

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

GÜNTHER KALTMAIER JUNIOR

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE FACHADA TERMO
FOTOVOLTAICO INTEGRADO À ARQUITETURA: ESTUDO DE
CASO NA CIDADE DE CURITIBA, BRASIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2020

GÜNTHER KALTMAIER JUNIOR

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE FACHADA TERMO FOTOVOLTAICO
INTEGRADO À ARQUITETURA – ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE
CURITIBA, BRASIL**

**ANALYSIS OF A BIPV/T FACADE SYSTEM - A CASE STUDY IN THE CITY OF
CURITIBA, BRAZIL**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior.

CURITIBA

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Kaltmaier Junior, Günther

Análise de um sistema de fachada termo fotovoltaico integrado à arquitetura estudo de caso na cidade de Curitiba, Brasil [recurso eletrônico] / Günther Kaltmaier Junior. -- 2020.

1 arquivo texto (87 f.): PDF; 4,57 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 26 out. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 73-77.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Energia - Fontes alternativas - Curitiba (PR). 3. Energia solar - Arquitetura. 4. Conforto térmico - Edifícios. I. Urbanetz Junior, Jair, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO N° 207

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Análise De Um Sistema De Fachada Termo Fotovoltaico Integrado À Arquitetura – Estudo De Caso Na Cidade De Curitiba, Brasil**, defendida em sessão pública pelo Candidato Günther Kaltmaier Junior, no dia 26 de agosto de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Meio Ambiente, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior- Presidente - UTFPR

Prof. Dr. José Alberto Cerri - UFPR

Prof^ª. Dr^ª. Isis Portolan dos Santos - UFSM

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 26 de agosto de 2020.

RESUMO

KALTMAYER JUNIOR, Günther, **Análise de um sistema de fachada termo fotovoltaico Integrado à arquitetura – estudo de caso na cidade de Curitiba, Brasil.** 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A constante e crescente demanda mundial por energia e a necessidade de fontes energéticas sustentáveis, renováveis e não poluidoras é um dos grandes desafios do novo milênio. A energia solar, cuja disponibilidade é inesgotável e irrestrita na escala humana global é uma das alternativas mais promissoras para atender à crescente demanda mundial. A tecnologia fotovoltaica (FV) é a única capaz de converter a energia solar diretamente em eletricidade podendo produzir energia no local de consumo. Quando há um comprometimento estético e funcional entre a tecnologia de matriz fotovoltaica e a arquitetura da edificação, estes sistemas são conhecidos pela abreviação em inglês: BIPV (*Building-integrated photovoltaics*). A revisão da literatura indica que o aquecimento dos módulos FV causa uma gradual redução da eficiência do painel e na energia produzida. No entanto se aproveitar esta energia em sistemas integrados à edificação observam-se alguns usos e vantagens tais como: a redução da temperatura do painel e o aquecimento utilizável em ambientes internos das edificações. Esta tecnologia denomina-se BIPV/T (*Building-integrated photovoltaic/thermal systems*), ou, sistemas termo fotovoltaicos integrados a edificações. Uma edificação experimental foi executada em Curitiba, Paraná, prevendo-se a integração arquitetônica de um painel FV de telureto de cádmio (CdTe) para se avaliar os impactos e benefícios térmicos e elétricos que um sistema de fachada termo fotovoltaica integrado é capaz de proporcionar à uma edificação experimental. A análise consistiu na comparação entre as temperaturas internas (T_i) e externas (T_e) em relação à zona de conforto térmico assim como estimativas de geração elétrica anual com base em aferições realizadas em dias específicos. Os resultados demonstraram que a configuração do sistema ajustada para aquecimento durante o período de inverno propiciou ganhos térmicos sensíveis e imediatos na temperatura interna (T_i) da edificação, contribuindo para uma temperatura média mais elevada em relação à T_e , e por maior período dentro da zona de temperatura conforto. Estimou-se uma energia média anual equivalente à cerca de 360 kWh/ano, calculados a partir das potências instantâneas, aferidas no conector do módulo mais favorável à captação de radiação solar.

Palavras chave: Eficiência energética. Arquitetura. BIPV/T. Conforto térmico.

ABSTRACT

KALTMAIER JUNIOR, Günther, **Analysis of a BIPV/T facade system - a case study in the city of Curitiba, Brazil.** 87p. PPGEC -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

The constant and growing world demand for energy and the need for sustainable, renewable and non-polluting energetic sources is one of the great challenges of the new millennium. Solar energy, whose availability is inexhaustible and unrestricted on the global human scale, is one of the most promising alternatives to meet growing global demand. Photovoltaic technology is the only one capable of converting solar energy directly into electricity. When there is an aesthetic and functional commitment between photovoltaic array technology and building architecture, these systems are known by their abbreviations: BIPV (Building-integrated photovoltaics). It's known that the heating of the PV modules causes a gradual reduction in the efficiency of the panel and therefore, a reduction in the amount of the final energy produced. When using this surplus thermal energy in systems integrated into buildings, some uses and advantages emerges such as the reduction of the panel operation temperature and the use of indoor heating in buildings. This technology known as BIPV/T (Building-integrated photovoltaic/thermal systems). An experimental prototype was built in Curitiba, Paraná, and the architectural integration of a cadmium telluride PV panel (CdTe) is foreseen. The analysis consisted of comparing internal (T_i) and external (T_e) building temperatures concerning to the thermal comfort range, as well as estimates of annual electrical generation based on measurements made on specific days. The results showed that the system configuration adjusted to take advantage of the thermal energy of the panel provided thermal gains in T_i , contributing to a higher average internal temperature and a longer period between the thermal comfort range. An average annual energy equivalent to 360 kWh/year, estimated from the power measured at the connector of the PV module.

Keywords: Energy efficiency, Architecture, BIPV/T, Thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fatia renovável da energia total consumida pelas edificações em 2017.	16
Figura 2: Demanda energética das edificações em diferentes países.	16
Figura 3: Condições máximas e mínimas do estado do ar para a zona de conforto.	23
Figura 4: Mapa da América do Sul com Classificação climática tipo Koppen-Geiger, com indicação da localização e tipo climático de Curitiba.	23
Figura 5: Temperaturas e zona de conforto térmico para a cidade de Curitiba.	25
Figura 6: Componentes da radiação solar.	27
Figura 7: Mapa da disponibilidade de irradiância solar global horizontal.	28
Figura 8: Tipologia de Sistemas FV conforme a aplicação.	31
Figura 9: Esquerda: Exemplo de BAPV. Sistema fotovoltaico aplicado ao telhado de uma edificação existente na Alemanha. Direita: Exemplo de BIPV. Edifício no Quai de Valmy 179, Paris, França.	32
Figura 10: Ábaco do potencial de radiação solar conforme ângulo de inclinação e desvio azimutal das superfícies da cidade de Curitiba.	33
Figura 11: Parcelas do espectro da radiação solar direta incidente convertida em eletricidade ou calor, em função do comprimento de onda.	36
Figura 12: Classificação conforme a tipologia de sistemas BIPV/T.	37
Figura 13: Edifício Solar XXI, Lisboa Portugal, e a fachada composta por sistemas BIPV/T	38
Figura 14: Localização de Curitiba no contexto regional. Sem escala.	43
Figura 15: Localização do experimento no contexto do entorno imediato.	43
Figura 16: Implantação do experimento no local selecionado. Sem escala.	44
Figura 17: Perspectiva externa da edificação experimental.	44
Figura 18: Fases de montagem inicial da edificação experimental.	46
Figura 19: Edificação experimental em fase final de montagem.	46
Figura 20: Aspecto final da edificação.	47
Figura 21: Configuração dos componentes da edificação esquema de vedações e estrutura da edificação experimental. Planta sem escala.	48
Figura 22: Configuração dos componentes da edificação esquema de vedações e estrutura da edificação experimental. Corte sem escala.	48
Figura 23: Tabela 2 da ABNT NBR 15220/2013- parte 3, tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 1.	52
Figura 24: Aberturas internas do sistema.	53
Figura 25: fotografia com localização dos termômetros digitais. Esquerda termômetro interno; direita termômetro externo.	54
Figura 26: Esquematisação do sistema BIPV/T.	55
Figura 27: Configurações esquemáticas do sistema; expectativa de movimentação do ar e trocas de calor sob a incidência de radiação solar.	56
Figura 28: Dados de Irradiação Global Horizontal do local do experimento.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dimensionais do espaço interno da edificação.	49
Tabela 2: Materiais das camadas sucessivas das superfícies da envoltória da edificação, e as respectivas espessuras.	49
Tabela 3: Espessura do material (e), Densidade de massa aparente (ρ), Condutividade térmica (λ) e Calor específico (c) da Parede Leste do experimento.	50
Tabela 4: Espessura, absorvância para ondas curtas (α), emissividade para ondas longas (ε) e resistência térmica de câmaras de ar das camadas dos componentes da parede leste	51
Tabela 5: Resistência térmica total e transmitância térmica das superfícies da envoltória do experimento.	51
Tabela 6: Tabela C.2 da ABNT NBR 15220/2005- parte 3, Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.	52
Tabela 7: Configurações de operação do sistema previstas.	56
Tabela 8: Percentuais comparativos entre T_i e T_e em relação às temperaturas da zona de conforto térmico.	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Dados climatológicos para Curitiba e temperaturas de zona de conforto.	24
Quadro 2: Relação dos materiais componentes das vedações da envoltória da edificação.	50
Quadro 3: Dispositivos e variáveis da configuração de abertura dos dispositivos.	55
Quadro 4: Médias de temperatura de T_i e T_e para julho e agosto de 2018	65
Quadro 5: Médias de temperatura de T_i e T_e para fevereiro de 2019.	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Potência aferida durante do dia 14/01/2019.	62
Gráfico 2: Potência aferida durante o dia 29/09/2019.	62
Gráfico 3: Temperaturas internas e externas em contraste com a as temperaturas da zona de conforto para julho e agosto de 2019.	64
Gráfico 4: Comparação entre os percentuais de T_i e T_e com relação à zona de conforto entre julho e agosto de 2018.	65
Gráfico 5: Percentuais de T_i e T_e comparativos à zona de conforto para os meses de clima frio	66
Gráfico 6: Temperaturas internas e externas em contraste com a as temperaturas da zona de conforto para fevereiro de 2019.	67
Gráfico 7: Comparação entre os percentuais de T_i e T_e com relação à zona de conforto no mês de fevereiro de 2019.	67
Gráfico 8: Percentuais de T_i e T_e em relação às temperaturas da zona de conforto.	68

LISTA DE EQUAÇÕES

$$1) V_{mp} \cong (0,75-0,90) \times VOC$$

$$2) I_{mp} \cong (0,85-0,95) \times ISC$$

$$3) V_{mp} / VOC \cong \text{Coeficiente V}$$

$$4) I_{mp} / ISC \cong \text{Coeficiente I}$$

$$5) P_{mpi} = V_{mpi} \times I_{mpi}$$

$$6) E_{ano2} = \frac{(PFV \cdot PR \cdot H)}{G} \cdot 365$$

$$7) E_h = \sum^n P_{mpi} / 2$$

$$8) E_{\text{mod1 dia}} = \sum_n E_h$$

$$9) E_{\text{mod3 dia}} = E_{\text{mod1 dia}} \times 3$$

$$10) E_{\text{mensal}} = E_{\text{mod3 dia}} \times 30 / 1000$$

$$11) E_{\text{anual}} = E_{\text{mod3 dia}} \times 365 / 1000$$

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Massa de ar
μ	Amplitude térmica
A _i	Amplitude térmica interna
A _e	Amplitude térmica externa
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	Ar atmosférico - câmara não ventilada
AR _B	Ar atmosférico - câmara com ventilação controlável
a-Si	Silício Amorfo
BAPV	<i>Building-attached photovoltaics</i>
BIPV	<i>Building-Integrated photovoltaics</i>
BIPV/T	<i>Building-Integrated Thermal Photovoltaics</i> (Sistemas termo fotovoltaicos)
BIPV/T _a	<i>Building-Integrated Thermal Photovoltaics air based systems</i> (Sistemas termo fotovoltaicos tendo o ar como fluido)
BIPV/T _w	<i>Building-Integrated Thermal Photovoltaics water based systems</i> (Sistemas termo fotovoltaicos tendo a água como fluido)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre-Índio
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CO ₂	Dióxido de Carbono
C _{OMP}	Compensado acabamento natural
E	Energia elétrica gerada
EPS	Poliestireno Expandido (isopor)
EOL	Central Geradora Eólica
FF	<i>Fill Factor</i> ou Fator de Forma
FV	Fotovoltaico
GI	Irradiância solar
GaAs	Arseneto de Gálio
GW	GigaWatt

H	Irradiância no plano inclinado (2,286 kWh.dia)
h	Hora
I	Corrente elétrica
I_{mp}	Corrente de máxima potência;
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
I_{mp}	Corrente elétrica no ponto de máxima potência
I_{SC}	Corrente elétrica de curto-circuito do módulo fotovoltaico
I_{mpi}	Tensão de circuito aberto instantânea;
kW	Quilowatt
L_{VIDRO}	Lã de vidro
m^2	Metro quadrado
M_{AL}	Manta térmica refletiva metalizada multifoil
MET	Índice metabólico do corpo humano
M_{FV}	Módulo fotovoltaico Vidro 3mm - Filme fino CdTe - Vidro 3mm
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
mono-Si	Silício monocristalino
Mtoe	Mega tonelada equivalente de petróleo
°C	Graus célsius
P_{INUS}	Tábuas de pinus de 30 cm sobrepostas (60mm)
P_{MPP}	Potência no ponto de máxima potência
P_{mpi}	Potência instantânea no ponto máximo de potência
PFV	Potência do painel FV (0,85 kW x 3 mód. = 0,255 kW);
PR	Índice de performance (<i>Performance Ratio</i>)(adotado 0,80);
p-Si	<i>Poli-crystalline Silicon</i> (Silício policristalino , ou Multicristalino)
P_{TA}	Pintura com tinta Acrílica fosca
S0	Área de superfície
SFV	Sistemas Fotovoltaicos
SFVCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
STC	<i>Standard Test Conditions (1 kW/m² / 25 °C / AM 1,5 espectro)</i>
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
T_{FIB}	Telha de fibrocimento ondulado - cor cinza claro
TPES	<i>Total primary energy supply</i>

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Tensão elétrica
V_{mp}	Tensão de máxima potência;
V_{mpi}	Corrente de máxima potência instantânea;
V_{oc}	Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico
W	watt
W/m^2	watt por metro quadrado
Wp	Watt-pico
μ -Si	<i>Micro-crystalline Silicon</i> (Silício Microcristalino)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.1.3	Questões Orientadoras	18
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	19
1.3	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA	20
1.4	ESTRUTURA.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	CONFORTO TÉRMICO E O CLIMA DE CURITIBA	22
2.2	ENERGIA SOLAR	26
2.3	APLICAÇÕES E TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR DIRETA	29
2.4	TIPOLOGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AGREGADOS À EDIFICAÇÃO	31
2.5	SISTEMAS TERMO FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS À EDIFICAÇÃO (BIPV/T) ..	35
2.6	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	LOCAL DO EXPERIMENTO	43
3.2	FUNCIONAMENTO E MEDIÇÕES CLIMÁTICAS DO SISTEMA BIPV/T	53
3.3	FUNCIONAMENTO E MEDIÇÕES CLIMÁTICAS DO SISTEMA BIPV/T	54
3.4	ESTRATÉGIAS TÉRMICAS DA EXPERIÊNCIA.....	55
3.5	MEDIÇÕES E ESTIMATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	AFERIÇÕES E ESTIMATIVAS DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA PELO PAINEL FV	60
4.2	AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA DA EDIFICAÇÃO.....	63
5	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – Tabela com relatório de operação do sistema	79
	APÊNDICE B - (V_{oc}) tensão de circuito aberto e (I_{sc}) corrente de curto circuito aferidos no dia 14 de janeiro de 2019.....	81
	APÊNDICE C - potência máxima e estimativas de energia elétrica fornecidas pelo módulo no decorrer do dia 14 de janeiro de 2020.	82

APÊNDICE D - potência máxima e estimativas de energia elétrica fornecidas pelo módulo no decorrer do dia 29 de setembro de 2019.....	83
ANEXO I - Catálogo do módulo fotovoltaico.	84
ANEXO II - Manual do equipamento (termômetro digital) utilizado para mensurar temperaturas internas e externas a edificação modelo NO: DS102.	86
ANEXO III – Interface do <i>software</i> Data Logger 3.3 do equipamento de medição térmica	87

1 INTRODUÇÃO

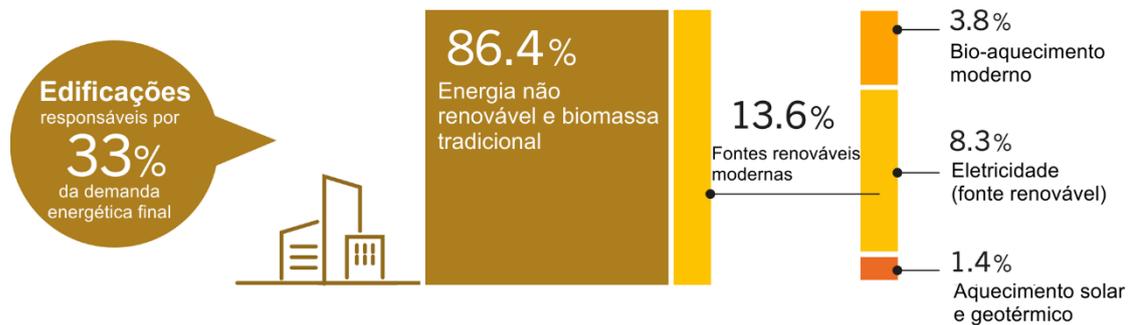
A energia é indispensável para o funcionamento das sociedades modernas, capaz e necessária para suprir as demandas humanas das mais básicas às mais sofisticadas. A disponibilidade contínua e ininterrupta de energia é um fator estratégico para as sociedades modernas. Atualmente as fontes para se adquirir energia com qualidade e quantidade são um fator preponderante, e a opção por fontes menos poluidoras e renováveis, em contrapartida às tradicionais fontes mais poluidoras, é uma das alternativas que podem propiciar o desenvolvimento humano de forma mais sustentável. Existem atualmente diversas alternativas para geração de energia não poluente e/ou adquirida a partir de fontes renováveis, tais como as tecnologias a partir de fonte hidroelétrica, solar, eólica, biomassa e maré-motora (IEA, 2018, p. 5). Apesar do potencial e disponibilidade, as fontes renováveis ainda possuem participação pequena frente às fontes de energia.

Uma das alternativas mais promissoras para atender a crescente e contínua demanda humana por energia é o aproveitamento da radiação solar para geração e aproveitamento de energia térmica e elétrica (PEREIRA *et al.*, 2017). A energia solar pode ser coletada, utilizada e armazenada de diversas maneiras, direta ou indiretamente. Pode ser aproveitada por exemplo para geração direta de eletricidade, a partir da tecnologia fotovoltaica (FV), ou aquecimento, a partir de coletores solares (PINHO; GALDINO, 2014). Um fator decisivo e vantajoso da energia solar fotovoltaica por exemplo, é a possibilidade de estabelecer a fonte geradora próxima ou concomitante ao local de consumo. Em modalidades reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica, como a micro e mini geração distribuída (ANEEL, 2012), a utilização destes sistemas permite ao consumidor gerar parte ou toda a energia consumida em seu imóvel, sendo recompensado com abatimentos na tarifa.

Dados atualizados coletados da ANEEL destacam a participação da fonte solar fotovoltaica no cenário energético nacional de geração distribuída. A geração distribuída a partir de fonte solar fotovoltaica apresenta potência instalada de 3,14 GW em 22 de julho 2020, representando uma fatia de 94,4% dentre um total de 3,59 GW, superando outras fontes como CGH (Central Geradora Hidrelétrica) ou eólica (ANEEL, 2020). Desta forma a energia FV representa uma alternativa viável e que apresenta um crescimento sensível no cenário brasileiro.

Observando-se o consumo de energia com foco nas edificações a Fig. 1 apresenta os dados no cenário global.

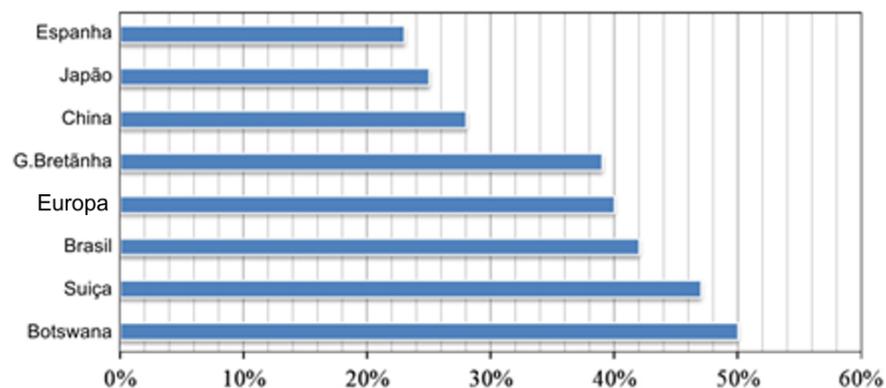
Figura 1: Fatia renovável da energia total consumida pelas edificações em 2017.



Fonte: REN21, 2020. Adaptado pelo autor.

Com relação ao consumo energético, observa-se em 2017 que os edifícios foram responsáveis pelo consumo de 33% da energia final consumida no mundo sendo que apenas 13,6% foi gerada a partir de fontes renováveis modernas (REN21, 2020). Ainda segundo o REN21, 77% da energia consumida pelos edifícios são utilizados para aquecimento e resfriamento (climatização). Os dados demonstram a dependência por fontes não renováveis. No Brasil e outros países o consumo demandado pelas edificações varia comparativamente conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Demanda energética das edificações em diferentes países.



Fonte: Zhang et al., 2016. Modificado pelo Autor.

Conforme os dados da Figura 2 avalia-se que o Brasil apresenta consumo elevado (42%) em comparação a Espanha (23%).

As edificações, apesar de consumirem boa parte da demanda global, possuem um potencial de geração energética intrínseco, pois as superfícies externas dos edifícios sejam horizontais, inclinadas ou verticais, permitem a aplicação de elementos construtivos ativos, tais como fachadas ventiladas e elementos fotovoltaicos integrados, contribuindo tanto no controle

de temperatura interna da edificação quanto na produção de energia elétrica e térmica aproveitáveis.

A pesquisa e desenvolvimento de produtos fotovoltaicos integrados a edificações obteve avanços consideráveis no século XXI. A terminologia que emergiu: BIPV (*Building-integrated photovoltaics*), classifica desta forma os sistemas fotovoltaicos em que há integração arquitetônica. Nestes sistemas os módulos ou painéis fotovoltaicos são incorporados ao projeto e à arquitetura das edificações, substituindo materiais construtivos tradicionais de fachadas, coberturas, *brises-soleil* ou outras partes das edificações.

Dentre os fatores que influenciam na geração elétrica fotovoltaica pode-se destacar a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos. Geralmente os módulos aquecem quando há radiação solar direta incidente, e este aquecimento causa redução da eficiência dos módulos e conseqüentemente reduz a quantidade de energia gerada pelo sistema FV (SKOPLAKI; PALYVOS, 2008. P621). No entanto, atualmente há tecnologias que aproveitam a energia térmica acumulada pelos módulos FV e seus componentes complementares. Se o calor acumulado é evacuado há um benefício para o sistema FV, pois contribui para reduzir a temperaturas dos módulos FV, mas se este calor é aproveitado transferindo a energia térmica para o interior da edificação pode haver um benefício para a climatização da edificação.

Quando o sistema aproveita tanto as energias elétrica e térmica proveniente do painel fotovoltaico denomina-se na literatura científica *Building-integrated photovoltaic thermal system* (BIPV/T), ou sistema termo fotovoltaico integrado à edificação (YANG; ATHIENITIS, 2016. P888). Neste caso, o sistema pode se tornar um componente multifuncional da edificação, cumprindo diversas funções: vedação, fachada, cobertura, gerador elétrico e climatizador térmico.

Geralmente os materiais BIPV e BIPV/T estão integrados à cobertura das edificações (planas ou inclinadas), fachadas e elementos de proteção e sombreamento solar (*brise-soleil*) (JELLE; BREIVIK; ROKENES, 2012). Na Europa por exemplo, o mercado de produtos BIPV possui disponibilidade e aceitação por parte indústria da construção civil e por arquitetos, os quais desempenham papel fundamental neste mercado (VERBERNE et al., 2016). Norman Foster, renomado arquiteto Britânico, cita que a “Arquitetura solar não se trata de modismo, mas de sobrevivência”, deixando claro que a integração da energia solar às edificações é necessária e inevitável (HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013).

Ao se observar o potencial, vantagens e desafios para sistemas fotovoltaicos integrados às fachadas de edificações, busca-se verificar nesta pesquisa o potencial de um sistema termo fotovoltaico, integrado a arquitetura de uma edificação experimental, localizada em Curitiba, Paraná, Brasil, afim de se analisar seus benefícios energéticos.

1.1 OBJETIVOS

Neste capítulo são definidos os objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar os impactos e benefícios térmicos e a geração elétrica fotovoltaica que um sistema de fachada termo fotovoltaico integrado é capaz de proporcionar em uma edificação experimental em Curitiba, Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

Edificar um protótipo arquitetônico com fachada orientada para o equador (norte) afim de se obter o maior potencial radiante conforme o desvio azimutal;

Instalar um sistema BIPV/T funcional na fachada do protótipo para testar o sistema na posição totalmente vertical;

Operar o sistema para que a temperatura interna apresente melhor resultado em relação à faixa de conforto térmico prevista para Curitiba;

Estimar a geração elétrica a partir do módulo mais favorável à captação de radiação solar.

1.1.3 Questões Orientadoras

Quais impactos e benefícios térmicos o sistema é capaz de produzir na temperatura interna e nas condições de conforto térmico interno da edificação?

Quanta energia elétrica o sistema é capaz de produzir face a diferentes condições climáticas?

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema deste trabalho se limita na abordagem dos seguintes aspectos:

- Das temperaturas internas e externas da edificação experimental, numa abordagem comparativa temporal, em relação à zona de conforto térmico prevista para a localidade;
- Da contribuição elétrica fotovoltaica, aferida a partir de um módulo fotovoltaico o qual compõe um painel fotovoltaico composto por 3 módulos de Telureto de Cádmio (CdTe).

Para viabilizar o experimento, uma edificação experimental com 5,34 m² de área construída foi executada na cidade de Curitiba em 2018, com o intuito de aferir a energia elétrica produzida pelo sistema. A edificação possui um sistema termo fotovoltaico integrado à fachada da edificação e foi executada quase que totalmente em madeira, seja nos seus elementos estruturais e de vedação (estrutura, paredes externas e internas, tetos e piso interno e externo), complementada por uma cobertura de telhas de fibrocimento ondulado e materiais de isolamento térmico entre as camadas externas e internas da edificação. O sistema utilizado é similar ao sistema conhecido como *wood-frame*.

As aferições de temperatura ocorreram internamente e imediatamente externas à edificação experimental. O período está compreendido entre os meses de julho a agosto de 2018 e janeiro a março de 2019.

O sistema de aproveitamento de energia térmica ocorre com o aquecimento do ar na cavidade dentre o painel e a fachada da edificação, onde o diferencial de pressão promove a convecção natural do ar aquecido.

As aferições elétricas ocorreram em datas específicas, compreendendo dias específicos do ano de 2019.

O sistema termo fotovoltaico consiste de um painel com 3 módulos de telureto de cádmio de 85W de potência nominal cada (STC à 1 kW/m² e 25 °C), cujo filme fino de CdTe (que promove a conversão fotovoltaica) fica encapsulado dentre duas lâminas de vidro, e possui aparência de coloração negra. O sistema não está conectado à rede elétrica e a energia elétrica gerada não é aproveitada. O sistema também não possui inversor conectado e a energia foi aferida a partir dos conectores de um único módulo FV, selecionado a partir da posição mais favorável com relação a evitar-se o sombreamento de elementos do entorno. O painel foi instalado com desvio azimutal 0° (Norte) e com inclinação de 90° (posição totalmente vertical).

1.3 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Além da arquitetura bioclimática, que aproveita a radiação solar para iluminação e aquecimento naturais das edificações, tecnologias contemporâneas surgem num contexto global do aumento da demanda energética e procura por alternativas e soluções mais sustentáveis. Um exemplo para geração energética sustentável contempla a tecnologia fotovoltaica, cujos equipamentos utilizam a radiação solar para gerar eletricidade.

Quando integrados a edificações os sistemas fotovoltaicos são denominados BIPV (*Building-integrated photovoltaics*), ou sistemas fotovoltaicos integrados às edificações, que substituem materiais convencionais nos elementos construtivos da envoltória da edificação (fachada ou cobertura por exemplo) e geram energia concomitantemente (HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013).

É de relevância e conhecimento científico que a temperatura dos módulos fotovoltaicos tem um papel fundamental no processo de conversão fotovoltaica (SKOPLAKI; PALYVOS, 2008. P621), impactando tanto na eficiência quanto na energia resultante do sistema, as quais sofrem redução quando há o aumento da temperatura. Portanto, o aquecimento dos módulos FV impacta negativamente na quantidade de elétrica que o módulo FV é capaz de produzir, e este calor pode ser simplesmente acumulado na porção posterior dos módulos ou por exemplo evacuado para a atmosfera por meio de sistemas de exaustão ou ventilação natural.

Porém, se o calor for aproveitado e direcionado para o ambiente interno da edificação, pode proporcionar tanto o resfriamento dos módulos, otimizando a geração elétrica, quanto o aquecimento do ar interno, o que é desejável em regiões de climas frios e temperados por exemplo. Estes sistemas são intitulados *Building-integrated photovoltaic thermal system* (BIPV-T), ou sistema termo fotovoltaico integrado à edificação (YANG; ATHIENITIS, 2016. P888). Neste caso, o sistema pode se tornar um componente multifuncional da edificação, cumprindo diversas funções: vedação, fachada, cobertura, gerador elétrico e climatizador térmico.

O desenvolvimento de pesquisas nesta área tecnológica está em pauta crescente na comunidade científica, e já surgem exemplares de protótipos com perspectivas de produção comercial em países como o Canadá (YANG; ATHIENITIS, 2016).

No Brasil esta temática ainda é pouco abordada, e abre espaço para experiências no território nacional. A resolução 482/2012 publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL, 2012) e depois revisada pela Resolução Normativa N° 687 (ANEEL, 2015) abriu a possibilidade para o consumidor brasileiro gerar a própria energia, estabelecendo os critérios e parâmetros para micro e mini geração distribuída a partir de fontes renováveis, abrangendo as tecnologias eólica e fotovoltaica por exemplo. Esta abertura impactou numa crescente demanda por sistemas fotovoltaicos e o aparecimento de diversas empresas especializadas.

Em se tratando da energia térmica recuperável, o clima temperado de Curitiba, cujo inverno apresenta temperaturas médias abaixo de 18 °C, mas com disponibilidade de radiação solar durante os meses mais frios (INMET, 2018).

Expostos os argumentos, destaca-se a necessidade de estudos afim de minimizar os impactos negativos oriundos da necessidade humana por energia diretamente utilizável, aproveitar a energia natural do sol na geração elétrica e aquecimento em climas frios, desta forma otimizando a eficiência energética em edificações, explorando as possibilidades tecnológicas atuais, propondo-se soluções de produtos que futuramente poderão compor as superfícies arquitetônicas mundiais

1.4 ESTRUTURA

- Capítulo 1: Introdução.
- Capítulo 2: Revisão da Literatura. Aborda conceitos sobre a energia e radiação solar, abordagem sobre o clima de Curitiba, algumas aplicações e tecnologias de aproveitamento da energia solar direta, tipologia de sistemas fotovoltaicos, integração fotovoltaica na arquitetura, e conceitos da aplicação de sistemas termo fotovoltaicos integrados a edificações;
- Capítulo 3: Metodologia: Neste capítulo serão apresentados o método científico adotado, as características construtivas do objeto de estudo, grandezas e variáveis estudadas, método de aferições e equações utilizadas.
- Capítulo 4: Resultados e Discussões: São apresentados os resultados, as análises e interpretações embasadas na literatura, nos dados coletados e cálculos realizados. Apresentam-se os gráficos e análises referentes as leituras verificadas.
- Capítulo 5: Conclusões: Neste capítulo serão apresentadas as conclusões originadas pela análise dos dados assim como as oportunidades e questionamentos para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda aspectos gerais sobre conforto ambiental e o clima de Curitiba, os principais fundamentos, tecnologias e aplicações da energia solar direta, e a pesquisa bibliográfica sobre a energia solar termo fotovoltaica integrada à arquitetura.

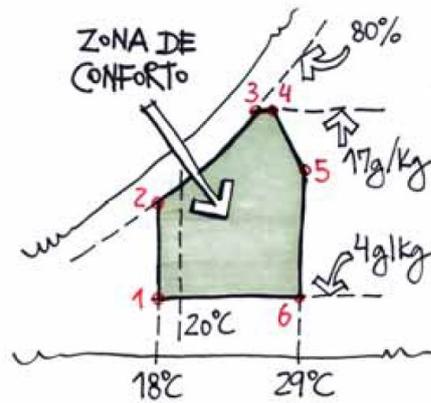
2.1 CONFORTO TÉRMICO E O CLIMA DE CURITIBA

Conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve o indivíduo (ASHRAE, 2005). Em seu trabalho Baruch Givoni (GIVONI, 1992) afirma que o conforto térmico em edificações depende da variação do clima externo e da experiência dos usuários (LAMBERTS; DUTRA, PEREIRA, 2014, p. 46), e que a aclimação dos usuários em edificações não condicionadas e ventiladas naturalmente impacta numa maior variação na zona da temperatura de conforto. Com este fundamento Givoni concebeu então uma carta bioclimática adaptada para países em desenvolvimento, na qual os limites máximos e mínimos de conforto térmico foram expandidos. Na área de conforto térmico, a “zona de conforto” é definida como uma faixa de condições climáticas dentro da qual a maioria das pessoas não sente frio ou calor (GIVONI, 1992) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). A carta bioclimática prevista por Givoni utiliza limites máximos e mínimos de temperatura de conforto, com parâmetros definidos pelos dados de temperatura de bulbo seco e umidade do ar.

Além da temperatura, outros fatores ambientais influenciam na sensação de confortos tais como a temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa (HOYT *et. al*, 2019). Dentre os principais fatores comportamentais humanos mensuráveis estão a taxa de vestimenta (CLO) e o índice metabólico (MET) (HOYT *et. al*, 2019). Além destes, diversos fatores tais como a adaptação ao clima regional, taxa de gordura subcutânea, idade e gênero também influenciam na sensação de conforto térmico para cada indivíduo (LAMBERTS; DUTRA, PEREIRA, 2014). Portanto, estas interdependências dos diversos fatores relacionados influenciam na temperatura de conforto, conforme a atividade que está sendo realizada num ambiente, roupas e características de cada indivíduo.

Para normalização destes parâmetros, a carta bioclimática proposta por Givoni e adaptada para o clima Brasileiro foi demonstrada por LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA conforme a Figura 3 (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Figura 3: Condições máximas e mínimas do estado do ar para a zona de conforto.

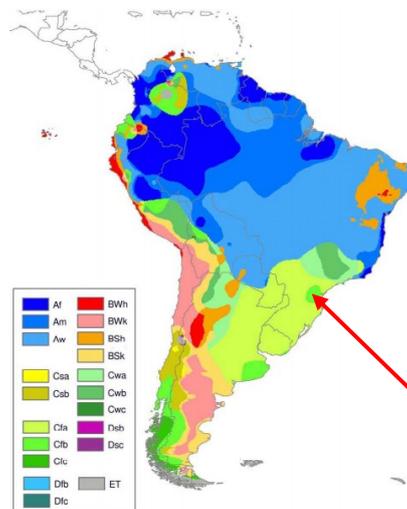


Fonte: LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 2014.

Nesta carta a zona de conforto limita-se à temperaturas entre 18 °C à 29 °C, dependendo das características de temperatura de cada mês, com umidade relativa entre 20% e 80%, e umidade absoluta do ar entre 4g/kg e 17g/kg (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Os limites inferiores e superiores de temperatura e umidade definem uma forma a partir dos encontros dos eixos (numerais de 1 à 6) representado uma condição em que o ser humano médio irá se encontrar em conforto térmico em situação de repouso.

Na climatologia, diversos modelos propõem diferentes classificações climáticas com critérios próprios para caracterizar e normalizar o clima de diferentes regiões. Na classificação climática de Köppen-Geiger (KÖPPEN, GEIGER, 1936), atualizada por Peel, Finnlaysen e McMahon em 2007 (PEEL, FINNLAYSON, MACMAHON, 2007) (Figura 4) observa-se a localização de Curitiba no tipo Climático Cfb.

Figura 4: Mapa da América do Sul com Classificação climática tipo Koppen-Geiger, com indicação da localização e tipo climático de de Curitiba.



Fonte: Adaptado de PEEL; FINNLAYSON, MCMAHON, 2007.

O clima tipo Cfb definido como Clima Temperado Oceânico possui características mesotérmicas e períodos quentes e frios bem definidos, umidade e precipitação significativa em todos os meses, sem estação seca e chuvosa bem definidos. Possui verão temperado com temperatura média do ar no mês mais quente abaixo de 22 °C, que no caso de Curitiba ocorre no mês de fevereiro com 21 °C (INMET, 2018). Estas características climáticas descrevem um parâmetro geral e global, porém quanto aos parâmetros climáticos específicos de uma localidade, outros dados devem ser observados.

Porém, para se obter um quadro mais preciso do clima local é possível observar outras variáveis climáticas, quantificadas em estações meteorológicas, e que descrevem as características gerais de uma região em termos de sol, nuvens, temperatura, ventos, umidade e precipitações (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014) (INMET, 2018). No Brasil os dados climáticos mais difundidos são as Normais Climatológicas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014) (INMET, 2018). O Quadro 1 demonstra dados de algumas Normais Climatológicas de Curitiba, conforme dados de arquivos climáticos obtidos pelo site e planilhas disponibilizadas pelo INMET referente às aferições anuais médias realizadas entre os anos de 1981 e 2010 (INMET, 2018).

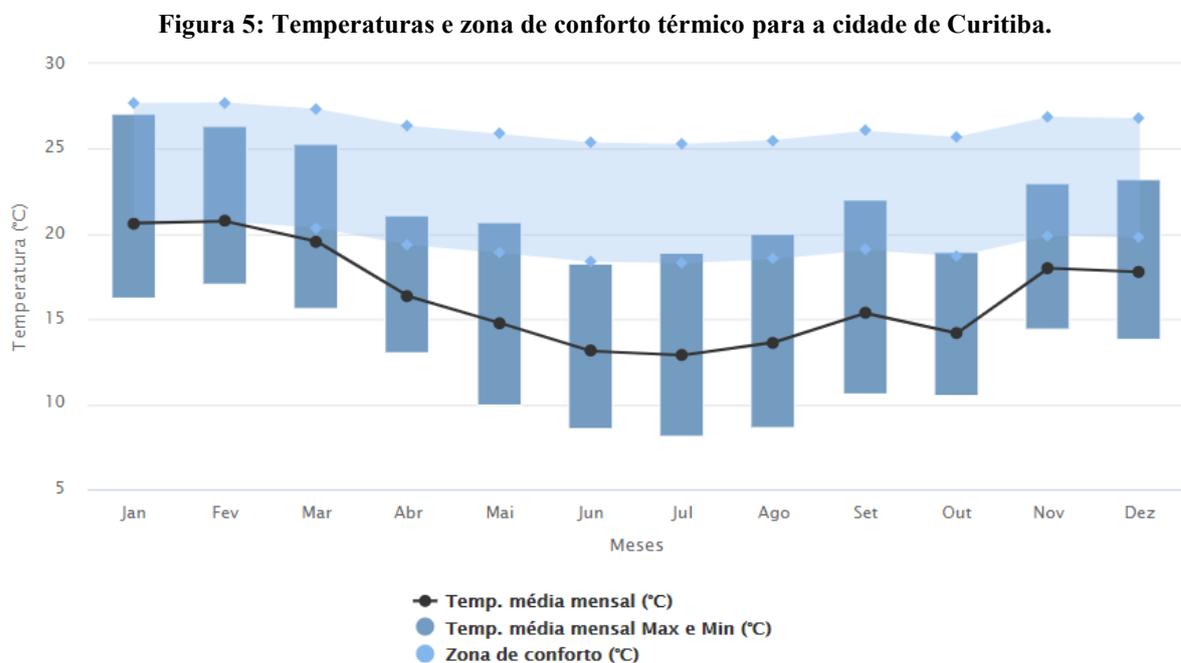
Quadro 1: Dados climatológicos para Curitiba e temperaturas de zona de conforto.

Mês	Jan	Fev.	Mar	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set	Out	Nov.	Dez	Ano
Temperatura Máxima Média (°C)	26,8	26,8	26,00	24,0	20,8	20,1	19,7	21,5	21,4	23,1	25,0	26,2	23,5
Temperatura Mínima Média (°C)	17,2	17,4	16,5	14,6	11,2	9,7	9,0	9,6	11,1	13,2	14,9	16,2	13,4
Temperatura Média Compensada - Bulbo Seco (°C)	20,9	21,0	20,1	18,3	15,1	13,9	13,5	14,6	15,3	17,1	18,9	20,2	17,4
Temperatura Máxima Absoluta (°C)	34,3	33,5	33,9	31,8	29,4	27,3	28,2	31,6	33,7	33,1	34,0	33,6	34,3
Temperatura Mínima Absoluta (°C)	10,2	10,8	6,6	2,5	-1,3	-1,6	-3,5	-1,9	0,4	2,6	7,1	9,0	-3,5
Zona de conforto temp. max (°C)	27,7	27,7	27,3	26,3	25,8	25,3	25,2	25,5	26,0	25,7	26,8	26,8	26,3
Zona de conforto temp. min (°C)	20,7	20,7	20,3	19,3	18,8	18,3	18,2	18,5	19,1	18,7	19,9	19,8	19,3
Precipitação Acumulada (mm)	218,3	166,2	147,0	95,7	113,0	94,1	108,3	74,0	141,4	138,7	124,4	154,2	1575
Umidade Relativa do Ar (%)	81,2	81,3	82,2	82,5	83,4	82,3	80,4	77,1	80,8	81,7	79,2	79,6	81,0
Insolação Total (horas)	160,5	151,3	163,1	155,5	148,8	141,3	162,1	173,0	124,3	136,7	163,5	164,7	1844

Fonte: INMET, 2018. Adaptado pelo Autor.

O período mais frio ocorre predominantemente no inverno, ocorrendo temperaturas médias anual e mensais de maio a outubro abaixo de 18,0 °C. As temperaturas mínimas absolutas variam de -3,5 °C à 10,2 °C. Em todos os períodos observa-se cerca de 10 °C de amplitude térmica entre as máximas e mínimas médias mensais e anual. A temperatura média mensal oscila entre 13,5 °C em julho e 21 °C em fevereiro, representando uma variação térmica entre o mês mais frio e mais quente na ordem de 7,5 °C. Embora as temperaturas mínimas ocorram no inverno, este período possui relativamente menor quantidade de precipitação acumulada, e nos meses de julho e agosto observam-se quantidades similares de horas de sol. Estas características específicas de julho e agosto indicam um potencial de aproveitamento da radiação solar a ser explorado justamente no período em que a energia térmica é desejável nas edificações curitibanas aproveitando o aquecimento passivo de diferentes elementos construtivo (cobertura, fachadas e aberturas).

A temperatura máxima e mínima prevista para estabelecer a zona de conforto térmico em Curitiba variam de acordo com os meses e estações do ano, conforme pode se observar na Figura 5. Para esta dissertação serão utilizados os dados disponibilizados pelo Ministério do Meio Ambiente (2020). A Figura 5 refere-se à edificações naturalmente ventiladas fundamentada nos conceitos estudados por Givoni (1992).



Fonte: Brasil, 2020.

Observa-se que Curitiba possui temperaturas médias mensais geralmente abaixo da temperatura mínima de conforto, demonstrando um clima tipicamente frio no qual se faz necessário o aquecimento das edificações.

A normativa NBR 15.220-parte 3, que trata da classificação climática brasileira, estabelece 8 regiões distintas caracterizando a Zona Bioclimática 1 (ZB1) para Curitiba, dentre as regiões do território brasileiro com clima mais frio. Já há estudos e propostas sugerindo a modificação ou ajustes da classificação vigente (RORIZ, 2012) (BAVARESCO et al., 2017), propondo mais subdivisões climáticas.

O estudo dessas características climáticas indica que a temperatura de Curitiba é geralmente mais fria em relação à zona de conforto térmico, predominantemente no período próximo à estação de inverno.

2.2 ENERGIA SOLAR

A energia solar, no seu aproveitamento direto ou indireto, está disponível em todo o globo, em maior ou menor intensidade. Pela disponibilidade irrestrita e contínua a energia solar direta é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios do milênio (PEREIRA *et al.*, 2017).

A rigor, a energia solar direta não é renovável, mas uma fonte inesgotável, considerando-se a escala de tempo humana e terrestre, e as características eletromagnéticas de espectro e de comprimento de onda são diretamente úteis e necessárias para os seres vivos seja na forma de iluminação natural (luz visível) ou como fonte de calor (ondas longas/infravermelho) (PEREIRA *et al.*, 2017).

Na escala terrestre a energia solar é a causa de diversos fenômenos físicos responsáveis pelos ciclos energéticos terrestres. A energia solar propicia a dinâmica em larga escala de gases na atmosfera (ventos) e nos oceanos (correntes oceânicas), os ciclos hidrológicos (a partir da evaporação e precipitação) (PEREIRA *et al.*, 2017), e está indiretamente incorporada na matéria orgânica de plantas e animais, e nos recursos energéticos fósseis (petróleo, carvão e gás natural). Esta energia é utilizada e compartilhada entre os seres e fenômenos de forma subsequente, ou seja, indiretamente.

A energia proveniente do Sol é emitida na forma de radiação eletromagnética e quando parte dessa energia é interceptada pela Terra, os diferentes comprimentos de onda da radiação

interagem de forma distinta com os constituintes atmosféricos, sofrendo processos de absorção e espalhamento (PEREIRA *et al.*, 2017). Os processos físicos de espalhamento da radiação solar são produzidos por moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão. Os processos físicos de absorção ocorrem com moléculas de ozônio (O_3), vapor de água, oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) (PEREIRA *et al.*, 2017). Geralmente, os processos físicos atenuam a irradiação solar fazendo com que a irradiância incidente na superfície da Terra atinja seu valor máximo de aproximadamente 1.000 W/m^2 no meio dia solar (momento do dia em que o Sol está na posição mais elevada de modo que a radiação solar percorre a menor espessura de atmosfera) em condições de céu claro.

A irradiância solar que incide em uma superfície é composta pelas componentes direta e difusa. A irradiância solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2017).

A Figura 6 demonstra esquematicamente os componentes da irradiância solar conforme a interação atmosférica terrestre.

Figura 6: Componentes da radiação solar.

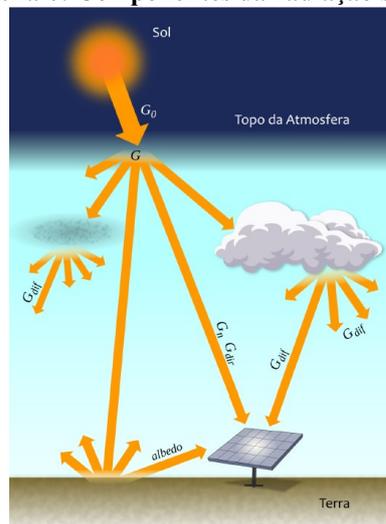


Figura 13. Componentes da irradiância solar.

Fonte: PEREIRA *et al.*, 2017.

Conforme a nomenclatura e classificação do Atlas Brasileiro de Energia Solar, a terminologia adotada neste trabalho é a seguinte:

Irradiância extraterrestre (G_0): é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera ou *GTOA*.

Irradiância direta normal (G_n): também conhecida como DNI, é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.

Irradiância difusa horizontal (G_{dif}): é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).

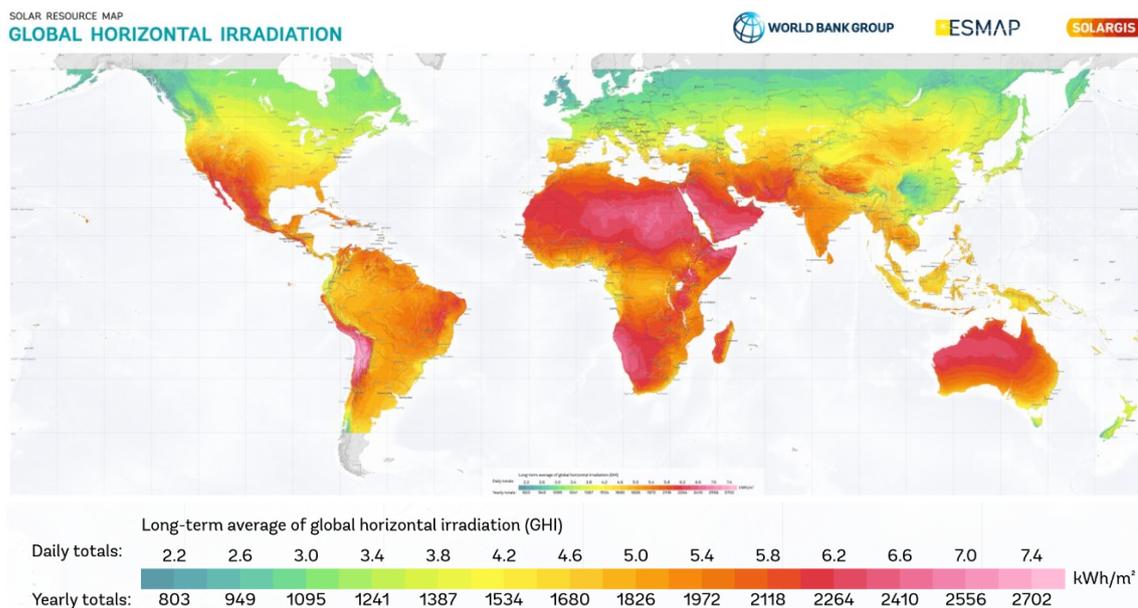
Irradiância direta horizontal (G_{dir}): é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal (DNI) e o cosseno do ângulo zenital solar.

Irradiância global horizontal (G): é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é dada pela soma $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$ onde θ_z é o ângulo zenital.

Irradiância no plano inclinado (G_i): é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra.

Na literatura é possível encontrar diversos mapas com os diferentes parâmetros de irradiância solar. A Figura 7 representa a disponibilidade da irradiância global horizontal no globo terrestre, com a média diária e total anual, demonstrando o potencial solar sobreposto ao mapa global.

Figura 7: Mapa da disponibilidade de irradiância solar global horizontal.



Fonte: Global Solar Atlas. 2019. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/downloads/world>>. Acesso em 08/03/2020.

Verifica-se o acesso global à irradiância solar, com o maior potencial solar localizado nas regiões entre as latitudes 30° S e 35° N, com destaque para o norte e sudoeste do continente

africano, porção noroeste do continente australiano, península do oriente médio, sudoeste norte americano, México, nordeste brasileiro e centro leste sulamericano. Nestas regiões a irradiação anual pode chegar a 2.700 kWh/m².

No território brasileiro a radiação varia conforme o regime climático e posicionamento em relação ao Equador (Latitude), dentre outros fatores, sendo que em Curitiba a irradiação global horizontal média anual é de cerca de 1.617 kWh/m² correspondendo à uma média diária de cerca de 4,773 kWh/m². Além da disponibilidade da irradiação outros fatores são determinantes e devem ser considerados na viabilidade do aproveitamento da energia solar direta, principalmente fatores de viabilidade social, ambiental, viabilidade técnica, características topográficas (terreno) e do entorno imediato (elementos naturais ou antrópicos que possam sombrear os módulos), dentre outros.

2.3 APLICAÇÕES E TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR DIRETA

A história do aproveitamento da energia solar direta a história tem início quando antigas civilizações descobriram que edificações com aberturas voltadas para sol (face equatorial do edifício) possuíam mais iluminação e mais aquecimento, mesmo nos períodos mais frios ou com menor incidência de radiação, técnica passiva de construção conhecida atualmente como arquitetura bioclimática.

As aplicações da energia solar direta são classificadas em cinco categorias conforme a tecnologia utilizada: solar passiva e iluminação natural, aquecimento e refrigeração, geração elétrica fotovoltaica, geração elétrica indireta a partir de concentradores solares térmicos de alta temperatura, e produção de combustível solar químico (PINHO; GALDINO, 2014). A energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica são as duas principais aplicações da energia solar direta, sendo que a opção térmica converte a radiação solar em calor útil, e no caso da fotovoltaica, converte a energia proveniente do sol diretamente em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico (RÜTHER, 2004).

No caso da energia solar térmica o interesse está na quantidade de energia que um determinado corpo é capaz de absorver e transmitir, sob a forma de calor, a partir da radiação solar incidente no mesmo (PINHO; GALDINO, 2014). Os equipamentos mais difundidos e utilizados são conhecidos como coletores solares térmicos, que são aquecedores de fluidos

líquidos ou gasosos, podendo ser classificados em coletores planos ou concentradores (PINHO; GALDINO, 2014). A energia térmica coletada é principalmente aproveitada para o aquecimento da água, tais como em sistemas individuais e isolados para o aquecimento de água de uso de edificações, ou para a climatização de ambientes através do aquecimento ou refrigeração do ar interno de edificações. Aplicações de médio e grande porte ocorrem em usinas concentradoras solares térmicas (CSP – *Concentrated Solar Power*) (PINHO; GALDINO, 2014).

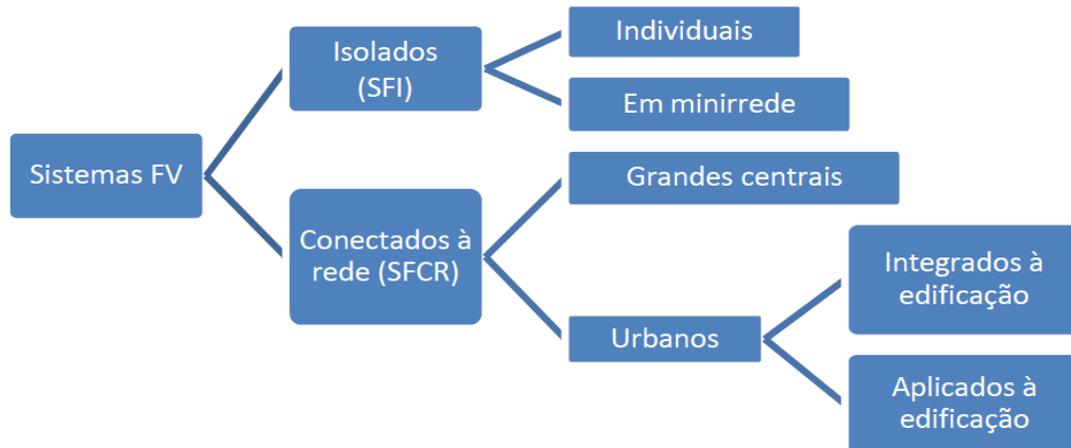
A tecnologia mais difundida e aplicada atualmente a transformação direta radiação solar em energia elétrica é a tecnologia fotovoltaica. O fenômeno físico responsável por converter luz em eletricidade foi observado primeiramente por Edmund Becquerel em 1839, a partir de uma célula eletroquímica, e é denominado efeito fotovoltaico. Basicamente o efeito ocorre quando a luz incide sobre uma célula fotovoltaica (FV) e transfere energia suficiente para liberar elétrons do material.

Somente em 1876 o primeiro aparato fotovoltaico foi concebido a partir de materiais sólidos, e a produção industrial se inicia 80 anos após, em 1956, acompanhando o desenvolvimento da indústria e tecnologia eletrônica (PINHO; GALDINO, 2014)p. 52 . O sistema fotovoltaico é composto por diversos componentes (inversor CC/CA, medidores, condutores e fixações) sendo o painel fotovoltaico o elemento principal. O painel fotovoltaico é o elemento formado por um ou mais módulos FV. Conforme a Norma técnica NBR 10899 – Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia, o módulo FV é a unidade básica, formada pela associação de um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica (ABNT, 2013).

Diversas tecnologias na fabricação de módulos FV estão disponíveis atualmente e as células manufaturadas a partir de lâminas de Silício (Si) cristalino (monocristalino ou policristalino) representam cerca de 81% da produção mundial. As outras tecnologias se baseiam em filmes finos tais como de telureto de Cádmio (CdTe), disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS), Silício amorfo hidrogenado (a-Si: H), silício microcristalino (mc-Si) e silício crescido em fintas (Si-fitas) (PINHO, GALDINO, 2014) p. 51.

Quanto a aplicação, sistemas FV podem ser classificados primariamente em sistemas FV isolados (SFVI) ou sistemas FV conectados à rede (SFVCR) (URBANETZ, 2010) conforme a Figura 8.

Figura 8: Tipologia de Sistemas FV conforme a aplicação.



Fonte: URBANETZ, J; 2010.

Em um sistema fotovoltaico isolado (SFVI) a geração de energia ocorre somente quando há radiação solar, e no caso dos sistemas isolados precisam de um sistema de armazenamento de energia para o uso na ausência de radiação solar, e geralmente estão agregados à um banco de baterias (URBANETZ, 2010). Os sistemas conectados à rede são aqueles em que a potência gerada pelo gerador FV é compartilhada e entregue diretamente na rede elétrica local. Estes sistemas dispensam equipamento para armazenamento tais como baterias (PINHO, GALDINO, 2014). Neste caso a energia gerada excedente ao consumo imediato será compartilhada com a rede, e no caso de maior demanda ou períodos com pouca ou nenhuma radiação, a energia será compensada pela rede elétrica. Os SFVCR podem ser instalados em grandes usinas e centrais elétricas, ou em sistemas urbanos aplicados a edificações, ou integrados à edificação, sendo o último o tipo abordado mais especificamente neste trabalho.

2.4 TIPOLOGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AGREGADOS À EDIFICAÇÃO

Duas classificações principais podem ser utilizadas para definir a construção fotovoltaica aplicada a arquitetura quanto à matriz projetual construtiva: BIPV e BAPV. Os termos são abreviações e referem-se aos termos em inglês:

BIPV – *Building-integrated Photovoltaics*, traduzindo-se para o português: fotovoltaica integrada às edificações, ou sistemas fotovoltaicos integrados às edificações, ou o termo utilizado no trabalho: sistemas fotovoltaicos integrados à arquitetura.

BAPV - *Building Attached (or) Applied Photovoltaics*. Traduzindo-se para o português, fotovoltaica anexada (ou) aplicada às edificações (ou) à Arquitetura. A Figura 9 demonstra duas aplicações arquitetônicas de sistemas fotovoltaicos.

Figura 9: Esquerda: Exemplo de BAPV. Sistema fotovoltaico aplicado ao telhado de uma edificação existente na Alemanha. Direita: Exemplo de BIPV. Edifício no *Quai de Valmy 179*, Paris, França.



Fonte: Adaptado de HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013.

Conforme se observa na figura 9, sistemas do tipo BAPV são considerados geralmente uma adição ao edifício, não tendo relevância decisiva no momento de concepção arquitetônica original e não diretamente relacionadas com aspectos funcionais da estrutura e/ou materiais da envoltória. Já os sistemas do tipo BIPV integram com elementos construtivos da arquitetura e são concebidos concomitantemente ao projeto arquitetônico.

Tradicionalmente a integração fotovoltaica à arquitetura é feita na maioria de maneira tradicional, sem explorar as características construtivas dos módulos, sendo que a maioria dos módulos é integrada nas coberturas das edificações, mas não fazem parte da composição formal da edificação (SANTOS, 2013).

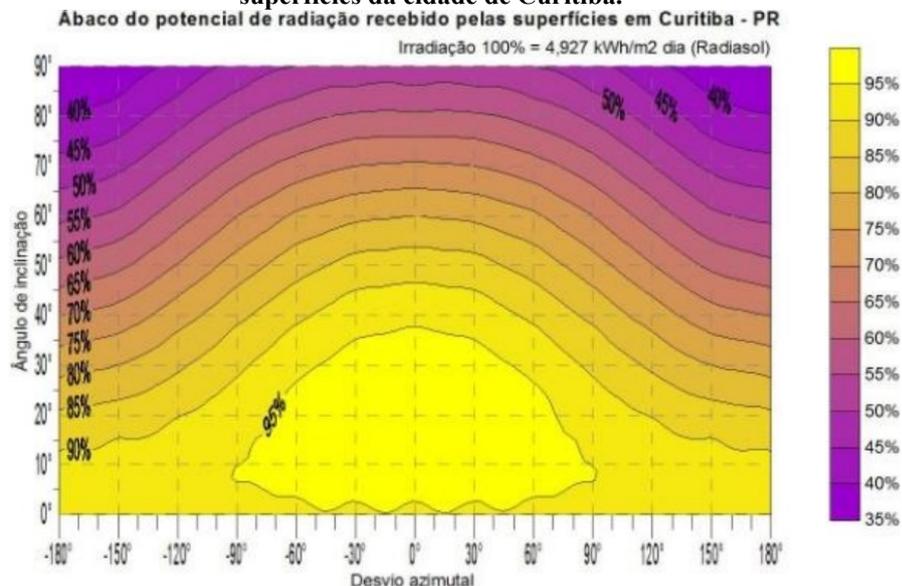
Santos (2013) observa ainda que “ os arquitetos brasileiros ainda não possuem conhecimentos específicos sobre a utilização dos módulos fotovoltaicos como elementos para a arquitetura” e que um dos motivos é a preocupação com o desempenho técnico da tecnologia FV. Estes aspectos revelam que o potencial estético pouco explorado pelos arquitetos e pelo setor da construção civil nacionais se devem pela “preocupação”, ou seja, boa parte devido ao desconhecimento técnico da tecnologia.

Um dos aspectos mais importantes no processo de tomada de decisões é a orientação dos módulos em relação ao sol, que envolve geometria e irradiação, e que conseqüentemente irão influenciar o projeto desde o início. Estes fatores impactam principalmente na forma

externa da edificação (volume arquitetônico) e nos aspectos de superfícies das fachadas (material de revestimento da envoltória), pois a integração fotovoltaica de sucesso implica em equilibrar os aspectos estéticos, energéticos e construtivos.

A adoção de módulos fotovoltaicos como elemento construtivo por arquitetos e projetistas depende do compromisso entre forma e performance (URBANETZ, ZOMER; RUTHER, 2011). Dentro do aspecto da performance sabe-se que módulos com orientação mais favorável irão gerar mais energia pois desta forma são capazes de captar mais radiação solar direta. Isto implica em avaliar preliminarmente as inclinações e orientações azimutais dos módulos. Para cada latitude há uma porção ideal do céu que irá proporcionar mais radiação solar incidente na superfície do módulo, observando-se o ângulo de inclinação do módulo e seu desvio azimutal, que em conjunto irão determinar a orientação da superfície do módulo FV. Em seu trabalho, Santos (2013) propõe uma ferramenta computacional de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura, visando facilitar os processos de desenvolvimento de projetos de integração fotovoltaica oferecendo um ábaco solar como mecanismo de estimativa. A Figura 10 revela o potencial de irradiação solar para a Cidade de Curitiba, Paraná, Brasil.

Figura 10: Ábaco do potencial de radiação solar conforme ângulo de inclinação e desvio azimutal das superfícies da cidade de Curitiba.



Fonte: SANTOS, 2013.

Em Curitiba, situada em 25,4°S, 49,2°O, observa-se um maior potencial nas faixas de inclinação entre 10° e 30° e com desvio azimutal dentre -60° e 60°. Nesta faixa a radiação que incide sobre o módulo FV fica entre 95% e 100% da irradiação em um dia típico, ou seja, há

uma boa margem de adaptação formal arquitetônica sem influenciar significativamente na geração FV, e uma margem ainda maior se for admissível assumir uma geração 20% aquém da ideal. No entanto para módulos posicionados com inclinação vertical (90°) e desvio azimutal 0° observa-se um percentual de absorção em torno de 50% se comparado à situação ideal.

No caso do tipo BIPV os sistemas são considerados uma parte funcional da estrutura ou envólucro do edifício, ou seja, são arquitetonicamente integrados ao projeto do edifício, desde a concepção inicial. Essa categoria inclui projetos que substituem os materiais de construção convencionais, tais como materiais de cobertura, revestimentos de fachadas ou superfícies translúcidas da edificação, mas sempre externamente, ou seja, na envoltória. Estes tipos de produtos podem ser em alguns casos indistinguíveis de seus homólogos não-fotovoltaicos. Esteticamente, isso pode ser atraente quando há um desejo para manter a continuidade arquitetônica e não atrair a atenção para a matriz fotovoltaica.

Kaltmaier (2015, p.27), em trabalho sobre sistemas fotovoltaicos integrados à edificação observa que na prática essas duas classificações podem não estar evidentes, pois em situações de RETROFIT a aparência da edificação pode ser melhorada e atualizada, com resultado estético superior ao original, e sem que se perceba o sistema como uma adição alheia ao edifício, mas como um conjunto arquitetônico holístico. A integração fotovoltaica de sucesso depende basicamente do comprometimento e cumplicidade técnica, estética e energética entre a arquitetura e a matriz fotovoltaica (KALTMAIER, 2015).

Um dos principais fatores neste tipo de aplicação arquitetônica é o custo dos equipamentos, uma vez que a fonte solar é irrestrita e sem custo. A indústria vem desenvolvendo produtos cada vez mais disponíveis, variados, avançados, eficientes, esteticamente agradáveis, prontos para serem utilizados por arquitetos e construtores. Isto vem acompanhado por uma redução gradual no custo destes equipamentos (HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013). O custo é considerado um fator limitante, mas que tende à ser minimizado conforme haja o desenvolvimento, produção de módulos em quantidades maiores espera-se aplicações mais numerosas de sistemas do tipo BIPV, pois a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações é uma tendência mundial (URBANETZ, ZOMER; RUTHER, 2011).

2.5 SISTEMAS TERMO FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS À EDIFICAÇÃO (BIPV/T)

Embora a pesquisa e desenvolvimento de sistemas híbridos termo fotovoltaicos tenha iniciado nos anos 1970, o conceito de sistema termo fotovoltaicos integrados a edificações emerge nos anos 1990, com a instalação de um BIPV/T na cobertura de um restaurante na Carolina do Norte/EUA, para geração de calor e eletricidade. Na literatura científica o termo usual para definir este tipo de sistema é BIPV-T (*Building-integrated photovoltaic/thermal systems*).

Por definição Sistemas Termo Fotovoltaicos Integrados à Edificação (BIPV/T) são sistemas que coletam a radiação solar, gerando concomitantemente no local de instalação, energia elétrica e energia térmica prontas e aproveitáveis para o uso (YANG; ATHIENITIS. 2016). Esta energia é gerada e utilizada de forma híbrida e o sistema está integrado à edificação, podendo ser combinados com outras fontes de calor tais como sistemas de climatização e aquecimento (calefação). Um sistema BIPV/T geralmente possui as seguintes características (YANG; ATHIENITIS. 2016).

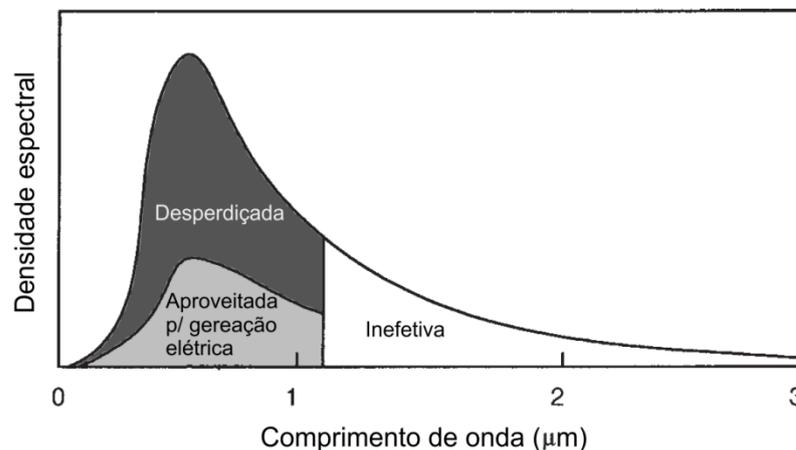
- O sistema está fisicamente ligado a construções
- O sistema gera eletricidade
- O sistema gera a energia térmica pronta para ser coletada e utilizada pela edificação, ou o comportamento térmico do sistema tem efeito positivo no desempenho energético da construção.

A temperatura de operação tem um papel significativo nos processos de conversão energética, afetando tanto a eficiência elétrica quanto a energia gerada pelo sistema (SKOPLAKI; PALYVOS, 2008. P621). Os efeitos térmicos resultantes da incidência de radiação solar direta em painéis FV geralmente são prejudiciais à eficiência elétrica da célula FV, e do sistema conseqüentemente. Os módulos FV absorvem cerca de 80% da radiação solar incidente (HELDEN; ZOLINGEN; ZONDAG, 2004), refletindo outros cerca de 20%. As citações diferem (CHOW, 2010) (HELDEN; ZOLINGEN; ZONDAG, 2004), mas pode se assumir que em típicos módulos comerciais, de 5% a 22% da radiação incidente é convertida em eletricidade, dependendo da tecnologia e condições de funcionamento. Após deduzir-se a parcela refletida, 50 % desta energia é convertida em calor (CHOW, 2010). Em dias ensolarados a temperatura dos módulos pode ficar de 35 °C a 50 °C acima da temperatura ambiente (CHOW, 2010).

O incremento na temperatura das células impacta na redução de eficiência elétrica (TRIPANAGNOSTOPOULOS, NOUSIA; SOULIOTIS, 2002). Uma redução de temperatura das células na ordem de 20 °C trará um incremento de 0,6 % a 1,0 % na eficiência absoluta do sistema em módulos do tipo de silício cristalino (SANDBERG; MOSHFEGH, 2001). Em células de c-SI verifica-se uma redução de 0,4% na eficiência para cada °C de elevação na temperatura da célula (CHOW, 2010). Já há extensiva pesquisa sobre os efeitos da temperatura na produção de energia gerada, e este assunto pode ser consultado em publicações científicas mais específicas como Skoplaki (2009).

A Figura 11 demonstra as parcelas de radiação passíveis para conversão elétrica (variando conforme a tecnologia) e a parcela desperdiçada, geralmente na forma de calor.

Figura 11: Parcelas do espectro da radiação solar direta incidente convertida em eletricidade ou calor, em função do comprimento de onda.



Fonte: Adaptado de HELDEN; ZOLINGEN; ZONDAG, 2004.

Dependendo do tipo de célula, cerca de 6–22% da energia é convertida em eletricidade, somando-se a parcela de luz refletida (cerca de 10%) ou transferido para o ambiente na forma de calor, significa que aproximadamente 70% da energia incidente dissipa-se na forma de energia não aproveitada (YANG; ATHIENITIS, 2016).

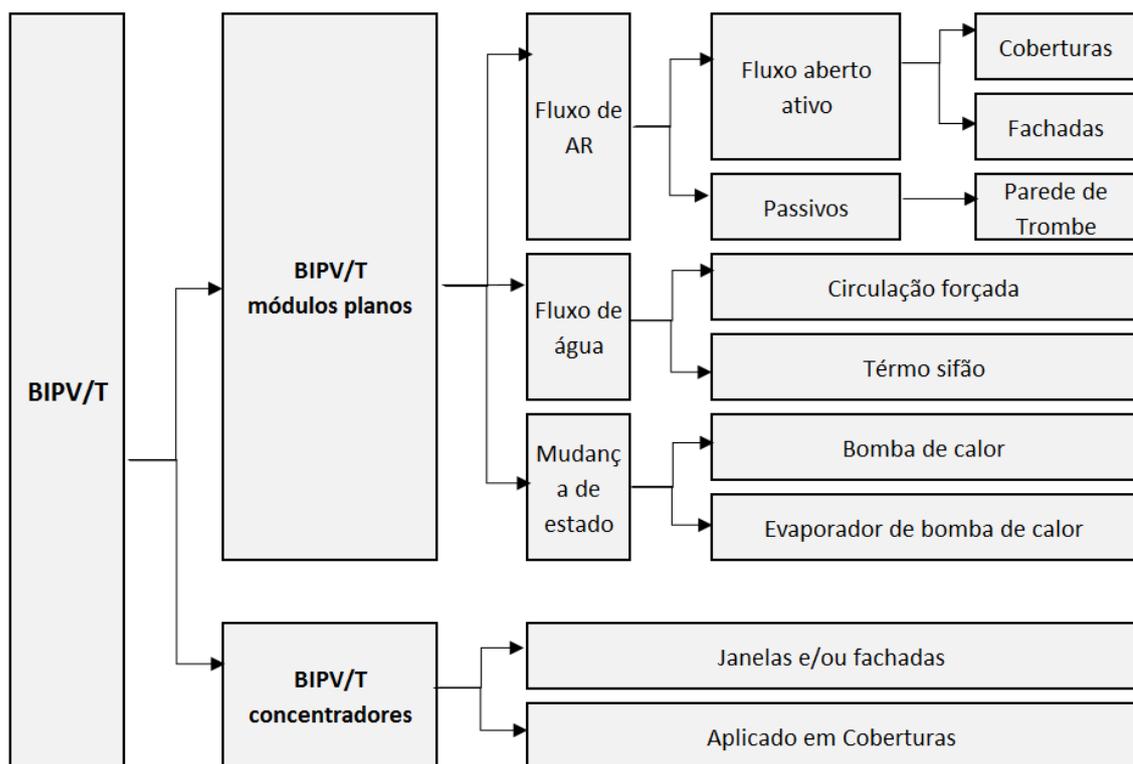
Portanto é vantajoso remover esta energia térmica prejudicial aos módulos FV, otimizando assim as eficiências elétricas das células e módulos do sistema. Uma das soluções possíveis para remover o calor dos módulos é ventilar a cavidade entre a superfície traseira do módulo e o componente construtivo (parede ou cobertura) simplesmente evacuando-se o calor acumulado para o entorno atmosférico, proporcionado pela exaustão natural ou mecânica do ar contido na cavidade. Estes aspectos estão extensivamente abordados na literatura e os

benefícios elétricos da redução da temperatura do painel por meio da ventilação da face posterior do painel não foram avaliados neste trabalho.

Esta evacuação quando ocorre naturalmente tem seu fluxo de ar na cavidade como resultado da fluabilidade do ar mais quente em relação ao ar mais frio, ocorrendo a convecção natural induzida pela diferença de pressão entre o topo e o inferior da chaminé (SANDBERG; MOSHFEGH, 2001). Este calor desperdiçado, no entanto, representa uma energia térmica com potencial de aproveitamento na climatização de edificações. Atualmente diversas tecnologias são desenvolvidas e pesquisadas com esta finalidade.

Tais tecnologias se baseiam no fluxo térmico com a utilização de diversos tipos de fluidos (ar e água por exemplo), oferecendo-se diferentes soluções de sistemas BIPV/Ts. Considerando-se o tipo de coletor, o fluido de atuação e o local e tipo de aplicação, os sistemas BIPV/T foram categorizados por Yang e Athienitis (2016, p.888), conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12: Classificação conforme a tipologia de sistemas BIPV/T.

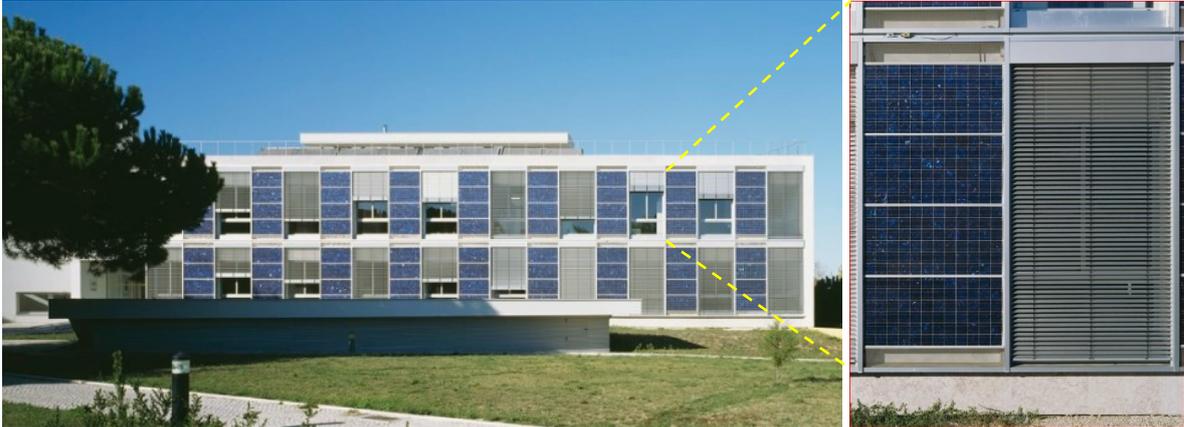


Fonte: adaptado de YANG; ATHIENTHIS, 2016.

Conforme Chan (CHAN, 2016) sistemas BIPV/T são basicamente classificados em dois tipos quanto ao fluido de transporte de calor: sistemas baseados em ar ou sistemas baseados na água, sendo os sistemas do tipo *air-based* os mais estudados atualmente.

Este trabalho irá se concentrar especificamente na categoria de sistemas termo fotovoltaicos de coletores planos, baseados em sistemas de ar ativos de ciclo aberto e integrados às fachadas de edificações. Um exemplo de um sistema similar é apresentado na Figura 13.

Figura 13: Edifício Solar XXI, Lisboa Portugal, e a fachada composta por sistemas BIPV/T



Fonte: Pedro Cabrito e Isabel Diniz Arquitectura e Design. 2020. Modificado pelo Autor.

Os principais fluidos utilizados em sistemas BIPV/T são o ar e a água, podendo ser classificados em BIPV/Ta e BIPV/Tw respectivamente. No caso dos sistemas BIPV/T, o ar ou a água são utilizados exclusivamente para resfriar o painel fotovoltaico e melhorar o desempenho elétrico, pois o calor é exaurido para o ambiente. Ao usar o ar de exaustão para resfriar o painel fotovoltaico, sistemas BIPV/T com exaustão de ar foram capazes de aumentar a produção de energia elétrica em 10,1%, ou um excedente de 129,2 kWh de energia gerada por ano (SHAHSAVAR *et al.*, 2001). Em sistemas tipo BIPV/T o ar ou a água são usados como fluido de trabalho para coletar e transportar o calor do painel e aproveitando esta energia para determinados fins (BALJIT, CHAN, SOPIAN, 2016). Sistemas BIPV/T são capazes de afetar o perfil de energia e a carga energética de edifícios (KIM, KIM, 2012).

Sistemas BIPV/T elaborados com base no ar como fluido preponderante são a princípio uma solução simples e econômica para resfriar as células FV, nos quais o ar pode ser aquecido em diferentes temperaturas pela circulação natural ou forçada. Embora a circulação forçada seja mais eficiente devido à melhores taxas de transferência de calor por condução e convecção, esta solução reduz a eficiência elétrica pois requer energia para a movimentação das hélices (TRIPANAGNOSTOPOULOS, NOUSIA; SOULIOTIS, 2002) (CHOW, 2010). Portanto sistemas com ventilação natural são menos eficientes termicamente, mas são mais

descomplicados na execução, manutenção e funcionamento pois minimizam a necessidade de equipamentos mecânicos na movimentação do fluido.

Sistemas PV / T dos dois tipos básicos (BIPV/Ta e BIPV/Tw) possuem um aumento elevado na eficiência total, devido à operação simultânea desses sistemas como coletores térmicos. Embora Coletores do tipo PV / T tenham eficiência térmica cerca de 9% menor que a eficiência de um coletor solar térmico convencional, é de grande importância demonstrar que a interpolação da energia termo fotovoltaica não influencia muito a redução da eficiência térmica do coletor (VOKAS, CHRISTANDONIS, SKITTIDES, 2005).

Sistemas BIPV/T possuem diversos potenciais a serem explorados, e no que se referem a aplicação em edificações, podem ser elencadas algumas vantagens, sejam no aspecto ambiental, econômico, técnico e cultural:

- Possuem potencial estético, devido à aparência polida e reluzente, e diferentes opções de cores e layouts;
- Produzem energia elétrica na própria edificação, gerando um abatimento no valor da tarifa de energia elétrica;
- Produzem energia térmica, pronta para ser utilizada na própria edificação;
- O aproveitamento do calor absorvido pelos módulos reduz a temperatura das células, aumentando a eficiência elétrica final do sistema fotovoltaico;

Os sistemas *BIPV/T-air systems* possuem vantagens em comparação a outros tipos de Sistema BIPV/T (CHAN, 2016; YANG, T.; ATHIENITIS, A.K., 2016):

- Menor custo inicial;
- Custo moderado de manutenção;
- Riscos reduzidos com relação a vazamentos ou congelamento de fluídos (água por exemplo);

2.6 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Em um sistema FV conectado à rede os componentes básicos são painel FV e o inversor (URBANETZ, 2014). O inversor é o equipamento eletrônico que fornece a energia em corrente Alternada (CA) a partir de uma fonte em energia contínua (CC), proveniente por exemplo de painéis fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014). No caso do experimento o estudo avalia apenas a energia gerada pelo módulo fotovoltaico, que é o elemento gerador

unitário de sistemas FV, geralmente identificado pela potência elétrica de pico, ou potência nominal (W_p). Esta potência é aferida em condições ambientais normalizadas, denominadas condições-padrão (STC, *Standard Test Conditions*), considerando irradiância solar de 1 kW/m^2 sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperaturas da célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (PINHO; GALDINO, 2014).

As características elétricas mais relevantes de um sistema FV são a potência, tensão e corrente, tal como em qualquer gerador elétrico. Quando o módulo é exposto à radiação solar, pode-se aferir através dos terminais positivo e negativo, a tensão de circuito aberto (V_{OC}) por meio de um voltímetro, e a corrente de curto circuito (I_{SC}) por meio de um amperímetro, entretanto estes dados são pouco indicativos sobre a potência instantânea real do módulo (PINHO; GALDINO, 2014).

Os principais parâmetros de um módulo FV são (PINHO; GALDINO, 2014):

Tensão de circuito aberto (V_{OC}): é a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando e é máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir. Pode ser medida diretamente com um voltímetro nos terminais do módulo. V_{OC} depende da corrente de saturação (I_0), da corrente elétrica fotogerada (I_L) e da temperatura.

Corrente de curto-circuito (I_{SC}): é a máxima corrente que se pode obter é medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero. Pode ser medida com um amperímetro curto-circuitando os terminais do módulo.

Fator de forma (FF): é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto.

Eficiência (η): é o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica.”

Para efeito de estudos, o valor da máxima potência extraível do módulo, para dada condição de irradiância, é o valor de maior interesse. Os valores de V_{mp} e I_{mp} de um módulo fotovoltaico, dependendo da tecnologia, podem ser estimados tendo como base V_{OC} e I_{SC} , respectivamente, conforme as equações (1) e (2), em que os valores de máxima potência (V_{mp} e I_{mp}) são o resultado da multiplicação de um coeficiente (entre 0,75 a 0,95) por V_{OC} e I_{SC} (ZILLES *et al.*, 2012) (AYABE; DA SILVA; LOVATO, 2017).

$$V_{mp} \cong (0,75-0,90) \times V_{OC} \quad (1)$$

$$I_{mp} \cong (0,85-0,95) \times I_{SC} \quad (2)$$

Em que:

V_{mp} Tensão de máxima potência;

I_{mp} Corrente de máxima potência;

V_{oc} Tensão de circuito aberto;

I_{sc} Corrente de curto circuito;

Utilizando as equações 1 e 2 pode-se calcular o coeficiente V e o coeficiente I , a partir dos dados de V_{mp} e I_{mp} fornecidos pelo fabricante do painel, conforme preveem as equações 3 e 4, derivadas das equações 1 e 2:

$$V_{mp}/V_{OC} \cong \text{Coeficiente } v \quad (3)$$

$$I_{mp}/I_{sc} \cong \text{Coeficiente } I \quad (4)$$

Conhecido também como *fill factor* (FF), o fator de forma é um parâmetro que determina a máxima potência do módulo fotovoltaico. O fator de preenchimento é definido matematicamente pela razão entre a potência máxima e o produto da corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto. O Fator de Forma (FF) é definido pela equação 5, conforme Pinho e Galdino (2014):

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (5)$$

Em que:

FF, Fator de Forma;

V_{oc} Tensão de circuito aberto;

I_{sc} Corrente de curto circuito;

Curvas de potência *versus* tempo em sistemas fotovoltaicos possuem formas variadas e não podem ser facilmente modeladas por equações. Contudo, mesmo sem dispor de um medidor de energia elétrica, é possível determinar a energia gerada por um módulo FV em um dado intervalo de tempo calculando-se a área sob a curva de potência instantânea, efetuando uma integração desta curva. Matematicamente, existem diversos métodos numéricos para efetuar essa integração (AYABE, M. S.; DA SILVA JR, S.; A.; LOVATO, T. G. 2017). Conforme apresentado pelo autor em seu estudo o método consiste em uma integração numérica dentro de um intervalo definido, através da interpretação de uma função contínua ou discreta, como a união de diversas retas que ligam pontos da curva, com intervalo constante, formando pequenos trapézios. Para uma função contínua, se foram considerados os intervalos entre os

pontos tendendo a zero, obtém-se a curva original (AYABE, M. S.; DA SILVA JR, S.; A.; LOVATO, T. G. 2017).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados o método adotado, as características construtivas do objeto de estudo, grandezas e variáveis estudadas, método de aferições e equações utilizadas.

3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

O local do experimento é localizado no hemisfério sul do globo terrestre, possuído face equatorial orientada para norte. Conforme exposto na Figura 14 o experimento foi realizado na América do Sul, dentro do território brasileiro, no estado do Paraná, cidade de Curitiba, bairro Jardim Social, CEP 82.520-070. No sistema lat./long. o experimento está a $24,41^{\circ}$ S e $49,24^{\circ}$ W.

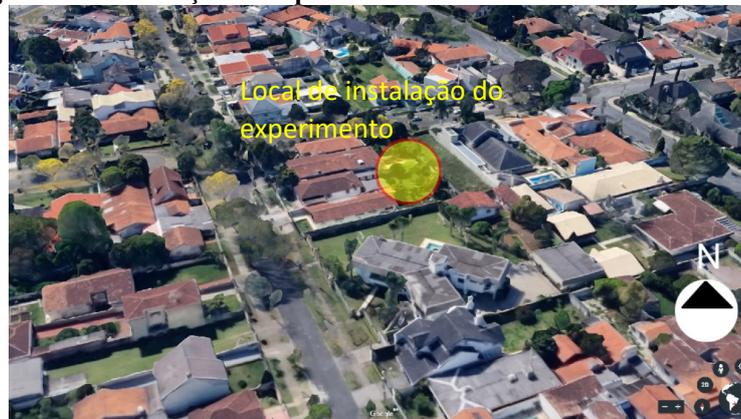
Figura 14: Localização de Curitiba no contexto regional. Sem escala.



Fonte: Adaptado de Googlemaps.

O entorno da edificação esta apresentada na Figura 15.

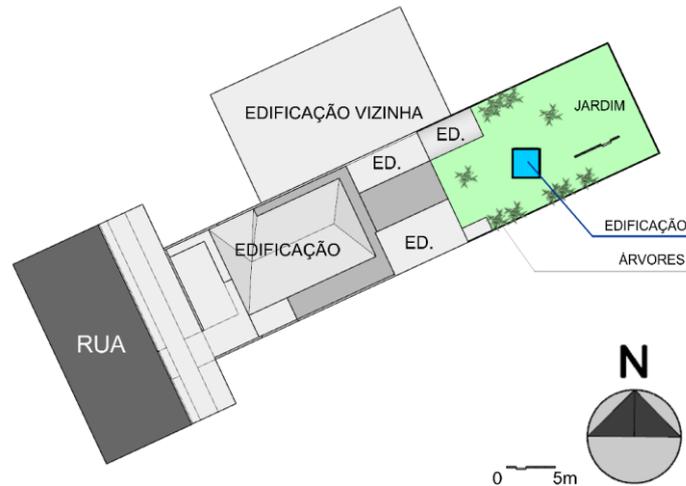
Figura 15: Localização do experimento no contexto do entorno imediato.



Fonte: Adaptado de GoogleEarth. Acesso em jan. 2016.

Conforme observa-se na Figura 14, o entorno imediato ao local do experimento possui edificações baixas com até dois pavimentos de altura, em região predominantemente urbana residencial de baixa densidade. O local não possui edificações vizinhas ou vegetações altas no entorno do local da experiência, portanto o local não possui obstruções que poderiam causar demasiadas sombras projetadas na face da edificação. A implantação da edificação experimental está representada na Figura 16.

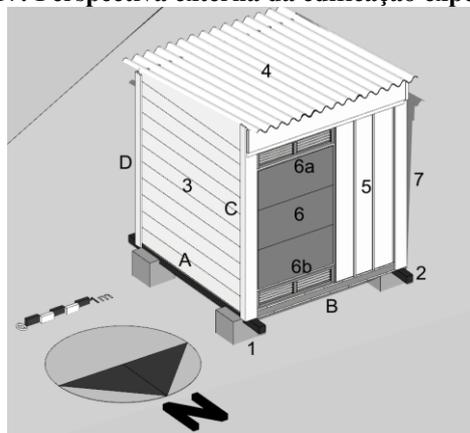
Figura 16: Implantação do experimento no local selecionado. Sem escala.



Fonte: autoria própria.

Conforme observado na Figura 15 a edificação experimental foi alocada aos fundos de um lote residencial, com algumas edificações e vegetações próximas. O formato é predominante retangular e ortogonal, medindo cerca de 2,5 m x 2,5 m. As faces foram orientadas para os pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste). A edificação experimental foi edificada praticamente totalmente em madeira, na maior parte utilizando o sistema construtivo conhecido com *wood-frame*. As características externas demonstradas na Figura 17.

Figura 17: Perspectiva externa da edificação experimental.



Fonte: autoria própria.

Dimensões externas da edificação:

A: dimensão horizontal = 2,51 m;

B: dimensão horizontal = 2,58 m;

C: dimensão vertical = 2,94 m;

D: dimensão vertical = 2,63 m;

As características dos materiais de vedação e suporte da edificação conforme exposto na Figura 16 descrevem-se:

1: fundações em concreto armado com largura de 0,30 m, profundidade de 0,30m, e altura média de 0,30 m a partir do nível do solo;

2: vigas de suporte estrutural, em madeira cambará, com seção de 0,095 m X 0,095 m e comprimento de 0,30 m;

3: painéis de vedação verticais (Leste, oeste e sul, em madeira pinus espessura 0,02 m com tábuas de 0,30 m sobrepostas (sobreposição entre tábuas com 0,06 m);

4: cobertura em fibrocimento ondulado espessura 0,006 m e comprimento de 0,30 m, com inclinação de aproximadamente 8%;

5: porta de acesso (0,90 m x 2,35 m) com vedação externa com três tábuas de pinus espessura 20mm e largura de cada tábua com 300mm;

6: BIPV/T - Painel fotovoltaico contendo 3 módulos Calyxo CX3PRO 85, com dimensões de 1,20 m x 0,60 m, compostos por filme fino de Telureto de cádmio (CdTe) encapsulado em duas lâminas de vidro transparente incolor. Os 3 módulos foram arranjados no sentido horizontal (paisagem), uns sobre os outros formando um painel com 1,20 m de largura por 1,80 m de altura. O painel está orientado a norte (azimute 0°) e instalado na vertical (inclinação 90°). O painel é complementado por duas aberturas (6a e 6b), sendo uma superior aos módulos e outra inferior. Estas aberturas com aletas em madeira do tipo veneziana servem para tomada e exaustão de ar (ventilação natural) do contato traseiro do painel, e estão demonstradas mais detalhadamente nos parágrafos a seguir.

7: arremates de acabamento de canto, em madeira pinus espessura 0,02 m;

O processo construtivo foi documentado fotograficamente e ocorreu entre os meses de janeiro e março de 2018. Algumas das etapas construtivas estão expostas Figura 18.

Figura 18: Fases de montagem inicial da edificação experimental.



Fonte: autoria própria.

A figura 18 demonstra o modelo em fase inicial de montagem realizada entre janeiro e fevereiro de 2017. Se observa em “a” o gabarito para demarcação das fundações, em “b” as fundações de concreto armado já executadas e com as peças principais de suporte, em “c” a estrutura do piso com o isolamento em EPS, em “d” a aplicação de manta térmica refletiva aluminizada multifoil, em “e” o piso terminado e em “f” o início da montagem das estruturas das paredes laterais.

Na figura 19 observa-se a edificação experimental na fase final de montagem.

Figura 19: Edificação experimental em fase final de montagem.



Fonte: autoria própria.

Em “a” a montagem das paredes leste e oeste, em “b” o detalhe da colocação do isolamento com peças de EPS, em “c” as paredes prontamente instaladas, em “d” a instalação da cobertura em fibrocimento, em “e” a instalação do suporte e estrutura do elemento BIPV/T, e em “f” a edificação praticamente pronta, aguardando a instalação do painel fotovoltaico.

As superfícies externas das faces verticais de vedação foram pintadas com tinta acrílica fosca na cor branca, com 2 demãos de tinta em cada face, conforme demonstrado em “f”, se tratando de uma fotografia registrada a partir da orientação noroeste da edificação. As paredes (superfícies verticais da envoltória), piso e cobertura (superfícies horizontais da envoltória) assim como o sistema BIPV/T receberam diferentes materiais nas camadas externas e internas, conforme tipo do elemento. A madeira compõe as superfícies externas e internas da edificação, com exceção do sistema BIPV/T, composto por módulos de filme fino e acabamento em vidro, e da cobertura, com acabamento externo em telhas de fibrocimento ondulado. A Figura 20 demonstra o aspecto final da edificação.

Figura 20: Aspecto final da edificação.



Fonte: O Autor.

As características construtivas e camadas da envoltória da edificação experimental estão demonstradas nas Figuras 21 e 22.

Figura 21: Configuração dos componentes da edificação esquema de vedações e estrutura da edificação experimental. Planta sem escala.

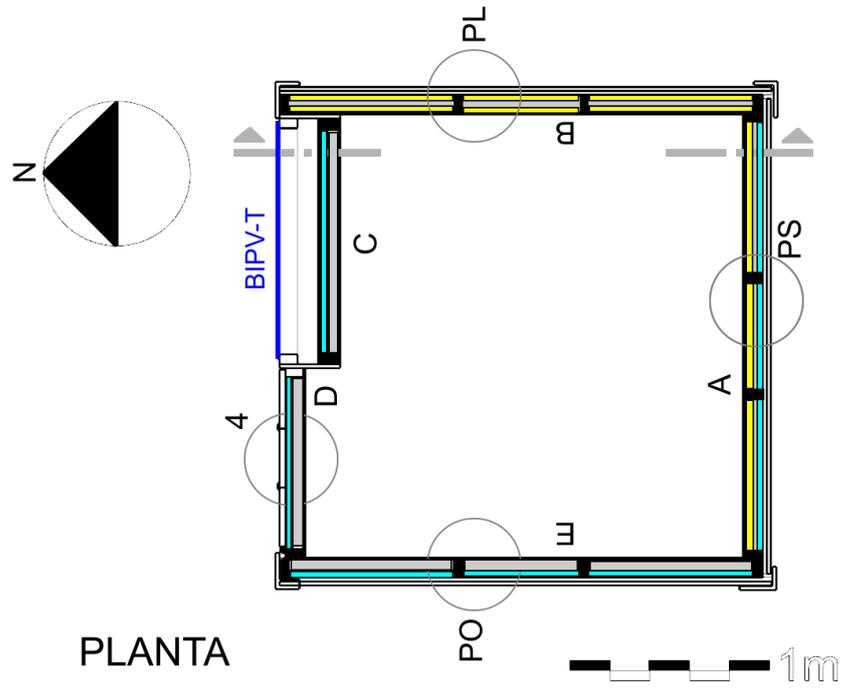
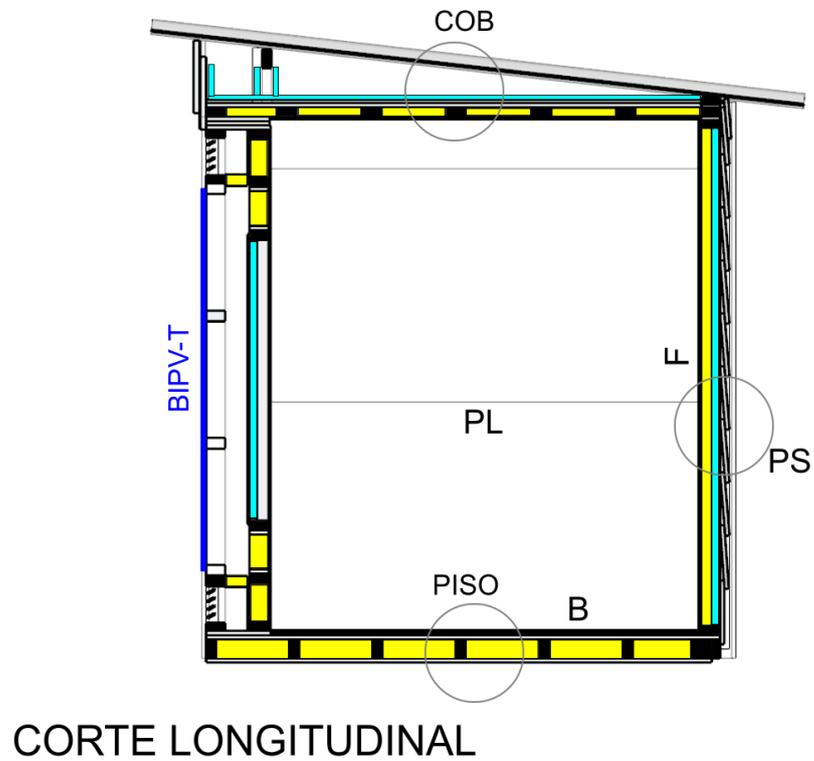


Figura 22: Configuração dos componentes da edificação esquema de vedações e estrutura da edificação experimental. Corte sem escala.



As figuras 20 e 21 demonstram os elementos construtivos por meio de planta e corte da edificação, observando-se em preto as peças estruturais de madeira (cambará), amarelo o isolante em poliestireno expandido (*extruded polistiyene*), em azul claro o isolamento com lã de vidro, e em cinza as camadas de ar não ventiladas.

Nas camadas internas dos componentes foram previstos materiais isolantes térmicos, em uma composição com EPS e/ou manta de lã de vidro com uma das faces com acabamento em película aluminizada. O objetivo foi prever o máximo isolamento térmico possível, para minimizar as trocas de calor interno x externo por meio das superfícies de vedação.

Tabela 1: Características dimensionais do espaço interno da edificação.

	Espessura total	Dimensão 1 (Dim. 1)	Dimensão 2 (Dim. 2)	Área (S)
	m	m	m	m ²
P _L - Parede Leste	0,135	B 2,10	F 2,62	5,50
P _O - Parede Oeste	0,135	E 2,19	F 2,62	5,74
P _S - Parede Sul	0,135	A 2,49	F 2,62	6,52
BIPV/T	0,300	C 1,68	F 2,62	4,40
Porta (4)	0,120	D 0,95	F 2,65	2,52
Piso	0,150	A 2,49	E/B 2,15	5,34
Cobertura	0,300	A 2,49	E/B 2,15	5,34

Fonte: autoria própria.

As camadas de cada componente da envoltória e a somatória das espessuras sucessivas das camadas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Materiais das camadas sucessivas das superfícies da envoltória da edificação, e as respectivas espessuras.

Camada (ext a int)	PL - Parede leste	PO - Parede oeste	OS - Parede Sul	BIPV-T	Porta (4)	Piso	Cobertura
	Esp.(m)	Esp.(m)	Esp.(m)	Esp.(m)	Esp.(m)	Esp.(m)	Esp.(m)
1	P _{TA}	P _{TA}	P _{TA}	M _{FV}	P _{TA}	P _{INUS}	T _{FIB}
2	P _{INUS}	P _{INUS}	P _{INUS}	AR _b	P _{INUS}	EPS	AR
3	AR	AR	AR	C _{OMP}	L _{VIDRO}	M _{AL}	L _{VIDRO}
4	M _{AL}	M _{AL}	M _{AL}	EPS	AR	P _{INUS}	M _{AL}
5	EPS	L _{VIDRO}	L _{VIDRO}	C _{OMP}	C _{OMP}	C _{OMP}	P _{INUS}
6	AR	AR	AR				EPS
7	EPS	C _{OMP}	EPS				C _{OMP}
8	C _{OMP}		C _{OMP}				
Espessura total (m)	0,155	0,135	0,135	1,126	0,120	0,095	0,266

Fonte: autoria própria.

Os numerais das ordenadas representam as camadas sucessivas dos materiais. As descrições codificadas de cada material estão relacionadas no Quadro 2.

Quadro 2: Relação dos materiais componentes das vedações da envoltória da edificação.

P _{TA}	Pintura com tinta acrílica fosca
P _{INUS}	Tábuas de pinus de 0,30 m sobrepostas (60mm)
AR	Ar atmosférico - câmara não ventilada
M _{AL}	Manta Térmica Refletiva Metalizada Multifoil
EPS	Poliestireno expandido moldado
C _{OMP}	Compensado acabamento natural
L _{VIDRO}	Lã de vidro com 1 face aluminizada
M _{FV}	Módulo fotovoltaico vidro 0,003 m - Filme fino CdTe - Vidro 0,003 m
AR _B	Ar atmosférico - câmara com ventilação controlável
T _{FIB}	Telha de fibrocimento ondulado - cor cinza claro

Fonte: autoria própria.

A partir dos dados da Tabela 2 e da Tabela B.3 da Norma de 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 (ABNT NBR 15220/2013) foram obtidos os dados de densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de cada componente (superfície da envoltória) e de cada camada da composição. Os dados da Parede Leste (PL) estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3: Espessura do material (e), Densidade de massa aparente (ρ), Condutividade térmica (λ) e Calor específico (c) da Parede Leste do experimento.

PL - PAREDE LESTE	Camada	Esp. (mm)	Densidade de massa aparente (ρ) (kg/m ³)	Condutividade térmica (λ) W/(m.K)	Calor específico (c) kJ/(kg.K)	Resist. térmica de câmaras de ar não vent. (Rar)
Pintura Acrílica fosca	1	0,000	1100,00	*	*	*
Tábuas de pinus de 30 cm sobrepostas (60mm)	2	0,020	500,00	0,150	1,34	*
Ar atmosférico - câmara não ventilada	3	0,015	1,20	0,028	1,01	0,29
Manta térmica Refletiva Metalizada Multifoil	4	0,001	*	*	*	*
EPS poliestireno expandido moldado	5	0,035	20,00	0,040	1,42	*
Ar atmosférico - câmara não ventilada	6	0,020	1,20	0,028	1,01	0,16
EPS poliestireno expandido moldado	7	0,035	20,00	0,040	1,42	*
Compensado	8	0,010	400,00	0,120	2,30	*

Fontes: Adaptado de ABNT 15220/20013. ¹ (*) não se aplica ou valor considerado desprezível para cálculo.

A partir dos dados da Tabela 3 e da Tabelas B.1 e B.2 da Norma de Desempenho Térmico de Edificações (ABNT NBR 15220/2013) foram obtidos os dados de absorvância para ondas curtas (α), emissividade para ondas longas (ε) e resistência térmica de câmaras de ar das camadas reflexivas e gasosas das diferentes camadas das diferentes composições da envoltória. Os dados obtidos da Parede Leste (PL) estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4: Espessura, absorvância para ondas curtas (α), emissividade para ondas longas (ε) e resistência térmica de câmaras de ar das camadas dos componentes da parede leste

	Espessura (m)	Absorvância para ondas curtas	Emissividade para ondas longas	Resistência térmica de câmaras de ar	
PL - PAREDE LESTE	e	α	ε	m ² .K/W	Rar
Pintura Acrílica fosca	0,000	0,20	0,90	*	
Ar atmosférico - câmara não ventilada	0,015	*	*	0,29	
Manta térmica Refletiva Metalizada Multifoil	0,000	0,05	0,05	*	
Ar atmosférico - câmara não ventilada	0,020	*	*	0,16	

Fonte: autoria própria.

A partir dos dados das Tabelas 2, 3 e 4 e das Equações da NBR 15.225/2013 – parte 2 para cálculo de Resistência térmica de componentes com camadas homogêneas a não homogêneas, transmitância térmica, atraso térmico, fator solar e capacidade térmica dos componentes da edificação. Os conceitos, métodos, tabelas e equações para cálculo destas grandezas estão descritos em detalhes na referida norma. Os dados das propriedades térmicas dos componentes da envoltória estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5: Resistência térmica total e transmitância térmica das superfícies da envoltória do experimento.

Parâmetro	Resist. térmica total (R)	Trânsmitância térmica (U)
Unidade	(m ² .K)/W	W/m ² .K
PL - Parede Leste	2,3166	0,43
PO - Parede Oeste	1,7625	0,57
PS - Parede Sul	2,1611	0,46
Porta	1,3712	0,73
Piso	1,3101	0,73
Cobertura fluxo descendente	2,6822	0,37
Cobertura fluxo ascendente	2,2607	0,44

Fonte: autoria própria.

Os valores de “U” da edificação variam de 0,43 W/m².K para a parede leste a 0,76 W/m².K para o componente de piso. Os valores obtidos foram comparados com os valores recomendados pela ABNT NBR 15.220/2013, Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Para a Zona Bioclimática 1, na qual a cidade de Curitiba se enquadra, a norma recomenda as seguintes características conforme exposto na Figura 23:

Figura 23: Tabela 2 da ABNT NBR 15220/2013- parte 3, tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 1.

Vedações externas
Parede: Leve
Cobertura: Leve isolada

Fonte Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15220/2003 – Parte 3.

A Tabela C.2 da referida norma conforme exposto na Figura 23, indica as características para classificar as paredes conforme os critérios de Transmitância térmica – U, Atraso térmico (ϕ), e Fator solar – (FS_o). A transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor é o inverso da resistência térmica total do componente (ABNT NBR 15220, 2013), e representa a quantidade de energia em Watt que passa por um componente para cada metro quadrado de área de superfície, para cada diferencial de temperatura de 1 Kelvin.

Tabela 6: Tabela C.2 da ABNT NBR 15220/2005- parte 3, Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.

Vedações externas		Transmitância térmica - U W/m ² .K	Atraso térmico - ϕ Horas	Fator solar - FS _o %
Paredes	Leve	U ≤ 3,00	ϕ ≤ 4,3	FS _o ≤ 5,0
	Leve refletora	U ≤ 3,60	ϕ ≤ 4,3	FS _o ≤ 4,0
	Pesada	U ≤ 2,20	ϕ ≥ 6,5	FS _o ≤ 3,5
Coberturas	Leve isolada	U ≤ 2,00	ϕ ≤ 3,3	FS _o ≤ 6,5
	Leve refletora	U ≤ 2,30.FT	ϕ ≤ 3,3	FS _o ≤ 6,5
	Pesada	U ≤ 2,00	ϕ ≥ 6,5	FS _o ≤ 6,5

Fonte: ABNT NBR 15220, 2005. Adaptado pelo autor.

Em comparação com os valores recomendados pela norma o cálculo da transmitância térmica (U), o valor calculado para todos os componentes da edificação ficou abaixo de 0,80 W/m².K. Este valor que indica vedações com isolamento térmico superior aos padrões brasileiros mínimos de transmitância térmica.

3.2 FUNCIONAMENTO E MEDIÇÕES CLIMÁTICAS DO SISTEMA BIPV/T

O sistema BIPV/T, quanto ao funcionamento dos dispositivos de aberturas com função de propiciar ou dificultar as trocas térmicas entre o ambiente interno, externo e na câmara de ar. Foram previstas quatro aberturas, sendo duas delas na parede interna do sistema BIPV/T, e duas (uma superior e outra inferior na câmara de ar entre os módulos FV e a parede interna BIPV/T. Estas aberturas podem ser operadas e manuseadas conforme a intenção do usuário, configurando duas possibilidades para cada dispositivo abertura: posição aberta e fechada.

Os dispositivos de fechamento ou abertura da parede interna, consiste de duas peças retangulares em madeira, medindo 0,25 m de altura por 1,00 m de largura, e que encaixam no vão previsto na parede, vedando totalmente ou abrindo totalmente com a remoção total da peça, permitindo o controle da circulação de ar e trocas térmicas.

A descrição e características do equipamento utilizado constam dos Apêndices do trabalho. Os dispositivos de abertura e fechamento da câmara de ar consiste em peças de EPS, encaixadas sobre pressão nos vãos superiores e inferiores, vedando ou abrindo totalmente o espaço, permitindo o controle sobre a tomada e exaustão do ar pelas aberturas da fachada BIPV/T (6a e 6b). Os dispositivos foram nomeados conforme descrito:

Dispositivo de aberturas:

- Ai, abertura inferior interna;
- Ae, abertura inferior externa;
- Bi, abertura superior interna;
- Be, abertura superior externa;

Na figura 24 observa-se o protótipo ainda em execução demonstrando em detalhe as aberturas “Ai” e “Bi” do sistema, em configuração aberta (esquerda) e a abertura “Bi” em configuração fechada (direita).

Figura 24: Aberturas internas do sistema.



Fonte: autoria própria.

Os elementos de fechamento das aberturas internas são manipuláveis internamente. Possuem dimensões de 0,22 m x 1,20 m e espessura de 0,13 m. São executados com estrutura de madeira, preenchidos com 0,09m de EPS e revestidos com lâmina de alumínio refletiva. A manipulação pode ser realizada por uma pessoa apenas, sendo encaixados ou desencaixados nos vãos previamente planejados.

3.3 FUNCIONAMENTO E MEDIÇÕES CLIMÁTICAS DO SISTEMA BIPV/T

No interior da edificação e na face externa orientada para sul da edificação foram alocados dois equipamentos com sensores e mostradores de temperatura e umidade. Os dados foram classificados conforme a posição e a característica da informação. A Figura 25 demonstra os equipamentos instalados no local.

Figura 25: fotografia com localização dos termômetros digitais. Esquerda termômetro interno; direita termômetro externo.

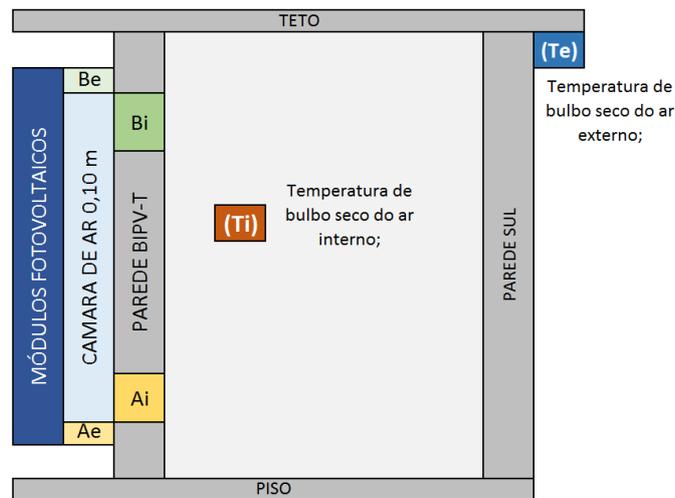


Fonte: autoria própria.

O equipamento prevê um *software* que pode ser configurado para adquirir dados conforme uma escala temporal, definida em intervalos de 15 minutos. Estes dados podem ser verificados através de um *software* disponibilizado pelo fabricante e exportados para um arquivo no formato .CSV. Este arquivo foi utilizado posteriormente para transpor e organizar os dados.

O sistema foi esquematizado na projeção do corte longitudinal da edificação, demonstrado na Figura 26, demonstrando os principais dispositivos e elementos do sistema, assim como a localização esquemática dos locais de instalação dos termômetros digitais.

Figura 26: Esquemática do sistema BIPV/T.



Fonte: autoria própria.

(Ti) Temperatura de bulbo seco do ar interno;

(Te) Temperatura de bulbo seco do ar externo;

O quadro 3 demonstra as possibilidades de abertura ou fechamento dos dispositivos previstos, estipulando-se um sistema binário, em que números pares representam o dispositivo aberto, e números ímpares representam o sistema fechado.

Quadro 3: Dispositivos e variáveis da configuração de abertura dos dispositivos.

Dispositivo	Num.	Configuração
Ai	2	ABERTO
Ae	4	
Bi	6	
Be	8	
Ai	1	FECHADO
Ae	3	
Bi	5	
Be	7	

Fonte: autoria própria.

3.4 ESTRATÉGIAS TÉRMICAS DA EXPERIÊNCIA

As diferentes possibilidades de configuração do sistema de aberturas permitem ao usuário diferentes dinâmicas das trocas de calor, conforme a intenção de aquecimento ou refrigeração do espaço interno e do painel fotovoltaico. Esta variável foi denominada intenção térmica, e prevê o manuseio do usuário sobre o sistema. As possibilidades selecionadas se fundamentam na expectativa de comportamento do ar interno da edificação e do ar na câmara de ar, prevendo-se o ganho de calor ou amortecimento da temperatura interna e da câmara de ar, por meio dos fenômenos de trocas de calor, principalmente causado pelo aquecimento e

convecção do ar na câmara de ar. As configurações gerais foram classificadas conforme a configuração e cada dispositivo. As configurações e os fenômenos previstos estão demonstradas na Tabela 7.

Tabela 7: Configurações de operação do sistema previstas.

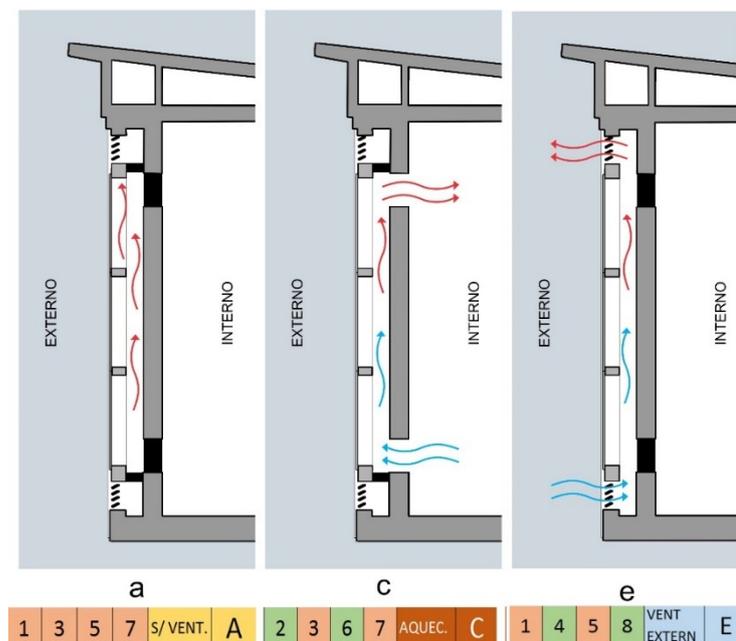
Config.	Descrição	Ai	Ae	Bi	Be	Câmara de ar	Ar interno
a	S/ ventilação	1	3	5	7	Sem ventilação	Sem ventilação
c	Aquecimento	2	3	6	7	Ventilação interna	Ventilação interna
e	Vent. externa	1	4	5	8	Ventilação externa	Sem ventilação

Fonte: autoria própria.

Os numerais dos sistemas de aberturas representam um sistema binário, representando a abertura fechada para os números ímpares e aberta para os números pares.

Os sistemas foram manuseados conforme as condições climáticas presentes em determinados períodos, intencionalmente procurando-se aquecer, resfriar ou manter a temperatura interna estável. A Figura 27 apresenta diferentes configurações de aberturas previstas para a experiência.

Figura 27: Configurações esquemáticas do sistema; expectativa de movimentação do ar e trocas de calor sob a incidência de radiação solar.



Fonte: autoria Própria

Conforme as possibilidades selecionadas e apresentadas na Figura 27, é possível em certas ocasiões, assumindo a hipótese de clima com temperaturas externas baixas e com

incidência de radiação solar no painel, aplica-se a configuração para aquecer o ambiente interno, codificado como configuração “c”. Esta configuração típica se aplica às condições climáticas recorrentes no inverno curitibano, com temperaturas do ar externo baixas, com dias ensolarados e sem nuvens em boa parte do período sazonal. No caso de dias com temperatura externa elevada pode se aplicar a configuração “e” ventilando a câmara de ar posterior ao painel. A configuração “a” aplica-se por exemplo em situações noturnas, interrompendo a troca de ar entre a câmara e o ambiente interno da edificação e desta forma retendo o calor acumulado durante o dia.

3.5 MEDIÇÕES E ESTIMATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA

As medições elétricas aferiram os dados de tensão de circuito a aberto (V_{oc}) e corrente de curto circuito (I_{sc}) do painel no dia 14 de janeiro e 29 de setembro de 2019. Um multímetro foi utilizado para aferir os dados, conectando-se os terminais positivos e negativos do módulo superior do painel aos terminais do medidores. As especificações do módulo FV e do multímetro utilizado constam nos anexos do trabalho. As aferições ocorreram intervalos de 15 minutos, iniciando-se as 8:15h e finalizando às 20h. Os dados levantados constam na Tabela do Apêndice B.

Para se obterem os valores dos coeficientes foram utilizados os dados de (V_{mp}) Tensão de máxima potência e (I_{mp}) corrente de máxima potência em STC (*Standard Test Conditions*) fornecidos pelo fabricante do módulo FV. Conforme as equações (1) e (2), tais coeficientes podem ser obtidos pelas equações (3) e (4).

$$\text{Coeficiente V} = V_{mp} / V_{oc} \quad (3)$$

$$\text{Coeficiente I} = I_{mp} / I_{sc} \quad (4)$$

Em que:

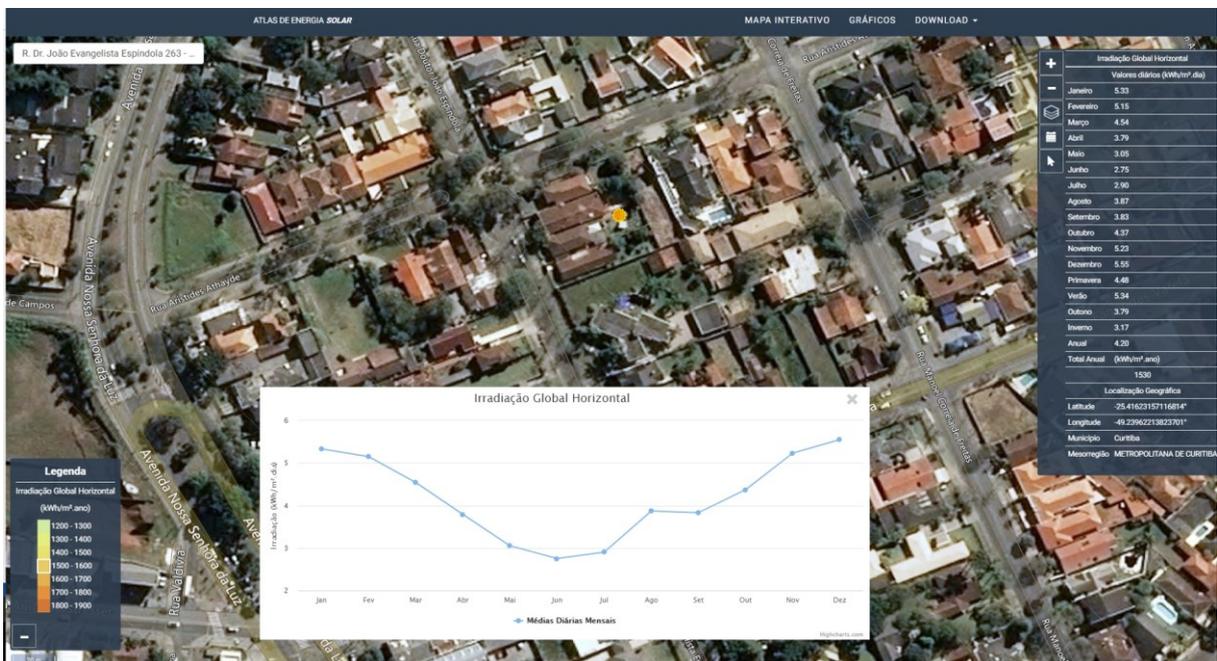
V_{mp}	Tensão de máxima potência;
I_{mp}	Corrente de máxima potência;
V_{oc}	Tensão de circuito aberto;
I_{sc}	Corrente de curto circuito;

Conforme os valores obtidos pelas equações (3) e (4) e os valores obtidos a partir da Tabela do Apêndice B, foram utilizadas as equações (1) e (2) para determinar a Tensão de máxima potência instantânea (V_{mpi}) e corrente de máxima potência instantânea (I_{mpi}) do painel no momento das aferições.

Porém medições realizadas em apenas duas datas, conforme realizado, são insuficientes para se obter uma estimativa precisa da geração anual do painel, e medições mais constantes resultariam em valores diferentes daqueles estimados inicialmente. Portanto comparam-se os valores e estimativas das medições com valores médios de geração a partir de simulações computacionais.

O Atlas de Energia Solar do Paraná (TIEPOLO et al., 2017) fornece dados médios mensais e anuais de Irradiação Global Horizontal da região onde se localiza o experimento conforme Figura 28.

Figura 28: Dados de Irradiação Global Horizontal do local do experimento.



Fonte: TIEPOLO et al., 2017

Verifica-se 4.20 kWh/m².ano de Irradiação Global Horizontal (média anual ou dia típico) para o local. Os valores médios mensais adquiridos por meio do Atlas foram transpostos para o software Radasol (UFRG, 2020), que permite o cálculo de irradiação em superfícies com qualquer ângulo de inclinação e qualquer desvio azimutal. Esta simulação permitiu obter os dados de irradiação para o ângulo de inclinação de 90° e desvio azimutal de 0° conforme a posição do painel FV da experiência. Para o plano da superfície do painel obteve-se um valor médio diário de 2,286 kWh.dia, ou seja, o valor de irradiação para um dia típico da localidade.

O dado e irradiação média diária no plano inclinado foi utilizado na equação 5 para se obter a energia gerada em um ano, com base na irradiação de um dia típico (H) obtendo-se o resultado de 170,21 kWh.ano.

$$E_{ano2} = \frac{(PFV \cdot PR \cdot H)}{G} \cdot 365 \quad (5)$$

E_{ano2}	Energia gerada pelo painel em um ano a partir de simulação computacional em Watt;
PFV	Potência do painel FV (0,85 kW x 3 mód. = 0,255 kW);
PR	Índice de performance (<i>Performance Ratio</i>)(adotado 0,80);
G	Irradiância global horizontal (1,00 kW)
H	Irradiância no plano inclinado (2,286 kWh.dia)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As aferições e ensaios realizados forneceram dados que transformados em gráficos permitiram análises dos impactos térmicos e valores de geração elétrica.

4.1 AFERIÇÕES E ESTIMATIVAS DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA PELO PAINEL FV

A equação (6) foi utilizada para calcular o produto da tensão pela corrente elétrica e reflete a potência instantânea do módulo no momento da medição, ou seja, a potência instantânea no ponto de máxima potência conforme as condições de radiação solar presentes.

$$P_{mpi} = V_{mpi} \times I_{mpi} \quad (6)$$

P_{mpi}	Potência instantânea fornecida nos terminais do módulo no ponto de potência máxima, em Watt
V_{mpi}	Corrente de máxima potência instantânea;
I_{mpi}	Tensão de circuito aberto instantânea;

Os dados obtidos a partir das equações (3), (4) e (6) foram utilizados para se obter a energia gerada por 1 módulo no período de uma hora (E_{mppn}), a partir da média da potência aferida em 2 intervalos consecutivos de 30 minutos conforme equação (7).

$$E_h = \sum^n P_{mpi} / 2 \quad (7)$$

E_h	Energia média aferida em 1 módulo em 2 períodos consecutivos de 30 minutos
P_{mpi}	Potência instantânea fornecida nos terminais do módulo no ponto de potência máxima, em Watt.

A soma dos 13 valores de E_h resultou na energia proveniente de um módulo FV ($E_{mod1 \text{ dia}}$) no período de 13 horas (1 dia) de sol do período aferido, desde as 08:00 às 20:00, conforme equação (8).

$$E_{mod1 \text{ dia}} = \sum_n E_h \quad (8)$$

$E_{mod1 \text{ dia}}$	Somatória de n médias de energia produzida por um módulo no período de 1 hora
E_h	Energia média aferida de um módulo em 4 períodos consecutivos de 15 minutos

Multiplicando-se $E_{\text{mod1 dia}}$ por 3, pois se trata de um painel FV com 3 módulos, obtém-se a energia total gerada pelo painel FV em um dia típico (14/01) conforme equação 9.

$$E_{\text{mod3 dia}} = E_{\text{mod1 dia}} \times 3 \quad (9)$$

$E_{\text{mod3 dia}}$ Energia gerada pelo painel em um dia em kWh/dia

Com os valores aferidos estimou-se a geração elétrica mensal (E_{mensal}) e anual (E_{anual}) do painel FV, conforme os dados aferidos na data do estudo, multiplicando-se $E^3\text{dia}$ por 30 ou 365 dias respectivamente, obtendo-se a partir das equações (10) e (11) as estimativas de energia elétrica conforme o dia típico aferido. Os resultados estão apresentados na Tabela do Apêndice C. Estas estimativas consideram como base a data das aferições demonstrando uma estimativa com base na média, no entanto as variações climáticas conforme as estações e características específicas de outros dias típicos podem gerar estimativas com valores diferentes.

$$E_{\text{mensal}} = E_{\text{mod3 dia}} \times 30 / 1000 \quad (10)$$

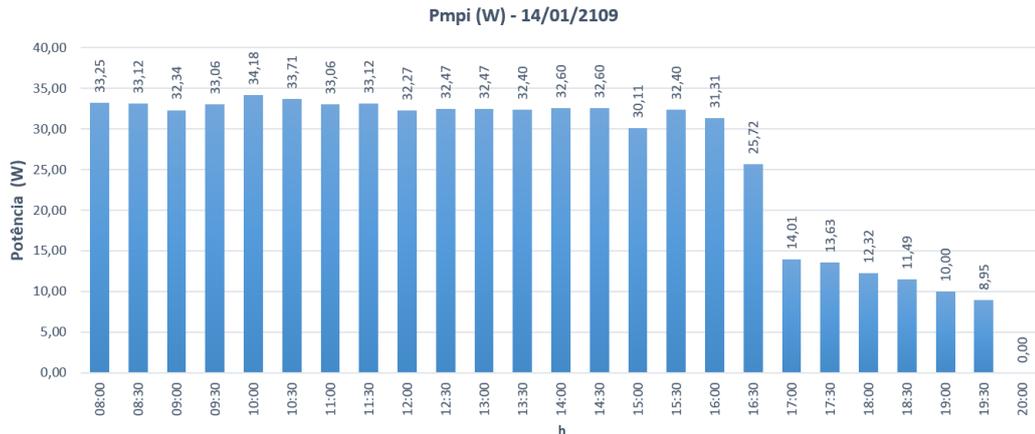
E_{mensal} Estimativa de geração elétrica mensal em kWh

$$E_{\text{anual}} = E_{\text{mod3 dia}} \times 365 / 1000 \quad (11)$$

E_{anual} Estimativa de geração elétrica anual em kWh/a

Observam-se Gráfico 1 os dados aferidos no condutor do módulo mais favorável, medidos em intervalos de 30 minutos, e aplicando-se as equações (6) e (7) obtiveram-se os valores horários de energia ($\sum P_{\text{mpi}}$).

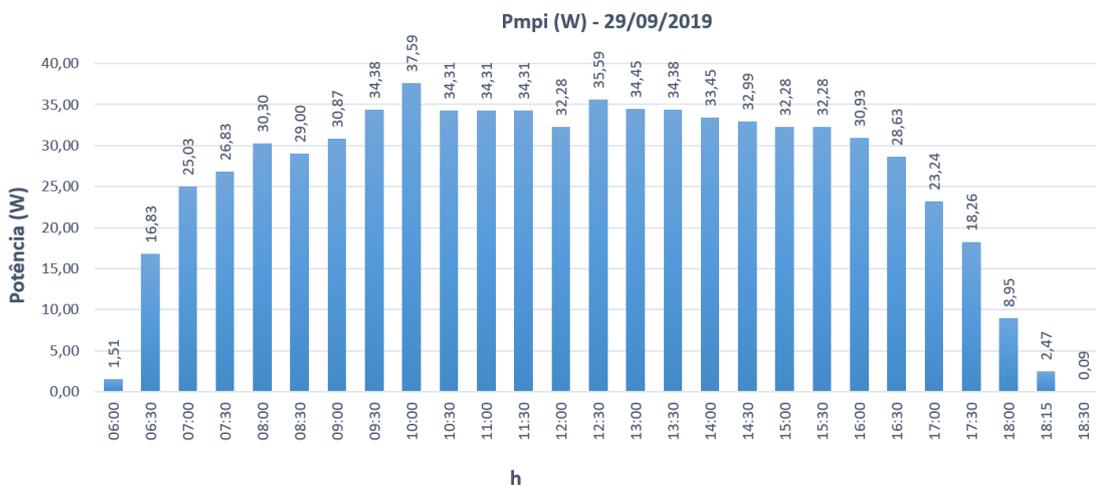
Com os dados da Tabela do Apêndice C elaborou-se o Gráfico 1, demonstrando a potência do módulo aferida em intervalos de 30 minutos, e a área do Gráfico 1 representando a energia gerada durante o período.

Gráfico 1: Potência aferida durante do dia 14/01/2019.

Fonte: autoria própria.

A queda na potência deve-se à mudança da condição climática, quando da presença de chuva e nebulosidade a potência diminuiu consideravelmente em função da redução da radiação solar incidente na superfície do módulo. A potência máxima no intervalo apresentou 34,18 W e média de 26,26 W. A partir do dado de energia diária foi possível estimar a geração mensal e anual de energia elétrica fornecida pelo painel fotovoltaico mensalmente (cerca de 27 kWh/mês) e anualmente (cerca de 338,00 kWh/ano), utilizando-se das equações (9), (10) e (11). Os dados da aferição constam na Tabela do Apêndice C.

O mesmo método foi utilizado no dia 29 de setembro de 2019 conforme exposto no Gráfico 2, medidos em intervalos de 30 minutos, e aplicando-se as equações (7) e (8) obtiveram-se os valores horários de energia ($\sum P_{mpi}$). No entanto a medição iniciou-se as 06:30h, observando-se produção de energia desde este horário.

Gráfico 2: Potência aferida durante o dia 29/09/2019.

Fonte: autoria Própria

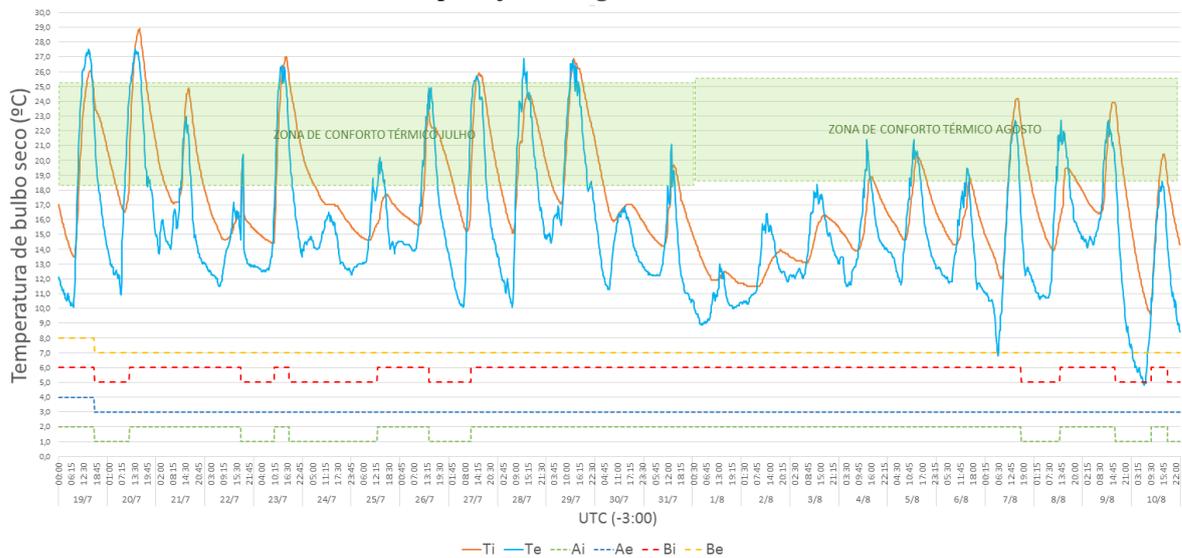
Com os dados levantados elaborou-se o Gráfico 2, demonstrando a potência do módulo aferida em intervalos de 30 minutos, e a área do Gráfico representando a energia gerada durante o período. A potência atingiu seu pico seu pico às 10:00h (37,59 W). Ao final do período a potência se reduz gradualmente até o fim da medição às 18:30h. Observa-se que a condição de nebulosidade não impactou em diferenças grandes na potência aferida em comparação com a condição de céu limpo. A partir dos dados de potência e utilizando-se das equações (8), (9) e (10) foi possível estimar a geração elétrica fornecida pelo painel fotovoltaico mensalmente (cerca de 32 kWh/mês) e anualmente (cerca de 390 kWh/ano).

As aferições nos dois períodos demonstram um potencial de geração elétrica anual médio cerca de 360 kWh. Observa-se ainda que a condição de nebulosidade afetou com maior impacto a geração no dia 14 de fevereiro. Ao final do dia em ambas as datas o painel tem seu rendimento reduzido gradualmente em virtude do menor ângulo de altura solar e consequente diminuição da radiação solar.

4.2 AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA DA EDIFICAÇÃO

As temperaturas internas e externas foram aferidas conforme intervalos de 15 minutos. Os dados foram tabulados e originaram gráficos comparativos entre T_i (azul) e T_e (laranja) com a zona de temperatura indicativa para a zona de conforto conforme o período de aferição. Para se observarem os efeitos da configuração do sistema foram indicados abaixo do gráfico e conforme os numerais que definem a posição aberta (numerais pares 2/4/6/8) e fechada (numerais ímpares 1/3/5/7). O Gráfico 3 apresenta os resultados das aferições realizadas no período compreendido entre julho e agosto de 2019, correspondendo, portanto, às condições climáticas locais com predominância de clima frio.

Gráfico 3: Temperaturas internas e externas em contraste com a zona de conforto para julho e agosto de 2019.

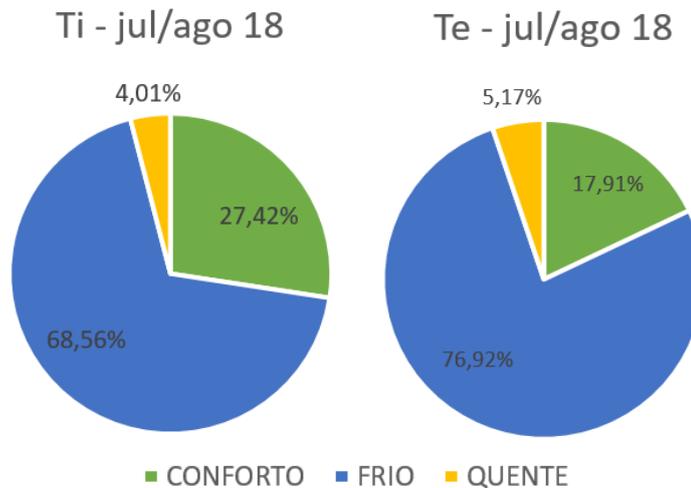


Fonte: autoria Própria

No Gráfico 3 observam-se as temperaturas entre 19 de julho e 15 de agosto de 2018. Observa-se que há um incremento rápido na temperatura interna quando da configuração de aquecimento (2/3/6/7), indicando que a radiação solar é transmitida prontamente para o interior na forma de energia térmica aproveitável. Em oito dos vinte e três dias avaliados a temperatura interna máxima superou a temperatura externa máxima. Nota-se ainda que há um menor diferencial nas temperaturas máximas entre Te e Ti se comparado ao diferencial de temperatura mínima. Independente da configuração (aquecimento ou sem ventilação) o sistema atenua o tempo de queda de temperatura interna, o que indica que mesmo em diferentes configurações o sistema adquire energia térmica rapidamente mas libera esta energia para o exterior em menor velocidade.

As temperaturas internas e externas foram quantificadas em períodos de 15 minutos e apresentadas em percentuais de modo a visualizar a porção de Ti e Te acima (amarelo/quente), abaixo (azul/frio) ou dentro da zona de conforto (verde) conforme exposto no Gráfico 4.

Gráfico 4: Comparação entre os percentuais de Ti e Te com relação à zona de conforto entre julho e agosto de 2018.



Fonte: autoria Própria

No período observado a temperatura interna esteve por maior tempo na zona de conforto (27,42 %) em relação à Te (17,91 %), obtendo-se um diferencial de 9,51% entre elas. Na observação das temperaturas acima da zona de conforto a diferença foi menos sensível (1,16 %), e em relação às temperaturas abaixo da zona de conforto (frio) Te apresentou maior tempo (8,36 %) em relação a Ti.

Os dados médios, máximos e mínimos de temperatura foram tabulados conforme exposto no Quadro 4.

Quadro 4: Médias de temperatura de Ti e Te para julho e agosto de 2018

	Temperatura média (°C)	Amplitude térmica média (°C)	T máx média (°C)	T min média (°C)	T máx (°C)	T min (°C)
Ti (°C)	17,49	7,33	21,65	14,32	28,90	9,60
Te (°C)	15,25	11,00	21,77	10,77	27,50	4,80
Ti - Te (°C)	2,24	-3,67	-0,12	3,55	1,40	4,80

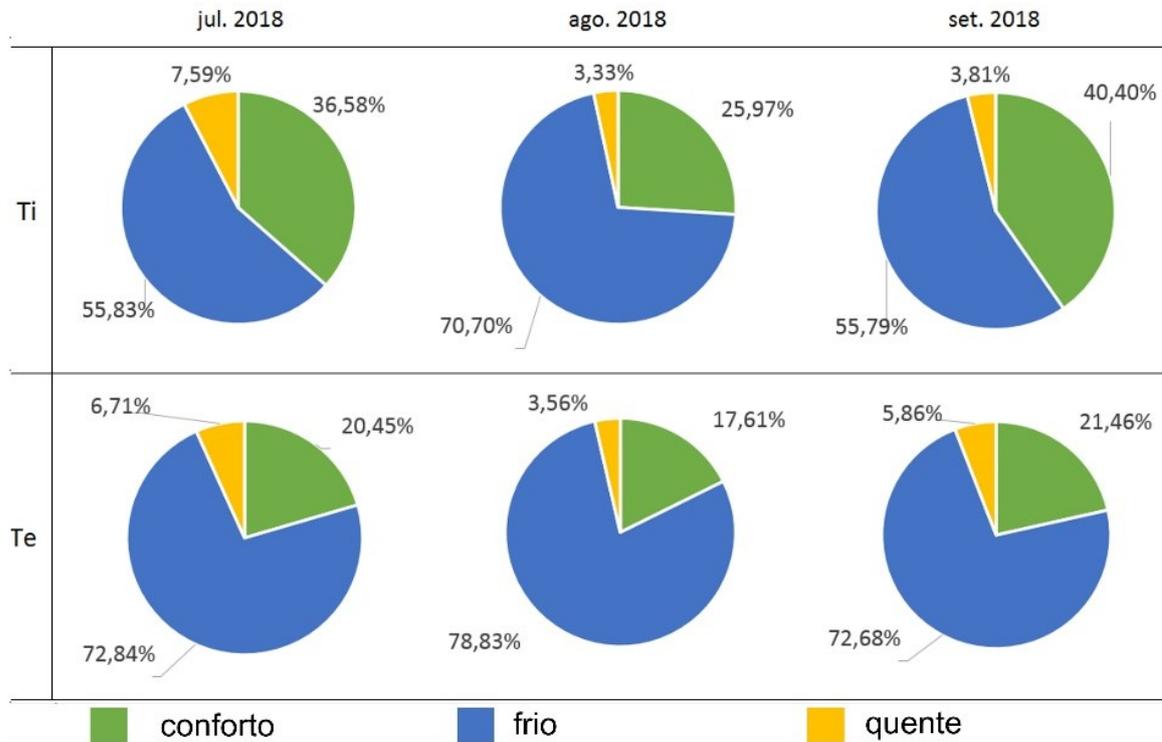
Fonte: autoria Própria.

Ao se observarem os dados de temperaturas médias verificou-se 17,49 °C para Ti e 15,25 °C para Te, observando-se uma diferença de 2,24 °C. A amplitude térmica de Ti foi em média 3,37 °C menor do que Te. Observa-se que a temperatura mínima de Ti ficou 4,80 °C acima de Te. As médias de temperaturas máximas resultou em um diferencial de 1,40 °C para mais em Ti. A temperatura mínima média de Ti ficou 3,55 °C acima de Te.

Os dados coletados por um período mais longo permitiram um comparativo para os meses de verão conforme dados do Gráfico 5. As estratégias de climatização mais utilizadas

visaram o aquecimento da edificação e constam no Apêndice A do trabalho conforme as situações climáticas predominantes do período.

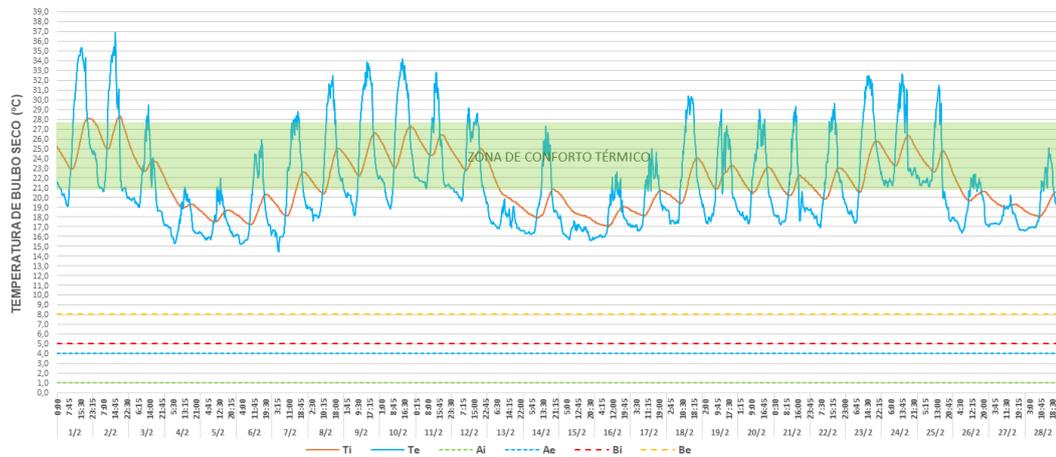
Gráfico 5: Percentuais de Ti e Te comparativos à zona de conforto para os meses de clima frio



Fonte: autoria Própria

Observa-se a predominância de temperaturas tendendo ao frio tanto para Ti como para Te, no entanto Ti demonstrou maior período dentro da faixa de interesse, que compreende às temperaturas na zona de conforto térmico. Em setembro a diferença entre Ti e Te na zona de conforto foi a mais sensível (18,94 %). As temperaturas acima da zona de conforto representam a menor parcela tanto para Ti quanto para Te. Os dados do Gráfico 6 demonstram os dados no período com predominância de clima quente compreendendo o mês fevereiro de 2019. Neste período manteve-se a configuração do sistema predominantemente no modo de ventilação externa (“e”1/4/5/8).

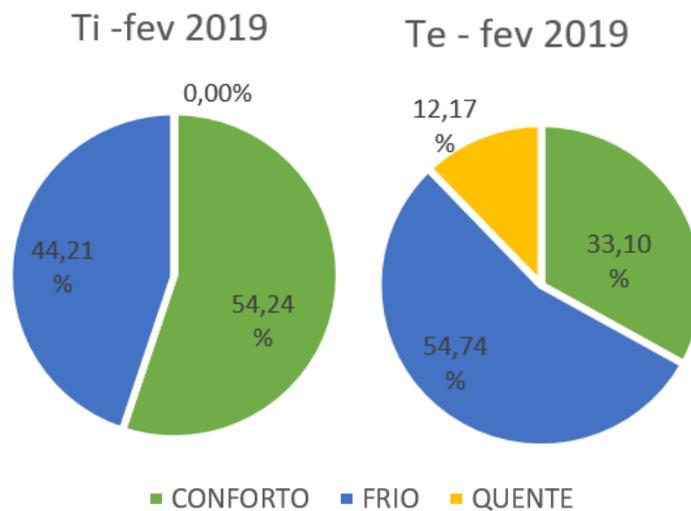
Gráfico 6: Temperaturas internas e externas em contraste com a zona de conforto para fevereiro de 2019.



Fonte: autoria Própria

Observa-se que Ti acompanha a flutuação e formato da curva de Te, no entanto com formato menos acentuado, revelando-se significativamente menor amplitude térmica. Observa-se que a curva de Te apresenta formato irregular nos picos e vales do gráfico, revelando possível influência de radiação direta e intempéries tais como vento sobre o equipamento de medição térmica (termômetro). O Gráfico 7 demonstra os percentuais atingidos por Ti e Te comparativamente à zona de conforto térmico.

Gráfico 7: Comparação entre os percentuais de Ti e Te com relação à zona de conforto no mês de fevereiro de 2019.



Fonte: autoria Própria

No mês de fevereiro Ti resultou em maior período na zona de conforto térmico em comparação à Te com diferença de 21,14%. Ti apresentou menor tempo em temperaturas frias

e não chegou a ficar com valores acima da zona de conforto, ao contrário de Te que extrapolou em 12,17% a zona ideal de temperatura. Os dados médios, máximos e mínimos de temperatura foram tabulados conforme exposto no Quadro 5.

Quadro 5: Médias de temperatura de Ti e Te para fevereiro de 2019.

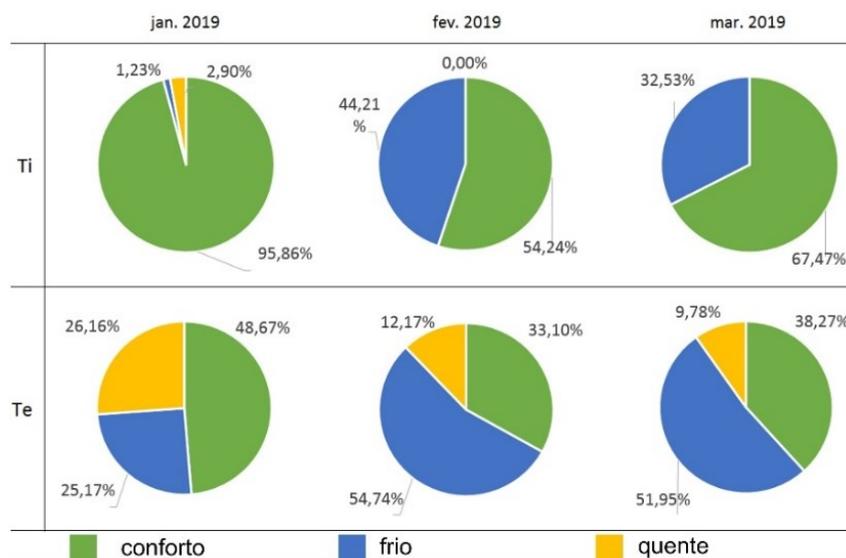
	Temperatura média (°C)	Amplitude térmica média (°C)	T máx (média °C)	T min média (°C)	T máx (°C)	T min (°C)
Ti (°C)	21,67	3,24	23,48	20,24	28,30	17,00
Te (°C)	21,29	10,81	28,09	17,28	36,90	14,40
Ti - Te (°C)	0,38	-7,56	-4,61	2,96	-8,60	2,60

Fonte: autoria própria

Ao se observarem os dados de temperaturas médias verificou-se pouca diferença com 21,67 °C para Ti e 21,29 °C para Te, observando-se uma diferença de 0,38 °C. A amplitude térmica de Ti foi em média 7,56 °C menor do que Te. Observa-se que a temperatura mínima de Ti ficou 2,60 °C acima de Te. As médias de temperaturas máximas resultou em um diferencial de 4,61 °C para menos em Ti e a temperatura mínima média de Ti ficou 2,96 °C acima de Te. Para a temperatura máxima observa-se grande diferencial com 8,60 °C para menos em Ti.

Os dados coletados por um período mais longo permitiram um comparativo para os meses de verão conforme dados do Gráfico 8 e demonstram os dados no período de verão desde 15 de janeiro de 2019 a 29 de março de 2019. A estratégia de climatização mais utilizada visou resfriamento do painel (“e” 1/4/5/8 – ventilação externa) e os dados de operação constam detalhadas no Apêndice A do trabalho Apêndice A do trabalho.

Gráfico 8: Percentuais de Ti e Te em relação às temperaturas da zona de conforto.



Fonte: autoria Própria

Observa-se nitidamente a predominância de temperaturas tendendo ao conforto para T_i e em desconforto térmico para os valores de T_e . Em T_e é sensível o percentual de valores acima da zona de conforto enquanto que T_i obteve poucos valores com temperaturas quentes. Em fevereiro e março observa-se os maiores percentuais em condição fria. A Tabela 8 apresenta o comparativo percentual em relação à zona de conforto térmico entre os meses frios e quentes.

Tabela 8: Percentuais comparativos entre T_i e T_e em relação às temperaturas da zona de conforto térmico.

	Inverno			Verão		
	Jul. 2018	Ago. 2018	Set. 2018	Jan. 2019	Fev. 2019	Mar. 2019
T_i x conforto	36,58%	25,97%	40,40%	95,86%	54,24%	67,47%
T_e x conforto	20,45%	17,61%	21,46%	48,67%	33,10%	38,27%
$T_i - T_e$	16,13%	8,36%	18,94%	47,19%	21,14%	29,20%
dif. média período ($T_i - T_e$)	14,48%			32,51%		

Fonte: autoria própria

Observa-se que T_i permaneceu por maior período na zona de conforto, superando o percentual de T_e em todos os meses avaliados. No inverno a diferença de percentual entre T_i e T_e dentro da zona de conforto foi menor em relação ao período de verão. Em janeiro a diferença entre T_i e T_e na zona de conforto foi a mais sensível (47,19 %) observando-se que a estratégia predominante foi de ventilação do painel (1/4/5/8). As temperaturas acima da zona de conforto apresentaram a maior diferença em janeiro (23,26%), em que T_e observou 26,16% e T_i apresentou apenas 2,9 % ocorrendo apenas em janeiro.

5 CONCLUSÕES

A energia solar é um recurso abundante e limpo, capaz de prover energia de diferentes formas aproveitáveis para o uso. A energia fotovoltaica é uma das formas de conversão mais acessíveis para consumidores que desejem gerar energia elétrica concomitante ao local de consumo. A integração entre arquitetura e tecnologia fotovoltaica é atualmente um dos campos mais promissores para a instalação de sistemas FV.

Preliminarmente é importante ressaltar que a edificação não possui aberturas tais como janelas que permitam a penetração da radiação solar direta no interior da edificação e/ou fontes internas de calor, sendo o sistema BIPV/T a principal fonte de energia térmica ativo na transmissão de calor para o interior da edificação;

O sistema construtivo não é totalmente adiabático e, portanto, possibilita transferência de calor através da envoltória da edificação. No entanto os materiais isolantes utilizados resultaram em valores de transmitância térmica sensivelmente abaixo dos recomendados pelas normas brasileiras vigentes;

Expostas as condições de avaliação questiona-se quais impactos e benefícios térmicos o sistema foi capaz de produzir na temperatura interna e condições de conforto térmico interno da edificação?

Verifica-se que durante o período de clima predominantemente frio, na incidência de radiação solar direta sobre a superfície dos módulos e com o sistema configurado para aquecimento interno da edificação (configuração “c” 2/3/6/7 – aquecimento) o sistema BIPV/T é capaz de transferir energia térmica para o interior da edificação proporcionando benefícios térmicos em relação ao conforto e habitabilidade da edificação.

Observa-se ainda pela avaliação dos gráficos que o sistema é capaz de transportar rapidamente para o interior a energia térmica absorvida pelos módulos FV durante o dia, verificando-se o nítido incremento nos valores de T_i comparáveis ao incremento nos valores de T_e . Ao final do período diurno quando há o decaimento da radiação solar e conseqüentemente nos valores da temperatura externa, observa-se um decaimento menor nos valores de T_i em comparação à T_e , proporcionado pelas características isolantes térmicas dos materiais de vedação. Mesmo que a configuração do sistema não tenha sido configurada para 1/3/5/7 (“a” - sem ventilação) ao fim do período diurno, este atraso térmico é verificável, ou seja, se mantida a configuração para aquecimento durante a noite não há diferenças sensíveis em comparação a configuração “c” 2/3/6/7 noturna.

A avaliação de T_i e T_e apresenta valores mais favoráveis ao conforto térmico em T_i no período frio, indicando que a conjugação da contribuição térmica do sistema BIPV/T e as características construtivas da edificação contribuíram para um ambiente melhor climatizado do que o clima externo, mesmo sem uma fonte de calor interna ativa.

Avaliando-se os dados de temperatura média, amplitude térmica, temperatura mínima média e temperatura mínima absoluta, observa-se que T_i demonstrou resultados melhores em comparação à T_e , considerando-se condições de habitabilidade e conforto térmico.

Quanto ao período de clima predominantemente quente do local (verão) a estratégia mais utilizada foi a de ventilação do painel e isolamento do ar interno (1/4/5/8). Observa-se que o sistema BIPV/T quando configurado para apenas ventilar e resfriar o painel (exaurindo-se o ar da camada posterior dos módulos FV) e sem permitir troca de calor entre o ar interno e externo, não promoveu o mesmo aquecimento do ar interno se comparado as configurações utilizadas nos climas frios. Principalmente a temperatura interna permaneceu por períodos muito maiores dentro da zona de conforto, e apresentou amplitude térmica sensivelmente menor em comparação à temperatura externa.

De tal maneira, tanto nas condições de clima predominantemente frio quanto de clima quente os resultados da temperatura interna foram mais adequados às condições de conforto térmico, revelando os benefícios térmicos esperados.

Em ambos os períodos a operação e configurações de operação do sistema BIPV/T produz impactos na temperatura interna da edificação, seja elevando a temperatura ou reduzindo a troca de calor pelas superfícies conforme a necessidade ou estratégia desejada.

A combinação de isolamento térmico da envoltória e integração de sistema BIPV/T à fachada da edificação apresenta potencial de climatização de ambientes sem a necessidade de consumo energético convencional, qualidade que pode ser explorada por arquitetos, projetistas e a indústria da construção civil em geral.

As aferições de energia elétrica foram realizadas em apenas dois dias específicos, e, portanto, as estimativas elaboradas são imprecisas, no entanto, fornecem um panorama para os dias com condições favoráveis à captação de radiação solar pelas superfícies do sistema, assim como, revelam seu potencial gerador elétrico. Verificou-se que o sistema BIPV/T avaliado além de proporcionar energia térmica, é capaz de fornecer energia elétrica aproveitável para o uso através da tecnologia de conversão fotovoltaica.

Preliminarmente às conclusões sobre quantidade de geração, destaca-se que sistema elétrico não está conectado à rede e o estudo desconsidera perdas relativas à conversão e/ou transmissão de energia elétrica por exemplo, tais como aquelas que naturalmente ocorrem da utilização de inversores CC/CA ou condutores. Portanto para se obter a energia aproveitável de forma exata, tais considerações são necessárias.

Os módulos de Telureto de Cádmio (CdTe) foram integrados à fachada da edificação e na posição vertical (90°), ou seja, distante da inclinação ideal para Curitiba (cerca de 25°), e com orientação azimutal de 0° (norte), ou seja, a ideal para regiões localizadas no hemisfério sul. Esta característica geométrica produziu impactos na quantidade de radiação solar absorvida pelos módulos FV e verifica-se a redução da quantidade de energia que os módulos foram capazes de produzir.

Além disso é muito provável, conforme abordado na revisão da literatura, que tenha havido redução na eficiência dos módulos devido ao aquecimento das células fotovoltaicas e demais componentes do painel FV, causando novamente a redução na energia produzida. Medições esporádicas realizadas com o termopar do multímetro indicaram temperaturas de até 60°C aferidos sobre a superfície externa do módulo. O catálogo do módulo de CdTe (ANEXO I) prevê Coeficiente de temperatura V_{oc} de $-0,24\ \%/K$ e de I_{sc} $-0,25\ \%/K$ acima da temperatura STC (25°C), ou seja, à 60°C pode-se considerar uma diferença de 35° de diferencial de temperatura a ser utilizado no cálculo do coeficiente de temperatura de operação. No entanto as aferições realizadas não são suficientemente precisas para fornecer dados confiáveis para se quantificar esta redução.

As estimativas realizadas conforme os métodos e condições apresentados revelam um potencial de geração elétrica fotovoltaica anual próximo à $360\ \text{kWh}$ nas condições de radiação e clima no momento das medições. No pico de potência, verificado entre as 10h e 11h do dia 29 de setembro de 2018, o painel atingiu $37,59\ \text{W}$ de potência, ou seja, cerca de 44% da potência nominal indicada no ANEXO I (catálogo do equipamento). Este percentual se aproxima do valor previsto no gráfico da Figura 10, que prevê a radiação disponível em 50% do total possível para a inclinação e azimute previstos. A inclinação do painel na vertical reduziu consideravelmente a quantidade de energia que o painel é capaz de produzir se comparado à potência nominal indicada pelo fabricante. Se comparada à estimativa obtida pelo método de simulação ($170,21\ \text{kWh/ano}$) verifica-se diferença sensível, uma vez que as medições

ocorreram em condições com altos índices de radiação na simulação computacional considera-se a média de irradiação anual.

O sistema avaliado confirma o potencial energético e construtivo da tecnologia BIPV/T e abre um leque de oportunidades para estudos futuros.

Amostras diárias mais numerosas das aferições elétricas poderão revelar dados mais precisos sobre o potencial gerador fotovoltaicos de sistemas BIPV/T integrados à arquitetura, e podem ser considerados na elaboração de trabalhos futuros. A utilização de equipamentos de medição de energia elétrica automatizados certamente trará resultados mais precisos de geração FV.

Pode-se instalar equipamento de ventilação forçada na câmara de ar do sistema BIPV/T, procurando verificar se a circulação de ar forçada propicia trocas térmicas mais rápidas entre a câmara e o ambiente interno.

Outra possibilidade é de simular o uso do ambiente alocando-se uma fonte de calor interna artificial no interior da edificação, simulando a presença de um ser humano no interior do ambiente.

A escala utilizada pode ser ampliada e proporcionar resultados mais confiáveis se a avaliação ocorrer por meio de edificações com dimensões maiores e com mais elementos BIPV/T integrados à arquitetura.

Sistemas do tipo BIPV/T aproveitam a energia disponível proveniente da radiação solar, fonte abundante e renovável, disponível em boa parte do globo terrestre, gerando energia aproveitável para o uso imediato,

O estudo revela que dentre as tecnologias disponíveis a fotovoltaica e derivações tais como sistemas do tipo BIPV/T é uma das possibilidades mais promissoras para gerar energia limpa e renovável. Por fim revelam-se neste estudo informações relevantes no campo da integração fotovoltaica à arquitetura e da sustentabilidade do ambiente construído.

REFERÊNCIAS

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Nova Iorque. 2005.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 10899** – Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). “**NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades”, Rio de Janeiro, 2005.

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

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 15575-1**: Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

AYABE, Murilo S.; DA SILVA JR, Sidnei A.; LOVATO, Tuane G. **Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico dotado de um seguidor solar de eixo polar**. 2017. 143 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba, 2017.

ANEEL. Dados de geração distribuída. Disponível em:<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 22 de jul. 2020.

BAVARESCO Mateus V.; MAZZAFERRO, Leonardo M.; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. **Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações**. 2017. Disponível em:< http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatorio_GruposClimaticos.pdf>. Acesso em: 01 de ago 2020.

BALJIT, Singh; CHAN, Hoy-Yen; KAMARUZZAMAN, Sopian. *Review of building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems*. **Journal of Cleaner Production** 137, pp. 677-689. 2016. Disponível em: < <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production> > Acesso em: 08 mar. 2020.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **PROJETEE. Dados Climáticos da Cidade de Curitiba**. 2020. Disponível em:< http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=PR++Curitiba&id_cidade=bra_pr_curitiba-pena.intl.ap.838400_try.1969>. Acesso em: 01 de ago 2020.

BRASIL, ANEEL. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em:< <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 26 de nov. 2019.

CHOW, Tin Tai. *A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology*. *Applied Energy* v. 87, p. 367. 2017.

DEBBARMA, K. Mary, SUDHAKAR, Prashant Baredar. *Comparison of BIPV and BIPV/T: A review*. *Resource-Efficient Technologies*, v. 3, p. 263–271. 2017. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240565371630207X?via%3Dihub> > Acesso em: 08 mar. 2020.

GIVONI, Baruch; Comfort, climate analysis and building design guidelines. **In Energy and Building**, vol. 18. 1992, p. 11-23. Disponível em: < https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_6454.pdf > Acesso em: 08 mar. 2020.

HEINSTEIN, Patrick, BALLIF, Christophe; PERRET-AEBI, Laure Emmanuelle. *Building-Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths*. **DE GRUYTER**, v. 3, n. 2, p. 125-156. 2013. Disponível em: < <https://www.degruyter.com/view/j/green.2013.3.issue-2/green-2013-0020/green-2013-0020.xml> >. Acesso em: 08 mar. 2020.

HELDEN, Wim G. J. van; ZOLINGEN, Ronald J. Ch. Van; ZONDAG, Herbert A.. *PV Thermal Systems: PV Panels Supplying Renewable Electricity and Heat*. **Progress In Photovoltaics: Research And Applications**. vol. 12, p. 415-426. 2004. Disponível em: < <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/4555.pdf> >. Acesso em: 08 mar. 2020.

HOYT, Tyler; SCHIAVON, Stefano; TARTARINI, Federico; CHEUNG, Toby; STEINFELD, Kyle; PICCIOLI, Alberto; MOON, Dustin. **CBE Thermal Comfort Tool**. *Software online*. Center for Building Environment, University of California Berkeley. Disponível em: < <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>>. Acesso em: 08 mar. 2020.

IEA. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress. 2019. Disponível em:< <https://www.iea.org/tcep/buildings/>>. Acesso em 03 dez. 2019.

JELLE, Bjørn Petter; BREIVIK, Christer; ROKENES, Hilde Drolsum. *Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities*. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. V. 100, pp.69-96. Elsevier. 2012. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811006970>>. Acesso em: 08 mar. 2020.

KALTMAIER, G.. **Metodologia de apoio à concepção de sistemas fotovoltaicos integrados à arquitetura por meio de ferramentas operacionais: estudo de caso para um projeto em Curitiba**. Monografia de especialização – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015. Disponível em: < <https://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/13035>> Acesso em: 03 set. 2020.

KÖPPEN, Wladimir; GEIGER, Rudolph. *Handbuch der Klimatologie. Das geographische System der Klimate*, Gebr. Borntraeger, 1–44, 1936. Disponível em: < http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2020.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttaky. **Eficiência Energética na Arquitetura**. ELETROBRAS/PROCEL. 3ª ed. 2017. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2020.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; ABREU, Samuel Luna de; RÜTHER, Ricardo; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson G. de. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª edição. São José dos Campos. INPE, 2017. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/atlas-brasileiro-de-energia-solar-2a-edicao.html>>. Acesso em: 08 mar. 2020.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar-GTES. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2020.

REN21. **Renewables 2020 global status report**. 2020. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2020/assets/img/Figure_04-super.png>. Acesso em: 22 jul. 2020.

RORIZ, M. **Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro**. ANTAC: São Carlos, 2012. 22 p.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. LABSOLAR, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf_2014.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2020.

SANDBERG, M.; MOSHFEGHBA, B. *Buoyancy-induced air-flow in photovoltaic facades Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules*. **Building and Environment**. v. 37. p. 211. 2001. Disponível em: <<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-800e2ead-4486-3b1f-975b-cc6ca4c7fac3>>. Acesso em: 08 mar. 2020.

SANTOS, ISIS PORTOLAN DOS. **Desenvolvimento de Ferramenta de Apoio à Decisão Em Projetos de Integração Solar Fotovoltaica à arquitetura**. 2013. 278 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2013. Disponível em: <http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Isis_Portolan_dos_Santos.pdf> Acesso em: 01 ago. 2020.

SHAHSAVAR, A., SALMANZADEH, M., AMERI, M., TALEBIZADEH, P.. *Energy saving in buildings by using the exhaust and ventilation air for cooling of photovoltaic panels*. **Energy Build.** Vol. 43, p. 2219-2226. 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811001848>>. Acesso em: 08 mar. 2020.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A.. *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations*. **Solar Energy**. v. 83, p. 614–624. 2009. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X08002788>>. Acesso em: 08 mar. 2020.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONCALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S., ALVES, A. R. "**Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**". 1a Edição. Curitiba: UTFPR, 2017. Disponível em: < <http://atlassolarparana.com/>> Acesso em: 03 set. 2020.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y ; NOUSIA, M. SOULIOTIS, M.; P. YIANOULIS, P. *Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems*. **Solar Energy**. v. 72, n. 3, p. 217. 2002. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X01000962>> Acesso em: 08 mar. 2020.

UFRGS. Laboratório de Energia Solar – LABSOL. Software RADIASOL. Porto Alegre. 2020. Disponível em: < <http://www.solar.ufrgs.br/>> Acesso em: 03 set. 2020.

URBANETZ, J. **Energia solar fotovoltaica**. Apostila disponibilizada pelo autor durante a disciplina do IV Curso de Especialização em Construções Sustentáveis. UTFPR. 2014.

URBANETZ, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados A Redes De Distribuição Urbanas: Sua Influência Na Qualidade Da Energia Elétrica E Análise Dos Parâmetros Que Possam Afetar A Conectividade**. 2010. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2010. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94284>> Acesso em: 08 mar. 2020.

URBANETZ, J.; ZOMER, C. D., RUTHER, R. *Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites*. **Building and Environment**. v. 46, p. 2112. 2011.

VERBERNE, G.; BONOMO P.; FRONTINI, F., VAN DEN DONKER, M.N.; A. CHATZIPANAGI, A.; SINAPIS, K.; FOLKERTS, W.. *BIPV Products For Façades And Roofs: A Market Analysis*. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC). 2014. **Anais**. Disponível em: < <https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=27123> > Acesso em: 08 mar. 2020.

VOKAS, Georgio , CHRISTANDONIS, Nikos; SKITTIDES, F.. *Hybrid photovoltaic–thermal systems for domestic heating and cooling—A theoretical approach*. **Solar Energy** v. 80 p. 607–615. 2006. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/222550848_Hybrid_photovoltaic-thermal_systems_for_domestic_heating_and_cooling-A_theoretical_approach > Acesso em: 08 mar. 2020.

YANG, Tingtin; ATHIENITIS, Andreas K. *A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 66, pp. 886-912. 2016. Disponível em: < <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v66y2016icp886-912.html>> Acesso em: 08 mar. 2020.

ZHANG, Tiantian; TAN, Yufei; YANG, Hongxing ; ZHANG, Xuedan . *The application of air layers in building envelopes: A review*. ***Applied Energy***. v. 165, p. 707–734. 2016. Disponível em:<
https://econpapers.repec.org/article/eeeappene/v_3a165_3ay_3a2016_3ai_3ac_3ap_3a707-734.htm>. Acesso em: 08 mar. 2020.

ZILLES, Roberto; MACÊDO, Wilson N.; GALHARDO, Marcos A. B.; OLIVEIRA, Sérgio H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.

APÊNDICE A – Tabela com relatório de operação do sistema

DATA	h	DESCRIÇÃO	Ai	Ae	Bi	Be
18/07/2018	17:30	Instalação do painel na fachada	2	4	6	8
19/07/2018	17:30	Fechamentos a2 e b2	1	3	5	7
20/07/2018	10:50	Operação do sistema	2	3	6	7
22/07/2018	17:40	Operação do sistema	1	3	5	7
22/07/2018	17:57	Leitura termômetros - remoção	1	3	5	7
22/07/2018	18:50	Devolução termômetros	1	3	5	7
23/07/2018	10:20	Operação do sistema	2	3	6	7
23/07/2018	17:20	Operação do sistema	1	3	5	7
25/07/2018	13:00	Operação do sistema	1	3	6	7
26/07/2018	12:15	Operação do sistema	2	3	6	7
26/07/2018	14:15	Operação do sistema	1	3	5	7
27/07/2018	11:00	Operação do sistema	2	3	6	7
07/08/2018	17:40	Operação do sistema	1	3	5	7
08/08/2018	12:30	Operação do sistema	2	3	6	7
09/08/2018	15:40	Operação do sistema	1	3	5	7
10/08/2018	9:40	Operação do sistema	2	3	6	7
10/08/2018	17:20	Operação do sistema	1	3	5	7
11/08/2018	12:20	Operação do sistema	2	4	6	7
11/08/2018	17:40	Operação do sistema	1	4	5	7
18/08/2018	15:30	Operação do sistema	1	3	5	7
19/08/2018	14:30	Operação do sistema	2	3	6	7
19/08/2018	18:10	Operação do sistema	1	3	5	7
20/08/2018	11:00	Operação do sistema	2	3	6	7
20/08/2018	18:00	Operação do sistema	1	3	5	7
23/08/2018	11:00	Operação do sistema	2	3	6	7
23/08/2018	18:00	Operação do sistema	1	3	5	7
24/08/2018	11:00	Operação do sistema	2	3	6	7
27/08/2018	17:00	Operação do sistema	1	3	5	7
28/08/2018	12:30	Operação do sistema	1	4	5	8
29/08/2018	18:00	Operação do sistema	2	3	6	7
31/08/2018	17:38	Operação do sistema	1	3	5	7
18/09/2018	11:00	Operação do sistema	2	3	6	7
17/10/2018	11:00	Operação do sistema	1	3	5	8
18/11/2018	11:30	Aferição termômetros	1	3	5	8
18/11/2018	13:27	Reset e devolução termômetros	1	3	5	8
21/11/2018	13:05	Movimentação ti	1	3	5	8
22/11/2018	13:28	Fixação ti	2	4	6	8
23/11/2018	11:40	Medição experimental multímetro	1	4	5	8
23/11/2018	11:40	Medição experimental multímetro	1	4	5	8
27/11/2018	12:45	Medição - operação sistema	2	4	6	7
29/11/2018	13:15	Operação sistema - medição elétrica	1	3	5	7
03/12/2018	15:45	Operação sistema - medição elétrica	1	3	6	7
04/12/2007	12:50	Operação sistema - medição elétrica	2	3	6	7
06/12/2018	14:00	Operação sistema - medição elétrica	1	3	5	7
09/12/2018	11:20	Operação sistema - baixa dados	2	3	6	7
11/12/2018	19:00	Operação sistema	1	3	5	7

13/12/2018	16:00	Operação sistema	2	4	6	8
18/12/2018	17:50	Operação sistema - leitura termômetros	1	4	5	8
14/01/2019	8:00	Aferição elétrica - leitura termômetros	1	4	6	8
14/01/2019	18:00	Aferição elétrica devolução termômetros	1	4	5	8
14/01/2019	18:00	Aferição elétrica fechamento	1	4	5	8
22/03/2019	14:00	Te recolhido para coleta de dados	2	4	6	8
23/03/2019	14:00	Ti recolhido para coleta de dados	2	4	6	8
23/03/2019	14:12	Ti devolvido	2	4	6	8
23/03/2019	14:15	Te devolvido	2	4	6	8
23/03/2019	18:15	Operação sistema	1	4	5	8
25/03/2019	11:45	Operação sistema	1	4	6	8
27/03/2019	13:45	Te recolhido para manutenção	1	4	6	8
28/03/2019	17:00	Te devolvido	1	4	6	8
29/03/2019	12:45	Operação sistema	1	4	5	8
02/04/2019	13:45	Operação sistema	1	3	5	7
09/04/2019	12:43	Operação sistema	2	3	6	7
18/04/2019	14:10	Início medições EFV - porta aberta	2	3	6	7
18/04/2019	14:10	Operação sistema	1	3	5	7
03/05/2019	11:35	Operação sistema	2	3	6	7
03/05/2019	15:30	Operação sistema	1	3	5	7
06/05/2019	10:15	Medições elétricas - leitura termômetros	1	3	5	7
06/05/2019	10:15	Medições elétricas - devolução termômetros	1	3	5	7
07/05/2019	12:15	Operação sistema	2	3	6	7
20/05/2019	15:26	Operação sistema	1	3	5	7
21/05/2019	15:26	Operação sistema	2	3	6	7
05/07/2019	16:30	Operação sistema	1	3	5	7
08/07/2019	12:57	Operação sistema	2	3	6	7
08/07/2019	17:00	Operação sistema	1	3	5	7
09/07/2019	13:33	Operação sistema	1	3	6	7
09/07/2019	16:13	Operação sistema	1	3	5	7
10/07/2019	11:15	Operação sistema	2	3	6	7
11/07/2019	12:15	Operação sistema	1	3	5	7
12/07/2019	13:15	Operação sistema	2	3	6	7
12/07/2019	8:47	Operação sistema	2	3	6	7
13/07/2019	16:24	Operação sistema	1	3	5	7
16/07/2019	12:00	Operação sistema	2	3	6	7
16/07/2019	18:56	Operação sistema	1	3	5	7
17/07/2019	11:00	Operação sistema e medições	2	3	6	7
23/07/2019	16:50	Operação sistema	1	3	5	7
03/08/2019	12:45	Operação sistema	2	3	6	7
03/08/2019	14:45	Operação sistema	1	3	5	7
04/08/2019	10:16	Operação sistema	2	3	6	7

APÊNDICE B - (V_{OC}) tensão de circuito aberto e (I_{SC}) corrente de curto circuito aferidos no dia 14 de janeiro de 2019.

h	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)
08:15	51,20	1,00
08:30	51,00	1,00
08:45	49,70	0,98
09:00	50,30	0,99
09:15	51,50	1,01
09:30	50,90	1,00
09:45	51,20	1,01
10:00	51,60	1,02
10:15	50,10	0,98
10:30	51,40	1,01
10:45	51,40	1,01
11:00	50,40	1,01
11:15	51,60	1,01
11:30	51,00	1,00
11:45	51,10	1,00
12:00	50,20	0,99
12:15	50,60	0,99
12:30	50,50	0,99
12:45	50,80	0,99
13:00	50,50	0,99
13:15	50,40	0,99
13:30	50,40	0,99
13:45	51,90	1,02
14:00	50,70	0,99
14:15	50,80	0,99
14:30	50,70	0,99
14:45	47,40	0,93
15:00	48,80	0,95
15:15	49,80	0,98
15:30	50,40	0,99
15:45	49,90	0,98
16:00	48,70	0,99
16:15	49,90	0,98
16:30	45,00	0,88
16:45	43,30	0,85
17:00	33,20	0,65
17:15	35,50	0,70
17:30	32,30	0,65
17:45	30,30	0,59
18:00	31,10	0,61
18:15	30,90	0,60
18:30	30,00	0,59
18:45	29,70	0,58
19:00	28,00	0,55
19:15	27,30	0,54
19:30	26,50	0,52
19:45	16,70	0,37
20:00	0,00	0,00

APÊNDICE C - potência máxima e estimativas de energia elétrica fornecidas pelo módulo no decorrer do dia 14 de janeiro de 2020.

EFV - 14 de janeiro de 2020 - 30 min								
h	V _{OC} (V)	I _{SC} (A)	V _{mpi} (V)	I _{mpi} (A)	P _{mpi} (W)	P _{mpi/2} (W)	E = $\sum P_{mpi/2}$ (Wh)	CONDIÇÃO APARENTE DO CÉU
08:30	51,00	1,00	38,33	0,86	33,12	16,56	32,73	Céu limpo poucas nuvens
09:00	50,30	0,99	37,80	0,86	32,34	16,17		
09:30	50,90	1,00	38,26	0,86	33,06	16,53	33,62	Céu limpo poucas nuvens
10:00	51,60	1,02	38,78	0,88	34,18	17,09		
10:30	51,40	1,01	38,63	0,87	33,71	16,86	33,39	Céu limpo poucas nuvens
11:00	50,40	1,01	37,88	0,87	33,06	16,53		
11:30	51,00	1,00	38,33	0,86	33,12	16,56	32,70	Céu limpo poucas nuvens
12:00	50,20	0,99	37,73	0,86	32,27	16,14		
12:30	50,50	0,99	37,95	0,86	32,47	16,23	32,47	Céu limpo poucas nuvens
13:00	50,50	0,99	37,95	0,86	32,47	16,23		
13:30	50,40	0,99	37,88	0,86	32,40	16,20	32,50	Céu limpo poucas nuvens
14:00	50,70	0,99	38,10	0,86	32,60	16,30		
14:30	50,70	0,99	38,10	0,86	32,60	16,30	31,35	Céu limpo poucas nuvens
15:00	48,80	0,95	36,68	0,82	30,11	15,05		Nuvens - chuva chegando
15:30	50,40	0,99	37,88	0,86	32,40	16,20	31,86	Nuvens - chuva chegando
16:00	48,70	0,99	36,60	0,86	31,31	15,66		
16:30	45,00	0,88	33,82	0,76	25,72	12,86	19,87	Muito nublado
17:00	33,20	0,65	24,95	0,56	14,01	7,01		Chuva leve
17:30	32,30	0,65	24,28	0,56	13,63	6,82	12,98	Chuva leve
18:00	31,10	0,61	23,37	0,53	12,32	6,16		
18:30	30,00	0,59	22,55	0,51	11,49	5,75	10,75	Chuva leve
19:00	28,00	0,55	21,04	0,48	10,00	5,00		
19:30	26,50	0,52	19,92	0,45	8,95	4,47	4,47	Chuva leve
20:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
E _{mod1} dia (Wh/dia)								308,67
E _{mod3} dia (Wh/dia)								926,02
Emensal (kWh/mês)								27,78
Ea (kWh/a)								338,00

Fonte: autoria Própria.

APÊNDICE D - potência máxima e estimativas de energia elétrica fornecidas pelo módulo no decorrer do dia 29 de setembro de 2019.

EFV 29 de setembro de 2019								
h	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _{mpi} (V)	I _{mpi} (A)	P _{mpi} (W)	P _{mpi/2} (W)	E = $\sum P_{mpi/2}$ (Wh)	CONDIÇÃO APARENTE DO CÉU
06:30	36,00	0,72	27,06	0,62	16,83	8,42	20,93	NUBLADO
07:00	43,80	0,88	32,92	0,76	25,03	12,52		
07:30	44,90	0,92	33,75	0,79	26,83	13,41	28,56	NUBLADO
08:00	48,10	0,97	36,15	0,84	30,30	15,15		
08:30	47,00	0,95	35,32	0,82	29,00	14,50	29,93	NUBLADO
09:00	48,50	0,98	36,45	0,85	30,87	15,43		
09:30	51,40	1,03	38,63	0,89	34,38	17,19	35,98	NUBLADO
10:00	53,10	1,09	39,91	0,94	37,59	18,79		
10:30	51,30	1,03	38,56	0,89	34,31	17,16	34,31	NUBLADO
11:00	51,30	1,03	38,56	0,89	34,31	17,16		
11:30	51,30	1,03	38,56	0,89	34,31	17,16	33,30	céu limpo poucas nuvens
12:00	49,70	1,00	37,35	0,86	32,28	16,14		
12:30	52,20	1,05	39,23	0,91	35,59	17,80	35,02	Céu limpo poucas nuvens
13:00	51,50	1,03	38,71	0,89	34,45	17,22		
13:30	51,40	1,03	38,63	0,89	34,38	17,19	33,92	Céu limpo poucas nuvens
14:00	50,50	1,02	37,95	0,88	33,45	16,73		
14:30	50,30	1,01	37,80	0,87	32,99	16,50	32,63	Céu limpo poucas nuvens
15:00	49,70	1,00	37,35	0,86	32,28	16,14		
15:30	49,70	1,00	37,35	0,86	32,28	16,14	31,60	Céu limpo poucas nuvens
16:00	48,60	0,98	36,53	0,85	30,93	15,47		
16:30	46,90	0,94	35,25	0,81	28,63	14,32	25,93	Céu limpo poucas nuvens
17:00	42,10	0,85	31,64	0,73	23,24	11,62		
17:30	37,50	0,75	28,18	0,65	18,26	9,13	13,61	Céu limpo poucas nuvens
18:00	24,60	0,56	18,49	0,48	8,95	4,47		
18:15	14,10	0,27	10,60	0,23	2,47	1,24	1,28	Céu limpo poucas nuvens
18:30	4,60	0,03	3,46	0,03	0,09	0,04		
E _{mod1} dia (Wh/dia)								357,02
E _{mod3} dia (Wh/dia)								1.071,05
Emensal (kWh/mês)								32,13
Eanual(kWh/a)								390,93

Fonte: autoria Própria

ANEXO I - Catálogo do módulo fotovoltaico.

calyxo

MÓDULO SOLAR DE PELÍCULA FINA CX3PRO 85

Produzidos na Alemanha, os módulos CX3Pro 85 unem a eficiência da tecnologia de película fina de Telureto de Cádmiio (CdTe) a um design elegante e atual, permitindo o desenvolvimento de soluções arquitetônicas inovadoras no campo do revestimento funcional de paredes externas em empreendimentos imobiliários de alto padrão.



ÁREA DE APLICAÇÃO

- Revestimento externo de paredes e *car ports* (cobertura de estacionamentos)
- Cobertura de Telhados
- Instalações ao nível do chão
- Pergolados

DIFERENCIAIS

- Design incomparável
- Ausência de bordas metálicas
- Vidro laminado duplo
- Resistente à condições ambientais extremas
- Adaptado a climas nublados e de baixa intensidade luminosa

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E GARANTIAS

- Dimensões: 1200 X 600 X 6,9 mm
- Peso: 12 Kg
- Baixo coeficiente de temperatura (mais eficiente em climas quentes)
- 25 anos de Garantia de Eficiência (Mínimo de 80%)

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Valores nominais com condições de teste padrão (STC: 1000W/m², 25°C, AM 1,5 espectro)¹

CLASSE DE POTÊNCIA	CX3	CX3Pro 85
Potência nominal (+10% / -5%)	P _{PPP}	85,0
Corrente à potência máx.	I _{PPP}	1,78
Tensão à potência máx.	V _{PPP}	47,8
Corrente de curto-circuito	I _{PPP}	2,06
Corrente de curto aberto	V _{PPP}	63,6

Coefficientes de temperatura (STC: 1000W/m², AM 1,5 espectro)

Coefficiente de temperatura I _{SC}	α	[%/K]	+0,02
Coefficiente de temperatura V _{OC}	β	[%/K]	-0,24
Coefficiente de temperatura P _{PPP}	γ	[%/K]	-0,25

Valores nominais à temperatura da célula de serviço normal (NOCT: 800W/m², 40 ± 2°C, AM 1,5 espectro)

CLASSE DE POTÊNCIA	CX3	CX3Pro 85
Potência nominal	P _{PPP}	85,0
Corrente à potência máx.	I _{PPP}	1,78
Tensão à potência máx.	V _{PPP}	47,8
Corrente de curto-circuito	I _{PPP}	2,06
Corrente de curto aberto	V _{PPP}	63,6

Características para a incorporação do sistema (IEC)

Tensão máxima do sistema	V _{sys} [V]	1000
Capacidade de carga da corrente de retorno	I _r [A]	4,0
Carga de vento/neve	P [Pa]	2400
Classe de proteção		II
Classe de incêndio		B

Siga corretamente as instruções de instalação e limitações de uso determinadas pelo fabricante.

Informações válidas na data de impressão deste material (Agosto/2017). O fabricante se reserva o direito de alterar especificações e/ou informações a qualquer tempo.

O SEU CONTATO DIRETO COM O SOL

FABRICANTE	IMPORTADOR	DISTRIBUIDOR	REVENDEDOR
 OT Theißen, Sonnenallee 11 06766 Ditzefeld-Wolffen Germany www.calyxo.com.br	 Rua 600, 109 - Centro Balneário Camboriú, SC - Brasil +55 (47) 3267-8200 www.tektrade.com.br	 Rua 1500, 990 - Centro Balneário Camboriú, SC - Brasil +55 (47) 2125-9691 www.tekenenergy.ind.br	 Soluções em Energia www.tdistributofociao.com.br CURITIBA BELMONTE MARIINGÁ 41 3094-1000 47 3037-8885 44 3028-1800

QUALIFICAÇÃO E CERTIFICADOS

IEC 61646; IEC 61730; MCS; IEC 61701; IEC 62716; Safety Class II. ISO 9001:2008; ISO 14001:2004; OHSAS 18001:2007; ISO 50001:2011



Nota: Deve seguir impreterivelmente as indicações das instruções de instalação. Para mais informações sobre o uso autorizado, pode consultar as instruções de utilização e de serviço ou pode consultar o Serviço Técnico. Reservadas as alterações técnicas na especificação.



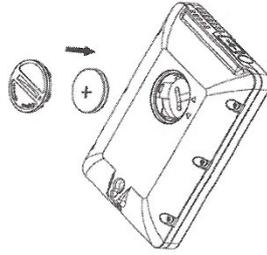
ANEXO II - Manual do equipamento (termômetro digital) utilizado para mensurar temperaturas internas e externas a edificação modelo NO: DS102.

- Time, date and unit synchronized your PC
- Low battery indicator

2. Installation

2.1 Insert battery

- 1). First use a large coin to open the battery cover at the back of the unit.
- 2). Checking the correct polarization, insert 1 x 3V (CR2032) lithium cell, positive (+) pole up into the battery compartment and replace the cover.
- 3). When the battery is inserted, all the segments of the LCD display for about 3 seconds then enter to normal mode.



Caution: Do not reverse polarity of the batteries

2.2 Wall amount

You can mount this item on a wall by using a screw (not included)

3. Button Function:

"SET" BUTTON:

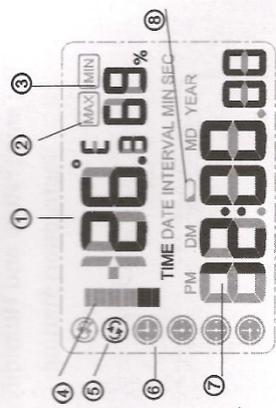
- In normal display, press "SET" button to alternate the display of time, date and logging intervals
- In normal display, press "SET" button for 2 seconds to enter setting mode
- In normal display, press SET and ADD buttons at the same time for 5 seconds to enter Calibration mode

"+" BUTTON:

- In normal display, press "+" button to alternate the display of Max, Min and current temperature & humidity
- In setting mode, press "+" button to increase the value of information being set.
- In Max/Min mode, press "+" button for 2 seconds, the Max or Min value will be reset to current reading

"-" BUTTON:

- In normal display, press "-" button for 2 seconds to clear the history data
- In setting mode, press "-" button to decrease the value of information being set.



1. Temperature
2. MAX/MIN value
3. Humidity
4. Memory status
5. Logging mode icon
6. Time period icon
7. Time/Date/Interval/year
8. Low battery indicator

1. Introduction

Thank you for choosing this item for your data logging requirement. Small simple and affordable, data logger can measure and record data at specified intervals ranging from once every 8 seconds to once every 4 hours. It is our goal to bring you accurate, low-cost, easy-to use data logger that integrate easily into the user's working environment.

1.1 Package Contents

- 1x data logger unit
- 1x USB cable
- 1x CD ROM
- 1x 3 V lithium battery CR2032
- Instruction manual

1.2 Features:

- Water resistance
- Measure and log temperature and humidity data
- Instant data download with PC/laptop
- USB interface for set-up and data download
- Easily re-configurable using included software
- Selectable logging intervals from 8 seconds to 4 hours (default 5minute)
- Selectable measurement in °F or °C

ANEXO III – Interface do *software* Data Logger 3.3 do equipamento de medição térmica

