo de calor, respectivamente.

Tabela 15 – Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, da umidade relativa do ar em relação ao fluxo de calor de cada telhado.

Atraso Térmico – ϕ (Horas)		
Umidade Relativa – FC telhado Cerâmico	Umidade Relativa – F. C. telhado com Coroa-de-Frade	Umidade Relativa – F. C. telhado com Babosa
1,0	0,8	0,2

Legenda: FC = Fluxo de Calor.

Fonte: A autora (2019).

Tabela 16 – Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, da temperatura do ar externo em relação ao fluxo de calor de cada telhado.

Atraso Térmico – ϕ (Horas)		
Temperatura externa – FC telhado Cerâmico	Temperatura externa – F. C. telhado com Coroa-de-Frade	Temperatura externa – F. C. telhado com Babosa
1,3	0,9	0,3

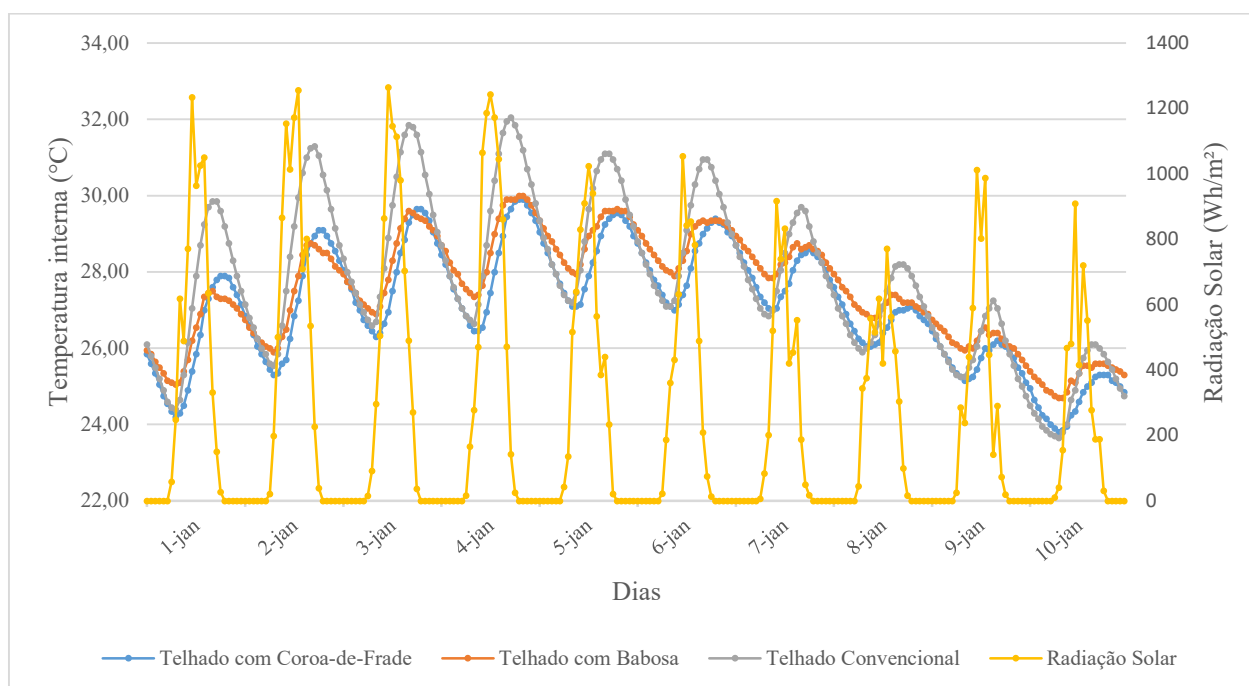
Legenda: FC = Fluxo de Calor.

Fonte: A autora (2019).

Ao analisar as Figuras Figura 19, Figura 20 e Figura 21, observa-se que a amplitude da curva do fluxo de calor do telhado cerâmico é consideravelmente maior se comparada com a dos telhados verdes. Isso ocorre pela variação na temperatura ser maior ao longo do dia para o telhado convencional, além da transmitância térmica possuir um valor mais elevado. No período, estima-se que o fluxo de calor foi reduzido em torno de 90% pelo uso dos telhados verdes.

As Figuras 22, 23 e 24 mostram o comportamento da temperatura abaixo de cada cobertura. Além disso, nessas figuras são representadas também a radiação solar, a umidade relativa do ar e a temperatura externa, respectivamente.

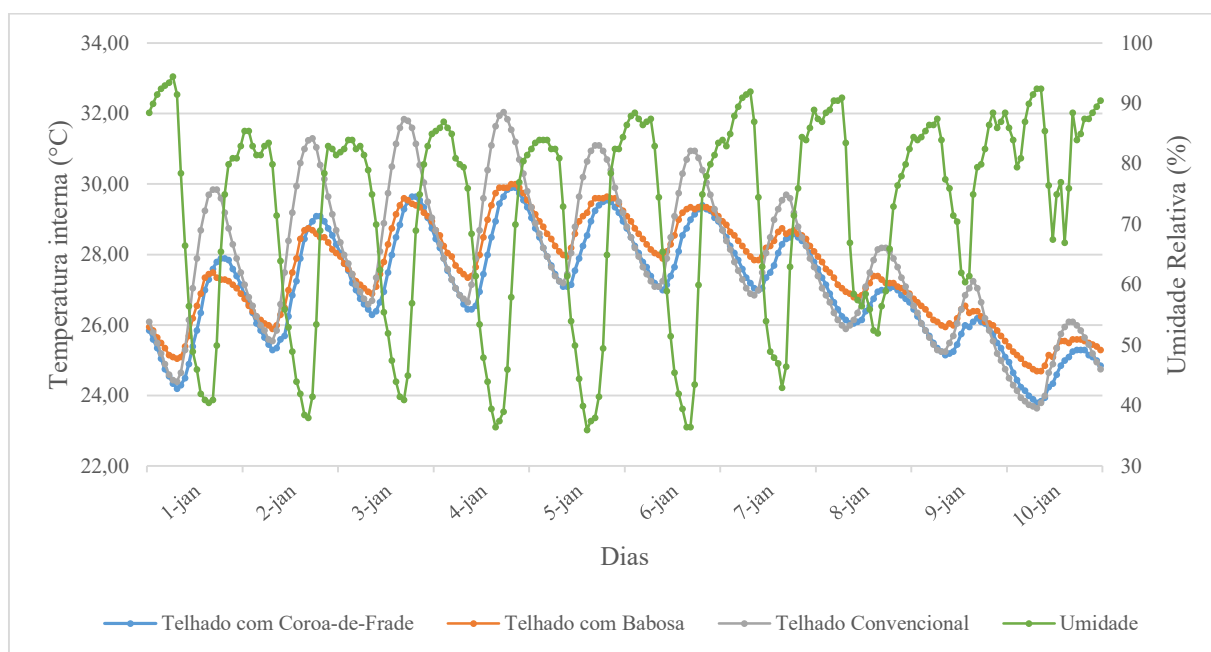
Figura 22 – Temperatura interna do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e radiação solar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.



Fonte: A autora (2019).

Na Figura 22 pode ser constatado que há um atraso térmico entre o pico da temperatura interna dos telhados verdes e a máxima temperatura interna do telhado cerâmico. E deste existe um atraso térmico em relação ao pico da radiação solar. Daí, constata-se uma propriedade dos telhados verdes, que é a de promover um maior atraso térmico entre as superfícies superior e inferior da cobertura, quando comparado a telhados convencionais (PERUSSI & VECCHIA, 2016).

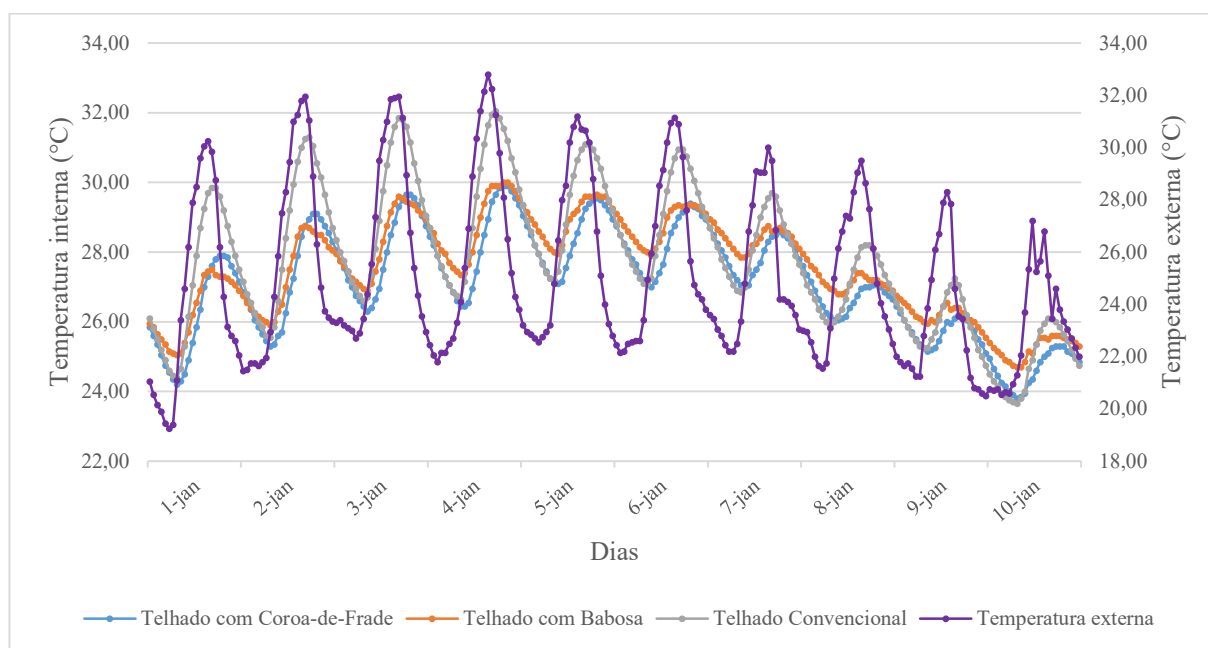
Figura 23 – Temperatura interna do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e umidade relativa do ar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.



Fonte: A autora (2019).

Em relação à umidade relativa do ar e à temperatura interna dos telhados na Figura 23, percebe-se que algum tempo depois de ocorrer o valor mínimo da umidade (entre uma e duas horas depois), se sucede o pico da temperatura interna do telhado cerâmico. E cerca de uma ou duas horas depois, ocorre o valor máximo da temperatura interna das coberturas verdes.

Figura 24 – Temperatura interna do telhado cerâmico, do telhado com Coroa-de-Frade e do telhado com Babosa, e temperatura externa do ar, nos dez primeiros dias de janeiro de 2016.



Fonte: A autora (2019).

Analisando a Figura 24, verifica-se um comportamento antagônico ao que ocorre com a umidade relativa, ou seja, logo após ocorrer o valor máximo da temperatura externa, são observados os valores máximos da temperatura dos telhados. Além disso, pode-se notar que existe um atraso térmico da temperatura máxima do telhado cerâmico em relação à temperatura máxima externa. A Tabela 16 apresenta o atraso térmico, em horas, da temperatura interna de cada telhado em relação às variáveis externas (radiação solar, umidade relativa e temperatura externa).

Tabela 17 – Atraso térmico médio, em horas, nos dez primeiros dias de janeiro, da temperatura interna de cada telhado em relação à radiação solar, umidade relativa e temperatura externa.

Atraso Térmico – ϕ (Horas)			
	TI telhado Cerâmico	TI telhado com Coroa-de-Frade	TI telhado com Babosa
Radiação Solar	4,1	6,1	4,7
Umidade Relativa do ar	2,8	4,8	3,4
Temperatura externa do ar	1,3	3,2	1,8

Legenda: TI = Temperatura Interna.

Fonte: A autora (2019).

4.2.1.2 Previsão do desempenho dos telhados a partir de variáveis climáticas

A partir da inspeção visual dos gráficos apresentados, pode-se perceber que existe um padrão de comportamento, visto que as grandezas variam de forma cíclica com o tempo. Além disso, foi possível notar uma relação entre os parâmetros externos (temperatura ambiente, umidade relativa do ar e radiação solar) e os parâmetros relacionados ao desempenho dos telhados (fluxo de calor e temperatura interna). O desenvolvimento de uma equação que relacione os parâmetros externos e os internos torna possível a previsão do comportamento dos telhados a partir dos dados climáticos e, consequentemente, a predição do desempenho térmico dos mesmos. Isso possibilita inclusive a previsão da economia na conta de energia pelo uso dos telhados verdes.

Uma forma de quantificar a relação entre os parâmetros é através do Coeficiente de Correlação de Pearson, que mede o grau da correlação entre duas variáveis. Dessa forma, podemos confirmar o que a inspeção visual dos gráficos sugere. As Tabelas Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20 apresentam o coeficiente de correlação entre as variáveis externas e internas, utilizando dados diários, dos primeiros dez dias do ano de 2016, para o telhado cerâmico, o telhado com Coroa-de-Frade e o telhado com Babosa, respectivamente.

Tabela 18 – Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as variáveis externas e internas para o telhado cerâmico.

Variáveis externas	Temperatura Interna	Fluxo de calor
Radiação solar	0,63	0,41
Umidade relativa do ar	-0,94	-0,58
Temperatura externa	0,97	0,48

Fonte: A autora (2019).

Tabela 19 – Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as variáveis externas e internas para o telhado com Coroa-de-Frade.

Variáveis externas	Temperatura Interna	Fluxo de calor
Radiação solar	0,44	0,60
Umidade relativa do ar	-0,86	-0,75
Temperatura externa	0,93	0,63

Fonte: A autora (2019).

Tabela 20 – Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as variáveis externas e internas para o telhado com Babosa.

Variáveis externas	Temperatura Interna	Fluxo de calor
Radiação solar	0,36	0,36
Umidade relativa do ar	-0,82	-0,57
Temperatura externa	0,91	0,49

Fonte: A autora (2019).

Nesta análise foram considerados os valores do fluxo de calor em módulo, visto que o sinal existe apenas para denotar o sentido do fluxo. A partir dos valores encontrados para os coeficientes, pode-se concluir que a temperatura externa é a variável que mais influencia a temperatura interna, seguida da umidade relativa e da radiação solar. Isso foi observado em todos os telhados. Já para o fluxo de calor, o cenário é um pouco diferente, sendo a umidade o parâmetro com maior influência, vindo depois a temperatura externa e a radiação.

Através do método da regressão multilinear, é possível relacionar as variáveis e criar equações para cada telhado, dentro de uma certa margem de erro. Sendo assim, analisou-se como a temperatura interna de cada ambiente pode estar relacionada com as variáveis externas. Três modelos foram criados para cada telhado:

- Modelo RUT: a temperatura interna do telhado é melhor explicada através da radiação solar, umidade relativa e temperatura externa;
- Modelo UT: a temperatura interna do telhado é melhor explicada através da umidade relativa e temperatura externa;
- Modelo T: a temperatura interna do telhado é melhor explicada através da temperatura externa.

Os Modelos 2 e 3 derivam do fato de que a umidade relativa possui melhor correlação com a temperatura interna do que a radiação solar, e que a temperatura externa apresenta melhor correlação com a temperatura interna do que a umidade e a radiação. O período da análise corresponde a 19 dias. Os dados dos primeiros dez dias foram utilizados para criar cada equação, sendo estas validadas nos nove dias seguintes a partir dos dados medidos. Os resultados para cada caso são apresentados abaixo. As variáveis Temperatura Interna, Radiação Solar, Umidade Relativa e Temperatura Externa são abreviadas para TI, RS, UR e TE, respectivamente.

Modelo RUT:

- Telhado cerâmico: $TI = -8,142 \cdot 10^{-5} \cdot RS - 0,088 \cdot UR + 0,869 \cdot TE + 12,810$
- Telhado com Coroa-de-Frade: $TI = -3,280 \cdot 10^{-4} \cdot RS - 0,091 \cdot UR + 0,811 \cdot TE + 15,434$
- Telhado com Babosa: $TI = -4,097 \cdot 10^{-4} \cdot RS + 0,083 \cdot UR + 0,892 \cdot TE + 13,788$

Modelo UT:

- Telhado cerâmico: $TI = -0,061 \cdot UR + 0,929 \cdot TE + 8,889$
- Telhado com Coroa-de-Frade: $TI = 0,016 \cdot UR + 1,049 \cdot TE - 0,356$
- Telhado com Babosa: $TI = 0,051 \cdot UR + 1,190 \cdot TE - 5,940$

Modelo T:

- Telhado cerâmico: $TI = 1,206 \cdot TE - 2,436$
- Telhado com Coroa-de-Frade: $TI = 0,976 \cdot TE + 2,647$
- Telhado com Babosa: $TI = 0,957 \cdot TE + 3,564$

Para avaliar qual dos modelos melhor se aproxima da realidade, é calculado o erro quadrático médio entre os valores previstos e os observados dos dias 11 a 19 de janeiro de 2016. Os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – RMSE entre os valores previstos de temperatura interna em cada modelo e os observados para o telhado cerâmico, telhado com Coroa-de-Frade e telhado com Babosa.

Modelo	RMSE		
	Cerâmico	Coroa-de-Frade	Babosa
RUT	1,141	1,244	1,111
UT	1,106	1,087	0,994
T	0,978	1,121	1,067

Fonte: A autora (2019).

Da Tabela 21 observa-se que para os telhados verdes, o modelo que possui o menor erro é aquele que leva em conta a temperatura externa e a umidade relativa (Modelo UT), e para o telhado cerâmico, o que apresenta menor erro é o modelo que considera apenas a temperatura externa (Modelo T). Era esperado que a radiação solar não apresentasse tanta influência na temperatura interna quanto as outras variáveis externas, visto que apresentou uma menor correlação; além disso, uma baixa radiação não significa necessariamente uma baixa temperatura, uma vez que o dia pode estar nublado e mesmo assim a temperatura ser alta. Pelos

resultados obtidos, verificou-se que a consideração da radiação solar no modelo introduziu erros à previsão.

Outro fato que pôde ser observado é que a umidade relativa do ar não foi uma variável representativa da temperatura interna para o telhado cerâmico, mas exerce influência significativa sobre a temperatura interna para as coberturas vegetais. Por um lado, é esperado que a umidade afete a temperatura interna da cobertura vegetal, visto que influencia diretamente no desempenho da vegetação; por outro, também era esperado que a umidade exercesse influência na temperatura interna do telhado cerâmico, visto que o coeficiente de correlação entre as duas variáveis foi de -0,94. Mas não foi isso que foi observado. Uma possível explicação pode residir na quantidade de dados utilizados, que podem não ser o suficiente para explicar possíveis variações ao longo do tempo. Outra questão que pode ser analisada é a respeito das variáveis que foram levadas em consideração. Possíveis acontecimentos podem ser explicados por outras variáveis que não foram descritas no modelo. Um exemplo é a precipitação. Ela foi praticamente zero nos primeiros dez dias de janeiro, mas no dia 18 de janeiro choveu aproximadamente 27 mm. Isso pode ter surtido um efeito no comportamento do telhado que não pôde ser explicado pelas outras variáveis. Assim, pode-se dizer que a análise climática é complexa, se constitui de muitas variáveis estocásticas e interdependentes. Avaliar o impacto das variáveis meteorológicas não é um processo simples e existem muitas incertezas associadas.

De modo a validar os modelos que apresentaram menor RMSE, é feita uma comparação entre os valores calculados e os observados. As Tabelas 22, 23 e 24 apresentam os resultados.

Tabela 22 – Valores da temperatura interna do telhado cerâmico previstos e observados.

Telhado Cerâmico (Modelo T)			
Dia	Valor observado (°C)	Valor previsto (°C)	Erro (%)
11/01/2016	25,55	27,15	6,23%
12/01/2016	26,13	26,73	2,33%
13/01/2016	26,50	26,96	1,71%
14/01/2016	27,65	27,10	1,99%
15/01/2016	28,41	28,46	0,17%
16/01/2016	28,54	27,76	2,73%
17/01/2016	28,71	28,44	0,96%
18/01/2016	26,39	24,51	7,10%
19/01/2016	25,73	26,73	3,87%

Fonte: A autora (2019).

Tabela 23 – Valores da temperatura interna do telhado com Coroa-de-Frade previstos e observados.

Telhado com Coroa-de-Frade (Modelo UT)			
Dia	Valor observado (°C)	Valor previsto (°C)	Erro (%)
11/01/2016	25,06	26,62	6,21%
12/01/2016	25,61	26,30	2,69%
13/01/2016	26,04	26,44	1,54%
14/01/2016	27,00	26,61	1,45%
15/01/2016	28,02	27,75	0,98%
16/01/2016	28,25	27,16	3,86%
17/01/2016	28,35	27,70	2,32%
18/01/2016	26,71	24,59	7,95%
19/01/2016	25,22	26,32	4,37%

Fonte: A autora (2019).

Tabela 24 – Valores da temperatura interna do telhado com Babosa previstos e observados.

Telhado com Babosa (Modelo UT)			
Dia	Valor observado (°C)	Valor previsto (°C)	Erro (%)
11/01/2016	25,58	27,17	6,22%
12/01/2016	26,08	26,89	3,11%
13/01/2016	26,34	26,95	2,30%
14/01/2016	27,23	27,22	0,01%
15/01/2016	28,15	28,41	0,93%
16/01/2016	28,49	27,78	2,47%
17/01/2016	28,63	28,29	1,17%
18/01/2016	27,28	25,40	6,90%
19/01/2016	25,90	26,95	4,08%

Fonte: A autora (2019).

Das tabelas 22, 23 e 24 verifica-se que o maior erro entre o valor observado e o previsto foi de 7,95%, que ocorreu para o telhado com Coroa-de-Frade no dia 18 de janeiro. Uma possível explicação para esse erro é a precipitação de 27 mm que ocorreu nesse dia, enquanto que nos outros dias nenhuma ou pouca chuva foi observada. Mesmo sem a inclusão da precipitação como variável do modelo, é constatado que o erro relativo percentual foi abaixo de 10% para todos os casos, indicando aproximação aceitável da previsão com a realidade para fins deste trabalho.

Apesar da tentativa de generalização do comportamento da temperatura interna dos telhados através das variáveis externas, os modelos apresentam limitações. Primeiramente, cada modelo deve ser aplicado ao tipo específico de cobertura que foi desenvolvido (cerâmico, vegetação Coroa-de-Frade ou Babosa). Parâmetros como o LAI (*Leaf Area Index*) ou o albedo de cada cobertura não foram variados no experimento e, portanto, o tipo de cobertura não pode ser mudado. Em segundo lugar, as variáveis externas e internas ao telhado foram coletas em uma cidade específica, com um clima característico e é recomendado que as equações sejam

utilizadas apenas para esta cidade, ou ainda, em cidades com climas semelhantes, visto que em climas diferentes o comportamento das coberturas pode ser distinto. Outro fator diz respeito à época do ano. Foram utilizados dados do mês de janeiro, o que significa verão no hemisfério sul. Em outras estações o comportamento do telhado pode ser diferente. Logo, os modelos devem ser aplicados apenas no verão ou em períodos quentes. A estação quente em Caruaru permanece por 5,5 meses, de 23 de outubro a 6 de abril (165 dias), segundo o sítio eletrônico *Weatherspark*. Para análise de dados, esse portal utilizou dados horários históricos de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2016, provenientes de estações meteorológicas e da fonte de dados de Reanálise MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*).

Com base nas equações obtidas através da regressão multilinear para cada telhado, é possível realizar previsões a respeito do comportamento térmico das coberturas a partir dos dados climáticos. De modo a prever a temperatura interna sob cada cobertura na estação quente em Caruaru no período 2018-2019, dados fornecidos pela estação automática do INMET de Caruaru foram utilizados, compreendendo o período de 23 de outubro de 2018 a 6 de abril de 2019. Com a temperatura interna é possível calcular a carga térmica necessária para se atingir o conforto térmico. Para o cálculo dessa carga, foi admitido o uso de resfriamento artificial apenas nas oito horas mais críticas do dia. A Tabela 25 apresenta os resultados considerando uma edificação com 20 m².

Tabela 25 – Carga térmica necessária para se atingir o conforto térmico por m² e para uma edificação de 20 m², no período de 23 de outubro de 2018 a 6 de abril de 2019, para os três tipos de telhados.

Cobertura	Carga térmica necessária ao conforto térmico (kW/m²)	Carga térmica para 20 m² (kW)
Telhado Convencional	12,014	240,299
Telhado com Coroa-de-Frade	1,018	20,359
Telhado com Babosa	1,081	21,625

Fonte: A autora (2019).

A tarifa da CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) de energia elétrica atualizada, da resolução homologatória N° 2535 de 23 de abril de 2019, corresponde a R\$ 0,54933/kWh, para uso residencial, grupo B1, sem a consideração de impostos e outros elementos, como o ICMS. Com isso, pode-se calcular a economia na conta de energia no período.

Tabela 26 – Economia na conta de energia pelo uso dos telhados verdes, no período de 23 de outubro de 2018 a 6 de abril de 2019.

Cobertura	Economia na conta de energia (R\$)
Telhado Convencional	-
Telhado com Coroa-de-Frade	120,82
Telhado com Babosa	120,12

Fonte: A autora (2019).

Observa-se que no período pode ser economizado em torno de R\$ 120,00 com a utilização dos telhados verdes propostos. No curto prazo, esse valor não parece muito expressivo, mas se considerarmos uma vida útil de 40 anos (CARTER & KEELER, 2007), a economia pode chegar a algo em torno de R\$ 4.800,00. Como visto na Tabela 7, o gasto pela instalação do telhado verde Coroa-de-Frade é em torno de R\$ 480,00 a mais do que o custo para a construção do telhado cerâmico. O retorno então é, de aproximadamente, dez vezes o valor do investimento, considerando apenas a economia de energia na estação quente do ano.

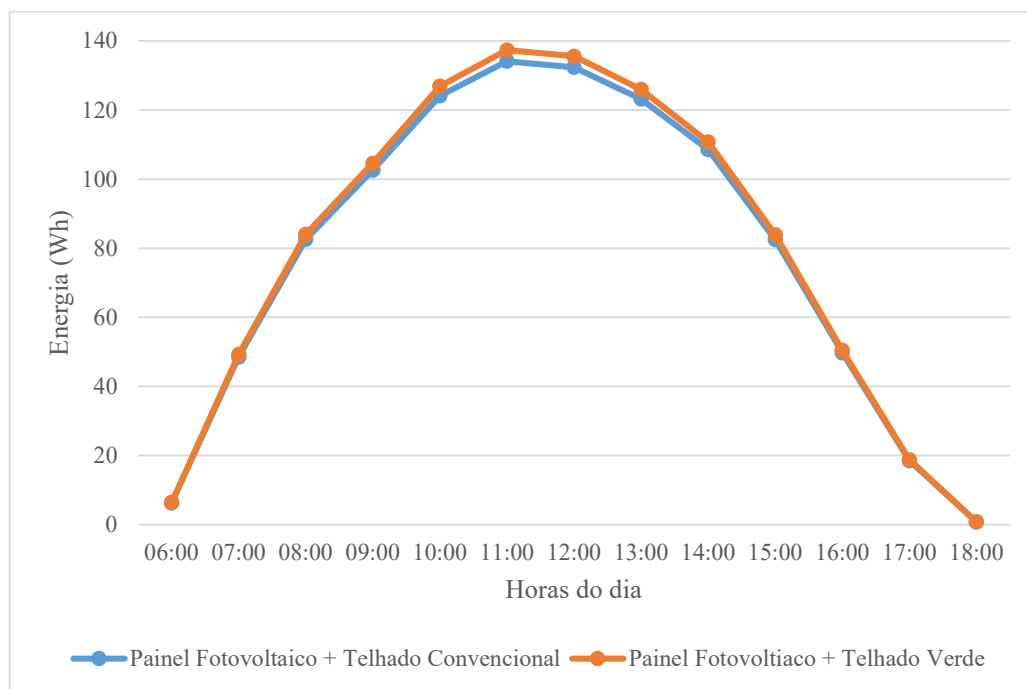
4.2.2 Análise da eficiência de um painel fotovoltaico sobre a cobertura vegetal

É sabido que a temperatura ambiente influencia no comportamento de módulos fotovoltaicos. Segundo o modelo de Kenny *et al.* (2006), é possível estimar a temperatura do módulo em função da temperatura do ar no entorno, pela Equação (9). Muitos estudos mostram as vantagens de se combinar coberturas verdes e painéis solares, visto que a vegetação reduz a temperatura em suas proximidades e, conseqüentemente, melhora a eficiência energética do painel.

No intuito de avaliar a performance de um painel solar instalado sobre uma cobertura vegetal, uma análise simplificada é realizada fazendo uso das Equações (4) e (5). Para isso será utilizado como referência um estudo de caso em Atenas (ALEXANDRI & JONES, 2006), cidade do Mediterrâneo com clima semiárido BSh, segundo classificação de Köppen, possuindo verões quentes e secos. Nesse estudo os autores utilizaram um modelo dinâmico unidimensional em microescala para descrever o comportamento térmico de um telhado verde (cujas vegetação era grama) comparado com um telhado de concreto em um típico dia de verão. Os resultados obtidos foram de que a temperatura média do ar um metro acima do telhado de concreto foi de 35,3°C, enquanto que na cobertura vegetal foi de 25,4°C. Tendo como base esses valores, analisou-se o desempenho do painel fotovoltaico da marca Risen com potência 150Wp, na situação hipotética em que a temperatura média do ar ao redor do equipamento no dia 26 de

novembro de 2015 (dia mais quente do ano) fosse as encontradas por Alexandri & Jones (2006). A Figura 25 apresenta os resultados da produção de energia do painel sobre o telhado convencional e sobre o telhado verde, no período de insolação do dia 26/11/2015.

Figura 25 – Produção de energia de um painel sobre um telhado convencional e sobre um telhado verde no dia 26/11/2015, no período de insolação.



Fonte: A autora (2019).

Como poder ser verificado, a diferença na produção em um único dia não é muito significativa. De fato, essa diferença é de apenas 2,02%. Considerando apenas a produção das placas (sem considerar a economia de energia gerada pela cobertura vegetal), a diferença de energia durante a vida útil destas (admitindo-se um período de 25 anos) será em torno de 200 kWh (para uma capacidade instalada de 150 Wp). Financeiramente, isso é algo em torno de R\$ 80,00. Para sistemas maiores, como indústrias, por exemplo, essa economia pode ser bem mais expressiva. Segundo a WST Energia Solar, sistemas fotovoltaicos industriais possuem potências instaladas geralmente entre 100 kWp e 1000 kWp. Neste caso, a economia pode chegar a até R\$ 1.650,00 por mês e a R\$ 495.000,00 em 25 anos.

No entanto, ao considerar também a economia de energia gerada pelo telhado verde, além da produzida pela placa solar, os resultados se modificam. Admitindo-se que a edificação possui uma cobertura de 20 m², com a vegetação Coroa-de-Frade, a Tabela 27 resume os investimentos necessários em cada caso estudado, bem como o tempo de retorno do

investimento. É considerado que a diferença entre as temperaturas médias a um metro acima da cobertura com e sem o telhado verde permanece constante e igual a 9,9°C ao longo dos dias.

Tabela 27 – Produção de energia e tempo de retorno do investimento para cada configuração.

Cobertura	Custo do investimento (R\$)	Economia com energia elétrica por mês	Tempo de retorno do investimento (meses)
Cerâmica	R\$2.885,06	-	-
Cerâmica + Placa	R\$3.963,56	R\$12,03	90
Coroa-de-Frade + Placa	R\$4.442,30	R\$39,73	39

Fonte: A autora (2019).

Pode-se observar que o tempo de retorno para a configuração do telhado verde mais placa solar é menos da metade do tempo necessário para o *payback* da instalação do telhado cerâmico e módulo fotovoltaico. Enquanto que no primeiro caso se leva 90 meses (7 anos e meio), no segundo o tempo é de 39 meses (pouco mais de 3 anos). Isso se deve principalmente à energia economizada pelo uso da cobertura vegetal.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou de forma comparativa o desempenho energético de painéis fotovoltaicos em relação ao desempenho dos telhados verdes com Coroa-de-Frade e com Babosa, bem como os custos necessários à instalação desses sistemas. Primeiramente, avaliou-se o desempenho energético de equipamentos financeiramente semelhantes nos dias mais críticos do período (04, 10, 26 e 27 de novembro). Em todos os dias da análise, a economia de energia pelos telhados verdes foi superior ao que seria produzido pelo módulo, chegando a ser até duas vezes maior no dia 26/11. Uma análise posterior foi a comparação de custos de sistemas que economizam/produzem quantidades semelhantes de energia. Nesse caso, a cobertura com Coroa-de-Frade e com Babosa são 28,7% e 16%, respectivamente, mais baratas do que o sistema com painel fotovoltaico e telhado cerâmico.

Também foi avaliada a relação entre variáveis climáticas e o comportamento térmico das coberturas vegetais e como a temperatura influencia na eficiência de placas fotovoltaicas. A partir da inspeção visual gráfica, foi possível inferir que os parâmetros variam de forma cíclica ao longo do tempo, além de estarem relacionados uns aos outros. Isso foi confirmado a partir do coeficiente de correlação de Pearson, que indicou que a temperatura externa é a variável que possui maior influência sobre as temperaturas internas medidas, chegando a possuir um coeficiente de correlação de 0,97 para o telhado com Coroa-de-Frade. Após constatar a relação entre as variáveis, três modelos foram criados para cada telhado no intuito de se realizar previsões da temperatura interna das coberturas. Foram calculados os erros percentuais dos valores previstos pelos modelos em relação aos valores medidos e todos possuíram erro menor que 10%, confirmando que as equações se aproximam da realidade dentro de uma margem de erro aceitável. Esses modelos podem ser aprimorados em trabalhos futuros ao considerar um período maior de dados, incluir outras variáveis climáticas, além de parâmetros relacionados à vegetação, para que se possa expandir os resultados para outros tipos de coberturas verdes. Além disso, se houver variação do local de estudo, ainda é possível chegar a fatores de decisão para a escolha do local mais apropriado à instalação.

Com o objetivo de se prever o quanto seria economizado na energia para resfriar o ambiente, dados climáticos de outubro de 2018 a abril de 2019 foram utilizados. Constatou-se que no período seria economizado em torno de R\$120,00 na conta de energia com o uso de telhados com Coroa-de-Frade e com Babosa. Considerando uma vida útil de 40 anos para cada telhado, a economia será em torno de R\$4.800,00 (levando em conta apenas a estação quente

do ano). Este valor é dez vezes maior do que o investimento necessário à construção do telhado verde Coroa-de-Frade em relação ao cerâmico.

Por último, foi analisada a influência da temperatura externa na produção de energia de uma placa fotovoltaica. Para isso, foi considerada uma situação hipotética onde a placa seria instalada acima de um telhado verde. Os resultados mostraram que houve um aumento da produção de 2,02%. Apesar de não ser um número muito significativo, foi visto que para uma potência instalada de 1000 kWp, por exemplo, a economia gerada pode chegar até R\$495.000,00 em 25 anos. Em relação ao tempo de retorno do investimento, se considerarmos o conjunto placa + telhado cerâmico, o *payback* é de 90 meses. Já se levássemos em consideração a combinação placa + telhado Coroa-de-Frade, o tempo de retorno se reduz a praticamente um terço, sendo de 39 meses.

A partir dos resultados encontrados, pode-se concluir que a instalação de telhados verdes e painéis fotovoltaicos na região do semiárido é bastante vantajosa, considerando tanto aspectos financeiros quanto ambientais. A implantação de ambas as tecnologias deve ser incentivada, principalmente de forma conjunta, pois melhoram a eficiência do painel solar, além de fornecer sombra para a vegetação. Para o caso da instalação de um sistema isolado, constatou-se que a instalação de coberturas vegetais proporciona maior vantagem financeira devido a maior economia de energia para arrefecimento.

REFERÊNCIAS

- ABDELILAH, B.; MOUNA, A.; SIRD, N.; HOSSAIN, A. Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller using Arduino. **Sustainable Buildings and Cities**, [S. l.], v. 353, p. 1-6. 2018.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-2. **Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-3. **Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16401-1. **Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários. Parte 1: Projetos das Instalações**. Rio de Janeiro, 2008;
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16401-2. **Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**. Rio de Janeiro, 2008.
- ALEXANDRI, E.; JONES, P. Sustainable Urban Future in Southern Europe - What About the Heat Island Effect? In: **ERSA Congress**. Las Vegas. 2006.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L., & SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, 711-728. 2014.
- ASCIONE, F. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy? **Applied Energy**, [S. l.], v. 104, p. 845-859. 2013.
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta-GA. 2004. 30 p.
- ASSIS, J. M., SOUZA, W. M.; SOBRAL, M. C. Climate analysis of the rainfall in the lower-middle stretch of the São Francisco river basin based on the rain anomaly index. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Porto Alegre, p. 188-202. 2015.
- BEN – Balanço Energético Nacional. **Relatório Síntese ano base 2017**. Rio de Janeiro, 2018
- BENBENEK, S. D. **The Photoelectric Effect**. 2017. Disponível em: <<https://scottbembenek.com/tag/photoelectric-effect/>>. Acesso em 21 mai. 2019.
- BESIR, A. B.; CUCE, E. Green roofs and facades: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v.82, p. 915-939. 2018.

BETT; P. E. THORNTON; H. E. The climatological relationships between wind and solar energy supply in Britain. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 87, p. 96-110. 2016.

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**, [S. l.], p. 1-26. 2017.

BEZERRA, F. D. Energia solar fotovoltaica. **Caderno Setorial ETENE**, [S. l.], ano 3, p.1-18. 2018

CANERO, R. F.; REDONDO, P. G. Green Roofs as a Habitat for Birds: A Review. **Journal of Animal and Veterinay Advances**, [S. l.], v. 9, p. 2041-2052. 2010.

CARNEIRO, J. **Electromagnetismo B: semicondutores – modelo matemático da célula fotovoltaica**. Notas de aula – Universidade do Minho. Braga, 2010.

CARPENTER, J., & ZHOU, J. Life Cycle Analysis of a St. Louis Flat Roof Residential Retrofit for Improved Energy Efficiency. In: **Proceedings of the 2013 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering**. Texas. 2013.

CARTER, T.; JACKSON, C. R. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. **Landscape and Urban Planning**, [S. l.], v. 80, p. 84-94. 2007.

CARTER, T.; KEELER, A. Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 87, p. 350-363. 2007.

CASTLETON, H. F.; STOVIN, V.; BECK, S. B.; DAVISON, J. B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 92, p. 1582-1591. 2010.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development Discussions**, [S. l.], p. 1247-1250. 2014.

CHEMISANA, D.; LAMNATOU, C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. **Applied Energy**, [S. l.], v. 119, p. 246-256. 2014.

COÊLHO, R. S. **Planejamento e controle de custos nas edificações**. UEMA Editora, São Luís, MA, 272 p. 2006.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Lawrence Erlbaum Associates, Nova Iorque, 579 p. 1988.

CUNHA, E. G.; RHEINGANTZ, P.; GONÇALVES, I. P. Estudo da relação custo-benefício na implantação de diferentes sistemas fotovoltaicos em um edifício de escritórios na zb 2. In: **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. Balneário Camboriú – SC. 2017.

CURRIE, B. A., & BASS, B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. **Urban Ecosyst**, [S. l.], v. 11, p. 409-422. 2008.

DANCEY, C., & REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Artmed, Porto Alegre. 2006.

DUTRA, J. C., BOFF, V. Â., SILVEIRA, J. S., & ÁVILA, L. V. Uma Análise do Panorama das Regiões Missões e Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul sob o Prisma da Energia Eólica e Solar Fotovoltaica como Fontes Alternativas de Energia. **Revista Paranaense de Desenvolvimento-RPD**, Curitiba, v. 34, p. 225-243. 2013.

DWIVEDI, A.; MOHAN, B. K. Impact of green roof on micro climate to reduce Urban Heat Island. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S. l.], p. 56-69. 2018.

ELIAS, E. M.; LIN, C. K. The empirical study of green buildings (residential) implementation: perspective of house developers. **The 5th Sustainable Future for Human Security**, [S. l.], v. 28, p. 708-716. 2015.

EPA - Environmental Protection Agency. **Estimating the environmental effects of green roofs: A case study in Kansas City**, Missouri. 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro, 2012.

FIGUEIREDO, D. B.; SILVA, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, [s.l.], v. 18, p. 115-146. 2009.

FLORÊNCIO, B. B. **Telhados Verdes: Contribuições ao Consumo de Energia**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2016. 62 p.

FOGIATTO, M. D. **Avaliação da transmitância térmica de blocos de concreto e cerâmica utilizados na construção civil**. Trabalho De Conclusão De Curso - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Ponta Grossa, 2015. 51 p.

FONDRIEST – Environmental Learning Center. **Solar Radiation and Photosynthetically Active Radiation**. 2014. Disponível em: <<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/>>. Acesso em 20 mai. 2019.

GALDINO, M. A. Análise de custos históricos de sistemas fotovoltaicos no brasil. In: **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES**. São Paulo. 2012.

GARGARI, C.; BIBBIANI, C.; FANTOZZI, F.; CAMPIOTTI, A. Environmental impact of Green roofing: the contribute of a green roof to the sustainable use of natural resources in a life cycle approach. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, [S. l.], p. 646-656. 2016.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A.; WICHMAN, I. S. Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 43, p. 3548-3557. 2011.

GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Atlas Eólico e Solar de Pernambuco**. 2017. Disponível em:

<[http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/chapter/potencialSolar.html?Potencial%20Solar%20\(PV\)%20Te%C3%B3rico](http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/chapter/potencialSolar.html?Potencial%20Solar%20(PV)%20Te%C3%B3rico)>. Acesso em 30 mai. 2019.

GRUE, A. Windographer Software, versão 4.1.1.4. **Coefficient of Determination**. 2018.

HARPUTLUGİL, T. Energy Efficient Building Design Development: A Retrospective Approach. In: **International Symposium on Energy Efficiency in Buildings**, Ankara, p. 296-303. 2017.

HERATH, H. M.; HALWATURA, R. U.; JAYASINGHE, G. Y. Modeling a Tropical Urban Context with Green Walls and Green Roofs as an Urban Heat Island Adaptation Strategy. In: **7th International Conference on Building Resilience; Using scientific knowledge to inform policy**, p. 691-698. Bangkok. 2018.

HEWAGE, K.; BIANCHINI, F. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, [S. l.], p. 57-65. 2011.

HOICKA, C. E., & ROWLANDS, I. H. Solar and wind resource complementarity: Advancing options for renewable electricity integration in Ontario, Canada. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 36, p. 97-107. 2011.

HUI, S. C.; CHAN, S. C. Integration of green roof and solar photovoltaic systems. **Integrated Building Design in the New Era of Sustainability**, [S. l.], p. 1-12. 2011.

HULD, T.; SÚRI, M.; DUNLOP, E. Geographical variation of the conversion efficiency of crystalline silicon photovoltaic modules in Europe. **Progress in photovoltaics: research and applications**, [S. l.], v. 16, p. 595-607. 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil/Pernambuco/Caruaru. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru/panorama>>. Acesso em 01 jun. 2019.

IEA – International Energy Statistics. **International Energy Statistics 2005: Key World Energy Statistics**. Paris, 2005.

IEA – International Energy Statistics. **International Energy Statistics 2017: Key World Energy Statistics**. Paris, 2017.

IEA – International Energy Statistics/Photovoltaic Power System Programme – PVPS. **Snapshot of Global PV Markets**. 2019.

IEA – International Energy Statistics. **Solar Energy Perspectives**. Paris, 2011.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., & LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. LTC, Rio de Janeiro, 665 p. 2008.

INSPE – Instituto de Ensino e Pesquisa. **Análise de Regressão Linear Múltipla I**. Disponível em: <<http://hedibert.org/wp-content/uploads/2014/02/Econometria201401-Aula04-ARLM-I-Estimacao.pdf>>. Acesso em 12 jul. 2019.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Featured Dashboard – Capacity and Generation.** Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=16>>. Acesso em 15 mai. 2019.

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, [S. l.], p. 157-164. 2012.

KENNY, R. P.; DUNLOP, E. D.; OSSENBRINK, H. A.; MÜLLEJANS, H. A. Practical Method for the Energy Rating of c-Si Photovoltaic Modules Based on Standard Tests . **Progress in photovoltaics: research and applications**, [S. l.], v. 14, p. 155-166. 2006.

KNOLSEISEN, P. C. **Compatibilização de orçamento com o planejamento do processo de trabalho para obras de edificações.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. 122 p.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; LAAR, M.; KRAUTER, S. Photovoltaic panels on greened roofs: Positive interaction between two architectures. In: **World Climate & Energy Event**, p. 151-158. Rio de Janeiro. 2002.

LAMBERTS, R. **Desempenho térmico de edificações.** Notas de aula - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2014.

LAMBERTS, R., GHISI, E., PEREIRA, C. D., & BATISTA, J. O. **Casa Eficiente - Bioclimatologia e Desempenho Térmico.** Florianópolis, 2010, 130 páginas.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 43, p. 264-280. 2015.

LI, X.; NORFORD, L. K. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. **Urban Climate**, [S. l.], p. 59-74. 2016.

LIN, B. S.; YU, C. C.; SU, A. T.; LIN, Y. J. Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. **Building and Environment**, [S. l.], p. 26-33. 2013.

LUNDHOLM, J.; MACLVOR, S.; MACDOUGALL, Z.; RANALLI, M. Plant Species and Functional Group Combinations Affect Green Roof Ecosystem Functions. **PLoS ONE**, [S. l.], p. 1-11. 2010.

MARQUEZAN, L. H. Análise de investimentos. **Revista Eletrônica de Contabilidade**, [s.l.], v.3, p. 1-13. 2006.

MATOS, R. S. **Climatização.** Notas de aula – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

MATTOS, C. S.. **Desempenho térmico de um telhado verde inserido em região semiárida.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2015.

MEDEIROS, R. M. O balanço hídrico e o aquecimento no município de Caruaru – PE, Brasil. **Revista Equador (UFPI)**, v. 07, p. 126-146. 2018.

MENTENS, J. R. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff. **Landscape and Urban Planning**, [S. l.], v. 77, p. 217-226. 2006.

MERAL, M. E., & DINÇER, F. A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 77, p. 2176-2184. 2011.

MICHEREFF, S. J., NORONHA, M. A., & MAFFIA, L. A. Tamanho de amostras para avaliação da severidade da queima das folhas do inhame. **Summa Phytopathologica**, [S. l.], v. 34, pp.189-191. 2008.

MINKE, G. **Techos verdes - Planificación, ejecución, consejos prácticos**. Uruguay: Editora Fin de Siglo. Uruguay. 2005.

MME – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2026**. Brasília, 2017. 271 p.

MOURA, R. G. **Estudos das Radiações Solar e Terrestre Acima e Dentro de uma Floresta Tropical Úmida**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2007. 147 p.

MOVAHHED, Y.; SAFARI, A.; MOTAMED, S.; KHOSHKHOO, R. H. Simultaneous use of PV system and green roof: A techno-economic study on power generation and energy consumption. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 159, p. 478-483. 2019.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração fotovoltaica no brasil: viabilidade econômica**. São Paulo, 2015, 58 páginas.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU, G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and buildings**, [S. l.], v. 33, p. 719-729. 2001.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M.; ROAF, S. **Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice**. Routledge, Londres. 2012

OLIVEIRA, A. P.; FUGANHOLI, N. S.; CUNHA, P. H.; BARELLI, V. A.; BUNEL, M. P.; NOVAZZI, L. F. Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [S. l.], v. 04, p. 01-07. 2018.

OSMA-PINTO, G.; PLATA, O.-P. G. Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. **Solar Energy**, [S. l.], v.185, p. 112-123. 2019.

PAN, L.; CHU, L. M. Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a vertical greenery system in Hong Kong: A case study. **Building and Environment**, [S. l.], p. 1-8. 2015.

PENDIUK, F.; MOISÉS, I. C.; PEREIRA, M. P. Telhado verde: a evolução da tecnologia e suas funcionalidades. **Gestão, Tecnologia e Inovação**, [s.l.], v. 01, p. 19-37. 2017.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. J., RÜTHER, R., SOUZA, J. G. (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2017.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, [S. l.], v. 44, p. 271-289. 1990.

PERINI, K.; ROSASCO, P. Costebenefit analysis for green façades and living wall systems. **Building and Environment**, [S. l.], v. 70, p. 110-121. 2013.

PERUSSI, R.; VECCHIA, F. A. Análise do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde utilizando plataformas de teste. **Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [S. l.], p. 225-236. 2016.

PETERNELLI, L. A. **Capítulo 9 - Regressão Linear e correlação**. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/~petercelli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>>. Acesso em 03 jul. 2019.

POMPEU, R. C.; NATALE, W. Tamanho da amostra foliar para avaliação do estado nutricional e índice SPAD de capim-elefante irrigado para corte. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 15, p. 584-591. 2014.

RAJI, B.; TENPIERIK, M. J.; DOBBELSTEEN, A. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 45, p. 610-623. 2015.

RAMSHANI, M.; KHOJANDI, A.; LI, X. Optimal Planning of the Joint Placement of Photovoltaic Panels and Green Roofs Under Climate Change Uncertainty. **The International Journal of Management Science**, [S. l.], p. 1-49. 2018.

RENTERGHEM, T. V.; BOTTELDOOREN, D. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. **Building and Environment**, [S. l.], v. 44, p. 1081-1087. 2009.

RIZWAN, A. M.; DENNIS, Y. C.; LIU, C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of Environmental Sciences**, [S. l.], p. 120-128. 2007.

ROWE, D. B. Green roofs as a means of pollution abatement. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 159, p. 2100-2110. 2011.

SAFIKHANI, T.; ABDULLAH, A. M.; OSSEN, D. R.; & BAHARVAND, M. A review of energy characteristic of vertical greenery systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], p. 450-462. 2014.

SANTAMOURIS, M. P. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. **Energy**, [S. l.], p. 1781-1788. 2007.

SANTAMOURIS, M.; CARTALIS, C.; SYNNEFA, A.; KOLOKOTSA, D. On The Impact of Urban Heat Island and Global Warming on the Power Demand and Electricity Consumption of Buildings - A Review. **Energy and Buildings**, [S. l.], p. 1-17. 2014.

SANTOS, G. C. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2016. 95 p.

SANTOS, S. M.; FARIAS, M. M. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: assessments in a semiarid region in northeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], p. 1-25. 2017.

SAVI, A. C. **Telhados verdes: análise comparativa de custo com sistemas tradicionais de cobertura**. Monografia de especialização - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012. 128p .

SILVA, E. I.; MARIANO, R. L. R.; MICHEREFF, S. J.; SALES, R.; OLIVEIRA, I. S. Levantamento da incidência da mancha-aquosa do melão no Rio Grande do Norte e determinação do tamanho das amostras para quantificação da doença. **Summa Phytopathologica**, [S. l.], v. 29, p. 172-176. 2003.

SIMMONS, M. T., GARDINER, B., WINDHAGER, S., & TINSLEY, J. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. **Urban Ecosystems**, [S. l.], v. 11, p. 339-348. 2008.

U.S. SOLAR. **Solar Market Insight Report**. Boston, 2017, 22.

SOUZA, M. C.; CORAZZA, R. I. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 42, p. 52-80. 2017.

SPOLEK, G. Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. **Urban Ecosyst**, [S. l.], v. 11, p. 349-359. 2008.

STONE, B.; VARGO, J.; HABEEB, D. Managing climate change in cities: Will climate action plans work? **Landscape and Urban Planning**, [S. l.], v. 107, p. 263-271. 2012.

SUN, Y.; AUGENBROE, G. Urban heat island effect on energy application studies of office buildings. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 77, p. 171-179. 2014.

SWALIN, A. **Choosing the Right Metric for Evaluating Machine Learning Models**. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/usf-msds/choosing-the-right-metric-for-machine-learning-models-part-1-a99d7d7414e4>>. Acesso em 10 jul. 2019.

TAKEBAYASHI, H.; MORIYAMA, M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. **Building and Environment**, [S. l.], v. 42, p. 2971-2979. 2007.

TAN, P. Y.; SIA, A. Understanding the performance of plants on non-irrigated green roofs in singapore using a biomass yield approach . **Nature in singapore**, Singapore, p. 149-153. 2009.

THAPA, S.; PANDA, G. K. Energy Conservation in Buildings – a Review. **International Journal of Energy Engineering**, [S. l.], p. 95-112. 2015.

TSANG, S. W.; JIM, C. Y. Theoretical evaluation of thermal and energy performance of tropical green roofs. **Energy**, [S. l.], v. 36, p. 3590-3598. 2011.

VALLÊRA, A. M.; BIRTO, M. C. **Meio século de história fotovoltaica**. Lisboa, 2005. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Acesso em 15 jul. 2019.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs : A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 57, p. 740-752. 2016.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica**. Saraiva, São Paulo, 224 p. 2017.

WEATHERSPARK. **Condições meteorológicas médias de Caruaru**. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/31343/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Caruaru-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em 10 jul. 2019.

WST Energia Solar. **Energia Solar Industrial**. Disponível em: <<https://wst.eng.br/energia-solar-industrial/>>. Acesso em 25 jun. 2019.

YANG, J.; KUMAR, D. L.; PYRGOU, A.; CHONG, A.; SANTAMOURIS, M., KOLOKOTSA, D.; LEE, S. E. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. **Solar Energy**, [S. l.], v. 173, p. 597-609. 2018.