

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Luiza de Queiroz Corrêa

**Análise de eficiência energética de instalação fotovoltaica integrada a  
edifício (BIPV) com painéis fotovoltaicos orgânicos (OPV) em fachadas  
verticais**

Belo Horizonte

2023

Luiza de Queiroz Corrêa

**Análise de eficiência energética de instalação fotovoltaica integrada a edifício (BIPV) com painéis fotovoltaicos orgânicos (OPV) em fachadas verticais**

Dissertação de mestrado apresentada ao “*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais*”, como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profs. DSc. Andréa Oliveira Souza da Costa

Coorientador: Prof. DSc. Esly Ferreira da Costa Junior

Belo Horizonte  
2023

C824a

Corrêa, Luiza de Queiroz.

Análise de eficiência energética de instalação fotovoltaica integrada a edifício (BIPV) com painéis fotovoltaicos orgânicos (OPV) em fachadas verticais [recurso eletrônico] / Luiza de Queiroz Corrêa. – 2023.

1 recurso online (72 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Andréa Oliveira Souza da Costa.

Coorientador: Esly Ferreira da Costa Junior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 64-72.

Bibliografia: f. 62-63.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fachadas - Teses. 3. Energia - Teses. 4. Eficiência energética - Teses. 5. Sustentabilidade - Teses. 6. Energia solar - Teses. 7. Efeito estufa - Aspectos ambientais - Teses. 8. Células solares - Teses. 9. Energia fotovoltaica - Teses. 10. Edifícios - Teses. I. Costa, Andréa Oliveira Souza da. II. Costa Junior, Esly Ferreira da. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

### FOLHA DE APROVAÇÃO

## ***“ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA INTEGRADA A EDIFÍCIO (BIPV) COM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS ORGÂNICOS (OPV) EM FACHADAS VERTICAIS”***

**LUIZA DE QUEIROZ CORRÊA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dra. Andrea Oliveira Souza da Costa (Orientadora–Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG), Dr. Esly Ferreira da Costa Junior (Co-orientador –Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG), Dr. Domingos Fabiano de Santana Souza (Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN), Dra. Viviane Santos Biralhal (Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Energia e Sustentabilidade"**.

Dissertação aprovada no dia 11 de agosto de 2023.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Oliveira Souza da Costa, Coordenador(a)**, em 14/08/2023, às 21:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Esly Ferreira da Costa Junior, Professor do Magistério Superior**, em 14/08/2023, às 22:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Domingos Fabiano de Santana Souza, Usuário Externo**, em 15/08/2023, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Viviane Santos Birchal, Diretor(a)**, em 17/08/2023, às 21:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2513547** e o código CRC **4542669F**.

## Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e pela saúde que me permitiram realizar este trabalho.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores, que me guiaram com paciência e dedicação ao longo desse projeto e me encorajaram em momentos de dúvida e incerteza. Sua compreensão e experiência foram fundamentais para o sucesso desta dissertação. Vocês terão sempre a minha admiração!

Agradeço aos professores do programa de pós-graduação de Engenharia Mecânica da UFMG pelo ensino de qualidade, estímulo e pela troca de conhecimentos. A pandemia e o ensino à distância dificultaram o vínculo com mais colegas, mas ainda sou grata àqueles que cruzaram o meu caminho, compartilharam dos estudos e trabalhos em grupo comigo e se tornaram suporte nessa caminhada.

Aos meus familiares, especialmente aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todas as etapas da minha vida pessoal, acadêmica e profissional. Ao Eduardo, por acreditar sempre no meu potencial mesmo em meio às minhas (muitas) inseguranças.

Aos meus colegas e amigos do CSEM Brasil, agora ONINN, e da SUNEW pelo apoio emocional e amizade. Compartilhar momentos difíceis e vitórias com vocês foi fundamental para superar as dificuldades e celebrar as conquistas.

Por fim, gostaria de agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Meus sinceros agradecimentos a todos os que participaram de alguma forma na elaboração deste estudo.

Muito obrigada a todos!

## RESUMO

A integração de painéis fotovoltaicos em edificações ou do inglês *building integrated photovoltaics* (BIPV) desempenha um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa contribuindo para a sustentabilidade no setor da construção civil. A tecnologia de células solares orgânicas apresenta várias vantagens em relação à tradicional baseada em silício, como leveza, flexibilidade e semitransparência, sendo adequada para esse tipo de aplicação. Quando integrados a janelas e fachadas, esses painéis oferecem uma dupla vantagem: por um lado, atuam como barreira contra uma fração da radiação solar ultravioleta, proporcionando conforto térmico ao ambiente interno, enquanto, por outro lado, geram energia *off grid*, isto é, à parte da rede elétrica. Além disso, os dispositivos orgânicos são conhecidos por serem mais eficientes do que os painéis fotovoltaicos tradicionais baseados em silício em condições de luz difusa e baixa luminosidade. No entanto, poucos estudos foram conduzidos na área utilizando módulos comerciais de grande área, em condições operacionais reais por um longo período. Este trabalho tem como objetivo reduzir essa lacuna e lançar luz sobre esse debate, apresentando uma análise baseada em dados reais de um conjunto de painéis orgânicos laminados em vidro em uma instalação vertical integrada a um edifício em São Paulo, Brasil. Para isso, vários modelos de regressão linear foram desenvolvidos e testados para prever a geração de energia a partir de dados meteorológicos e posição solar ao longo de quatro anos de operação. Os melhores modelos alcançaram valores de  $R^2$  de 0,76 e 0,81 para regressões simples e múltiplas, respectivamente, com dados de validação.

Palavras-chave: *building integrated photovoltaics*; células solares orgânicas; modelos de regressão.

## ABSTRACT

Building-integrated photovoltaics play a key role in the reduction of greenhouse gases emission towards sustainability in the building and construction sector. The organic solar technology holds several advantages such as lightweight, flexibility and semitransparency, suiting well for this type of application. Integrated to windows and facades, they offer a dual-benefit: at one hand offers a barrier to part of the solar radiation, adding thermal comfort to the indoor environment, while at the other generates off-grid power. Besides that, organic devices are known to be more efficient than traditional photovoltaics based in silicon in diffuse and low light conditions. Nevertheless, only few studies had been conducted in the area employing large-area commercial modules, in real operational conditions for a long-term period. This work has the purpose to reduce this gap and shine a light on this debate bringing an analysis based on real data of a set of organic panels laminated in glass in a vertical installation. For this, several linear regression models were tested to predict the energy generation from meteorological data and solar position throughout four years of operation, and the best models developed achieved 0.76 and 0.81 values for  $R^2$  with validation data, respectively for simple and multiple regressions.

Keywords: building integrated photovoltaics; organic photovoltaics; regression models.



## Lista de figuras

Figura 1.1: Esquema explicativo das diferentes tecnologias fotovoltaicas. Fonte: o autor.....	14
Figura 1.2: Estrutura multicamada do OPV flexível. Fonte: o autor.....	14
Figura 1.3: a) Esquema energético do OPV (De Queiroz Corrêa et al., 2016) e b) moléculas tradicionais usadas na camada ativa do OPV.....	15
Figura 2.1: Imagens da instalação vertical BIPV da empresa Sunew com painéis OPV integrados ao vidro. Fonte: SUNEW e TOTVS.....	19
Figura 3.1: Número de publicações sobre sistemas BIPV nos últimos 30 anos (Maghrabie et al., 2021). .....	20
Figura 3.2: Performance diurna dos módulos OPV para um dia a) ensolarado e b) nublado no inverno, e c) ensolarado e d) nublado no verão (Stoichkov et al., 2019). .....	21
Figura 3.3: Rendimento energético mensal em função da posição do módulo de dezembro de 2015 a julho de 2016 (Stoichkov et al., 2019).....	23
Figura 3.4: Configurações de ETFE e OPV estudadas por (Moreno et al., 2019) .....	24
Figura 3.5: Iluminância solar útil em a) Barcelona e b) Paris (Moreno et al., 2019).....	26
Figura 3.6: a) Irradiância ( $W/m^2$ ) incidente média por hora em fachada vertical em locação na Malásia, b) Casos BIPV estudados em edifício alto A) $90^\circ$ azimute, fachada leste, B) $270^\circ$ azimute, fachada oeste, C) $90^\circ$ e $270^\circ$ azimute, D) Metade superior do prédio e E) telhado, c) Geração de energia anual (Ghazali et al., 2017).....	29
Figura 3.7: Resultados da análise de eficiência para cada janela vertical e inclinada de DSSC BIPV (Lee et al., 2018) .....	30
Figura 3.8: Tendência de eficiência para painéis DSSC e MCPV (Silício multi-cristalino) em função da nebulosidade. (Lee et al., 2018).....	31
Figura 3.9: Fator de Sky view para cada revestimento - vertical ou inclinado (Lee et al., 2018).....	31
Figura 3.10: Efeito de sombreamento a) vista plana de cima b) sombra modelada em uma parede vertical. A área sombreada (em cinza) é igual a 30% do total da área da parede, c) seção vertical. (Vulkan et al., 2018).....	33
Figura 4.1: Imagem de satélite do edifício. As setas vermelhas apontam para a orientação Noroeste da fachada que contém os painéis. Fonte: Google Maps. ....	37
Figura 4.2: Informações solares na localização de São Paulo. Recorte de um dia e horário específicos. Fonte: <a href="http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html">http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html</a> .....	38
Figura 4.3: Projeção estereográfica do sol sobre o plano.....	39
Figura 4.4: Esquema explicativo da metodologia para construção dos modelos. ....	42
Figura 5.1: Relação entre a geração de energia e radiação global (RG) ao longo do ano.....	43

Figura 5.2: a) Recorte da relação entre a geração de energia e radiação global máxima no inverno; b) Esquemático da variação da posição do sol nas estações do verão e inverno. ....	45
Figura 5.3: Resumo de geração e radiação por mês, a) sem e b) com filtro de dados de RG. ....	46
Figura 5.4: Relação entre geração de energia e temperaturas média e máxima ao longo do ano. ....	47
Figura 5.5: Geração de energia média por mês ao longo de 2018 e 2019.....	48
Figura 5.6: a) Média e b) máxima de radiação global diária, c) média e d) máxima de geração de energia diária para cada mês ao longo dos quatro anos de operação entre 2018 e 2021 analisados. ....	49
Figura 5.7: Relação entre geração de energia e altitude solar ao longo dos quatro anos de operação entre 2018 e 2021.....	51
Figura 5.8: Comportamento dos melhores modelos durante o período de inverno de 2020 e verão de 2021 para ambos os conjuntos de dados: a) regressão e b) validação. ....	57
Figura 5.9: Gráficos referentes aos modelos com melhor $R^2$ obtido com os dados de validação	58
Figura I.1: Tratamento de dados .....	66
Figura II.1: Modelos de regressão simples.....	68
Figura II.2: Modelos de regressão múltipla .....	70

## Lista de tabelas

Tabela 3.1: Análise comparativa dos trabalhos da literatura estudados.....	35
Tabela 5.1: Manipulação de dados de radiação e de geração de energia elétrica para cálculo da média diária do ano de 2019 .....	45
Tabela 5.2: Resumo das variáveis consideradas no desenvolvimento dos modelos matemáticos. ....	50
Tabela 5.3: Matriz de correlação entre variáveis. ....	51
Tabela 5.4: Modelagem matemática com regressão simples .....	53
Tabela 5.5: Modelagem matemática com regressão múltipla .....	54
Tabela 5.6: Coeficientes do modelo matemático de regressão simples de ordem 2 (modelo 2). 58	
Tabela 5.7: Coeficientes do modelo matemático de regressão múltipla de ordem 2 (modelo 8) 58	
Tabela II.1: Coeficientes dos modelos de regressão simples .....	71
Tabela II.2: Coeficientes dos modelos de regressão múltipla .....	71

## Lista de siglas e nomenclaturas

PV	fotovoltaico
BIPV	<i>building integrated photovoltaics</i> ou sistema fotovoltaico integrado a edifícios
BAPV	<i>building applied photovoltaics</i> ou sistema fotovoltaico aplicado a edifício
IPV	<i>indoor photovoltaics</i> ou sistema fotovoltaico para ambientes internos
OPV	<i>organic photovoltaics</i> ou sistema fotovoltaico orgânico
Voc	<i>open-circuit voltage</i> ou tensão de curto-circuito
Jsc	<i>short-circuit current density</i> ou densidade de corrente de curto-circuito
HOMO	<i>highest occupied molecular orbital</i> ou orbital molecular mais elevado ocupado
LUMO	<i>lowest unoccupied molecular orbital</i> ou orbital molecular mais baixo não ocupado
WWR	<i>window wall ratio</i> ou proporção janela/parede
Wearables	dispositivos eletrônicos integráveis a tecidos

## Sumário

1. Introdução .....	13
2. Objetivos .....	18
2.1. Objetivo geral.....	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. Referencial teórico .....	20
4. Metodologia .....	37
4.1. Dados da instalação.....	37
4.2. Dados meteorológicos.....	38
4.3. Análise qualitativa.....	40
4.4. Modelagem.....	40
5. Resultados .....	43
5.1. Análise qualitativa.....	43
5.1.1. Geração de energia e radiação global em função da data.....	43
5.1.2. Geração de energia e temperatura do ar em função da data .....	46
5.1.3. Geração de energia ao longo dos anos .....	47
5.2. Análise quantitativa .....	50
5.2.1. Variáveis.....	50
5.2.2. Modelagem matemática .....	53
6. Conclusões .....	60
7. Referências bibliográficas .....	61
Apêndice I.....	63
Apêndice II.....	67

## 1. Introdução

Os dispositivos fotovoltaicos orgânicos, também conhecidos pela sigla OPV (do inglês, *organic photovoltaics*), são classificados como uma tecnologia fotovoltaica inovadora de terceira geração. São também parte da categoria de tecnologia de filme fino, termo utilizado para se referir a camada ativa da ordem de desde poucos micrômetros até camada monoatômica, possibilitando flexibilidade, leveza e semi-transparência a dispositivos que se utilizam dessa tecnologia (De Queiroz Corrêa et al., 2022; Hermes et al., 2015).

Os painéis de silício, que nos dias de hoje dominam o mercado PV, são chamados painéis de tecnologia de primeira geração. Além deles, há a tecnologia que utiliza materiais semicondutores compostos de elementos químicos do grupo III e grupo V da tabela periódica, como o arseneto de gálio (GaAs) ou o fosfeto de índio (InP), e são comumente conhecidos como junções simples III-V.

A segunda geração engloba os principais materiais semicondutores: disseleneto de cobre e índio (CIGS), telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobalto e molibdênio (CIS), além do silício amorfo. Esses materiais têm uma eficiência de conversão de luz solar em eletricidade comparável à dos painéis solares de silício de primeira geração, mas com a vantagem de serem muito mais finos e leves, tornando-os ideais para aplicações em telhados, paredes e outras superfícies.

Nos últimos anos, entretanto, surgiram novos materiais semicondutores que compõem a terceira geração de tecnologias de filmes finos. Além dos polímeros orgânicos, essa tecnologia inclui as células sensibilizadas por corante (conhecidas pela sigla em inglês DSSC), perovskitas e *quantum dots*, e apresentam vantagens em relação aos materiais de segunda geração, como maior flexibilidade, menor peso e custo mais baixo de produção.

Os materiais semicondutores emergentes de terceira geração ainda estão em desenvolvimento e pesquisa, mas representam um grande potencial para a próxima geração de tecnologias de células solares fotovoltaicas de filmes finos, com eficiência de conversão ainda mais elevada, menor custo de produção e aplicações mais amplas (Pastuszak et al., 2022).

A Figura 1.1 esquematiza com exemplos as diferentes tecnologias fotovoltaicas.

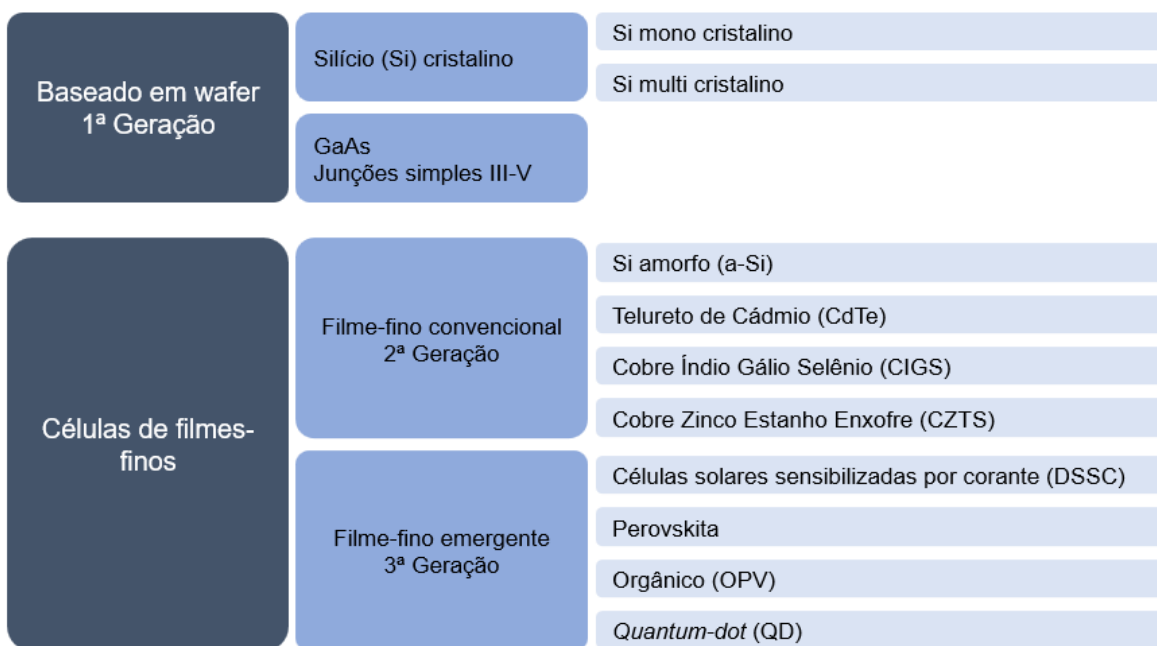


Figura 1.1: Esquema explicativo das diferentes tecnologias fotovoltaicas. Fonte: o autor.

Do ponto de vista químico, a camada ativa do OPV, responsável pela absorção de fótons e geração de cargas, é constituída, na maioria dos casos, de uma mistura de um polímero doador e um derivado solúvel do fulereno acceptor de elétrons. Além dessa camada, fazem também parte da estrutura as camadas de apoio para transporte de elétrons e lacunas até os eletrodos de base e de topo, respectivamente, o catodo e o anodo. A Figura 1.2 esquematiza a estrutura multicamada do OPV.

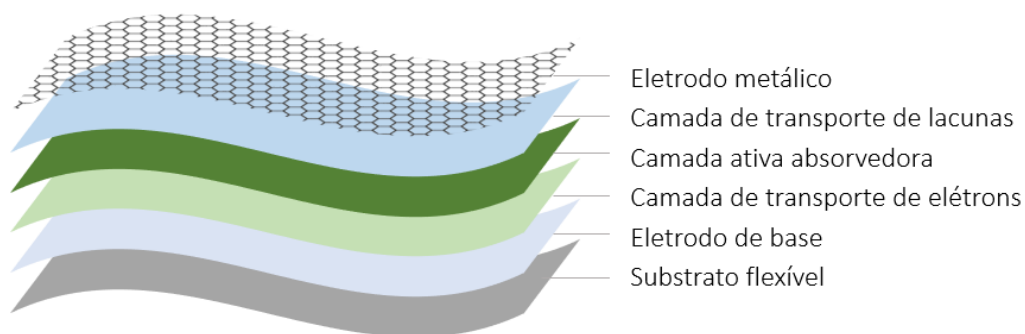
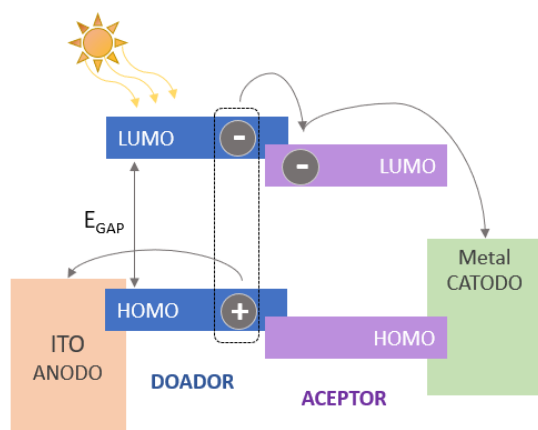


Figura 1.2: Estrutura multicamada do OPV flexível. Fonte: o autor.

Para entender o princípio de funcionamento de uma célula OPV, é importante ter em mente o esquema energético do dispositivo. Quando a luz solar atinge a célula, os fótons são absorvidos pelo polímero semicondutor, promovendo elétrons de um nível de energia chamado de HOMO (nível de energia mais alto ocupado) para um nível mais alto de energia chamado de LUMO (nível de energia mais baixo desocupado). Esses elétrons excitados são transportados então para o LUMO do material aceitador de elétrons e, em seguida, coletados pelos eletrodos, gerando uma corrente elétrica, como demonstra a Figura 1.3a. Os principais e mais tradicionais materiais envolvidos na pesquisa com esse tipo de célula estão apresentados na Figura 1.3b e são eles o polímero P3HT (poli(3-hexiltiofeno)) e o fulereno PCBM ([6,6]-Phenyl C61 butyric acid methyl ester).

a) Esquema energético do OPV



b) Polímero P3HT e fulereno PCBM

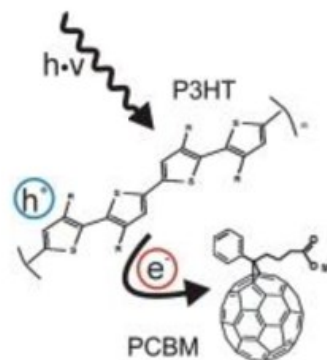


Figura 1.3: a) Esquema energético do OPV (De Queiroz Corrêa et al., 2016) e b) moléculas tradicionais usadas na camada ativa do OPV.

O processo produtivo do OPV é compatível com a técnica de deposição por solução conhecida como *slot-die* rolo-a-rolo, que apresenta potencial de baixo custo em termos de velocidade e simplicidade de processo, além de empregar baixas temperaturas na fabricação (Krebs, 2009). Apesar de ainda apresentar menor eficiência e estabilidade operacional se comparado ao silício tradicional, dominantes no mercado das fazendas solares (*solar farms*) e coberturas em telhados, o excelente aproveitamento e conversão de energia em condições de luz difusa do OPV, combinado às vantagens discutidas anteriormente, o torna uma alternativa mais adequada para aplicações em que se há baixa intensidade de luz, como ambientes internos, com luz natural indireta ou luz



artificial (Reynaud et al., 2019). Recentemente, a pesquisa com o uso do OPV nessas condições de baixa luminosidade avançou e alcançou valores de 18% de eficiência em apenas 400 lux de iluminação LED para módulo encapsulado fabricado utilizando apenas processos completamente industrialmente escaláveis (Miranda et al., 2021).

A aplicação da tecnologia fotovoltaica em ambientes internos (também conhecida como *indoor photovoltaics*, IPV) têm crescido consideravelmente nos últimos anos, pois apresenta o potencial de alimentar o ecossistema de Internet das Coisas, que inclui sensores sem-fio e outros dispositivos eletrônicos interconectados de baixo consumo. Hoje em dia, o uso de baterias para sustentar esses dispositivos restringem o alcance e a frequência de transmissão de dados em função de sua vida útil. A substituição de baterias representa custos adicionais de operação e manutenção (Mathews et al., 2019). Outras possibilidades de aplicação do OPV englobam os *wearables* (integração a roupas e tecidos), estufas, mobiliário urbano e veículos (Kim et al., 2022; Lee et al., 2014).

Com as mudanças climáticas e o aquecimento global, a pressão pela redução de emissões de gases de efeito estufa tem se tornado cada vez maior e também diz respeito à sustentabilidade no setor de construção civil. Uma diretiva de 2010 da União Europeia (UE) declara que todos os edifícios ocupados por autoridades públicas, construídos após 31 de dezembro de 2018, deve ter necessidade de energia quase nula, e, ainda, que todos os outros prédios também deveriam atender a esse requisito até 31 de dezembro de 2020. Isso quer dizer que, a partir dessas datas, os novos prédios deveriam gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis e não depender de energia baseada em combustíveis fósseis oferecidas no grid tradicional (Stoichkov et al., 2019). A aplicação BIPV ou BAPV (*building-integrated* ou *building-applied photovoltaics*) apresenta potencial para contribuir com essa transição energética observada na UE, devendo se tornar exemplo também para outros países, e as projeções afirmam que esse mercado deve expandir para 32,2 bilhões de dólares americanos até 2024 (Van Der Staaij et al., 2021).

No que se refere ao BIPV, os painéis fotovoltaicos substituem uma parte da construção que utilizaria materiais convencionais, como telhado e janelas. Estruturas de vidro semitransparentes despertam interesse pela habilidade de permitir passar a luz natural ao mesmo tempo que adiciona conforto térmico, ao filtrar parte da luz solar, principalmente a ultravioleta. Já o BAPV não substitui nenhum componente de

construção, e pode ser adaptado a construções já prontas (Ghosh, 2020). Uma vantagem para o IPV e BIPV/BAPV vertical é que as condições de operação são normalmente menos extremas e variáveis que as aplicações em ambientes externos, sujeitos à radiação integral e precipitações, mitigando o fator degradação.

## 2. Objetivos

Levando-se em consideração a crescente demanda pelo mercado BIPV, e a adequação do OPV para esse tipo particular de aplicação, o presente trabalho traz uma análise qualitativa da geração de energia ao longo do tempo de um ano de uma instalação na orientação vertical de painéis fotovoltaicos orgânicos, laminados em vidro substituindo as janelas de um edifício. Sua face está direcionada à Noroeste, localizada em São Paulo, SP.

A Figura 2.1 apresenta a instalação de 200 m<sup>2</sup> de vidro integrado com OPV, com uma área ativa de 76,65 m<sup>2</sup> e um total de 90 painéis, realizada pela SUNEW, que será o objeto de estudo deste trabalho.

a) Prédio com instalação BIPV



b) Detalhe dos painéis OPV integrados às janelas



Figura 2.1: Imagens da instalação vertical BIPV da empresa Sunew com painéis OPV integrados ao vidro.  
Fonte: SUNEW e TOTVS.

### 2.1. Objetivo geral

O objetivo principal é identificar tendências da eficiência e performance do OPV na disposição vertical, iluminado de forma indireta e difusa, através da análise de dados de geração de energia em função da data e das condições do clima.

### 2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos do presente trabalho, têm-se:

1. Analisar dos dados meteorológicos registrados e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
2. Analisar dos dados de altitude solar disponibilizados no aplicativo MARSH;
3. Analisar dos dados de geração de energia disponibilizados por sistema de monitoramento da instalação (SUNEW);
4. Realizar manipulações e filtragem de dados, que se mostrarem necessárias;
5. Construir modelos matemáticos para predição de geração em aplicações BIPV verticais com painéis OPV e análise de desempenho de cada um dos modelos.

### 3. Referencial teórico

A tendência de aumento no número de publicações relacionadas ao BIPV, como mostra a Figura 3.1 demonstra o crescente interesse pela pauta da sustentabilidade e pelo aproveitamento de superfícies até então passivas como geradoras de energia através da aplicação de películas fotovoltaicas (Maghrabie et al., 2021). No período do ano de 2005 a 2010, o número de publicações sobre sistemas BIPV não passou de 4000 unidades. Já entre 2010 e 2015, esse número mais que duplicou chegando a 8000 publicações. No último período de 2015 a 2020, foram cerca de 11000 publicações, representando um aumento de quase 40% em relação aos cinco anos anteriores.

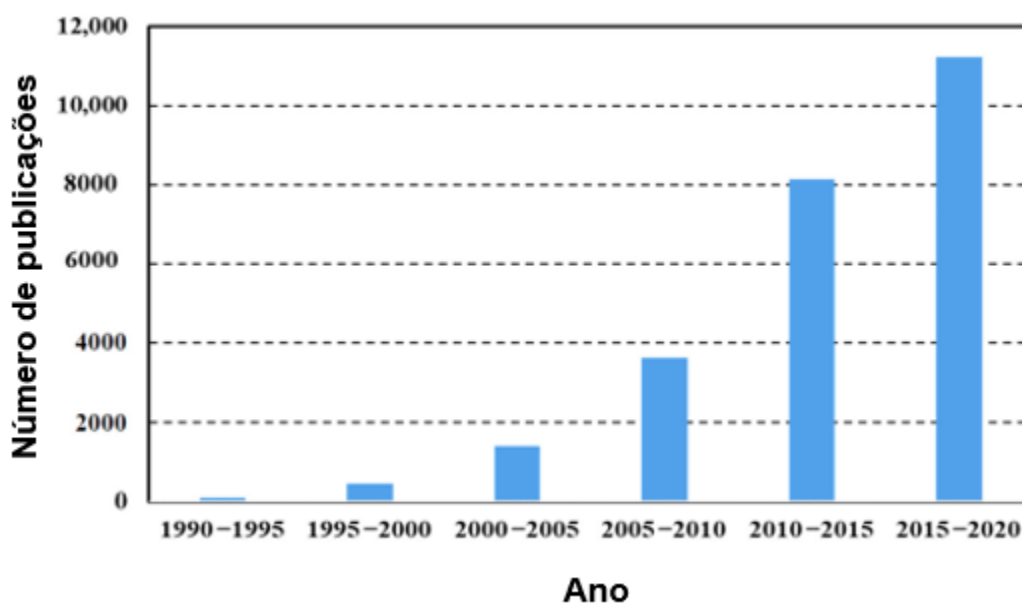


Figura 3.1: Número de publicações sobre sistemas BIPV nos últimos 30 anos (Maghrabie et al., 2021).

No caso de prédios, as áreas superficiais são extensas e representam uma boa oportunidade. A seguir, serão apresentados alguns trabalhos que exploram o potencial de painéis fotovoltaicos baseados em diferentes tecnologias na integração em edifícios, tanto em fachadas verticais quanto horizontais, e em diferentes localidades do globo terrestre, apresentando latitudes e longitudes variadas.

O trabalho conduzido por Stoichkov et al. (2019) monitorou o desempenho de módulos OPV orientados para cima e para faces diferentes (norte, sul, leste e oeste)

integrados a um edifício localizado em Bangor, no Reino Unido em relação à performance e ao rendimento energético, além da variação sazonal das condições climáticas no local. O monitoramento ocorreu por 8 meses, de dezembro de 2015 a julho de 2016, em temperaturas entre 5 °C (inverno) e 14 °C (verão).

A Figura 3.2 traz a performance diurna para um dia ensolarado e um nublado nas estações de inverno e verão no sistema analisado por Stoichkov et al. (2019).

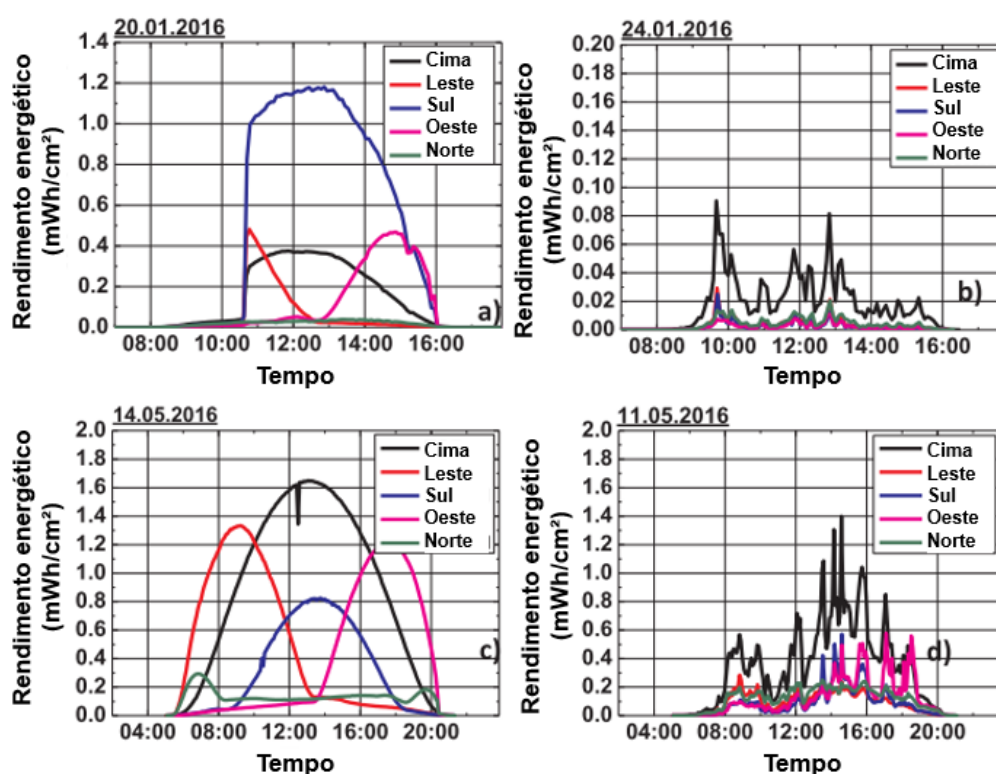


Figura 3.2: Performance diurna dos módulos OPV para um dia a) ensolarado e b) nublado no inverno, e c) ensolarado e d) nublado no verão (Stoichkov et al., 2019).

O que se percebe é que durante o inverno, quando a elevação máxima do sol, ou altitude solar, é de apenas 16.35°, a face sul é superior às demais. Essa tendência continua até o final de fevereiro quando a máxima elevação solar atinge 28.8°. Após essa data, o ângulo zenital entre o nascer e o pôr do sol aumenta resultando em maior geração diurna para os módulos posicionados horizontalmente. O ângulo zenital é a medida do ângulo entre a linha vertical que passa pelo observador e um objeto celeste, como o sol ou a lua. Durante o verão, módulos das faces leste e oeste podem impactar a

geração durante o início da manhã e o fim da tarde. Como esperado, Stoichkov et al. (2019) observaram que os módulos apontados para o norte exibem performance inferior nos dias ensolarados, já que essa face não recebe radiação direta durante o dia, sendo iluminado apenas por irradiação difusa e albedo. Albedo é uma medida da refletividade de uma superfície em relação à luz solar incidente. É a fração da radiação solar que é refletida por uma superfície em relação à quantidade total de radiação que a atinge. Superfícies com alto albedo refletem mais luz solar do que absorvem, enquanto superfícies com baixo albedo absorvem mais luz solar do que refletem.

Os autores percebem ainda que a luz difusa é muito maior em dias nublados que em ensolarados, e, por isso, esses módulos têm melhor desempenho em dias nublados. Os dados também mostram os benefícios de módulos orientados a leste e oeste já que eles podem contribuir para equilibrar a demanda de energia com geração ao início da manhã e ao fim da tarde em dias ensolarados. Já no inverno, entretanto, com a redução dos níveis de irradiação e os dias mais curtos (limitação das horas de luz), os módulos a leste/oeste já não impactam significativamente a geração.

De acordo com a Figura 3.3, observa-se que durante o inverno (de dezembro a fevereiro), Stoichkov et al. (2019) apontam que a face sul contribui mais para a geração. De março em diante, os módulos posicionados horizontalmente apresentam o maior rendimento energético mensal devido à maior elevação do sol. A partir de maio, as faces leste e oeste passam a gerar mais que a face sul, atribuído aos dias mais longos e à menor difusividade da irradiação no verão.

Para esse estudo, 100 módulos de laboratório de 64 cm<sup>2</sup> foram conectados em paralelo para criar um painel de 64 m<sup>2</sup>. A corrente e tensão desse painel foi a entrada para as simulações do tipo *system-level*. Simulações do tipo "*system level*" (ou nível de sistema, em português) são aquelas que visam simular o comportamento e desempenho de um sistema completo, em vez de simular apenas um componente ou parte do sistema. Em outras palavras, essas simulações abrangem todo o sistema, incluindo todas as suas partes e interações. As simulações de sistema foram desenvolvidas a partir dos dados obtidos e mostraram boa correlação com os dados experimentais.

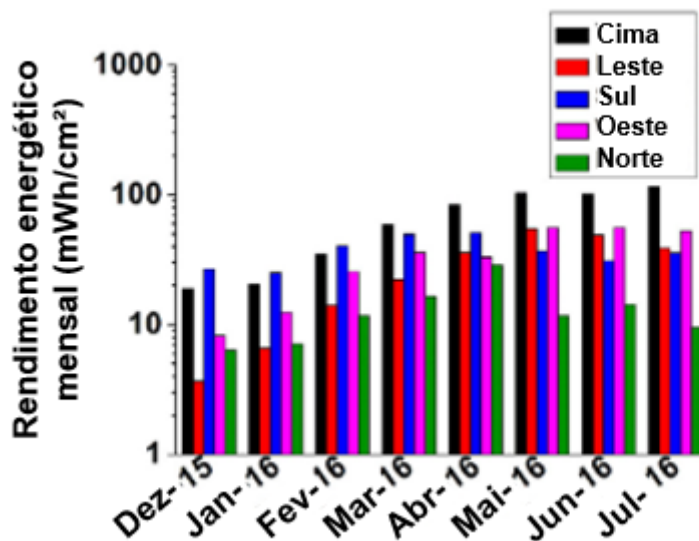


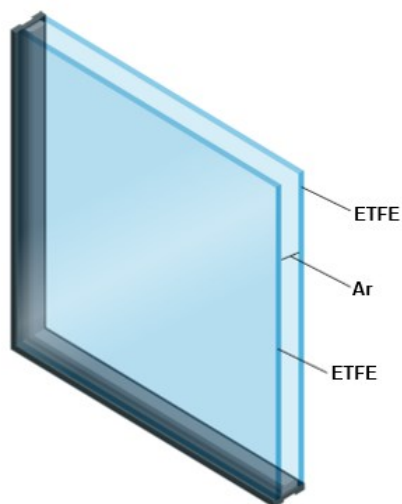
Figura 3.3: Rendimento energético mensal em função da posição do módulo de dezembro de 2015 a julho de 2016 (Stoichkov et al., 2019).

Moreno et al. (2019) apresentam uma alternativa mais leve e flexível às estruturas convencionais de janela em vidro no mercado BIPV: as folhas e membranas poliméricas. Dentre as opções disponíveis, o ETFE (etileno tetrafluoroetileno) é uma das mais comuns uma vez que apresenta características adequadas para integração em edifícios sendo leve, flexível, transparente, autolimpante, adequada mecanicamente, estável e com características de isolante térmico. Além disso, muitos estudos apontam que o impacto ambiental associado ao uso do ETFE é menor que o do vidro, tornando aquele um material sustentável.

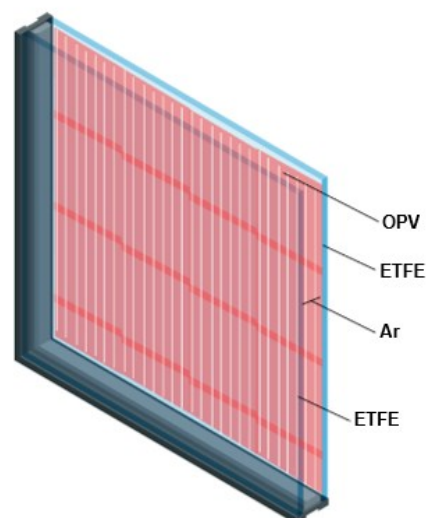
As folhas de ETFE são utilizadas no trabalho de Moreno et al. (2019) em quatro configurações variadas, todas elas compostas de dois filmes planos e uma camada de ar intermediária de 10 mm. As configurações selecionadas são: a) um painel composto de duas camadas transparentes de ETFE, b) um painel composto de uma camada de ETFE e outra de OPV, cobrindo 100% da área, c) um painel composto de uma camada de ETFE e outra de OPV, cobrindo 50% da área, e d) um painel composto de uma camada de ETFE transparente e outra de ETFE com 50% da área de prata impressa. Cada uma dessas configurações é apresentada na Figura 3.4 e varia em características luminosas, solares e térmicas.



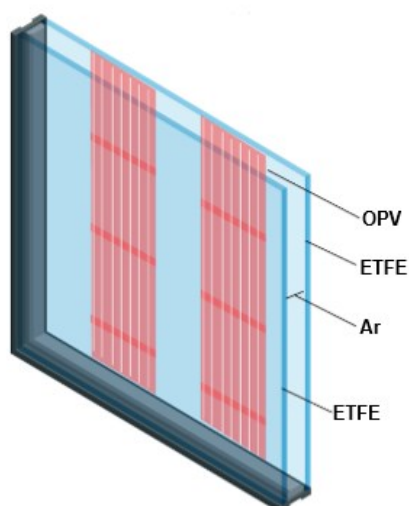
a) ETFE + ETFE



b) ETFE + OPV/ETFE



c) ETFE + OPV (50%)/ETFE



d) ETFE + ETFE-Prata (50%)

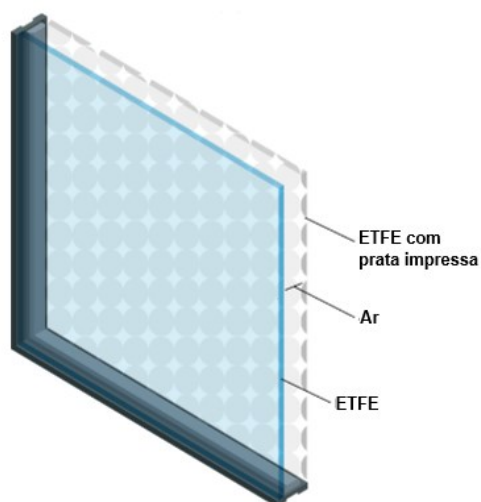


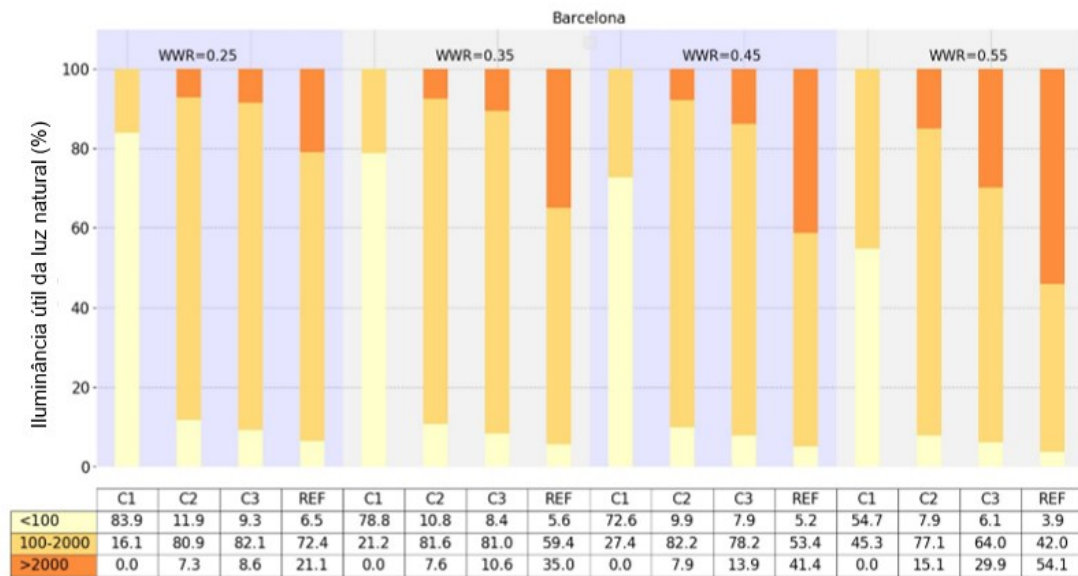
Figura 3.4: Configurações de ETFE e OPV estudadas por (Moreno et al., 2019)

Uma maquete 3D de um edifício comercial foi criada por Moreno et al. (2019) no software *SketchUp*® e importado da ferramenta de simulação *Trnsys*®. As diferentes configurações descritas anteriormente foram integradas na fachada sul em locais selecionadas no hemisfério norte com diferentes proporções entre janela e parede (WWR, do inglês *window wall ratio*). Window Wall Ratio (WWR) é uma métrica que

indica a proporção da área total de abertura de janelas em relação à área total da fachada de um edifício. Em outras palavras, é a fração da fachada que é composta por janelas. As temperaturas envolvidas devido ao tipo de envidraçamento das janelas são calculadas considerando a transmissão, reflexão e absorção de cada sistema para as radiações solares diretas e difusas. As premissas de ganho de calor interno gerado pela ocupação, iluminação e equipamentos no interior do prédio foram calculadas de acordo com a norma europeia que estabelece os requisitos e procedimentos para avaliação do desempenho energético de edifícios EN16798-1, sendo as demandas de aquecimento e resfriamento mantidas entre 20 °C e 26 °C no inverno e verão, respectivamente. Os dados climáticos foram extraídos do banco de dados *Meteonorm Trnsys*® para as cidades de Barcelona, na Espanha, e Paris, na França.

A Figura 3.5 apresenta o nível de iluminância útil da luz natural para as diferentes localidades e diferentes proporções WWR. A faixa de 100 a 2000 lux indica níveis de iluminação confortáveis em que a maioria das atividades pode ser realizada. Com base neste indicador, no caso de Barcelona, a melhor configuração é encontrada para um WWR de 0,45 e a configuração C2, alcançando um nível de iluminação de 100 a 2000 lux durante 82,2% das horas anuais. Para o restante dos valores de WWR analisados, a configuração C2 sempre apresenta o melhor desempenho, exceto para um WWR de 0,25, onde o vidro com padrão prateado impresso (configuração C3) apresenta ligeiramente melhor desempenho do que a configuração C2. No caso de Paris, o melhor desempenho é alcançado quando o WWR é igual a 0,35 para a configuração C2. De maneira semelhante aos resultados obtidos para Barcelona, com um WWR de 0,25, a combinação que inclui uma folha ETFE impressa em prata (C3) fornece uma iluminação melhor do que a configuração C2.

a)



b)

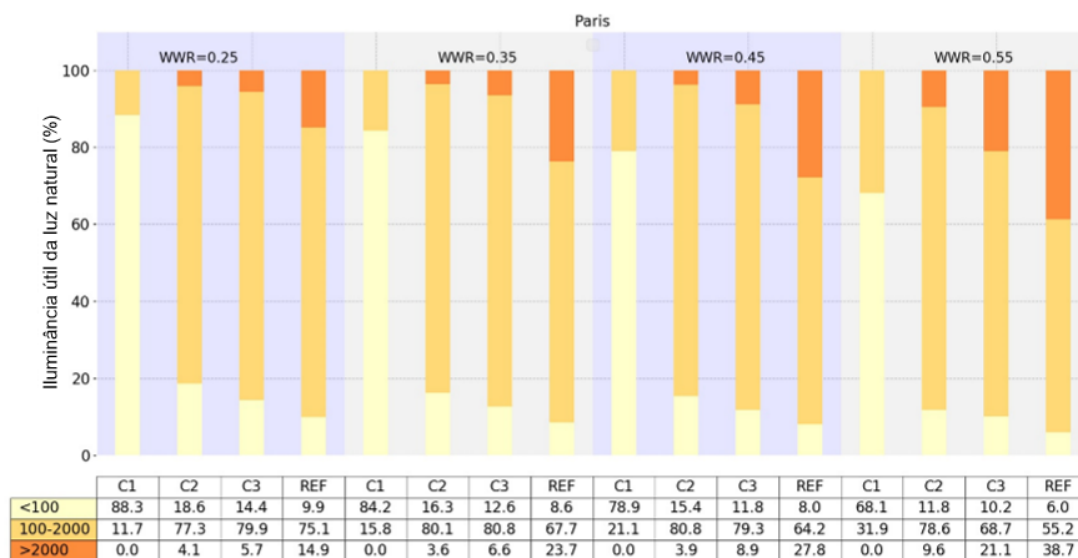


Figura 3.5: Iluminância solar útil em a) Barcelona e b) Paris (Moreno et al., 2019)

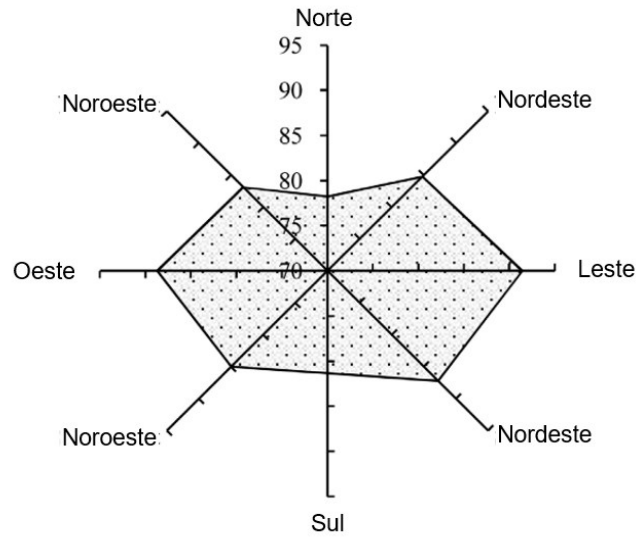
As conclusões principais do trabalho conduzido por Moreno et al. (2019) a partir da simulação dinâmica no *Trnsys*® para um edifício comercial foram: 1) as folhas de ETFE com integração de OPV foram capazes de cobrir de 16% (Paris) a 22% (Barcelona) das demandas totais de calor e refrigeração (WWR de 25%). A configuração mais eficiente para geração de energia nas duas locações foi a que possui

100% da área coberta por OPV (configuração b). Por outro lado, a melhor fração WWR é diferente para as duas localidades, devido a diferenças de temperatura média entre as duas cidades. As configurações que apresentam elementos sombreadores são importantes no quesito conforto luminoso para as latitudes e climas similares aos de Barcelona, além de reduzir as demandas para resfriamento. Por outro lado, esses elementos aumentam as demandas térmicas em localidades como Paris. Por fim, o estudo de (MORENO et al., 2019) destaca que há um equilíbrio a ser perseguido entre cobrir áreas maiores com módulos OPV para maior geração de energia e a redução do conforto luminoso gerado por essa opção, a depender da localidade em climas mais quentes ou mais frios.

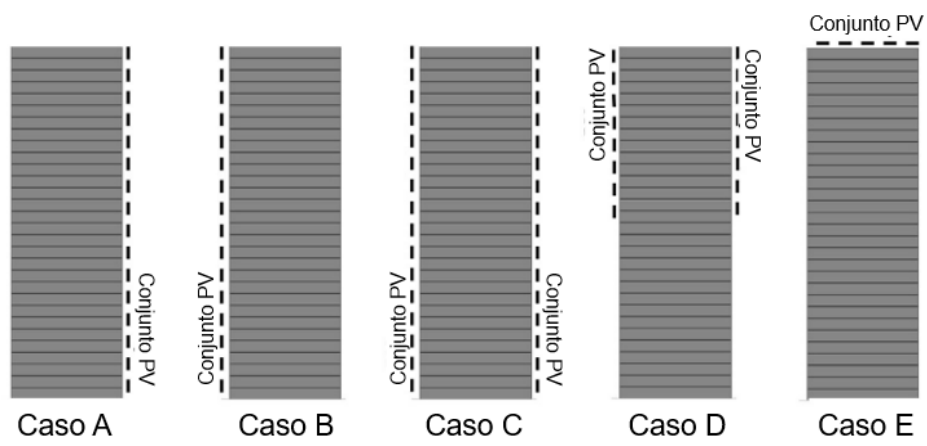
Ghazali et al. (2017) avalia a viabilidade de um sistema fotovoltaico integrado a um edifício alto na Malásia com foco na avaliação de performance e econômica.—A ferramenta *System Advisor Model* (SAM) desenvolvida pelo NRL (*National Renewable Energy Laboratory*, EUA) é usada para estudar o efeito da radiação solar incidente em várias orientações verticais na performance do sistema, com o objetivo de determinar a melhor orientação para aplicação em fachada na Malásia. Segundo (Ghazali et al., 2017), o SAM é uma ferramenta de simulação desenvolvida para assistir profissionais da indústria de energia renovável na tomada de decisões sobre previsões de performance e estimativas de custo de energia para os projetos. Nesse trabalho, os dados climáticos de Kuala Lumpur são obtidos do Departamento de Energia dos EUA e a tecnologia considerada é a de Silício (filme fino intrínseco de heterojunção).

A Figura 3.6 apresenta os principais resultados do estudo de Ghazali et al. (2017), com a geração de energia simulada para as diferentes configurações de conjunto fotovoltaico aplicado à fachada do edifício em relação a irradiância incidente média em oito diferentes orientações da fachada vertical.

a)



b)



c)

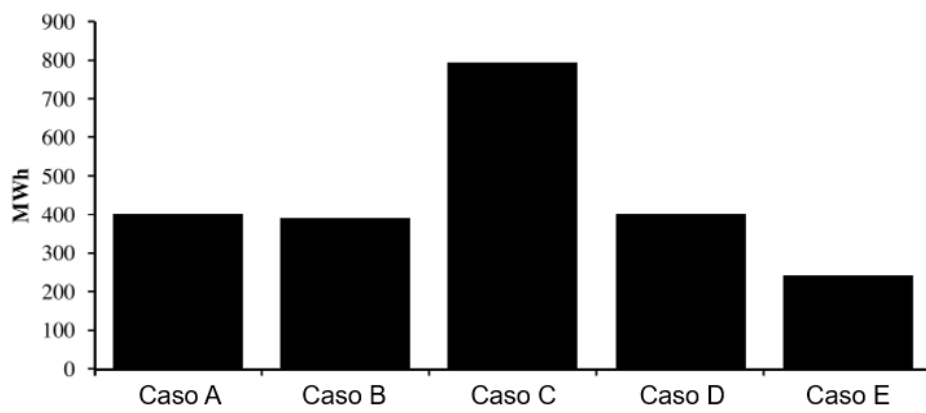


Figura 3.6: a) Irradiância ( $\text{W/m}^2$ ) incidente média por hora em fachada vertical em localização na Malásia, b) Casos BIPV estudados em edifício alto A)  $90^\circ$  azimute, fachada leste, B)  $270^\circ$  azimute, fachada oeste, C)  $90^\circ$  e  $270^\circ$  azimute, D) Metade superior do prédio e E) telhado, c) Geração de energia anual (Ghazali et al., 2017).

Os principais resultados do trabalho de Ghazali et al. (2017) mostraram que apesar de a fachada horizontal (no teto do edifício) receber a maior radiação incidente em comparação à vertical, maximizar a integração PV em ambas as fachadas face leste e face oeste levou a uma geração de energia significativamente mais alta de cerca de 800 MWh anual devido à maior área superficial. Por outro lado, a fachada leste gera mais em comparação à oeste com 400 – 390 MWh anual. No caso A, B, C e D, em que o sistema PV foi instalado na fachada vertical a razão de performance é a mesma de 0,75 independentemente do número de módulos e da sua área. Entretanto, a instalação PV na orientação horizontal (telhado) tem a maior razão de performance de 0,77 e fator de capacidade de 13.8%. A razão de performance (*performance ratio*) é medida pela fração entre a energia gerada e a radiação solar incidente no conjunto de painéis fotovoltaicos, isto é, a radiação considerando o plano do campo solar ou *plane of array* (POA). POA é um termo utilizado na indústria de energia solar para descrever a área e orientação da superfície onde os painéis solares são instalados. É o plano onde a radiação solar incide diretamente nos painéis solares. O POA é importante porque afeta a quantidade de radiação solar que os painéis solares recebem, o que, por sua vez, afeta a produção de energia dos sistemas fotovoltaicos. A orientação e inclinação corretas da POA são importantes para maximizar a eficiência energética dos painéis solares. Já o fator de capacidade é a razão entre energia gerada no período de um ano e quantidade de energia que o sistema seria capaz de gerar se operasse em capacidade nominal em todas as horas em um ano.

Lee et al. (2018) analisaram a performance de um sistema BIPV baseado em células solares sensibilizadas por corante ou DSSC (*dye-sensitized solar cell*) aplicadas a janelas de uma maquete real em dois ângulos de instalação diferentes:  $90^\circ$  (fachada vertical) e levemente inclinada (Lee et al., 2018). O rendimento energético das janelas BIPV foi estudado usando os dados de monitoramento por dois anos. A Figura 3.7 apresenta os resultados da análise de eficiência para cada janela vertical e inclinada de DSSC e a Figura 3.8 apresenta a tendência de eficiência para painéis DSSC e silício

multi-cristalino (MCPV) em função da nebulosidade. Os autores observaram que a potência de geração para a instalação inclinada foi cerca de 43% maior que a vertical. A eficiência de geração dos módulos DSSC aumentaram com o decréscimo de diário da irradiação solar e com o aumento diário da nebulosidade diária. Essa tendência foi atribuída por Lee et al. (2018) à temperatura e foi comparada com células de silício multicristalino que normalmente tem um coeficiente de temperatura maior. O fato de os módulos inclinados gerarem mais que os verticais foi atribuído ao maior fator de exposição à radiação (fator de visão do céu).

O fator de visão do céu é uma medida da porcentagem do céu visível em um determinado ponto da superfície terrestre, em relação ao hemisfério completo. Esse fator é usado em estudos de microclima urbano e de desempenho térmico de edifícios, para avaliar a disponibilidade de luz solar direta e a ventilação natural em uma determinada área. Um fator de visão do céu elevado indica uma maior exposição à luz solar direta e à ventilação natural, enquanto um fator de visão do céu reduzido indica maior sombreamento e menor disponibilidade de ventilação natural.

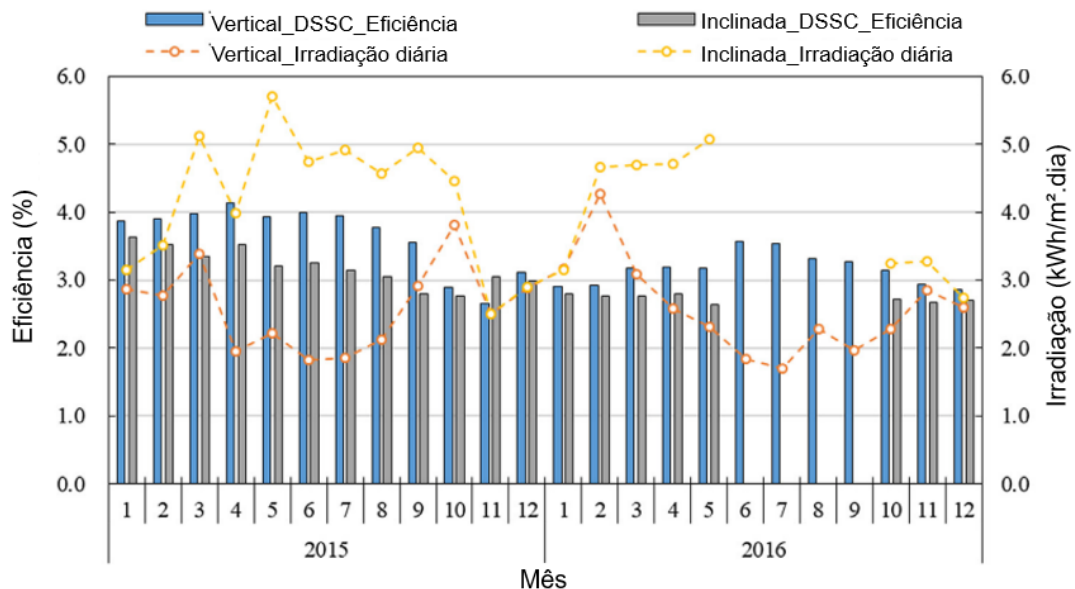


Figura 3.7: Resultados da análise de eficiência para cada janela vertical e inclinada de DSSC BIPV (Lee et al., 2018)

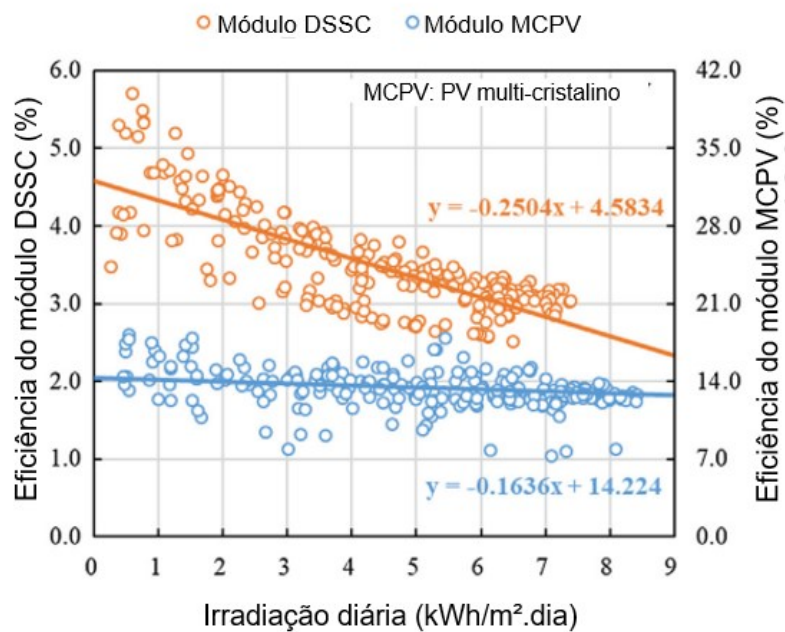


Figura 3.8: Tendência de eficiência para painéis DSSC e MCPV (Silício multi-cristalino) em função da nebulosidade. (Lee et al., 2018)

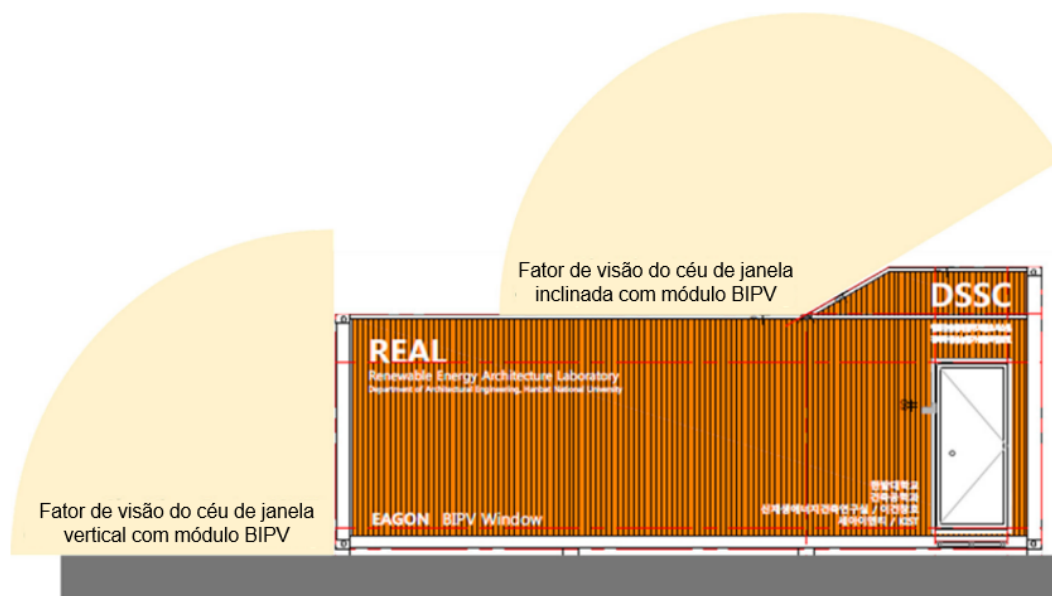


Figura 3.9: Fator de Sky view para cada revestimento - vertical ou inclinado (Lee et al., 2018)

Vulkan et al. (2018) chama a atenção, em seu trabalho, para a falta de ferramentas para análises quantitativas de larga-escala em ambientes urbanos complexos e resolução temporal ampla disponíveis ao público. Estimar o potencial solar das fachadas de

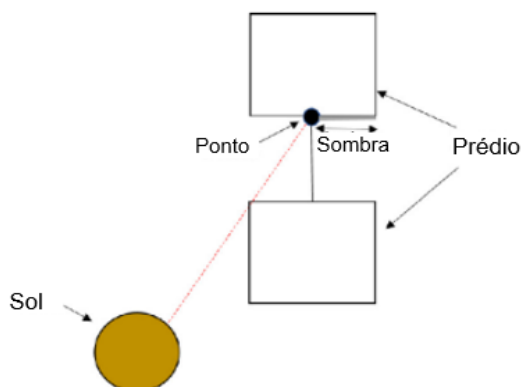


edifícios requer métodos para estimar o potencial solar de superfícies verticais. A maioria desses métodos e softwares disponíveis são desenvolvidos em plataformas de programação comercial ou acadêmicas e são geralmente adequadas para áreas menores, contendo um ou alguns prédios. Por essa razão, Vulkan et al. (2018) se empenharam em desenvolver e demonstrar uma ferramenta gratuita, de código aberto (*open-source*), para avaliar como configurações de edifícios afetam a insolação e o potencial de instalações PV em envelopes de edifício (telhado e fachada) em ambientes urbanos complexos e irregulares.

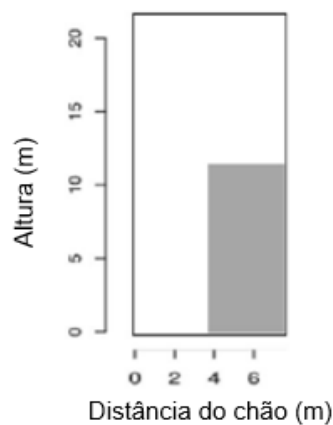
Em cidades populosas, o potencial de geração de eletricidade pelo BIPV é afetado pela exposição da superfície do edifício à radiação solar. De acordo com Vulkan et al. (2018), três fatores influenciam: a área total de teto e fachada, a orientação da fachada e a locação do edifício em relação a outros prédios adjacentes. No caso estudado por Vulkan et al. (2018) em uma cidade localizada no plano central costeiro de Israel, o perfil das edificações baixas mas densas na parte sul da vizinhança apresenta a maior exposição à radiação direta, somando mais de 600 kWh/m<sup>2</sup> por ano em média.

O modelo de Vulkan et al. (2018) calcula a altura do plano de sombra acima do solo em qualquer ponto da área de estudo, com base nas relações trigonométricas entre os raios solares, o solo e quaisquer obstáculos intermediários. As sombras nas fachadas dos edifícios são derivadas da altura da sombra para cada ponto da grade no perímetro do edifício ao nível do solo. Esse cálculo foi realizado para uma grade regular de pontos com resolução de 1 metro, abrangendo as fachadas e telhados de todos os edifícios na área de estudo. A Figura 3.10 ilustra a obtenção da altura da sombra em um determinado local (ponto) com base no ângulo de elevação do sol (ELEVsol) no caso de haver um obstáculo com altura conhecida e uma distância conhecida. A figura também demonstra a saída do cálculo da altura da sombra. Essa abordagem pode ser expandida para o caso geral de múltiplos obstáculos, onde deve-se considerar o valor máximo de todas as alturas potenciais de sombra causadas por todos os obstáculos.

a) Vista plana de cima



b) Sombra modelada em parede vertical



c) Seção vertical

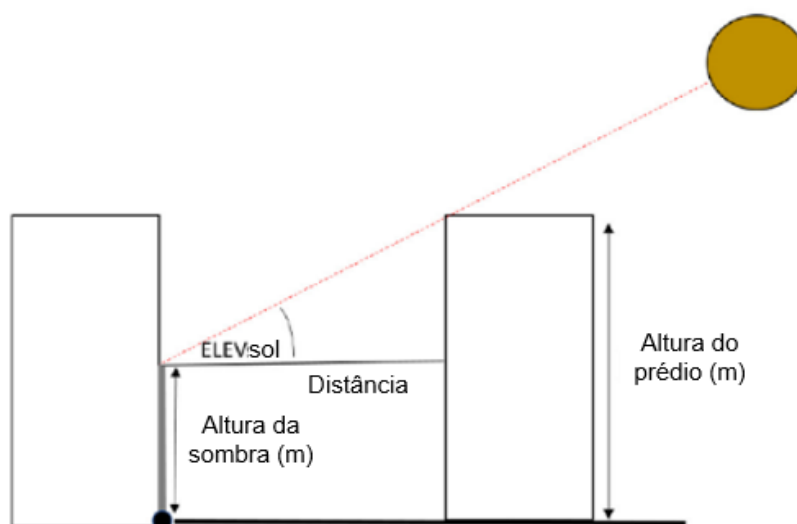


Figura 3.10: Efeito de sombreamento a) vista plana de cima b) sombra modelada em uma parede vertical. A área sombreada (em cinza) é igual a 30% do total da área da parede, c) seção vertical. (Vulkan et al., 2018).

As sombras mútuas entre objetos urbanos e orientação das fachadas impõem limitações significativas à utilização dos sistemas fotovoltaicos, de acordo com (Vulkan et al., 2018). Apesar de coberturas horizontais (telhados) tipicamente receberem mais luz solar direta que as paredes e serem menos afetados por sombras do que fachadas verticais, o potencial solar de algumas fachadas, principalmente às orientadas ao sul e ao leste, podem ser relevantes na geração devido à grande disponibilidade de área

superficial. No estudo de Vulkan et al. (2018), percebe que, no caso de prédios altos, em particular, a área vertical lateral tem uma contribuição substancial para a performance solar do edifício.

Tabela 3.1: Análise comparativa dos trabalhos da literatura estudados.

Trabalho	Sistema	Metodologia	Localidade	Conclusões
(Stoichkov et al., 2019)	OPV	Monitoramento de módulos pequenos aplicados em uma maquete na posição vertical em faces de orientações diferentes e simulações para aumento de escala	Bangor, Reino Unido	A face sul foi mais eficiente que a horizontal no inverno. Faces leste e oeste podem ter contribuição relevante.
(Moreno et al., 2019)	OPV	Medidas experimentais de características óticas de folhas de ETFE e performance dos OPVs comerciais monitorados outdoor. Simulações de integração em edifício	Barcelona, Espanha Paris, França	A configuração mais eficiente em termos de geração de energia é a que tem maior cobertura de OPV, porém aumenta a demanda térmica em localidades como Paris.
(Ghazali et al., 2017)	Silício (Si)	Simulações para diferentes faces e posição em relação à altura de um edifício alto	Kuala Lumpur, Malásia	Apesar de a fachada horizontal (telhado) receber maior radiação que a vertical, maximizar a integração PV em ambas as fachadas leste e oeste leva a uma geração de energia significativamente maior devido à maior área superficial disponível.
(Lee et al., 2018)	DSSC	Monitoramento de módulos pequenos aplicados em uma maquete na posição vertical e levemente inclinado	Coréia	A potência de geração para a instalação inclinada foi cerca de 43% maior que a vertical devido à maior exposição a luz solar
(Vulkan et al., 2018)	-	Desenvolvimento de algoritmo capaz de prever elementos sombreadores em contextos urbanos complexos	Israel	Os três fatores que influenciam a geração BIPV são a área total de telhado e fachada; a orientação da fachada; e a localização do edifício em relação a

outros edificios.

## 4. Metodologia

### 4.1. Dados da instalação

Os painéis OPV foram produzidos pela SUNEW, em Belo Horizonte, e instalados em aplicação BIPV vertical na cidade de São Paulo, como mostra a Figura 2.1, em meados de 2016. Desde então, seu conjunto tem sido monitorado diariamente através do registro de dados de geração a cada quinze minutos. Para este trabalho, foram considerados apenas os dados diários, ou seja, a soma de cada intervalo de 15 minutos durante o período de um dia. Limitou-se o período estudado do ano de 2018 até 2021, totalizando 4 anos de operação.

A localização espacial do prédio apresentado na vista frontal da Figura 2.1 é detalhada na imagem de satélite da Figura 4.1. A fachada do prédio aponta para duas direções, seguindo o contorno do terreno de esquina em que está inserido; e os painéis OPV estão distribuídos em dois conjuntos, como mostram as setas na Figura 4.1. O primeiro conjunto aponta para o ponto subcolateral oés-noroeste (ONO) e o segundo conjunto para nor-noroeste (NNO). Para efeitos de simplificação, uma vez que não estão disponíveis os dados de forma separada para cada um desses dois pontos, a orientação Noroeste (NO) será adotada para definir a face para a qual apontam todos os painéis dessa instalação.

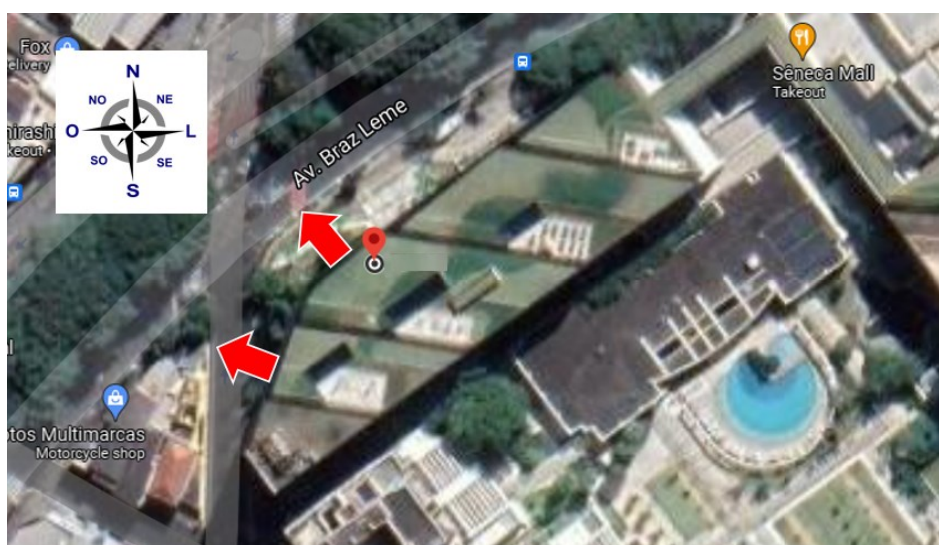


Figura 4.1: Imagem de satélite do edifício. As setas vermelhas apontam para a orientação Noroeste da fachada que contém os painéis. Fonte: Google Maps.

## 4.2. Dados meteorológicos

Para dados de condições ambientais, foi utilizado o banco de dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponível publicamente tomando-se como base uma estação distante em menos de cinco quilômetros da localização do edifício. O INMET é responsável por monitorar e fornecer informações meteorológicas para todo o território nacional. Os dados disponíveis em seu website para diversas estações distribuídas pelo país englobam dados diversos como radiação global (RG), temperatura do ar, precipitação e pressão registrados em intervalos de uma hora. Além desses dados, foram utilizados os dados de altitude solar, extraídos do aplicativo Andrew Marsh, incluindo como entrada a latitude e longitude de São Paulo, SP, Brasil. O aplicativo é uma ferramenta que permite visualizar o caminho do sol em três dimensões em qualquer local e hora do dia. É especialmente útil para designers, arquitetos, engenheiros e outras pessoas que trabalham com design e construção de edifícios e estruturas. O aplicativo usa dados de posicionamento do sol e do tempo para calcular a posição do sol no céu em qualquer hora do dia e em qualquer lugar do mundo. A Figura 4.2 traz a imagem da interface desse aplicativo.

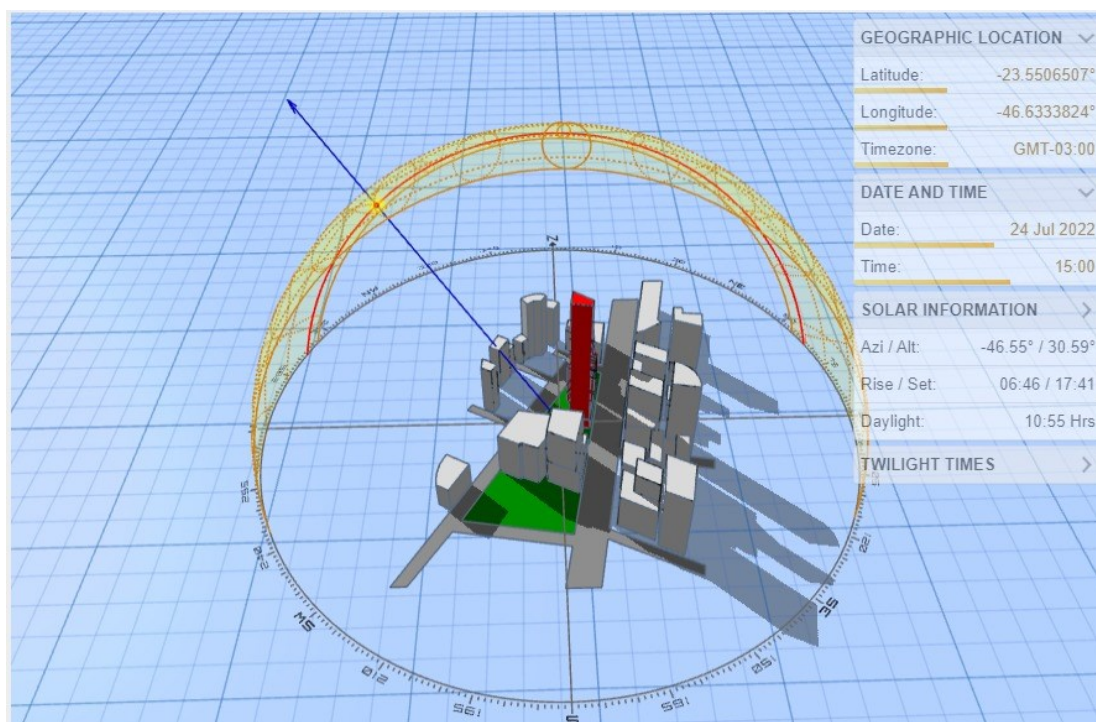


Figura 4.2: Informações solares na localização de São Paulo. Recorte de um dia e horário específicos. Fonte:

<http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>

A localização do sol na abóbada celeste pode ser identificada através de dois ângulos: a altura solar e o azimute. O azimute é o ângulo formado pela projeção do sol no plano com a direção norte. Já a altura solar é o ângulo entre o sol e o plano horizontal, como demonstra a Figura 4.3. A altura solar é o ângulo vertical entre a linha do horizonte e o centro do sol. Em outras palavras, é a elevação do Sol acima do horizonte em um determinado momento. A altura solar varia ao longo do dia devido ao movimento aparente do Sol na abóbada celeste em resposta à rotação da Terra. No meio-dia solar, quando o Sol está no ponto mais alto no céu, a altura solar é maximizada e é igual à latitude do local para um observador em uma superfície plana e horizontal.

O azimute é o ângulo horizontal medido a partir do norte verdadeiro e contado no sentido horário até a posição atual do Sol na abóbada celeste. Em outras palavras, é a direção do Sol no céu em relação ao norte verdadeiro. O azimute é medido em graus, variando de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , onde  $0^\circ$  é o norte verdadeiro,  $90^\circ$  é o leste,  $180^\circ$  é o sul e  $270^\circ$  é o oeste.

A altura solar e o azimute são informações importantes para a determinação da posição do Sol em um determinado local e horário, e são utilizados em diversas aplicações, como na astronomia, na meteorologia, na navegação e na engenharia, entre outros. Esses ângulos permitem aos observadores localizar e rastrear o movimento aparente do Sol na abóbada celeste, o que pode ser útil em diversas situações, como determinar o momento do nascer e do pôr do Sol, calcular a duração do dia e da noite, ou planejar a instalação de painéis solares para aproveitamento da energia solar, por exemplo.

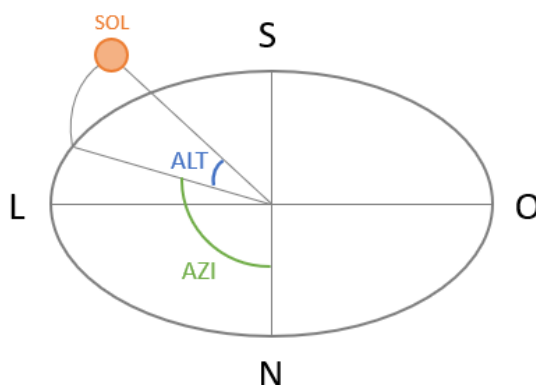


Figura 4.3: Projeção estereográfica do sol sobre o plano.



### 4.3. Análise qualitativa

Em um primeiro momento, foram realizadas análises gráficas das informações de radiação global (ou incidência solar), temperatura do ar e a variável resposta geração de energia ao longo do tempo. O objetivo foi compreender os dados coletados e identificar possíveis padrões. Além disso, essa análise permitiu avaliar a qualidade do conjunto de dados utilizado.

A análise inicial dos dados brutos revelou que algumas informações eram discrepantes. Em alguns horários e dias específicos, algumas informações não foram registradas ou os valores registrados não eram confiáveis, pois eram muito baixos e não tinham significado físico. Nesta seção, serão apresentadas as análises dos dados, sem a aplicação de filtros, a menos que indicado.

### 4.4. Modelagem

Modelos matemáticos empíricos são desenvolvidos com o objetivo de prever uma variável de saída a partir de um banco de dados de variáveis dependentes. Para isso, várias regressões lineares variando de primeira a ordens superiores podem ser analisadas para buscar o melhor ajuste, avaliando seu coeficiente de determinação ( $R^2$ ).  $R^2$  é um parâmetro que representa a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores reais e os previstos.

Relatos na literatura têm utilizado abordagens similares de estimação de parâmetros e ajuste de modelos empíricos para diferentes processos, trabalhando com dados experimentais já publicados ou dados industriais fornecidos por operadores de planta. Campos et al., (2017) e Lacerda De Oliveira Campos et al. (2018) desenvolveram modelagem matemática para prever a dessalinização solar por humificação-desumidificação, um processo renovável para produção de água doce a partir de água do mar. Fraga et al. (2018) analisaram energeticamente e exergeticamente uma usina térmica a óleo combustível no Brasil. Niquini et al. (2019) desenvolveram modelos empíricos para prever o rendimento de metano usando dados experimentais da literatura. A mesma abordagem utilizada por Niquini et al. (2019) será seguida no presente estudo.

O coeficiente de determinação  $R^2$  é calculado como descrito na Equação 1.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $\hat{y}_i$  representa o valor predito para o  $i$ -ésimo experimento,  $\bar{y}$  representa o valor médio da variável dependente,  $y_i$  representa o valor medido ou real do  $i$ -ésimo experimento, e  $n$  é o número de pontos de dados usados na análise. O  $R^2$  é um parâmetro estatístico que mede o quão próximas estão as previsões da regressão em relação aos pontos de dados reais. À medida que o  $R^2$  se aproxima de 1, pode-se dizer que a variabilidade da variável de saída é descrita de forma mais precisa pela regressão.

Inicialmente, foram estudados modelos de regressão linear simples de primeira a sexta ordem. Em seguida, modelos de regressão linear múltipla também foram avaliados, de primeira a quinta ordem. Em todos os casos, o efeito das variáveis e de suas inversas foi testado. Todos os termos, incluindo o coeficiente linear, tiveram sua significância estatística avaliada e apenas os termos significativos foram incluídos no modelo, adotando o critério de valor de  $p$  inferior a 0,05 para um nível de confiança de 95%.

O banco de dados completo foi distribuído aleatoriamente em dois conjuntos: um chamado de dados da regressão (ou do modelo), abrangendo 80% de todos os dados, e outro chamado de validação, com os outros 20% restantes. O modelo foi construído considerando o conjunto de dados da regressão e, em seguida, o modelo desenvolvido foi testado com os dados de validação. O  $R^2$  foi calculado para ambos os conjuntos de dados.

Alguma manipulação de dados foi necessária para remover os dias com registros ausentes da análise. Para isso, os dias com registros de radiação global ausentes no meio das horas normais de radiação foram excluídos do conjunto de dados. Além disso, todos os dias com geração de energia inferior a 0,1 kWh também foram removidos. Após isso, um total de 1087 dias foram considerados para construir os modelos. O Apêndice I traz maiores informações a respeito do tratamento de dados realizado.

Para os modelos de regressão simples, os parâmetros significativos foram encontrados por busca exaustiva e tiveram sua significância devidamente testada. Em seguida, para o desenvolvimento de modelos de regressão múltipla, cada termo adicionado na equação foi obtido por busca exaustiva e escolhido efetivamente se levou o modelo a um desempenho melhor. Apenas os termos com significância estatística de 95% foram considerados nos modelos.

A Figura 4.4 traz um esquema da metodologia aplicada para o desenvolvimento dos modelos apresentados neste trabalho.

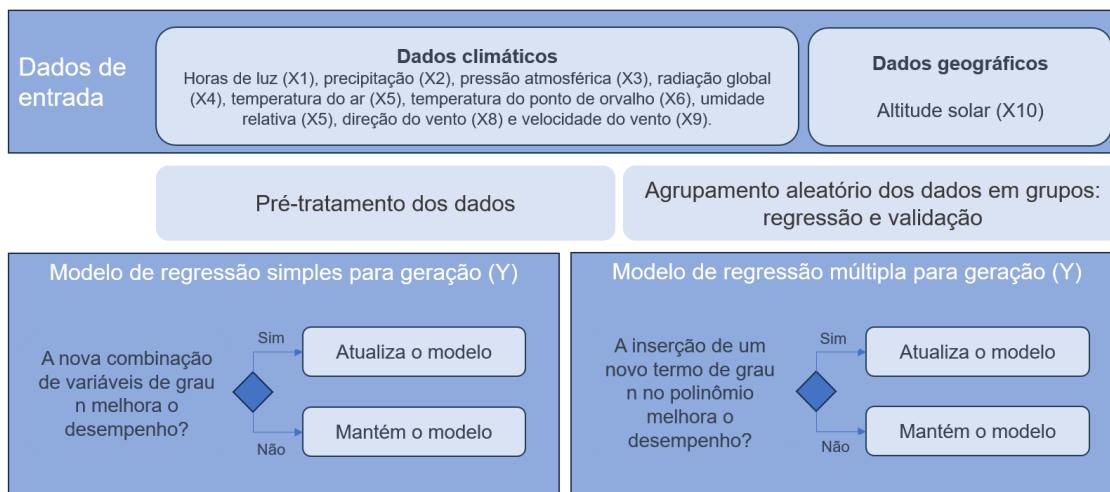


Figura 4.4: Esquema explicativo da metodologia para construção dos modelos.

## 5. Resultados

### 5.1. Análise qualitativa

#### 5.1.1. Geração de energia e radiação global em função da data

A primeira variável analisada foi a radiação global (RG), que carrega a medida da intensidade de luz, e é a mais importante e diretamente relacionada à eficiência de um dispositivo fotovoltaico. No caso específico dos módulos na orientação vertical, outro importante fator começa a fazer diferença: a posição do sol em relação à Terra no decorrer do ano. A Figura 5.1 mostra a influência desse fator, que acarreta uma maior geração de energia durante o inverno (meses de junho a setembro), período em que RG apresenta valores absolutos mais baixos. Os menores valores de geração de energia, por sua vez, são aqueles que coincidem com os meses de verão, especialmente em dezembro e janeiro, apesar de os índices de RG serem mais elevados para esse período. Aplicando o ajuste polinomial para essas duas variáveis, geração e RG, fica evidente que o período de maior geração de energia em termos absolutos coincide com o período de RG mais baixa, e que isso se dá nos meses do meio do ano, durante a estação do inverno ou próximo a ela.

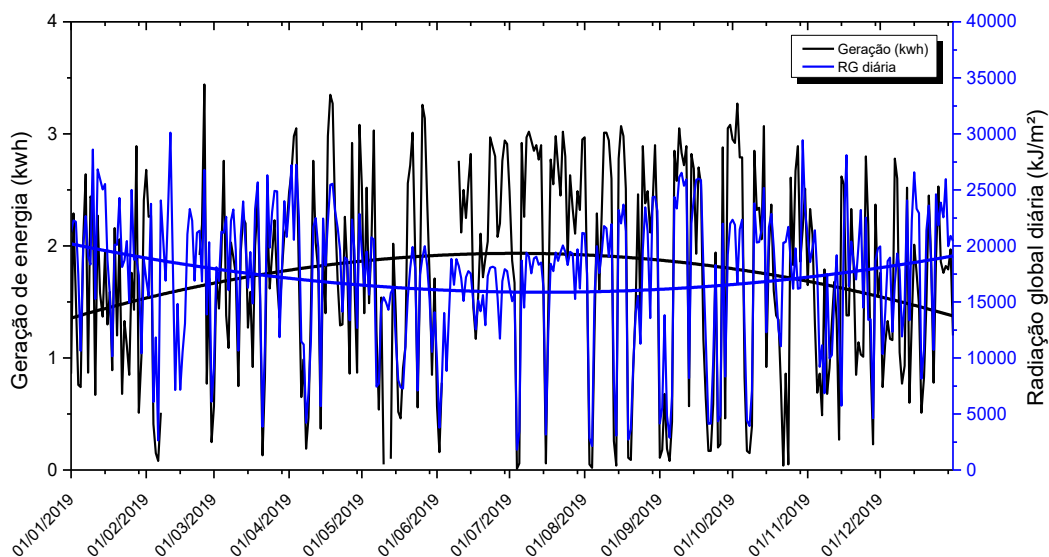


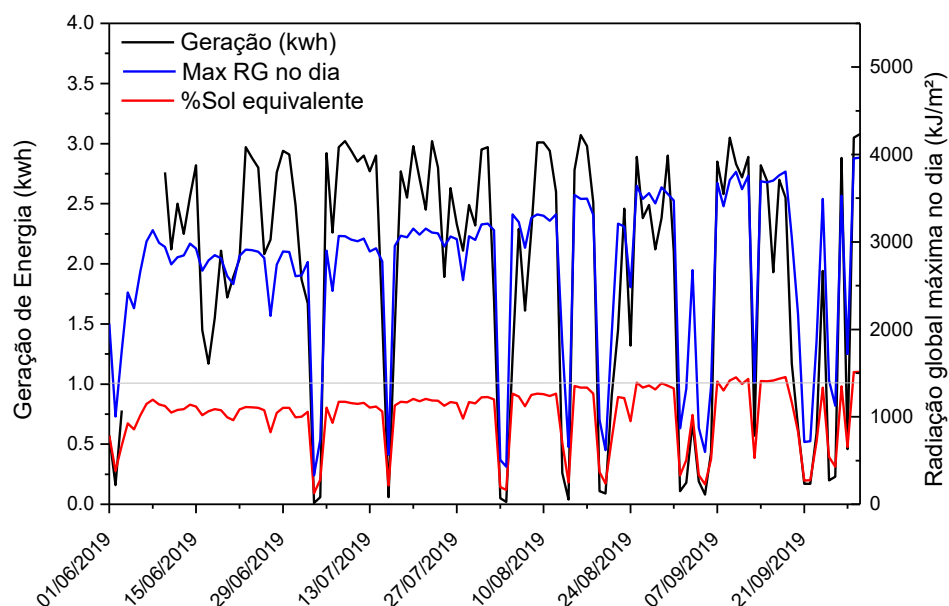
Figura 5.1: Relação entre a geração de energia e radiação global (RG) ao longo do ano

A Figura 5.2a detalha a faixa de junho a setembro, dentro da qual estão os dias de inverno, apresentando uma vez mais os dados de geração diária e dessa vez os dados de radiação global máxima no dia, aquela que ocorre normalmente ao redor do horário do

meio-dia. Para facilitar a análise, os dados de RG foram convertidos para uma medida de sol equivalente. A medida de laboratório, com o auxílio de um simulador solar, utiliza a definição de 1 sol como a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ , ou, ainda,  $3600 \text{ kJ/hm}^2$  correspondente ao período de uma hora.

Realizando essa conversão para a RG durante os meses analisados, percebe-se que a RG máxima fica abaixo de 1 sol (abaixo da linha igual a 1) na Figura 5.2a. O fato de gerar mais energia com a potência incidente de iluminação mais baixa no inverno significa dizer que o OPV apresenta maior eficiência nesses dias que se comparado ao verão. Isso pode ser explicado pelo movimento aparente anual do sol, em que a sua máxima elevação seja menor, ou seja, mais próximo da superfície terrestre nos dias de inverno, como mostra a Figura 5.2b, permitindo uma radiação mais direta nos painéis dispostos na vertical.

a)



b)

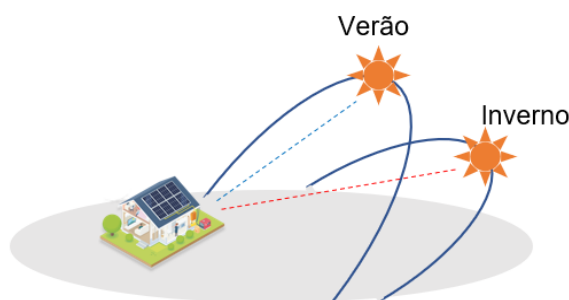


Figura 5.2: a) Recorte da relação entre a geração de energia e radiação global máxima no inverno; b) Esquemático da variação da posição do sol nas estações do verão e inverno.

A fim de reduzir os erros associados a uma fração de dados faltosos, lançou-se mão da seguinte abordagem para cálculo da média diária de geração ao longo do ano: 1) excluiu-se os dados de geração diária abaixo do valor de 0,5 kwh, assumindo que sinalizavam uma falha no registro automático de dados; 2) contou-se quantos dias no mês permaneciam preenchidos, após o filtro anterior e fez-se a soma desses dados no mês; 3) calculou-se a média de geração pela divisão soma e contagem de dias. Para o tratamento dos dados de radiação, adotou-se a seguinte regra para os dados corrigidos: no caso de falta de registro da RG em determinada hora, replicou-se o valor da hora anterior, por quantas vezes foram necessárias em situações de dados vazios consecutivos.

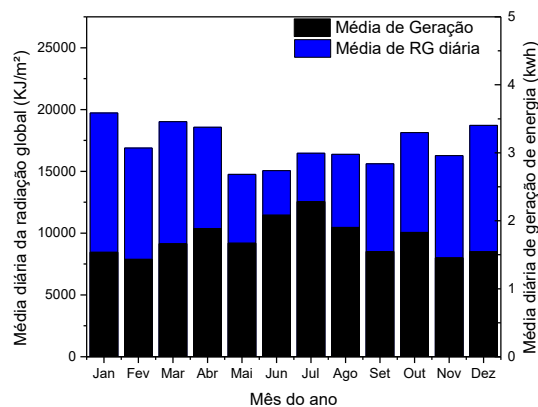
Na Tabela 5.1, estão os valores na íntegra e na Figura 5.3 os gráficos de barras para o conjunto de dados de RG sem e com a correção descrita anteriormente. Em ambos, fica claro como a média diária de geração cresce no meio do ano, enquanto a média diária da radiação global apresenta tendência de queda. A frequência de correção de dados de RG foi maior nos meses de verão, em que a diferença de valores com e sem tratamento alcançaram valores de até 26%.

Tabela 5.1: Manipulação de dados de radiação e de geração de energia elétrica para cálculo da média diária do ano de 2019

<b>Mês/ 2019</b>	<b>Média de RG diária (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Média de RG diária corrigida (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferença entre RG real/corr.</b>	<b>Contagem de Ger. (kwh)</b>	<b>Soma de Geração (kwh)</b>	<b>Média diária de Geração (kwh)</b>
<b>jan</b>	19728	24956	26%	31	47.61	1.54
<b>fev</b>	16893	19938	18%	13	18.64	1.43
<b>mar</b>	19019	20077	6%	31	51.51	1.66
<b>abr</b>	18566	18649	0%	30	56.54	1.88
<b>mai</b>	14750	14778	0%	29	48.41	1.67
<b>jun</b>	15057	15074	0%	24	49.99	2.08
<b>jul</b>	16470	16504	0%	31	70.69	2.28
<b>ago</b>	16383	16451	0%	31	58.93	1.90
<b>set</b>	15618	16242	4%	30	46.43	1.55
<b>out</b>	18133	22131	22%	31	56.72	1.83

<b>nov</b>	16265	19384	19%	30	43.63	1.45
<b>dez</b>	18724	21487	15%	31	47.87	1.54

a)



b)

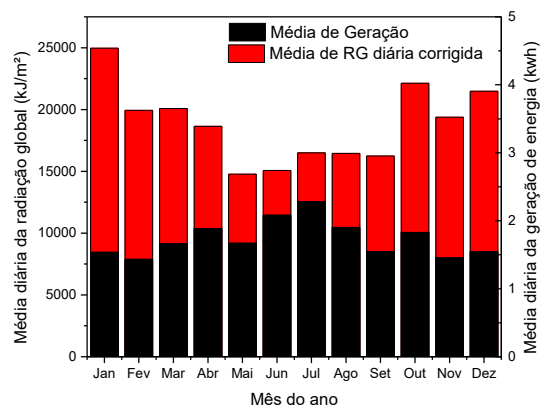


Figura 5.3: Resumo de geração e radiação por mês, a) sem e b) com filtro de dados de RG.

### 5.1.2. Geração de energia e temperatura do ar em função da data

Na Figura 5.4 está representada a análise conduzida com os dados de temperatura do ar média e máxima registrados pelo INMET. Como esperado, as temperaturas nos meses de inverno apresentam uma queda, e esse período mais frio coincide com os picos de geração de energia. Por outro lado, nos meses mais quentes, em especial janeiro e dezembro, os valores de geração de energia apresentam tendência de queda. A temperatura do ar está diretamente relacionada aos níveis de radiação, como visto anteriormente: quanto menor a RG, energia em forma de luz solar, que incide sobre a superfície terrestre, menor também será a temperatura da atmosfera.

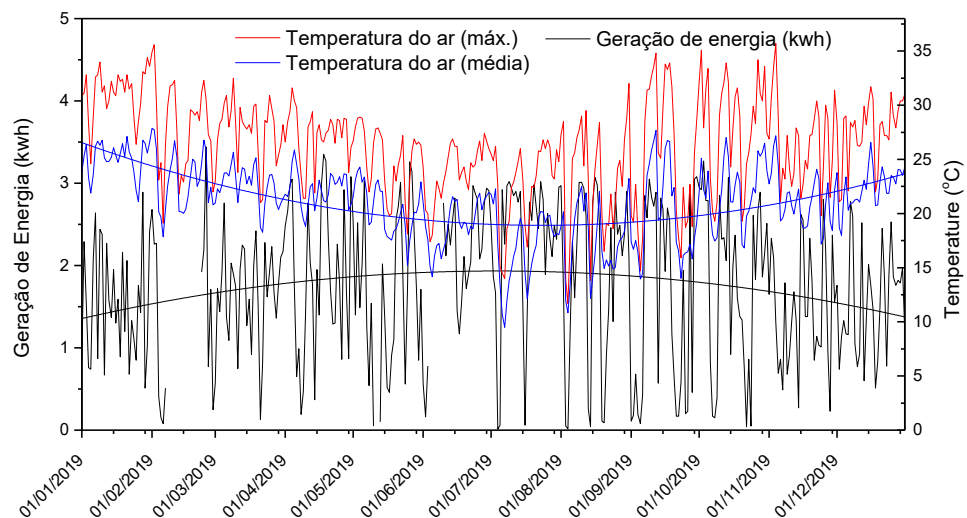


Figura 5.4: Relação entre geração de energia e temperaturas média e máxima ao longo do ano.

Há estudos que demonstram o coeficiente positivo do OPV, isto é, os dispositivos orgânicos costumam apresentar maior eficiência de conversão de energia com o aumento de temperatura, enquanto os painéis de silício usualmente apresentam uma queda de performance com a elevação de temperatura (Bardizza et al., 2020). Porém, no caso específico que está sendo analisado, a falta de correlação positiva entre temperatura e geração pode estar associada 1) ao fato de os painéis se encontrarem laminados em vidro, isolante térmico, o que torna a propagação de calor muito lenta até atingir o filme ativo do OPV, e 2) ao fato de que a variação de temperatura não é grande suficiente nas temperaturas tratadas para acarretar uma variação na eficiência do painel. Além disso, o fator posição do sol, afetando a proporção de radiação direta incidente no painel disposto na vertical, parece sobressair em relação aos parâmetros de RG e temperatura.

### 5.1.3. Geração de energia ao longo dos anos

A vida útil do OPV ainda é uma preocupação uma vez que materiais orgânicos são mais propensos à degradação. Por isso, a análise de campo, a partir de dados reais de operação de painéis comerciais, se torna fundamental para um estudo mais sério de viabilidade da tecnologia. A Figura 5.5 apresenta os dados médios de geração de energia de cada mês ao longo do período de 2018 e 2019, totalizando dois anos de operação. A análise é feita com os dados brutos de geração e é possível novamente observar que os



meses referentes ao meio do ano, que englobam o período de inverno ou está próximo a ele, apresentam os maiores valores de energia gerada. Apesar disso, é possível notar certa variabilidade. Em 2019, a maior média de geração se dá no mês de julho, no valor de 2,3 kWh, enquanto em 2018, o pico se dá no mês de maio, com o valor de 2,1 kWh. Entende-se, no entanto, que esses são valores similares em posição temporal próximo, e, portanto, não descartam a tendência.

Uma vez que não foi observada uma queda nos valores de geração de um ano para outro, é possível afirmar que não houve degradação significativa do sistema durante o período analisado. Esse resultado sugere que o OPV protegido pela laminação em vidro e em condições de radiação difusa pode ter sua vida útil estendida se comparado ao dispositivo encapsulado com barreiras finas flexíveis e mantido em ambientes externos.

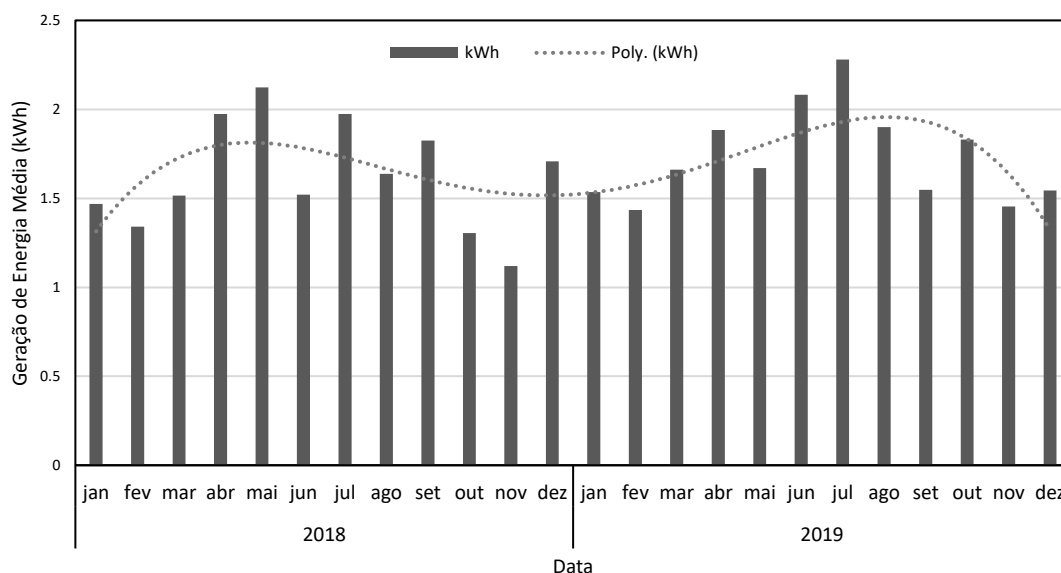


Figura 5.5: Geração de energia média por mês ao longo de 2018 e 2019.

A propensão à degradação e à curta vida útil ainda são os principais desafios para as OPVs superarem os obstáculos do mercado fotovoltaico. Felizmente, a aplicação de BIPV pode ser uma boa maneira de superar essa barreira. A baixa variação nos níveis de geração de energia, tanto nos valores médios quanto nos máximos, expandindo a análise para o período de operação de quatro anos, como mostrado na Figura 5c, d, indica que não houve degradação significativa nos painéis orgânicos. Isso pode ser atribuído a condições menos extremas às quais os dispositivos estão expostos, uma vez que são protegidos por laminação de vidro e recebem iluminação difusa e indireta.

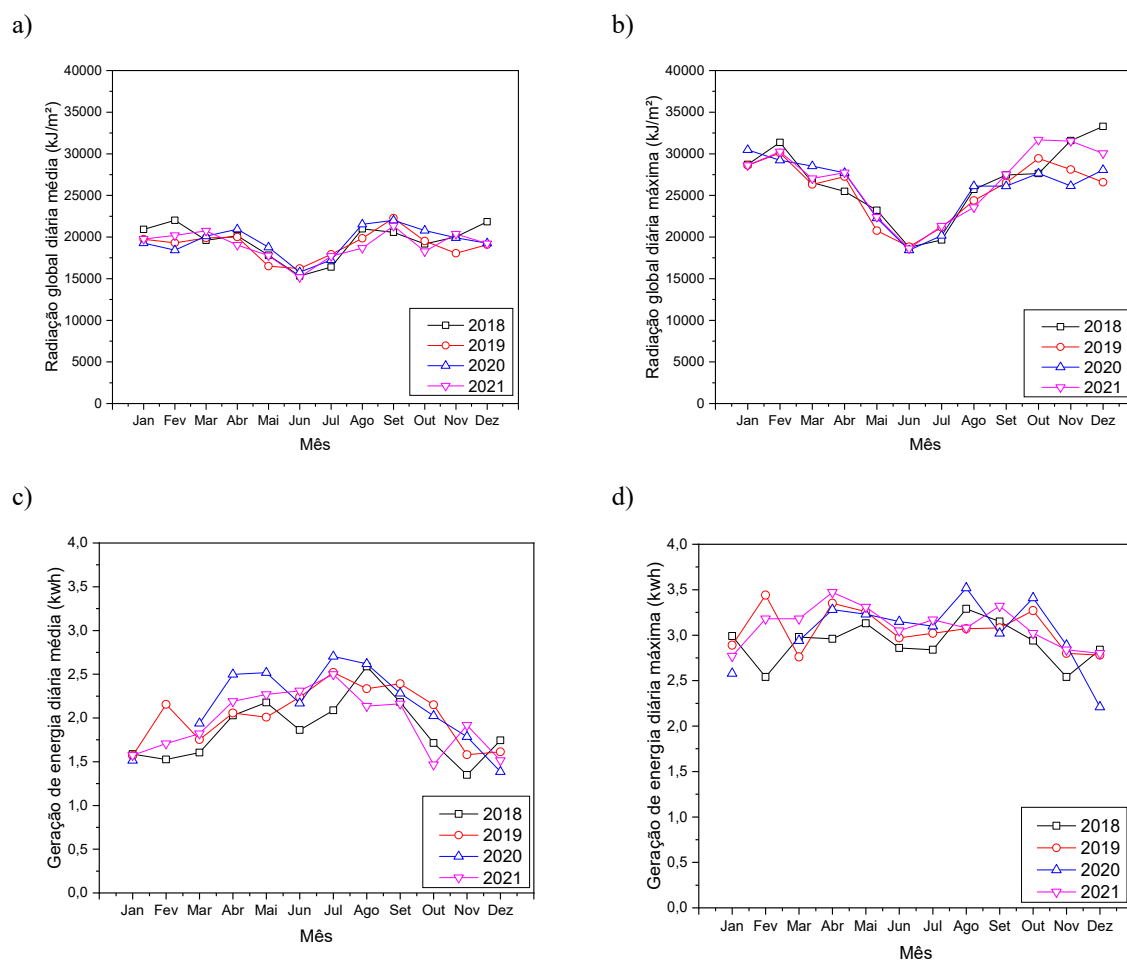


Figura 5.6: a) Média e b) máxima de radiação global diária, c) média e d) máxima de geração de energia diária para cada mês ao longo dos quatro anos de operação entre 2018 e 2021 analisados.

## 5.2. Análise quantitativa

Nesta seção, serão apresentados os estudos quantitativos levando-se em consideração o impacto dos dados meteorológicos registados pelo INMET e os dados de altitude solar na quantidade de energia gerada.

### 5.2.1. Variáveis

A Tabela 5.2 apresenta o resumo das variáveis meteorológicas e a da variável resposta, geração de energia, considerados nesse estudo. Após uma etapa de filtragem e manipulação de dados indicada na metodologia, em que se descartaram os dias com dados faltantes ou com dados de geração de energia muito baixos, foi possível chegar a um conjunto de 1087 dias selecionados ao longo do período de quatro anos de operação entre 2019 e 2021.

Tabela 5.2: Resumo das variáveis consideradas no desenvolvimento dos modelos matemáticos.

	Descrição	Estatística básica (não-normalizado)				Unidade
		Média	Máx.	Mín.	DP	
<b>Y</b>	Geração de energia	1.79	3.44	0.11	0.89	<i>Kwh</i>
<b>X<sub>1</sub></b>	Número de horas de radiação no dia	12.25	14.00	9.00	0.94	-
<b>X<sub>2</sub></b>	Precipitação total no dia	0.15	7.05	0.00	0.49	<i>mm</i>
<b>X<sub>3</sub></b>	Pressão atmosférica ao nível da estação	927.65	938.18	917.55	3.51	<i>mB</i>
<b>X<sub>4</sub></b>	Radiação global total no dia	17158.1	31705.9	2506.2	6064.2	<i>kJ/m<sup>2</sup></i>
<b>X<sub>5</sub></b>	Temperatura do ar – Bulbo seco	21.74	33.06	10.30	3.40	<i>°C</i>
<b>X<sub>6</sub></b>	Temperatura de ponto de orvalho	13.05	20.04	0.00	3.62	<i>°C</i>
<b>X<sub>7</sub></b>	Humidade relativa do ar	60.87	90.79	25.18	12.71	<i>%</i>
<b>X<sub>8</sub></b>	Direção do vento	172.07	332.31	52.71	59.96	<i>°</i>
<b>X<sub>9</sub></b>	Velocidade do vento	1.89	5.18	0.00	0.91	<i>m/s</i>
<b>X<sub>10</sub></b>	Altitude solar (função da época do ano)	62.35	89.89	43.03	15.94	<i>Â°</i>

Além da radiação global (referida como X<sub>4</sub>), que foi o foco da seção anterior, outras condições meteorológicas foram adicionadas à análise, como o número de horas de

radiação em um dia ( $X_1$ ), precipitação ( $X_2$ ), pressão atmosférica ( $X_3$ ), temperatura do ar em bulbo seco ( $X_5$ ), temperatura de ponto de orvalho ( $X_6$ ), umidade relativa ( $X_7$ ), direção do vento ( $X_8$ ) e velocidade do vento ( $X_9$ ). A altitude solar ( $X_{10}$ ) também foi introduzida na análise, carregando informações sobre a data ou hora do ano, como pode ser visto na Figura 5.7. A relação entre a altitude solar e a geração de energia também pode ser verificada nessa figura, que indica a presença de agrupamento de dados da produção de energia quando a altitude atinge valores mais baixos.

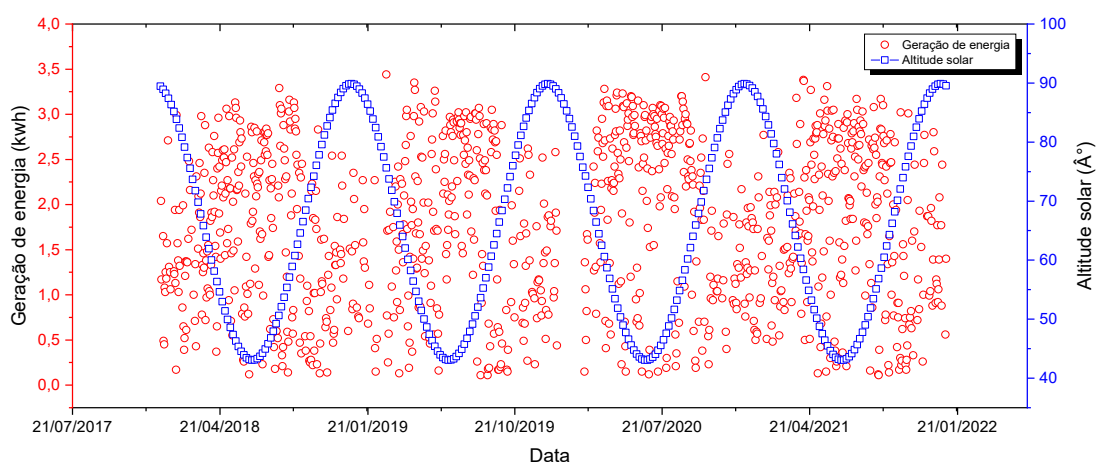


Figura 5.7: Relação entre geração de energia e altitude solar ao longo dos quatro anos de operação entre 2018 e 2021.

Além disso, uma matriz de correlação foi construída e é apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Matriz de correlação entre variáveis.

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	Y
$X_1$	1.00										
$X_2$	0.20	1.00									
$X_3$	-0.47	-0.20	1.00								
$X_4$	0.16	-0.17	-0.16	1.00							
$X_5$	0.25	0.02	-0.52	0.60	1.00						
$X_6$	0.53	0.31	-0.50	-0.14	0.38	1.00					
$X_7$	0.29	0.31	-0.05	-0.68	-0.47	0.62	1.00				
$X_8$	-0.01	0.03	-0.45	0.10	0.31	0.00	-0.26	1.00			
$X_9$	0.17	-0.06	-0.20	0.01	0.01	0.17	0.12	0.25	1.00		
$X_{10}$	0.88	0.27	-0.58	0.09	0.29	0.65	0.38	0.03	0.24	1.00	
Y	-0.24	-0.28	0.19	0.70	0.22	-0.52	-0.71	0.04	-0.09	-0.37	1.00

Muitas das variáveis climáticas estão interconectadas e esse fato é observado diretamente ao analisar a Tabela 5.3. A escala de cores indica o grau de correlação: quanto mais escuro o verde, mais forte é a correlação positiva, e quanto mais escuro o vermelho, mais forte é a correlação negativa. Correlações baixas, em torno de zero, são coloridas com tonalidades amareladas. Um coeficiente de +1 indica uma correlação perfeita positiva, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta na mesma proporção. Um coeficiente de -1 indica uma correlação perfeita negativa, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui na mesma proporção. Um coeficiente de 0 indica ausência de correlação.

O número total de horas de radiação global registradas em um dia ( $X_1$ ) e a altitude solar ( $X_{10}$ ) apresentam uma forte correlação de 0,88, uma vez que a posição solar, dependendo da estação do ano, influencia a quantidade de tempo de irradiação solar em um dia. Portanto, os dias de verão são mais longos do que os de inverno. A temperatura ambiente ( $X_5$ ) também mostra um alto grau de correlação com a radiação global (0,6), o que significa que os dias ensolarados geralmente são mais quentes. Em contraste, a direção e velocidade do vento (respectivamente,  $X_8$  e  $X_9$ ) apresentam níveis mais baixos de correlação com outros parâmetros, inferiores a 0,5. Isso pode ser atribuído ao fato de que os aspectos do vento estão mais relacionados à sensação de temperatura e conforto térmico.

Ao examinar cuidadosamente as variáveis mais importantes que afetam a variável dependente, podemos ver que a radiação global ( $X_4$ ) tem um impacto maior na produção de energia, conforme esperado, com uma correlação positiva de 0,70. Por outro lado, a umidade relativa do ar ( $X_7$ ) tem o mesmo nível de correlação, porém negativa (-0,71), sugerindo que quando os dias estão mais úmidos, possivelmente há uma maior nebulosidade, o que reduz os níveis de radiação global e, conseqüentemente, a geração de energia. A temperatura do ponto de orvalho ( $X_6$ ) é o terceiro parâmetro que mais afeta a variável resposta, com uma correlação de -0,52. Isso pode ser atribuído ao seu alto grau de correlação com a variável  $X_7$ . Os parâmetros que têm o menor impacto na geração de energia, com correlações abaixo de 0,1, são  $X_8$  e  $X_9$ , que estão relacionados às condições do vento.

É relatado que os painéis OPV têm um coeficiente de temperatura positivo. Isso significa que eles apresentam uma maior eficiência na conversão de energia quando expostos a temperaturas mais altas, enquanto os painéis convencionais de silício

geralmente demonstram o contrário (Bardizza et al., 2020). No entanto, no caso analisado, a fraca correlação positiva (0,22) entre a temperatura do ar e a geração de energia pode ser explicada pelo 1) fato de que os painéis são laminados em vidro, um isolante térmico, o que torna a propagação do calor lenta até chegar à camada ativa, e 2) fato de que a faixa estreita de temperatura do ar, de 22 a 33 °C, não é significativa o suficiente para provocar um aumento na eficiência.

### 5.2.2. Modelagem matemática

Todas as dez variáveis listadas anteriormente foram consideradas nesta etapa e, como primeiro passo de análise, o foco foi mantido em regressões simples.

#### 5.2.2.1. Regressão simples

Para o modelo de primeira ordem, apenas uma das variáveis é considerada dentre as 20 possibilidades, que são as 10 variáveis e suas inversas. Todas elas foram testadas e foi escolhida aquela que apresentou o melhor desempenho com os dados de regressão e validação. Em segunda ordem, por sua vez, foi utilizada uma combinação de duas variáveis, que poderiam ser o produto delas ou o produto de uma com a inversa da outra, ou ainda a mesma variável multiplicada por si mesma. Novamente, todas as possibilidades foram testadas e a que apresentou melhor desempenho em termos de  $R^2$  de regressão e validação foi selecionada. O mesmo procedimento foi aplicado para modelos de regressão simples de ordem superior, sempre incluindo uma variável adicional. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos para as regressões simples de primeira a sexta ordem.

Tabela 5.4: Modelagem matemática com regressão simples

#	Ordem	Modelo	$R^2$ validação ( $R^2$ regressão)
1	1	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_4$	0.5171 (0.4839)
2	2	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{X_4}{X_{10}}$	0.7584 (0.7610)
3	3	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{X_3 \cdot X_4}{X_{10}}$	0.7591 (0.7613)
4	4	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{X_3^2 \cdot X_4}{X_{10}}$	0.7597 (0.7614)

5	5	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{X_3^3 \cdot X_4}{X_{10}}$	0.7601 (0.7613)
6	6	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{X_3^4 \cdot X_4}{X_{10}}$	0.7604 (0.7612)

No modelo de primeira ordem, a variável RG ( $X_4$ ) foi a que levou ao melhor desempenho, com um  $R^2$  de validação de 0,52. Na segunda ordem, a segunda variável que aparece no modelo é a altitude solar ( $X_{10}$ ), e o  $R^2$  sobe para 0,76. Ao elevar a ordem de regressão acima de dois,  $X_3$  é adicionada ao modelo, mas o desempenho (representado pelo  $R^2$ ) se mantém praticamente estável em torno de 0,76, com variações na terceira ou quarta casa decimal apenas. Portanto, conclui-se que o melhor modelo obtido por regressão simples é o de ordem 2, uma vez que alcança valores de  $R^2$  comparáveis aos modelos de ordem superior, ao mesmo tempo em que mantém a simplicidade usando apenas duas variáveis no modelo.

#### 5.2.2.2. Regressão múltipla

Após o desenvolvimento dos modelos de regressão simples, os modelos de regressão múltipla foram estudados. Nas regressões múltiplas, várias iterações são executadas, e cada termo adicionado na equação do modelo é testado quanto à sua significância estatística. Neste estudo, o nível de significância é fixado em 5%. O modelo cresce com a adição de novos termos, desde que isso aumente o  $R^2$  tanto do conjunto de dados de regressão quanto de validação. As versões finais incluem todos os termos que são significativos. Os resultados obtidos para os modelos de regressão múltipla são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Modelagem matemática com regressão múltipla

#	Ordem	Modelo	$R^2$ validação ( $R^2$ regressão)
7	1	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_4 + \frac{\beta_2}{X_{10}} + \beta_3 \cdot X_6 + \frac{\beta_4}{X_4} + \frac{\beta_5}{X_5} + \frac{\beta_6}{X_2} + \beta_7 \cdot X_7$	0,7576 (0,7462)

8	2	$Y = \beta_0 + \frac{\beta_1 \cdot X_4}{X_{10}} + \beta_2 \cdot X_6 \cdot X_9 + \beta_3 \cdot X_4^2 + \frac{\beta_4 \cdot X_4}{X_2}$ $+ \beta_5 \cdot X_1 \cdot X_{10} + \frac{\beta_6}{X_4^2} + \frac{\beta_7 \cdot X_4}{X_7} + \beta_8 \cdot X_1 \cdot X_5$ $+ \frac{\beta_9 \cdot X_{10}}{X_7} + \frac{\beta_{10}}{X_5 \cdot X_7} + \beta_{11} \cdot X_2 \cdot X_9$ $+ \frac{\beta_{12} \cdot X_2}{X_3} + \beta_{13} \cdot X_2$	0,8067 (0,8108)
9	3	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_5 \cdot X_6 + \frac{\beta_2 \cdot X_4}{X_{10}} + \frac{\beta_3 \cdot X_4^2}{X_7} + \frac{\beta_4 \cdot X_4 \cdot X_{10}}{X_2}$ $+ \beta_5 \cdot X_1 \cdot X_7 \cdot X_{10} + \frac{\beta_6}{X_4^2 \cdot X_{10}} + \frac{\beta_7 \cdot X_2 \cdot X_9}{X_8}$ $+ \frac{\beta_8 \cdot X_1}{X_4 \cdot X_5} + \beta_9 \cdot X_7 \cdot X_9^2$	0,8026 (0,8089)
10	4	$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_4^2 \cdot X_5 \cdot X_7 + \frac{\beta_2 \cdot X_6}{X_1 \cdot X_7 \cdot X_{10}} + \frac{\beta_3 \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_7}{X_2}$ $+ \beta_4 \cdot X_6^2 \cdot X_9^2 + \beta_5 \cdot X_1^2 \cdot X_4 \cdot X_5 + \frac{\beta_6 \cdot X_4}{X_{10}}$ $+ \frac{\beta_7 \cdot X_1^2}{X_{10}} + \frac{\beta_8 \cdot X_2 \cdot X_9}{X_6 \cdot X_8} + \frac{\beta_9 \cdot X_2^2 \cdot X_6}{X_8}$ $+ \frac{\beta_{10} \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_8}{X_9} + \frac{\beta_{11} \cdot X_1 \cdot X_{10}}{X_7 \cdot X_9}$ $+ \beta_{12} \cdot X_1^2 \cdot X_3 + \frac{\beta_{13} \cdot X_5}{X_{10}^3} + \frac{\beta_{14} \cdot X_1 \cdot X_6}{X_5}$ $+ \frac{\beta_{15}}{X_4 \cdot X_{10}}$	0,7984 (0,8167)
11	5	$Y = \beta_0 + \frac{\beta_1 \cdot X_3^2 \cdot X_4}{X_{10}} + \frac{\beta_2 \cdot X_1^2 \cdot X_7 \cdot X_{10}}{X_5}$ $+ \beta_3 \cdot X_4^3 \cdot X_6 \cdot X_7 + \frac{\beta_4 \cdot X_1 \cdot X_5 \cdot X_{10}^2}{X_2}$	0,7970 (0,8030)

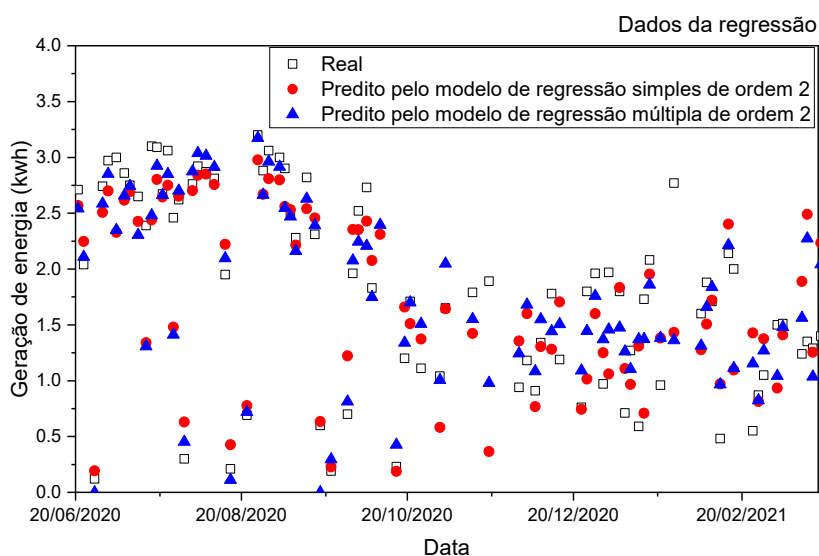
A regressão múltipla de primeira ordem resultou em um valor razoável de  $R^2$  de validação de 0,76, o mesmo valor obtido para a regressão simples de ordem igual ou superior a 2. Já a regressão múltipla de segunda ordem mostrou um aumento no  $R^2$  de validação para 0,81. Semelhante aos modelos de regressão simples, as regressões múltiplas



com ordem mais alta (3 ou superior) apresentaram valores de  $R^2$  de validação bastante próximos, até mesmo ligeiramente inferiores a 0,81, indicando que a melhor regressão múltipla desenvolvida foi a de ordem 2. Novamente, como visto anteriormente nas regressões lineares simples, a RG ( $X_4$ ) e altitude solar ( $X_{10}$ ) aparecem como variáveis relevantes presentes em todos os modelos. O aumento no grau do polinômio reduziu o desempenho dos modelos com os dados de validação, embora tenha permitido reduzir o número de parâmetros nos modelos no caso das ordens 3 e 5. A regressão de 4ª ordem apresentou o melhor desempenho, no entanto, mostrou um desempenho pior com os dados de validação em comparação com os modelos de 2ª e 3ª ordens.

A Figura 5.8 apresenta a comparação entre os dados reais e os dados previstos pelos melhores modelos de regressão simples e múltipla - aqueles de segunda ordem - para os conjuntos de dados de regressão e validação. Um período mais curto foi selecionado para facilitar a visualização dos dados, entre o inverno de 2020 e o verão de 2021, de junho a março. Apesar de alguma dispersão, é possível observar que os modelos seguem os padrões de geração mais alta durante o período de inverno, e o oposto ocorre durante o verão. Com uma análise visual mais cuidadosa, também é possível notar que os dados da regressão múltipla se aproximam mais dos dados reais em comparação com o conjunto de dados da regressão linear.

a)



b)

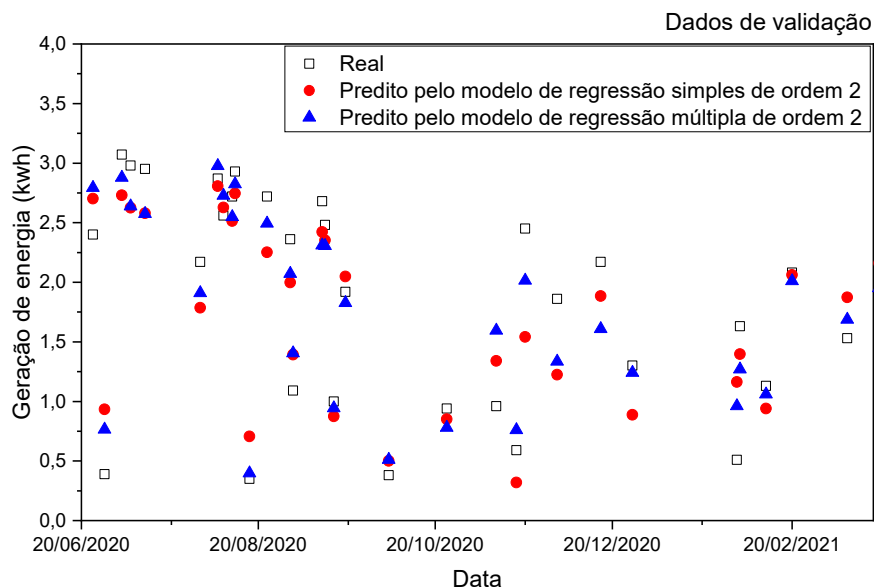
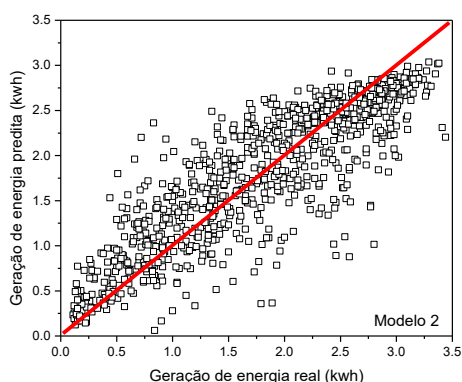


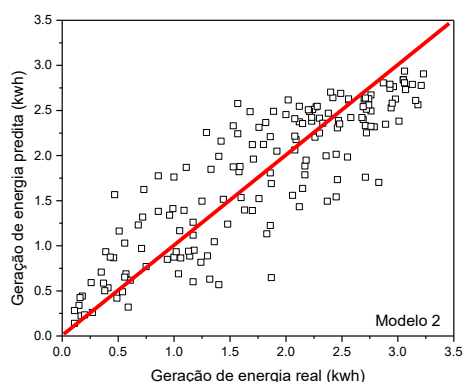
Figura 5.8: Comportamento dos melhores modelos durante o período de inverno de 2020 e verão de 2021 para ambos os conjuntos de dados: a) regressão e b) validação.

A visualização dos dados previstos em relação aos dados reais e a distribuição dos erros para os dois melhores modelos de regressão simples e múltipla são apresentados graficamente na Figura 5.9. A mesma análise foi realizada para ambos os conjuntos de dados da regressão e da validação. Os coeficientes desses dois modelos que atingiram melhor performance estão apresentados na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7.

a) Regressão simples de ordem 2 (dados da regressão)

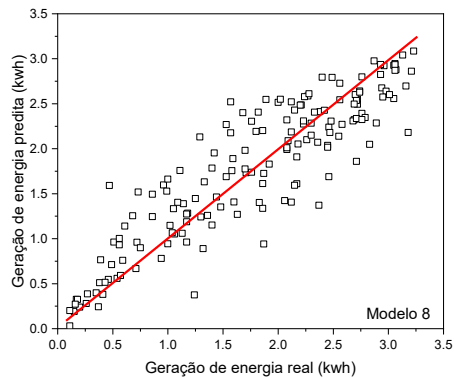
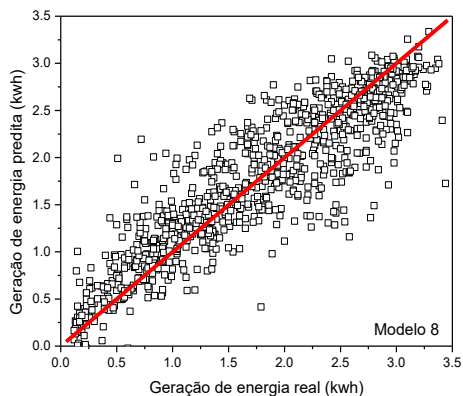


b) Regressão simples de ordem 2 (dados de validação)



c) Regressão múltipla de ordem 2 (dados da regressão)

d) Regressão múltipla de ordem 2 (dados de validação)



e) Distribuição de erros para a regressão simples de ordem 2

f) Distribuição de erros para a regressão múltipla de ordem 2

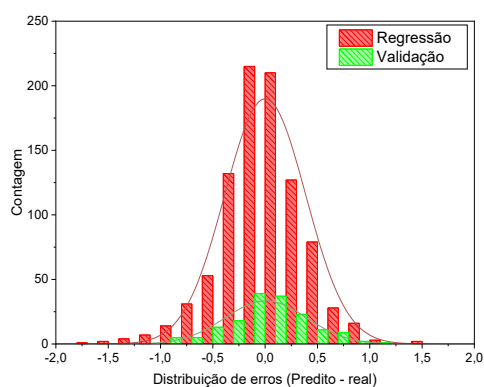
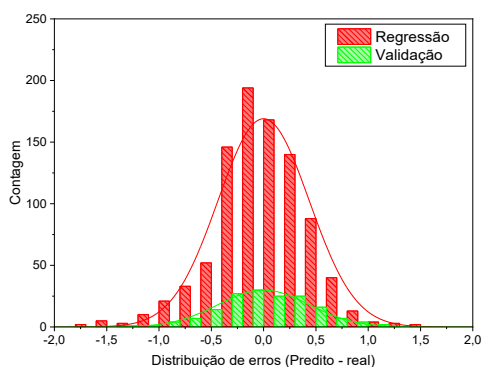


Figura 5.9: Gráficos referentes aos modelos com melhor R<sup>2</sup> obtido com os dados de validação

Tabela 5.6: Coeficientes do modelo matemático de regressão simples de ordem 2 (modelo 2)

<i><b>Coefficiente</b></i>	<i><b>Valor</b></i>
<i><b>Intercepto <math>\beta_0</math></b></i>	$-2,069 \times 10^{-1}$
<i><b>Variável <math>\beta_1</math></b></i>	$6,881 \times 10^{-3}$

Tabela 5.7: Coeficientes do modelo matemático de regressão múltipla de ordem 2 (modelo 8)

<i><b>Coefficiente</b></i>	<i><b>Valor</b></i>	<i><b>Coefficiente</b></i>	<i><b>Valor</b></i>
<i><b>Intercepto <math>\beta_0</math></b></i>	-	<i><b>Variável <math>\beta_7</math></b></i>	$5,165 \times 10^{-3}$
<i><b>Variável <math>\beta_1</math></b></i>	$8,716 \times 10^{-3}$	<i><b>Variável <math>\beta_8</math></b></i>	$-6,057 \times 10^{-3}$
<i><b>Variável <math>\beta_2</math></b></i>	$2,703 \times 10^{-3}$	<i><b>Variável <math>\beta_9</math></b></i>	$-1,181 \times 10$
<i><b>Variável <math>\beta_3</math></b></i>	$-2,785 \times 10^{-9}$	<i><b>Variável <math>\beta_{10}</math></b></i>	$-8,520 \times 10^{+2}$

<i>Variável</i> $\beta_4$	$7,952 \times 10^{-10}$	<i>Variável</i> $\beta_{11}$	$-1,134 \times 10^{-1}$
<i>Variável</i> $\beta_5$	$2,479 \times 10^{-3}$	<i>Variável</i> $\beta_{12}$	$2,958 \times 10^{+4}$
<i>Variável</i> $\beta_6$	$4,577 \times 10^{+6}$	<i>Variável</i> $\beta_{13}$	$-3,184 \times 10^{+1}$

Pode-se observar a partir das Figura 5.9a-d que o modelo de regressão múltipla apresenta menos resíduos, uma vez que o seu  $R^2$  é superior ao modelo de regressão simples, tanto para os dados de regressão quanto para os dados de validação. As distribuições dos erros (Figura 5.9e, f) seguem uma forma de distribuição normal, sendo mais estreita para o modelo de regressão múltipla em comparação com o modelo de regressão simples. Em relação aos coeficientes apresentados na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7, vale ressaltar que a variação nas ordens de magnitude não está relacionada com a sua significância. Coeficientes representados por números muito pequenos, como  $10^{-9}$  e  $10^{-10}$  em  $\beta_3$  e  $\beta_4$  do modelo 8, respectivamente, estão associados a termos que contêm combinações de variáveis muito grandes. O coeficiente de intercepto  $\beta_0$  não foi considerado significativo no caso do modelo de regressão múltipla de segunda ordem (modelo 8).

## 6. Conclusões

A tecnologia fotovoltaica orgânica (OPV) vem sendo estudada em condições de laboratório há anos, porém dados de painéis de escala industrial em aplicações reais e condições operacionais ainda são escassos na literatura científica. Este trabalho traz uma análise original e pretende contribuir para a comunidade fotovoltaica preenchendo essa lacuna. Aqui, foi obtida uma relação entre a geração de energia de uma fachada vertical de OPV instalada em um edifício existente em São Paulo, Brasil, e as condições climáticas ao longo de quatro anos de operação, e foram propostos modelos matemáticos.

Pela análise gráfica visual, ficou evidente que o sistema de OPV gerou mais energia durante o inverno, fato atribuído à menor altitude solar, apesar dos níveis mais baixos de radiação global nessa estação. Os melhores modelos de regressão simples e múltipla foram os de segunda ordem e apresentaram coeficientes de determinação, respectivamente, em torno de 76% e acima de 80%, tanto para o conjunto de dados de regressão quanto para os de validação. As variáveis que levaram ao melhor desempenho no desenvolvimento do modelo de regressão simples foram a radiação global ( $X_4$ ) e a altitude solar ( $X_{10}$ ). No caso do modelo de regressão múltipla, treze termos foram adicionados à equação, usando todas as variáveis originais, exceto a direção do vento ( $X_8$ ).

O fato de os painéis estarem laminados em vidro e terem orientação vertical provavelmente evitou a degradação ao longo do tempo, uma vez que foram observados níveis similares de geração de energia no quarto ano de operação em comparação com o primeiro. Por fim, são encorajados estudos adicionais, uma vez que as OPVs podem se comportar de maneira diferente dependendo dos materiais e processos usados em sua composição e fabricação, respectivamente. Outra nota importante para uma compreensão mais profunda da correlação entre a energia de saída e as variáveis climáticas é desenvolver um registro de dados mais preciso, uma vez que a falta de dados ou a presença de valores muito baixos podem mascarar os resultados dos modelos de regressão.

## 7. Referências bibliográficas

- BARDIZZA, G. et al. Power performance and thermal operation of organic photovoltaic modules in real operating conditions. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 28, n. 6, p. 593–600, 2020.
- CAMPOS, B. L. DE O.; COSTA, A. O. S. DA; COSTA JUNIOR, E. F. DA. Mathematical modeling and sensibility analysis of a solar humidification-dehumidification desalination system considering saturated air. **Solar Energy**, v. 157, n. August, p. 321–327, 2017.
- DE QUEIROZ CORRÊA, L. et al. From-lab-to-fab: challenges and vision for sustainable organic electronics—organic photovoltaic case. Em: **Sustainable Strategies in Organic Electronics**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 521–560.
- DE QUEIROZ CORRÊA, LUIZA; DE SOUSA LIMA, FRANCISCO ANDERSON; BAGNIS, D. Performance and Light Stability Study on Icba and Pcbm Fullerene Acceptors Related To the Choice on Electron. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, n. August, 2016.
- FRAGA, M. M. C. et al. Analysis of a Brazilian thermal plant operation applying energetic and exergetic balances. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, n. 4, p. 1395–1403, 2018.
- GHAZALI, A. et al. Performance and financial evaluation of various photovoltaic vertical facades on high-rise building in Malaysia. **Energy and Buildings**, v. 134, p. 306–318, 2017.
- GHOSH, A. Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123343, 2020.
- HERMES, W. et al. **Emerging thin-film photovoltaic technologies**. **Chemie-Ingenieur-Technik**Wiley-VCH Verlag, , 1 abr. 2015.
- KIM, Y. J.; PARK, S. E.; CHO, B. J. A wearable organic photovoltaic-thermoelectric (OPV-TE) hybrid generator to minimize the open-circuit voltage losses of OPV module. **Nano Energy**, v. 93, 1 mar. 2022.
- KREBS, F. C. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 93, n. 4, p. 394–412, 2009.
- LACERDA DE OLIVEIRA CAMPOS, B. et al. Performance comparison of different mathematical models in the simulation of a solar desalination by humidification-dehumidification. **Desalination**, v. 437, n. February, p. 184–194, 2018.
- LEE, H. M.; YOON, J. H. Power performance analysis of a transparent DSSC BIPV window based on 2 year measurement data in a full-scale mock-up. **Applied Energy**, v. 225, n. April, p. 1013–1021, 2018.
- LEE, S. et al. Stitchable organic photovoltaic cells with textile electrodes. **Nano Energy**, v. 9, p. 88–93, 2014.
- MAGHRABIE, H. M. et al. State - of - the - Art Technologies for Building - Integrated Photovoltaic Systems. 2021.
- MATHEWS, I. et al. Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells. **Joule**, v. 3, n. 6, p. 1415–1426, 2019.
- MIRANDA, B. H. S. et al. Efficient fully roll-to-roll coated encapsulated organic solar module for indoor applications. **Solar Energy**, v. 220, p. 343–353, 2021.

MORENO, Á. et al. Energy and luminous performance investigation of an OPV/ETFE glazing element for building integration. **Energies**, v. 12, n. 10, 2019.

NIQUINI, G. R. et al. Feedstock and inoculum characteristics and process parameters as predictors for methane yield in mesophilic solid-state anaerobic digestion. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 91, n. 4, 2019.

PASTUSZAK, J.; WĘGIEREK, P. **Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development**. **Materials**MDPI, , 1 ago. 2022.

REYNAUD, C. A. et al. Evaluation of indoor photovoltaic power production under directional and diffuse lighting conditions. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 200, n. June, p. 110010, 2019.

STOICHKOV, V. et al. Studying the outdoor performance of organic building-integrated photovoltaics laminated to the cladding of a building prototype. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 191, n. June 2018, p. 356–364, 2019.

VAN DER STAAIJ, F. M.; VAN KEULEN, I. M.; VON HAUFF, E. Organic Photovoltaics – Where are we Headed? **Solar RRL**, v. 2100167, p. 1–8, 2021.

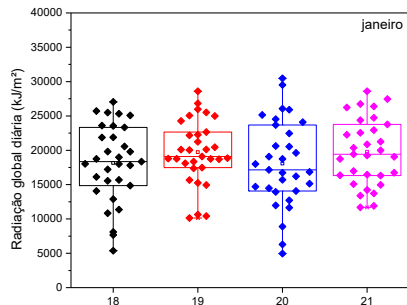
VULKAN, A. et al. Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 97–109, 2018.

## Apêndice I

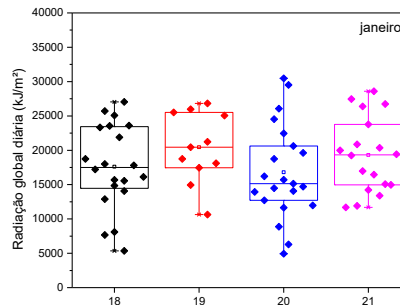
O tratamento prévio dos dados brutos foi realizado para garantir a qualidade da análise, onde os dias que continham dados ausentes de radiação global em uma determinada hora, mas que possuíam registros de dados na hora anterior e posterior, foram excluídos da análise. Essa abordagem foi adotada para evitar a inclusão de dados incompletos ou questionáveis, o que poderia comprometer a confiabilidade dos resultados. Ao remover os dias com dados ausentes em uma hora específica, mas com registros nas horas adjacentes, buscou-se garantir que os dados utilizados na análise fossem completos e consistentes, proporcionando uma base sólida para a realização das regressões e obtenção dos resultados.

A Figura I.1 apresenta a análise estatística dos dados de geração global mês a mês nos anos analisados antes e após o tratamento dos dados, referidos, respectivamente, como dados completos e dados limpos.

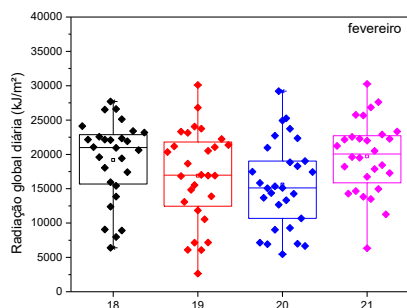
a) Janeiro – dados completos



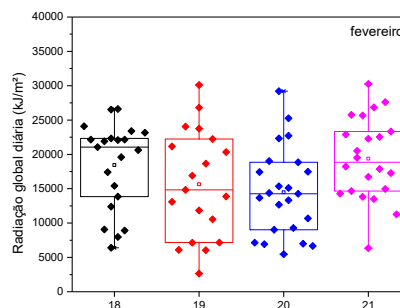
b) Janeiro – dados limpos



c) Fevereiro – dados completos



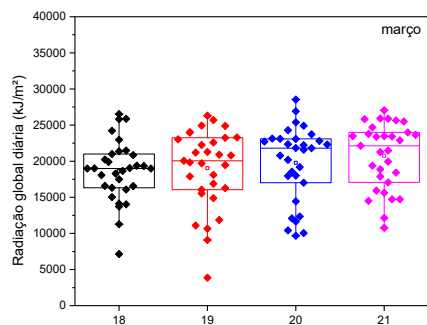
d) Fevereiro – dados limpos



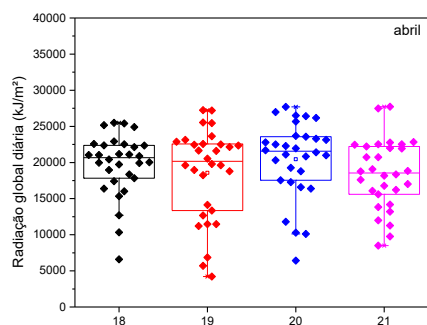
e) Março – dados completos

f) Março – dados limpos

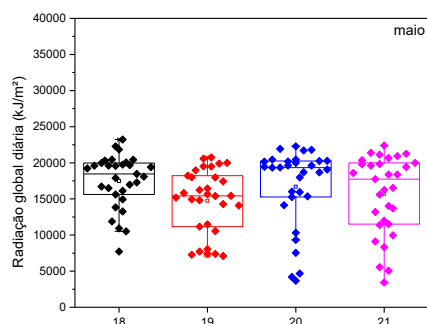




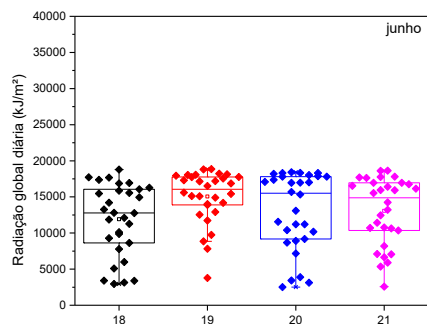
g) Abril - dados completos



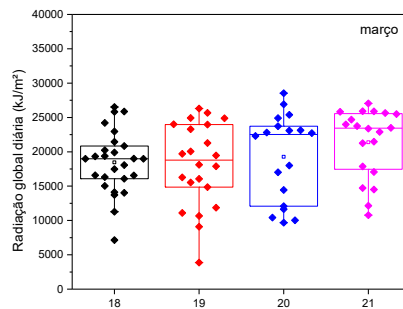
i) Maio – dados completos



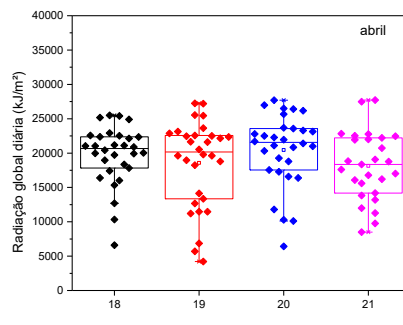
k) Junho – dados completos



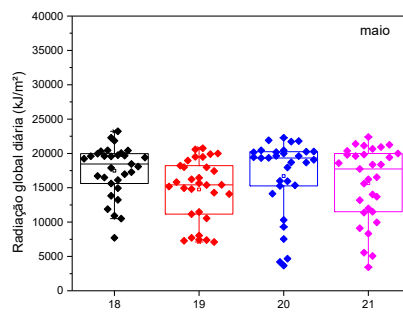
m) Julho – dados completos



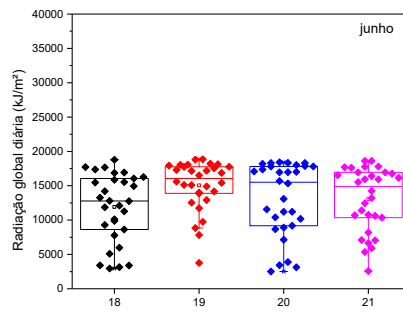
h) Abril – dados limpos



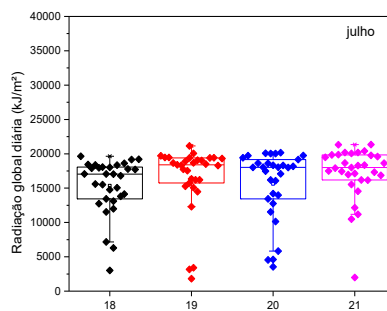
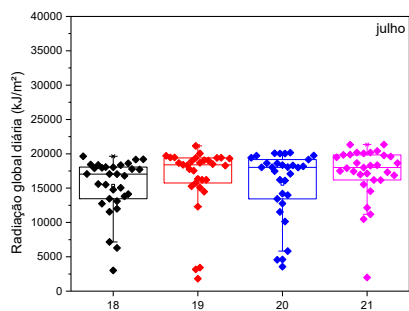
j) Maio – dados limpos



l) Junho – dados limpos

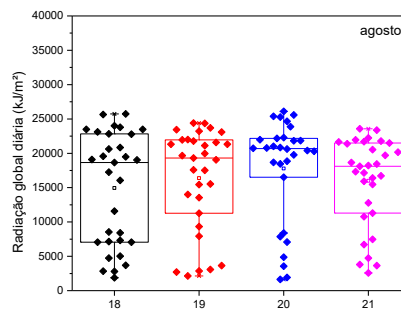
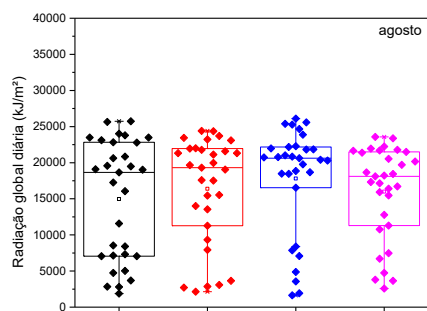


n) Julho – dados limpos



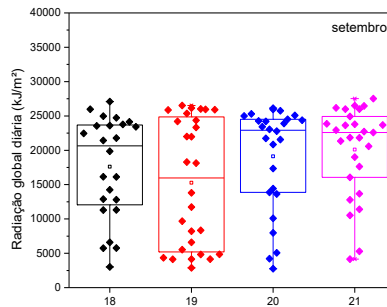
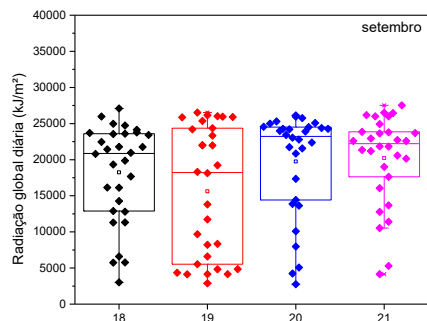
o) Agosto – dados completos

p) Agosto – dados limpos



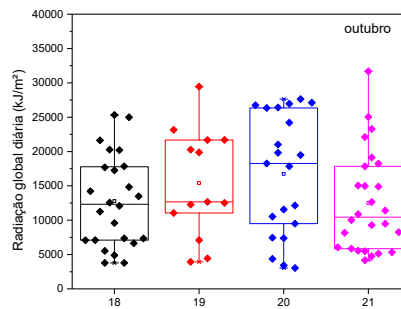
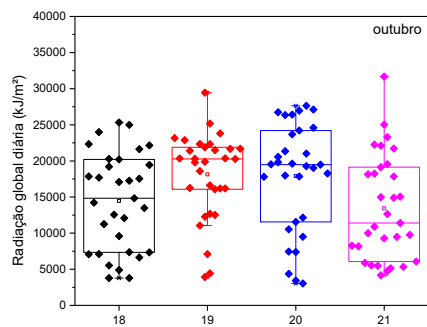
q) Setembro – dados completos

r) Setembro – dados limpos



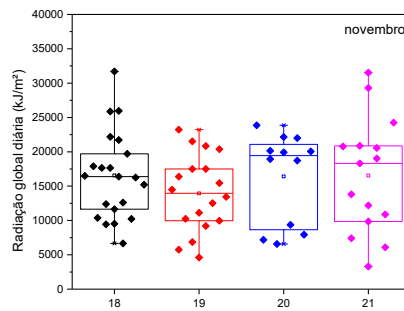
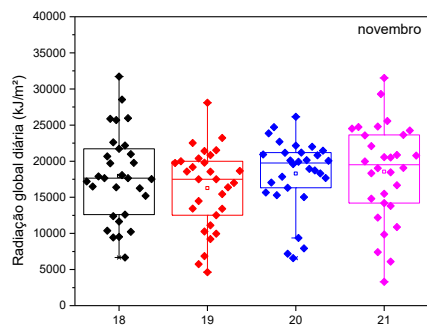
s) Outubro – dados completos

t) Outubro – dados limpos



u) Novembro – dados completos

v) Novembro – dados limpos



w) Dezembro – dados completos

x) Dezembro – dados limpos

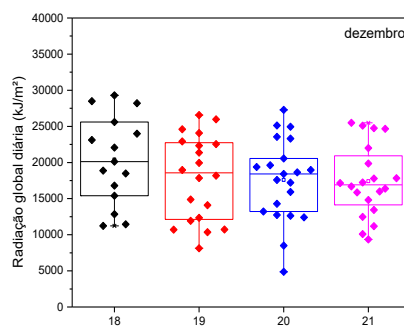
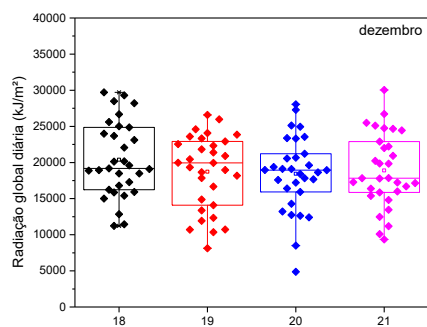


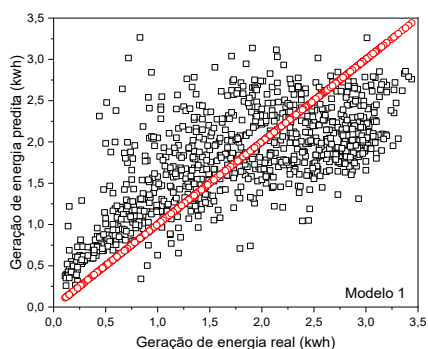
Figura I.1: Tratamento de dados

## Apêndice II

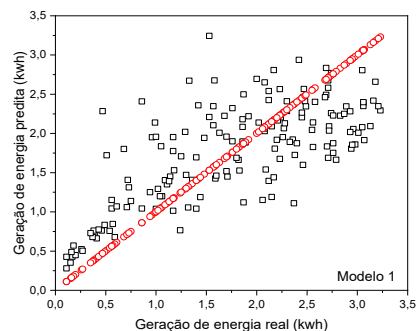
Os dados preditos foram comparados aos dados reais em gráficos para cada um dos modelos de regressão, incluindo regressões simples e múltiplas de diferentes ordens, para os conjuntos de dados de regressão e validação. Os gráficos da Figura II.1 e da Figura II.2 apresentam os resultados das previsões em relação aos dados reais, para as regressões simples e múltiplas, respectivamente, permitindo uma visualização clara do desempenho de cada modelo.

Os coeficientes de todos os modelos estão apresentados na Tabela II.1 e na Tabela II.2.

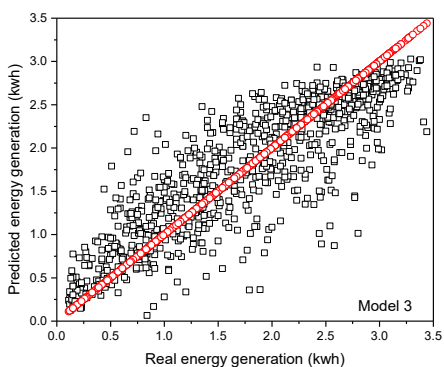
a) Ordem 1 (regressão)



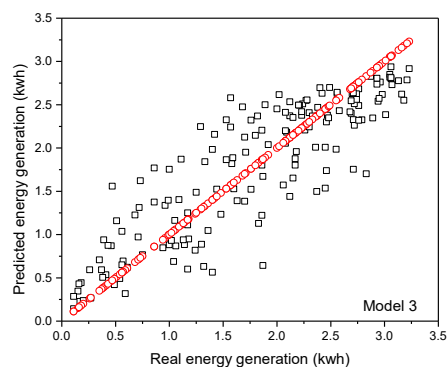
b) Ordem 1 (validação)



c) Ordem 3 (regressão)

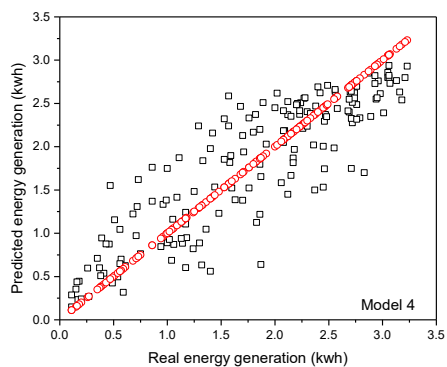
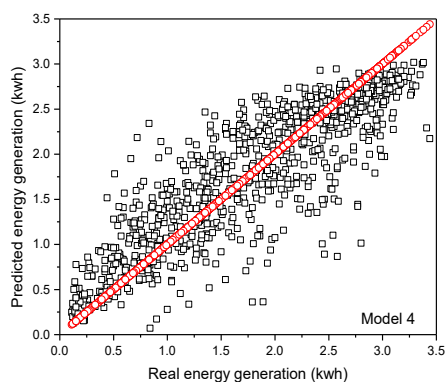


d) Ordem 3 (validação)



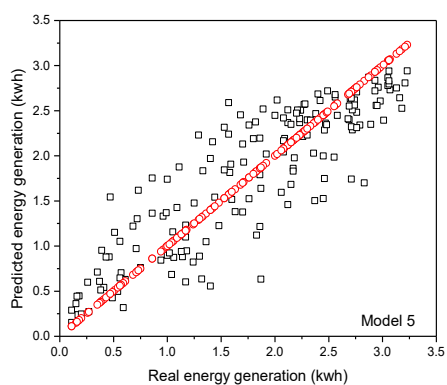
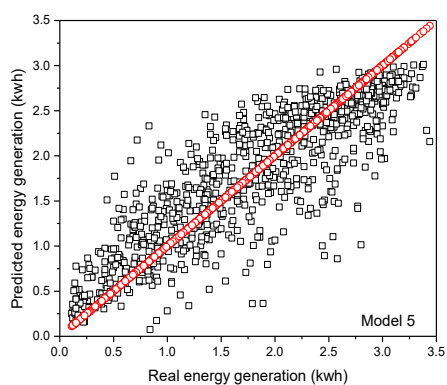
e) Ordem 4 (regressão)

f) Ordem 4 (validação)



g) Ordem 5 (regressão)

h) Ordem 5 (validação)



i) Ordem 6 (regressão)

j) Ordem 6 (validação)

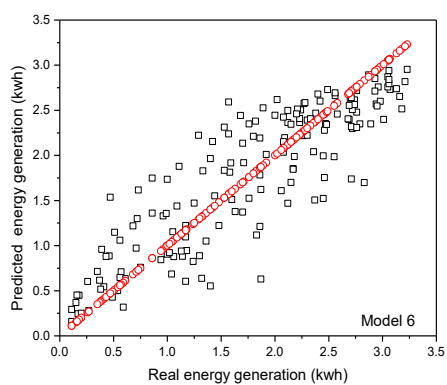
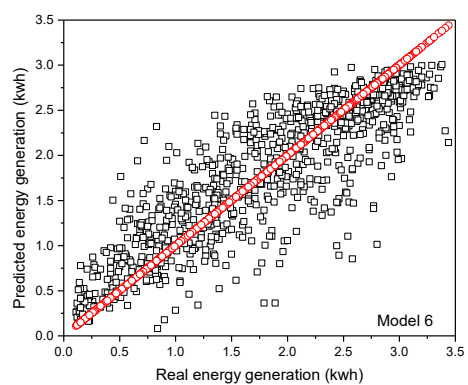
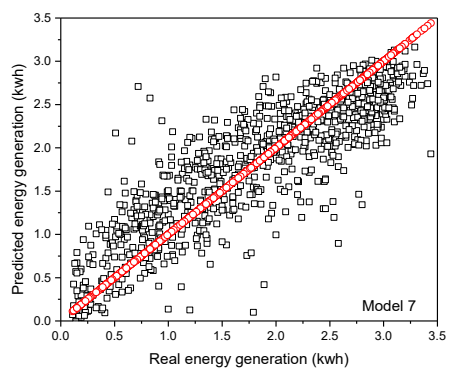
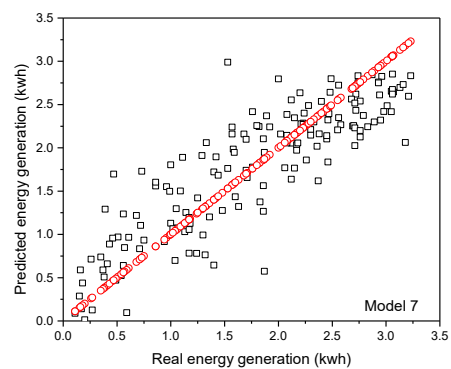


Figura II.1: Modelos de regressão simples

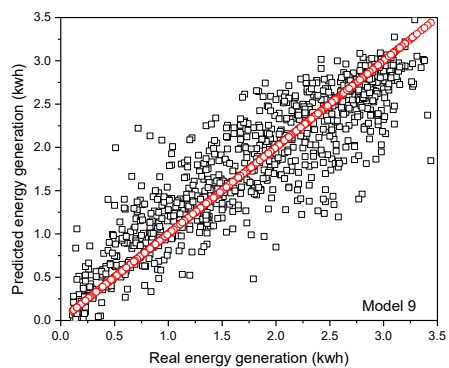
a) Ordem 1 (regressão)



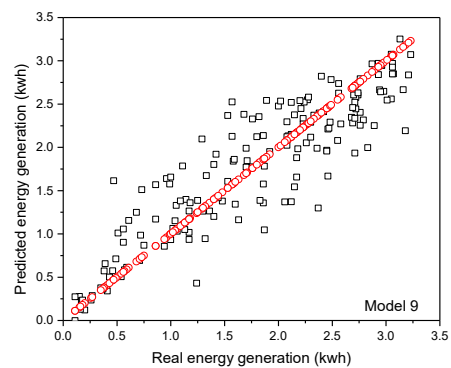
b) Ordem 1 (validação)



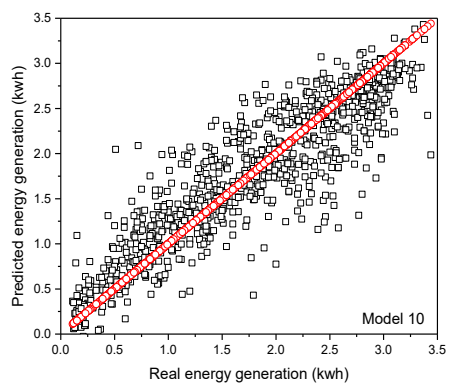
c) Ordem 3 (regressão)



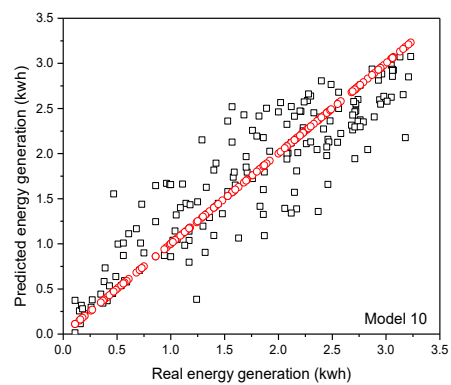
d) Ordem 3 (validação)



e) Ordem 4 (regressão)



f) Ordem 4 (validação)



g) Ordem 5 (regressão)



h) Ordem 5 (validação)



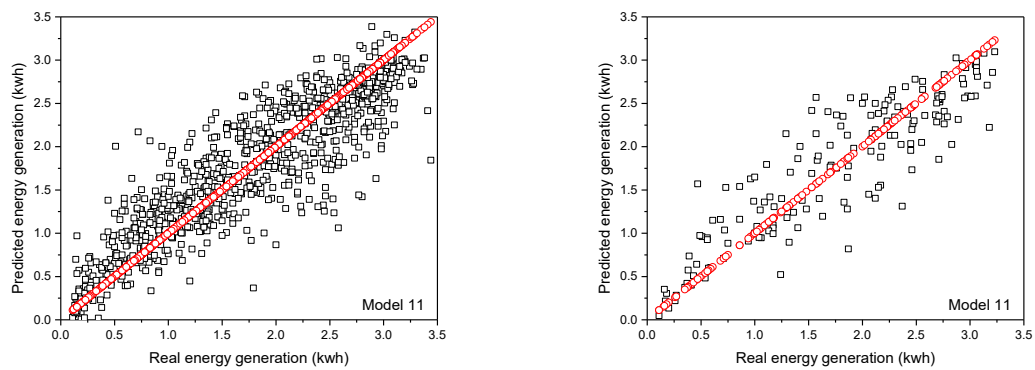


Figura II.2: Modelos de regressão múltipla

Tabela II.1: Coeficientes dos modelos de regressão simples

<i>Coeficiente</i>	<i>Modelo 1</i>	<i>Modelo 2</i>	<i>Modelo 3</i>	<i>Modelo 4</i>	<i>Modelo 5</i>	<i>Modelo 6</i>
<i>Intercepto <math>\beta_0</math></i>	-	-0,2069	-0,2026	-0,1978	-0,1928	-0,1873
<i>Variável <math>\beta_1</math></i>	$1,030 \times 10^{-4}$	$6,881 \times 10^{-3}$	$7,400 \times 10^{-6}$	$7,955 \times 10^{-9}$	$8,551 \times 10^{-12}$	$9,190 \times 10^{-15}$

Tabela II.2: Coeficientes dos modelos de regressão múltipla

<i>Coeficiente</i>	<i>Modelo 7</i>	<i>Modelo 8</i>	<i>Modelo 9</i>	<i>Modelo 10</i>	<i>Modelo 11</i>
<i>Intercepto <math>\beta_0</math></i>	0,7391	-	-1,483	-0,7876	-1,294
<i>Variável <math>\beta_1</math></i>	$9,295 \times 10^{-5}$	$8,716 \times 10^{-3}$	$-1,078 \times 10^{-3}$	$-2,149 \times 10^{-12}$	$1,052 \times 10^{-8}$
<i>Variável <math>\beta_2</math></i>	63,53	$2,703 \times 10^{-3}$	0,01022	-1364	$1,845 \times 10^{-5}$
<i>Variável <math>\beta_3</math></i>	-0,1552	$-2,785 \times 10^{-9}$	$-2,320 \times 10^{-11}$	$7,326 \times 10^{-13}$	$-2,998 \times 10^{-17}$
<i>Variável <math>\beta_4</math></i>	-3387	$7,952 \times 10^{-10}$	$1,021 \times 10^{-11}$	$6,202 \times 10^{-5}$	$1,049 \times 10^{-11}$
<i>Variável <math>\beta_5</math></i>	-34,77	$2,479 \times 10^{-3}$	$2,103 \times 10^{-5}$	$1,081 \times 10^{-8}$	
<i>Variável <math>\beta_6</math></i>	$1,599 \times 10^{-5}$	$4,577 \times 10^6$	$4,813 \times 10^8$	0,01219	
<i>Variável <math>\beta_7</math></i>	0,03565	$5,165 \times 10^{-3}$	-8,760	$2,877 \times 10^{-4}$	
<i>Variável <math>\beta_8</math></i>		$-6,057 \times 10^{-3}$	-3393	-216,1	
<i>Variável <math>\beta_9</math></i>		-1,181	$1,776 \times 10^{-4}$	0,2228	
<i>Variável <math>\beta_{10}</math></i>		-852,0		$8,803 \times 10^{-13}$	
<i>Variável <math>\beta_{11}</math></i>		-0,1134		$-1,894 \times 10^{-6}$	
<i>Variável <math>\beta_{12}</math></i>		$2,958 \times 10^4$		$-2,620 \times 10^{-5}$	
<i>Variável <math>\beta_{13}</math></i>		-31,84		$-8,177 \times 10^{-8}$	
<i>Variável <math>\beta_{14}</math></i>				0,1104	
<i>Variável <math>\beta_{15}</math></i>				$1,486 \times 10^5$	