



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**“ANÁLISE TÉCNICA E ECÔNOMICA DE FACHADAS VENTILADAS
FOTOVOLTAICAS”**

Relatório Final apresentado à disciplina
de “Trabalho de Conclusão de Curso” de caráter
obrigatório da graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito parcial de aprovação na mesma

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Rüther
Coorientadora: Profa. Dra. Clarissa Debiazi
Zomer

Aluno: Nikolas dos Santos Barbosa
Matrícula: 15100544

Florianópolis
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Barbosa, Nikolas dos Santos
Análise técnica e econômica de fachadas ventiladas
fotovoltaicas / Nikolas dos Santos Barbosa ; orientador,
Ricardo Rüther, coorientadora, Clarissa Debiazi Zomer, 2022.
99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (gradua  o) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Gradua  o em Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. BIPV. 3. Fachada. 4. Energia
Solar. 5. Sustentabilidade. I. Rüther, Ricardo. II. Zomer,
Clarissa Debiazi. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Gradua  o em Engenharia Civil. IV. Título.

Nikolas dos Santos Barbosa

ANÁLISE TÉCNICA E ECÔNOMICA DE FACHADAS VENTILADAS FOTOVOLTAICAS

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Civil

Florianópolis, 07 de março de 2022.



Documento assinado digitalmente
Liane Ramos da Silva
Data: 10/03/2022 08:04:03-0300
CPF: 458.746.032-04
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Liane Ramos da Silva, Dr^a.

Coordenador do Curso



Documento assinado digitalmente
Ricardo Ruther
Data: 09/03/2022 07:50:35-0300
CPF: 388.223.850-04
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Ricardo Ruther, Dr.

Orientador

UFSC



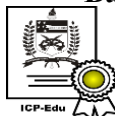
Documento assinado digitalmente
CLARISSA DEBIAZI ZOMER
Data: 09/03/2022 10:58:11-0300
CPF: 008.387.779-70
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Clarissa Debiazi Zomer, Dr^a.

Coorientadora

UFSC

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Roberto Lamberts
Data: 09/03/2022 08:18:39-0300
CPF: 294.003.840-68
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Roberto Lamberts, Dr.

Avaliador

UFSC



Documento assinado digitalmente
ANA KELLY MARINOSKI RIBEIRO
Data: 08/03/2022 21:52:24-0300
CPF: 040.815.179-08
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Ana Kelly Marinoski, Dr^a.

Avaliadora

UFSC

AGRADECIMENTOS

Primeiro, gostaria de agradecer aos meus pais, pelo amor incondicional e suporte, que me fizeram chegar até este momento. Nenhuma forma de agradecimento será suficiente para demonstrar o tamanho da minha gratidão, amo vocês do tamanho do universo.

A minha família, por me transmitir orgulho, confiança, amor, e compreensão todas as vezes que não pude compartilhar da companhia de vocês. Em especial ao Vô Brasil e ao Tio Mano, de quem eternamente sentirei saudades.

Aos meus orientadores, por me abrirem as portas do laboratório e dessa forma transformar os rumos da minha carreira como engenheiro. Jamais esquecerei do dia em que esta oportunidade me foi oferecida. Agradeço também a liberdade e confiança depositadas em mim ao decorrer deste trabalho.

Aos colegas do laboratório Fotovoltaica-UFSC, que me acolherem na equipe e compartilharam comigo muito conhecimento. Pelo companheirismo nos momentos de trabalho duro, nos momentos de descontração e pelo apoio recebido na realização deste trabalho, o qual não seria possível sem a ajuda de vocês.

Aos meus colegas de curso, pela parceria nos momentos difíceis, pela amizade em momentos de felicidade e pelos momentos de reflexão que geraram discussões tão produtivas quanto o momento permitia. São nos momentos de descontração e ócio que surgem as ideias mais criativas.

Finalmente, gostaria de agradecer a oportunidade de estar vivo e poder desfrutar cada instante da minha existência, por poder errar e aprender com os meus erros, por poder sentir tristeza e felicidade e por poder conviver com tantas pessoas especiais que fazem minha jornada ser tão prazerosa!

Obrigado a todas as pessoas que de alguma forma influenciaram este trabalho.

Com carinho, Nikolas.

“E o que me importa é não estar vencido”

Sangue Latino – Secos & Molhados

RESUMO

Com o constante aumento da parcela de fontes de energia renováveis na matriz energética global, as edificações tendem a desempenhar um papel importante neste cenário de transição energética, dado que são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 49% da energia elétrica mundial. A instalação de sistemas solares fotovoltaicos integrados ao envelope das edificações melhora o seu desempenho térmico ao mesmo tempo em que permite a geração de energia elétrica, deste modo, consomem menos energia e geram parte da energia que necessitam no mesmo local de consumo, tornando-as mais sustentáveis. Este trabalho apresenta a avaliação de um sistema solar fotovoltaico instalado como um elemento BIPV (*Building Integrated-Photovoltaics*) sob a condição de fachada ventilada. Foram calculados o rendimento energético (*Energy Yield*) e a taxa de desempenho (*Performace Ratio*) de dois sistemas fotovoltaicos, considerando suas diferentes topologias construtivas, além da influência das variáveis ambientais na taxa de desempenho dos sistemas. Também foi avaliado o impacto destes elementos nos ganhos térmicos da edificação, através de dados de temperatura coletados em diferentes pontos da parede influenciados pelos sistemas. Por fim, foi avaliada a viabilidade econômica para esse tipo de sistema através do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Descontado, considerando três cenários diferentes.

Palavras-chave: BIPV; Fachada; Energia Solar; Sustentabilidade

ABSTRACT

With the increase in the share of renewable energy sources in the global energy matrix, buildings tend to play an important role in this energy transition scenario, since they are responsible for the consumption of approximately 49% of the global electrical energy. The installation of photovoltaic solar systems integrated into the building envelope improves their thermal performance while allowing the generation of electric energy, thus consume less energy and generating part of the energy they need in the consumption site, making them more sustainable. This work presents the evaluation of a photovoltaic solar system installed as a BIPV (Building Integrated-Photovoltaics) element under the ventilated facade condition. The energy yield and the performance ratio of two photovoltaic systems were calculated, considering their different constructive topologies, considering the influence of environmental variables on the performance ratio of the systems. The impact of these elements on the building's thermal gains was also evaluated, through temperature data collected at different points on the wall influenced by the systems. Finally, the economic feasibility for this type of system was evaluated by calculating the Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Discounted Payback, considering three different scenarios.

Keywords: BIPV; Facade; Solar energy; sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Preço médio de módulos fotovoltaicos por tecnologia e local para o período de janeiro de 2010 a janeiro de 2020 (acima) e preço médio por mercado no período de 2013 a 2019 (abaixo).	10
Figura 2 – Consumo de energia primária mundial por fonte.	15
Figura 3 – Parcela de geração de energia elétrica mundial por fonte.	16
Figura 4 – Cenário otimista para o consumo global de energia em 2050.....	18
Figura 5 – Capacidade de geração instalada global por fonte, projeção considerando as atuais políticas governamentais, 2000-2040	22
Figura 6 – Irradiação Global Horizontal no Brasil	24
Figura 7 – Irradiação Global Horizontal na Alemanha.....	25
Figura 8 – Elementos de um sistema solar fotovoltaico	26
Figura 9 – Primeiro Sistema fotovoltaico conectado à rede e integrado a uma edificação do Brasil, sistema de 2kWp.	28
Figura 10 – Arranjo de módulos em série e paralelo	29
Figura 11 – Impacto ambiental de uma usina solar fotovoltaica, comparativo entre 25/01/2013 (acima) e 05/01/2021 (abaixo).....	32
Figura 12 – Protótipo de uma fachada utilizando módulos BIPV	34
Figura 13 – Módulos semitransparentes	35
Figura 14 – Possibilidades de instalação de módulos fotovoltaicos em edificações.	38
Figura 15 – Umwelt Arena Switzerland	40
Figura 16 – Frodeparken.....	41
Figura 17 – Copenhagen International School.....	42
Figura 18 – Fachada fotovoltaica.....	43
Figura 19 – Comparação entre ganho de calor pela parede com fachada fotovoltaica (acima) e parede nua (abaixo).....	44
Figura 20 – Influência da velocidade do vento na temperatura e no <i>Energy Yield</i> e um sistema de fachada fotovoltaica.	45
Figura 21 – Influência da direção do vento na temperatura e no <i>Yield</i> de um sistema de fachada fotovoltaica.	46
Figura 22 – Mecanismo de fixação de módulos fotovoltaicos BIPV	47
Figura 23 – Elementos de fixação e métodos de encaixe de módulos BIPV.....	48

Figura 24 – Divisão do sistema conforme inversores.....	49
Figura 25 – Sistema de fachada ventilada (à esquerda) e estanque (à direita) de módulos fotovoltaicos instalada no Fotovoltaica – UFSC em Florianópolis, Brasil.....	51
Figura 26 – Localização do sistema em Florianópolis, Santa Catarina	52
Figura 27 – Porcentagem dos dias com dados de irradiância disponíveis em cada mês.	54
Figura 28 – Porcentagem dos dias com dados de geração disponíveis em cada mês.....	55
Figura 29 – Porcentagem dos dias com dados de velocidade e direção do vento disponíveis em cada mês.....	56
Figura 30 – Porcentagem dos dias com dados de temperatura ambiente disponíveis em cada mês.....	57
Figura 31 – Comparação da disponibilidade de dados em relação ao mesmo período de tempo	58
Figura 32 – Porcentagem dos dias com dados de temperatura dos módulos e das paredes relacionadas a eles disponíveis em cada mês.....	59
Figura 33 – Porcentagem dos dias com dados de temperatura da parede nua disponíveis em cada mês.....	60
Figura 34 – Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) 2012 - 2021	61
Figura 35 – <i>Energy Yield</i> mensal de ambas as fachadas para o período de um ano	65
Figura 36 – PR mensal de ambas as fachadas para o período de um ano	66
Figura 37 – Orientação do vento em relação a fachada	67
Figura 38 – Predominância da direção dos ventos.....	68
Figura 39 – Velocidade média do vento de acordo com sua direção.....	70
Figura 40 – Variáveis ambientais x PR dos sistemas	71
Figura 41 – Velocidade média do vento em relação à recorrência	72
Figura 42 – Foto da fachada feita com câmera termográfica.....	73
Figura 43 – Temperatura média mensal dos elementos relacionados a Fachada S1	75
Figura 44 – Temperatura média mensal dos elementos relacionados a fachada S2	77
Figura 45 – Temperatura média mensal da parede externa da edificação	78
Figura 46 – Temperatura média mensal da parede interna da edificação	79
Figura 47 – Geração de energia	80
Figura 48 – Taxa interna de Retorno (TIR)	81
Figura 49 – Valor Presente Líquido (VPL).....	82
Figura 50 – Payback Descontado.....	83

SUMÁRIO

1.	Introdução	9
1.1.	Aspectos Iniciais	9
1.2.	Objetivos	13
1.2.1.	Objetivo Geral	13
1.2.2.	Objetivos Específicos	13
2.	Revisão Bibliográfica	14
2.1.	Fontes renováveis de energias	14
2.2.	Edificações e Sustentabilidade	19
2.3.	Energia Solar Fotovoltaica	22
2.3.1.	Sistemas Solares Fotovoltaicos	26
2.3.2.	Módulos fotovoltaicos	33
2.3.3.	Desempenho dos Sistemas Fotovoltaicos	35
2.4.	Building Integrated-Photovoltaics (BIPV) systems	37
2.4.1.	Fachadas Fotovoltaicas	42
3.	Método	50
3.1.	Análise Elétrica	54
3.1.1.	Radiação Solar	54
3.1.2.	Geração de energia ao longo do tempo	55
3.1.3.	Rendimento Energético (<i>Energy Yield</i>)	55
3.1.4.	Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio - PR</i>)	56
3.1.5.	Variáveis Ambientais	56
3.2.	Análise Térmica	59
3.2.1.	Comparação entre as diferentes topologias	60
3.3.	Análise Econômica	61
3.3.1.	Valor Presente Líquido (VPL)	61

3.3.2.	Taxa Interna de Retorno (TIR)	62
3.3.3.	Payback Descontado	63
4.	Discussão dos Resultados	64
4.1.	Análise Elétrica	64
4.1.1.	Influência ambiental	66
4.2.	Análise Térmica	75
4.2.1.	Fachada com o Sistema S1	75
4.2.2.	Fachada com o Sistema S2	76
4.2.3.	Comparação com a Parede Nua	77
4.3.	Análise Econômica	80
5.	Considerações Finais	84
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	86
	Referências Bibliográficas	87
	Anexo A – Datasheet Módulo Fotovoltaico	92
	Anexo B – Datasheet Inversor	94
	Anexo C – Tabela com valores máximos, mínimos e médias das medidas de temperatura para cada elemento	96

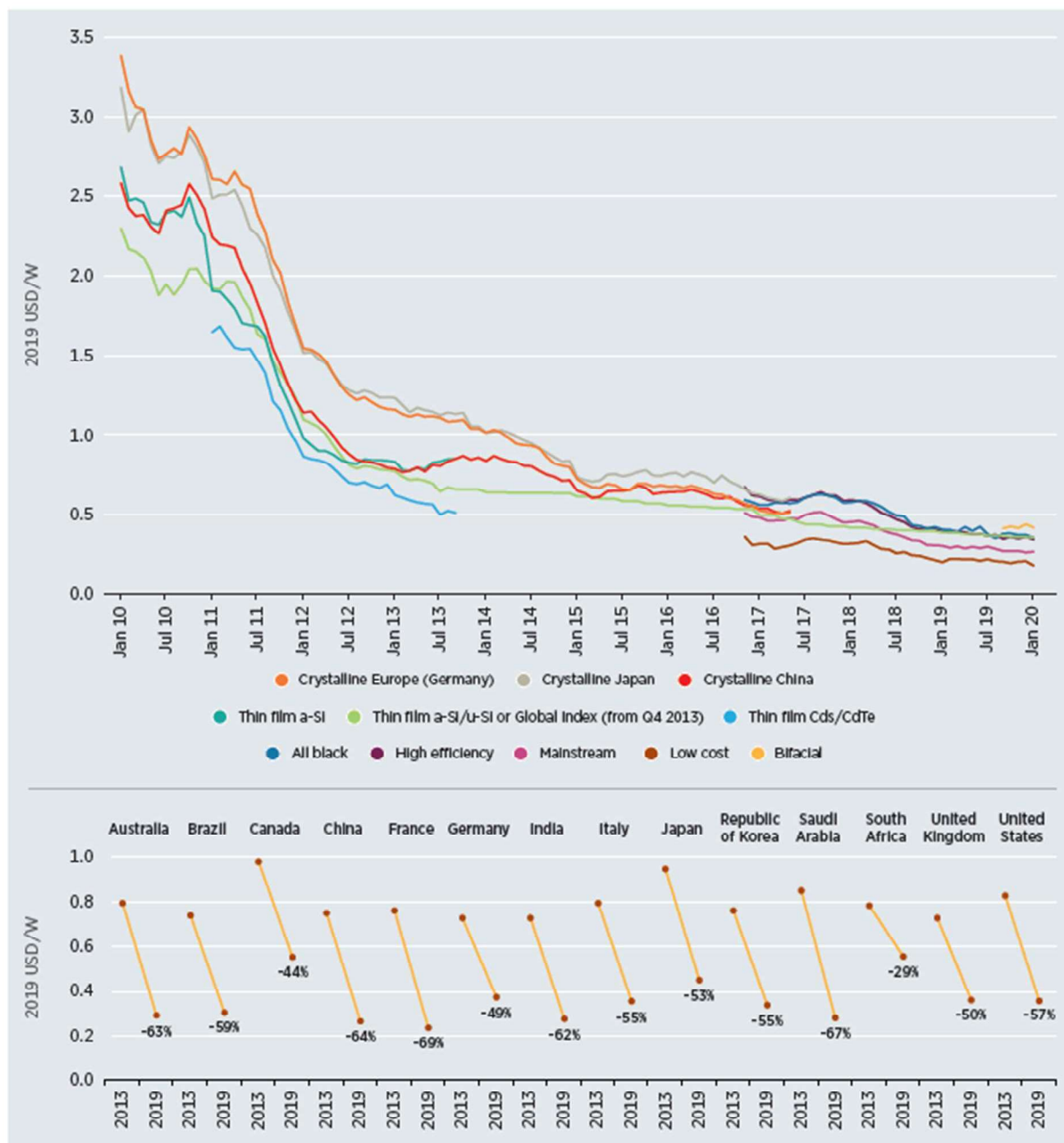
1. Introdução

1.1. Aspectos Iniciais

Na tentativa de transpor os impactos negativos no meio ambiente, causados pela utilização de fontes de energia de origem fóssil, diferentes países têm buscado políticas públicas de incentivo às energias renováveis, que supram a crescente demanda por energia elétrica, sem esgotar os recursos do planeta. Nesse contexto destaca-se a energia solar fotovoltaica, que através do efeito fotovoltaico converte energia solar diretamente em energia elétrica, sem a emissão de quaisquer tipos de poluentes (SOLANGI et al., 2011).

O preço dos módulos fotovoltaicos, principal componente do sistema, vem sofrendo uma queda nos últimos anos. Em 2020 este custo apresentou uma diminuição de 90% em relação a 2009, sendo que no Brasil, entre 2013 e 2019, a queda foi de 59% (IRENA, 2020a). A Figura 1 apresenta um gráfico com os preços dos módulos fotovoltaicos por tecnologia e mercado local.

Figura 1 – Preço médio de módulos fotovoltaicos por tecnologia e local para o período de janeiro de 2010 a janeiro de 2020 (acima) e preço médio por mercado no período de 2013 a 2019 (abaixo).



Fonte: (IRENA, 2020a)

A diminuição nos preços dos módulos fotovoltaicos contribuiu para uma redução dos custos de instalação desse tipo de sistema, tornando a energia solar acessível aos usuários da rede elétrica. Somando esta redução à abertura do Brasil à geração distribuída, através da

resolução normativa REN 482 de 2012, foi percebido um expressivo aumento no número de unidades consumidoras que usufruem dessa tecnologia, chegando a um total de 816.961 unidades em fevereiro de 2022 (ABSOLAR, 2022).

Por possuírem uma característica modular, os sistemas fotovoltaicos podem ser incorporados ao envelope das edificações, podendo desempenhar dupla função ao revestir e gerar energia em fachadas, telhados, brises entre outros elementos arquitetônicos. Assim a geração de energia ocorre no mesmo local de consumo, eliminando a necessidade de longas linhas de transmissão e distribuição, evitando perdas de energia (RÜTHER, 2004).

Considerando os locais de integração, os telhados se apresentam como um dos locais mais adequados para a integração por serem grandes áreas que não são utilizadas para outros fins, normalmente pouco sombreadas, ou não sombreadas e que permitem que os módulos sejam posicionados de maneira adequada, aproveitando a irradiância local disponível sem perdas consideráveis (DEBBARMA; SUDHAKAR; BARENDAR, 2017).

Em grandes centros urbanos, onde há um maior número de pessoas vivendo em uma mesma porção de terreno, ocorre a verticalização das edificações. Deste modo, a área de telhado passa a não ser suficiente para que a geração solar supra a demanda por energia elétrica. Assim, outras superfícies da edificação se tornam mais atrativas para a integração, como por exemplo as fachadas (BRITO et al., 2017).

Em edifícios altos, com vários pavimentos, a área de fachada disponível é consideravelmente maior do que a área de telhado. Portanto esta área pode ser considerada como uma alternativa válida para a integração, constituindo um elemento importante na busca por uma sistema que supra a demanda por energia elétrica, com a possibilidade de melhorar também o seu desempenho térmico (LAU et al., 2018).

Mesmo que existam perdas consideráveis de irradiação, que giram em torno de 50% quando o módulo é instalado na vertical, com inclinação de 90°, para regiões tropicais, com baixas latitudes, considerando estas perdas, a porção de irradiância incidente no módulo é maior do que em módulos idealmente posicionados em regiões de altas latitudes. Também é importante notar que para regiões de baixa latitude, módulos posicionados nas fachadas leste e oeste, recebem em torno de 5%-10% mais irradiação do que fachadas orientadas com a face para a linha do equador (PORTOLAN DOS SANTOS; RÜTHER, 2014).

As edificações representam uma peça-chave rumo à sustentabilidade e eficiência energética. Em 2018 este setor foi responsável pelo consumo de aproximadamente 49% da

energia elétrica do mundo, o setor residencial foi responsável por 27%, enquanto que prédios comerciais e públicos consumiram 22% (REN21, 2019).

Além da geração de energia elétrica no local de consumo, a instalação de sistemas fotovoltaicos em fachadas pode trazer benefícios térmicos, tanto para os sistema fotovoltaico quanto para a edificação em si, visto que fachadas ventiladas diminuem a incidência direta da radiação solar sobre as paredes do edifício e o espaço entre os módulos e a parede externa permite um fluxo de ar que contribui para a diminuição da temperatura da parte de trás dos módulos (IRSHAD et al., 2019).

Não existem somente vantagens energéticas da instalação de sistemas solares em fachadas; as camadas duplas de isolamento também contribuem para o isolamento acústico entre o ambiente interno e externo da edificação (GONÇALVES et al., 2021).

Concomitantemente ao interesse do consumidor final em gerar sua própria energia e a tendência global de edificações energeticamente eficientes, novos produtos voltados para a integração de sistemas solares em edificações surgem, permitindo maior versatilidade e adaptação dos sistemas solares aos projetos arquitetônicos. Dimensionar um sistema fotovoltaico integrado à edificação durante a fase de projeto permite a supressão de erros que normalmente são encontrados quando os sistemas são aplicados em edificações já existentes, o que leva a um melhor desempenho do sistema solar fotovoltaico (ZOMER et al., 2020a).

Edifícios que possuem um sistema de geração de energia elétrica possuem uma maior eficiência energética, e vão de encontro à ideia de edifícios de energia quase zero ou *Nearly Zero Energy Building (NZEB)*. Em países como Canadá e Estados Unidos, já é possível perceber uma tendência na execução desse tipo de edificação; entre 2017 e 2018 houve um aumento de 59% na execução de NZEBs, somando as construções finalizadas e as que ainda estavam em fase de projeto durante este período (REN21, 2021).

Este trabalho busca analisar a viabilidade construtiva e o potencial de geração de energia de sistemas fotovoltaicos integrados a fachadas de edificações, tendo como objeto de estudo sistemas fotovoltaicos em operação, instalados no Laboratório Fotovoltaica UFSC (www.fotovoltaica.ufsc.br), levando em consideração a geração de energia, a temperatura dos elementos relacionados ao sistema e o impacto destes na temperatura de elementos da edificação.

1.2. Objetivos

Nessa seção são discutidos os objetivos do trabalho, estratificados em gerais e específicos.

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar aspectos técnicos relacionados à geração de energia, o impacto no desempenho energético da edificação e a viabilidade econômica da integração de módulos fotovoltaicos aplicados como elemento construtivo constituinte de fachadas ventiladas a partir de dados coletados em dois sistemas instalados no Laboratório Fotovoltaica – UFSC, considerando sua topologia construtiva.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Coleta e tratamento de dados de geração, temperatura dos módulos, da parede e do ambiente interno e dados climáticos;
- b) Avaliação da performance dos sistemas fotovoltaicos;
- c) Comparação dos desempenhos das duas topologias de fachada;
- d) Cruzamento de dados de performance com variáveis ambientais;
- e) Avaliação do impacto da fachada em relação aos ganhos térmicos da edificação para cada tipologia;
- f) Avaliação da viabilidade econômica da instalação de um sistema de fachada fotovoltaica.

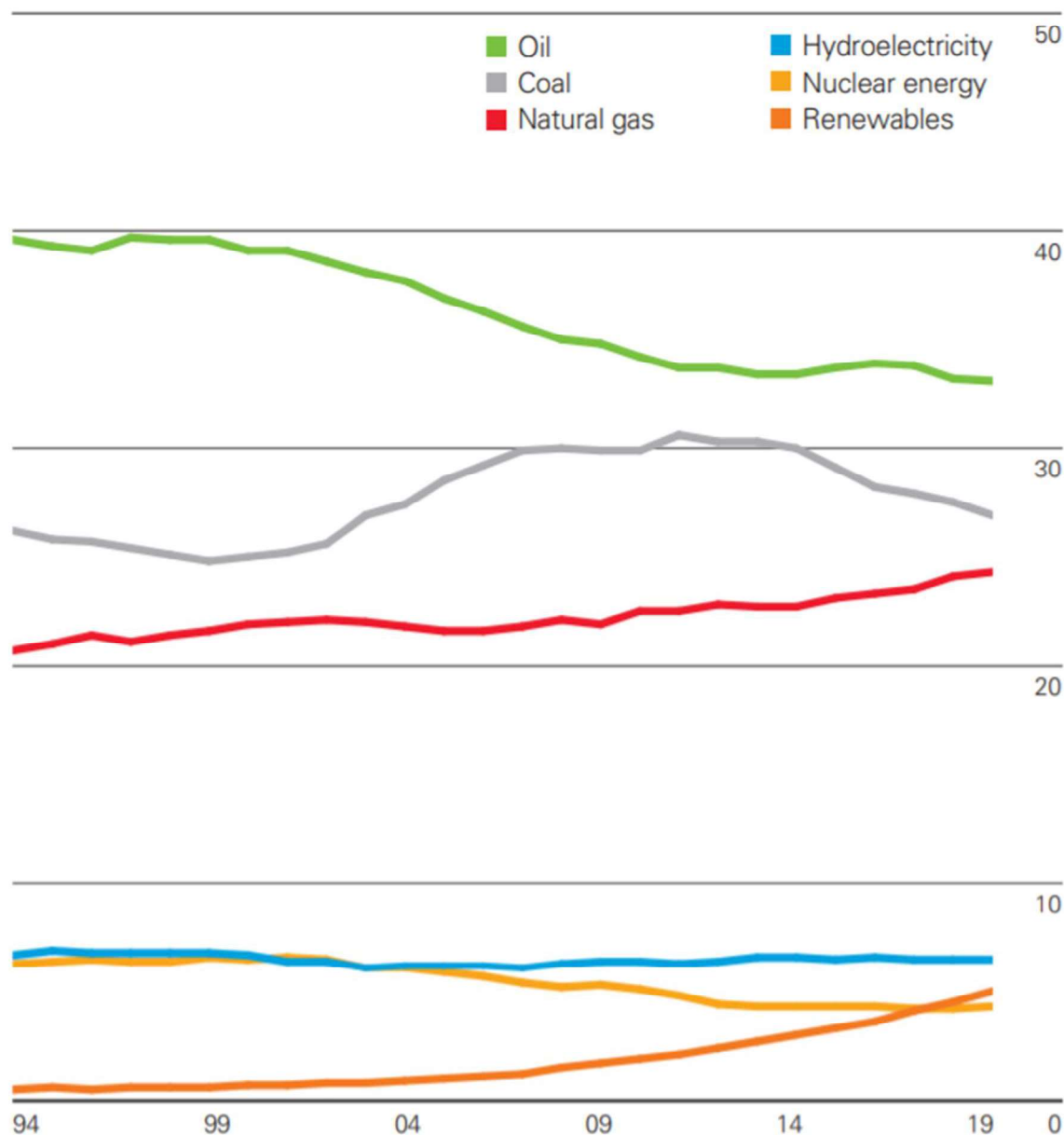
2. Revisão Bibliográfica

Essa seção contém a revisão de literatura que auxiliou no desenvolvimento do trabalho.

2.1. Fontes renováveis de energias

Durante a maior parte da história humana, o homem utilizou a queima de elementos encontrados na natureza para a geração de energia. Até os dias de hoje as principais fontes de energia provêm de recursos não-renováveis. Em 2019, esta realidade continuava imutável, com a matriz energética mundial composta majoritariamente por fontes fósseis, tendo como maiores parcelas o petróleo, com 33,1% de participação, seguida do carvão e gás natural, com 27% e 24,2% respectivamente, como mostra a Figura 2. Juntos, estes três produtos somam aproximadamente 84,3% de toda a energia consumida no mundo. É importante destacar que as fontes renováveis vem aumentando sua cota de participação e já ultrapassaram a fonte nuclear, chegando a 5% de participação ao final do ano de 2019 (BP, 2020).

Figura 2 – Consumo de energia primária mundial por fonte.



Fonte: (BP, 2020)

As consequências do uso de combustíveis fósseis para a geração de energia são perceptíveis ao redor do mundo. O resultado direto dessa utilização é o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, que tem gerado um desequilíbrio ambiental de amplitude global, causando impactos negativos no funcionamento dos ecossistemas e por consequência na economia e na qualidade de vida das pessoas (IPCC, 2019).

Nas últimas décadas, esforços multilaterais têm feito governos do mundo todo buscar, através de políticas públicas, soluções e estratégias para mitigar os efeitos do aquecimento global. Com diferentes abordagens adotadas para diversas regiões do globo, os incentivos às

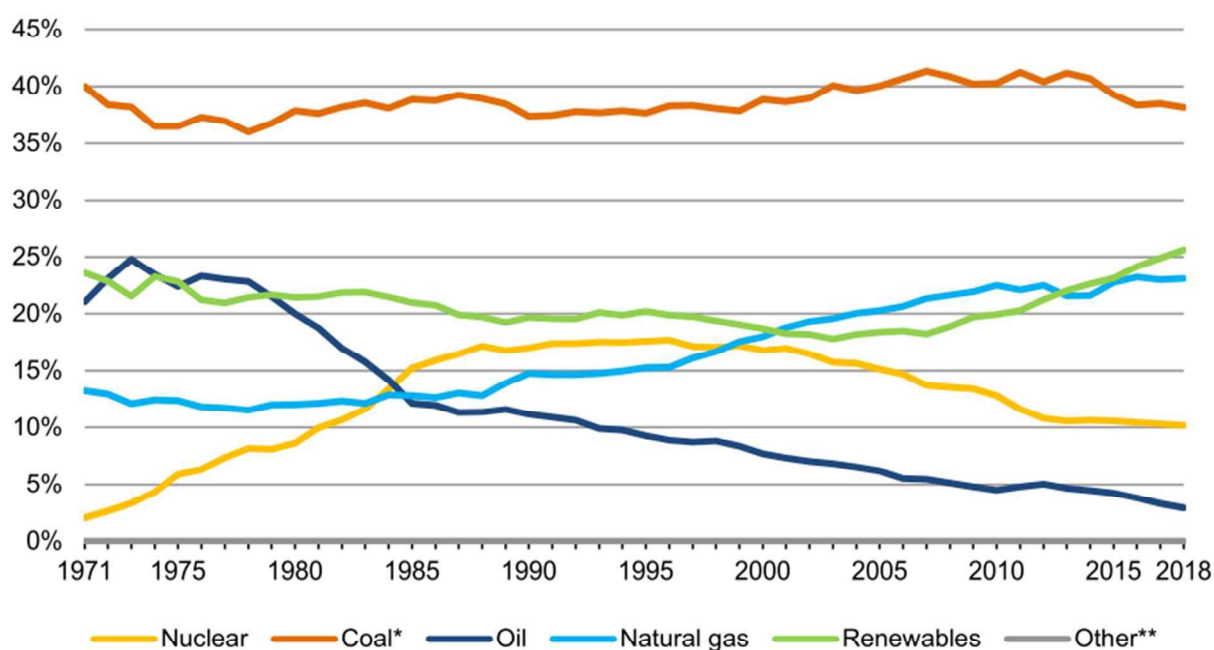
energias renováveis tem conseguido aumentar a participação destas fontes na matriz energética dos países, principalmente com relação à geração de energia elétrica (SOLANGI et al., 2011).

As esperanças para reverter este quadro têm sido depositadas em três principais fontes de energia renovável: a energia solar fotovoltaica, a energia eólica e a energia hidroelétrica (JACOBSON; DELUCCHI, 2011). Estas três tecnologias representam juntas cerca de 23,6% da geração total de energia elétrica no mundo. Nos últimos anos apresentaram um relevante crescimento, puxado pelas fontes solar e eólica, o que demonstra que existe um interesse global por fontes renováveis de energia. A energia solar fotovoltaica apresentou um crescimento de 24,3% em 2019, seguido da energia eólica, com 12,6% (BP, 2020).

No Brasil, cerca de 83% das fontes de energia elétrica são de origem renovável, sendo que a energia hidroelétrica é a principal fonte, com 59,3% de participação. A energia eólica e a solar fotovoltaica possuem 11,3% e 7,7% de participação na matriz elétrica nacional, respectivamente. Com a eólica apresentando um crescimento de 15,5% em 2019 e a solar fotovoltaica um crescimento de 92%, no mesmo período (ABSOLAR, 2021).

Embora o Brasil tenha boa parcela de sua matriz elétrica proveniente de fontes renováveis, esta característica não é representativa quando analisada a realidade global, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Parcela de geração de energia elétrica mundial por fonte.



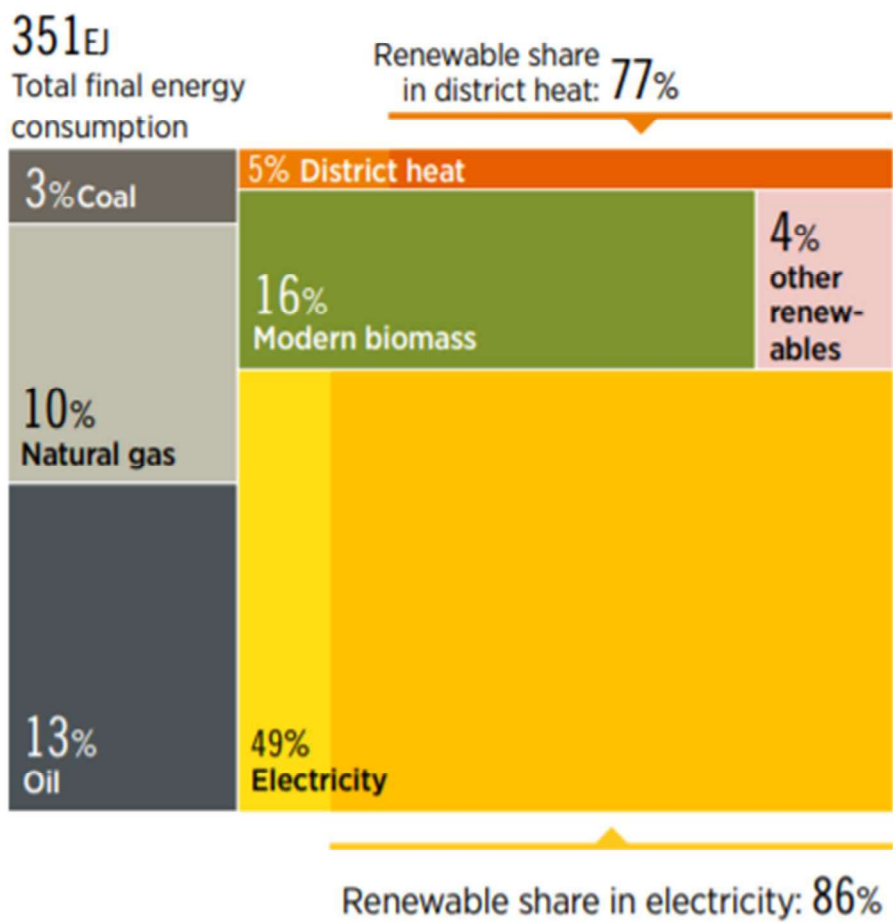
Fonte: (IEA, 2020a)

A geração de energia elétrica a partir do carvão continua sendo o recurso dominante para a geração de energia elétrica global. Apesar disso, as fontes renováveis vêm ganhando espaço, aumentando sua participação de forma constante desde 2007.

Nos setores residencial, comercial e público, as edificações, são responsáveis por consumir cerca de 49% dessa energia, sendo, portanto, uma área chave no processo de descarbonização da matriz elétrica mundial. A instalação de sistemas de geração de energia elétrica integrados às edificações, principalmente os sistemas solares fotovoltaicos, e especialmente quando associados a sistemas de armazenamento de energia, apresentam potencial para suprir total ou parcialmente a demanda por energia elétrica das edificações, contribuindo na transição para uma matriz energética mais sustentável (PETRICHENKO; ÜRGE-VORSATZ; CABEZA, 2019).

Portanto a parcela de consumo, a partir de fontes renováveis a ser ocupada no futuro, tende a ser composta majoritariamente por fonte renováveis, não somente para suprir a crescente demanda por energia, mas também para atender a eletrificação de setores que atualmente não utilizam energia elétrica, como os veículos elétricos, por exemplo. Em um cenário otimista, fontes renováveis, podem chegar a ser responsáveis por 50% de toda a energia consumida mundialmente, principalmente a partir das fontes solar e eólica, chegando a suprir 86% do consumo elétrico global. A Figura 4 apresenta o cenário otimista de consumo por fontes de energia para o ano de 2050.

Figura 4 – Cenário otimista para o consumo global de energia em 2050.



Fonte: (IRENA, 2020b)

2.2. Edificações e Sustentabilidade

Dentre os principais objetivos estabelecidos pelo acordo de Paris, o qual entrou em vigor em 2016, está o que estabelece um esforço conjunto para que a elevação da temperatura global se mantenha abaixo dos 2°C, tentando limitá-la a 1,5°C. Não somente isso, também estabelece o objetivo de se atingir a neutralidade de emissão de gases de efeito estufa em algum momento da segunda metade do século 21 (PARIS AGREEMENT, 2015).

Para alcançar estes objetivos o setor da construção tem sido alvo de políticas que estimulam o desenvolvimento de edificações com baixo impacto ambiental, com edificações que consumam energia de maneira mais eficiente, orientando esta área para um contexto de edificações sustentáveis, que obtenham toda a energia necessária para o seu funcionamento de fontes renováveis e que preferencialmente gerem esta energia no local de consumo (LASKI; BURROWS, 2017).

Um dos modelos conhecidos são os chamados Edifícios de Energia Zero, do inglês *Zero Energy Building (ZEB)*, ou ainda Edifícios de Energia quase Zero, do inglês *Nearly Zero Energy Building (NZEB)*, que utilizam, em um primeiro momento, estratégias que buscam diminuir o consumo energético da edificação, reduzindo suas cargas térmicas e utilizando estratégias passivas que melhoram as condições ambientais do interior da edificação, sem prejudicar o ambiente externo. Para buscar a neutralidade energética, estes edifícios utilizam fontes de energia renovável que supram, parcialmente ou totalmente, a demanda por energia elétrica. Normalmente esse tipo de edificação possui sistemas fotovoltaicos integrados ao envelope da edificação para a geração de energia elétrica (DOE, 2015).

Na Europa, ao final do ano de 2020 entrou em vigor a regra que determina que todas as novas edificações devem ser no mínimo *NZEB*, seguindo as definições estabelecidas pela diretiva 2010/30/EU. Esta diretiva determinou parâmetros e regulamentações que visam a diminuição da geração de gases de efeito estufa por parte das edificações, direta ou indiretamente e estimula a proliferação de sistemas e materiais que tornem as construções mais eficientes, diminuindo seu impacto ambiental (EPBD, 2010).

Entre as iniciativas nacionais, estão o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), que classifica os edifícios de acordo com seu desempenho energético e atribui uma nota de acordo com a sua performance, fornecendo assim uma informação simplificada ao usuário, o que permite a este saber o desempenho da edificação sem a necessidade de conhecimentos técnicos. Na mesma linha, a NBR 15575 (ABNT, 2013),

estabelece critérios mínimos a serem atendidos pelas edificações, levando em consideração a zona bioclimática na qual o edifício está instalado.

Em um contexto urbano, existe a possibilidade de se estender a análise do balanço energético para um conjunto de edificações, fazendo com que um grupo de prédios ou residências atendam, em conjunto, a demanda energética do grupo em sua totalidade. Assim uma edificação que tenha um excedente de geração pode suprir o saldo negativo de outra, ou seja, a análise pode ser feita pra um grupo de edificações e não somente para uma edificação sozinha. Desta forma, residências com pouco espaço para a geração própria podem usufruir de uma fonte de energia próxima, sem ter de recorrer a grandes centrais geradoras, distantes do local de consumo (SCOGNAMIGLIO; MUSALL; RØSTVIK, 2012).

No Brasil a partir da Resolução Normativa (REN) 687 de 2015, atualização da REN 482 de 2012, mais modalidades de geração distribuída foram introduzidas, permitindo o surgimento de novos modelos de negócio e facilitando o acesso dos usuários às fontes renováveis. Dentre novas possibilidades estão o autoconsumo remoto, os empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras e a geração compartilhada. Com isso pessoas que antes não tinham acesso ou espaço físico suficiente para gerar sua própria energia, agora podem se unir em forma de cooperativas, para atenderem a demanda do grupo. O mesmo ocorre para condomínios, onde a geração do condomínio pode ser compensada entre os moradores ou atender a demanda do condomínio em si.

Além da geração própria, outro aliado são os sistemas de armazenamento de energia que são capazes de elevar a performance energética das edificações, a partir da diminuição das cargas de energia provenientes da rede. Estes sistemas demonstram que são capazes de melhorar o desempenho de edifícios NZEB, elevando sua classificação para ZEB. Este tipo de sistema possibilita a própria edificação armazenar o excedente de energia gerado durante o dia e utilizá-lo durante períodos sem geração, ou ainda utilizar a energia armazenada em períodos em que a tarifa de energia se encontre com um preço mais elevado (MEDVED; DOMJAN; ARKAR, 2021).

A partir da formação de cooperativas ou comunidades de geração de energia, onde os grupos geradores conectam-se na mesma rede de distribuição, agregando pequenas parcelas de geração de energia de diferentes fontes, ocorre a flexibilização do fornecimento de energia, podendo assim ser analisado do ponto de vista de uma usina virtual, com o potencial de transformar totalmente o setor elétrico (VAN SUMMEREN et al., 2020).

A possibilidade de ter uma fonte geradora de energia elétrica junto à unidade consumidora permite que as perdas com transmissão e distribuição sejam minimizadas. Levando em conta que os setores residencial, comercial e público somam juntos mais de 50% de todo o consumo de energia elétrica do Brasil, a instalação de sistemas fotovoltaicos integrados a estas edificações representaria uma diminuição significativa destas perdas (EPE, 2019; RÜTHER, 2004).

A geração solar fotovoltaica tem se destacado com relação às demais fontes renováveis. Em janeiro de 2022, a geração solar fotovoltaica ultrapassou a marca de 13 GW de potência instalada, no Brasil, sendo que desse valor, 34% se refere a geração centralizada, grandes usinas solares, e 66% a geração distribuída, separada em pequenas centrais geradoras. Destes valores também é importante destacar que o crescimento da geração distribuída (GD) foi de 82,3%, entre 2020 e janeiro de 2022, contra 49,9% das grandes usinas, o que demonstra que a GD tem estado em um ritmo mais forte de crescimento (ABSOLAR, 2022).

A GD é a geração de energia elétrica de forma descentralizada. Diferente do que ocorre atualmente, onde grandes usinas de larga escala geram quantidades significativas de energia, na GD, pequenas quantidades de energia são produzidas por diversos personagens do setor elétrico. Consome-se a própria demanda, injetando o excedente na rede. Essa modalidade coloca os consumidores em uma posição mais ativa do cenário de energia elétrica, permitindo que possuam mais poder de decisão sobre mudanças no setor elétrico.

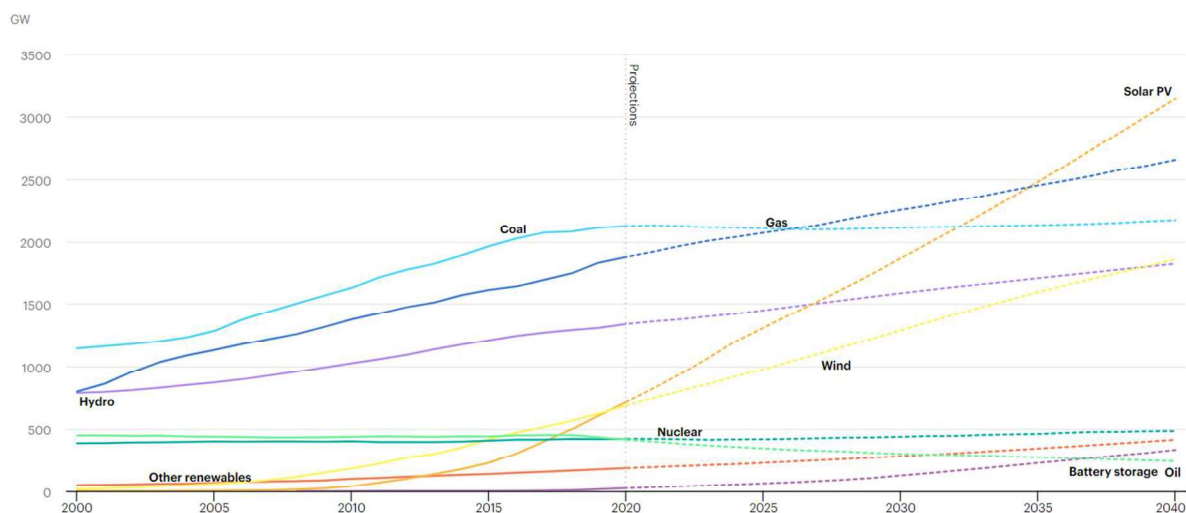
Para que o equilíbrio da rede elétrica não seja afetado é necessário haver um sistema interconectado que gerencie a rede elétrica e seja capaz de se comunicar com os vários consumidores e geradores que surgem no sistema, os chamados *Smart Grids*. Dentre os desafios de gerir os diversos participantes deste sistema elétrico que vem surgindo, estão o grande volume de dados, capacidade de proteger a rede de distribuição de energia, capacidade de prever as demandas e comportamento dos integrantes, além de incorporar sistemas de geração centralizada e geração distribuída (KYLILI; FOKAIDES, 2020).

Portanto, é possível perceber que existe um esforço sendo feito, para solucionar os problemas que vêm surgindo ao longo do cenário que vem se formando para a introdução das energias renováveis no meio urbano. O potencial para a geração de energia pode ser alcançado com a utilização da energia solar integrada à arquitetura dos edifícios já existentes e até mesmo ultrapassar a demanda de uma cidade inteira, sem a necessidade da implantação de grandes usinas (BARRAGÁN-ESCANDÓN et al., 2020).

2.3. Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica, através do efeito fotovoltaico, produz energia elétrica diretamente a partir da luz solar. Esta tecnologia de operação simples e democrática, acompanhada da versatilidade de instalação, custos competitivos e elevado grau de confiabilidade, permitiu um crescimento que tem se destacado na matriz elétrica global, com potencial para se tornar a fonte de energia elétrica dominante nos próximos anos (IEA, 2020a). A Figura 5 apresenta a projeção da capacidade instalada de geração de energia por fonte, considerando as atuais políticas governamentais.

Figura 5 – Capacidade de geração instalada global por fonte, projeção considerando as atuais políticas governamentais, 2000-2040



Fonte: (IEA, 2020a)

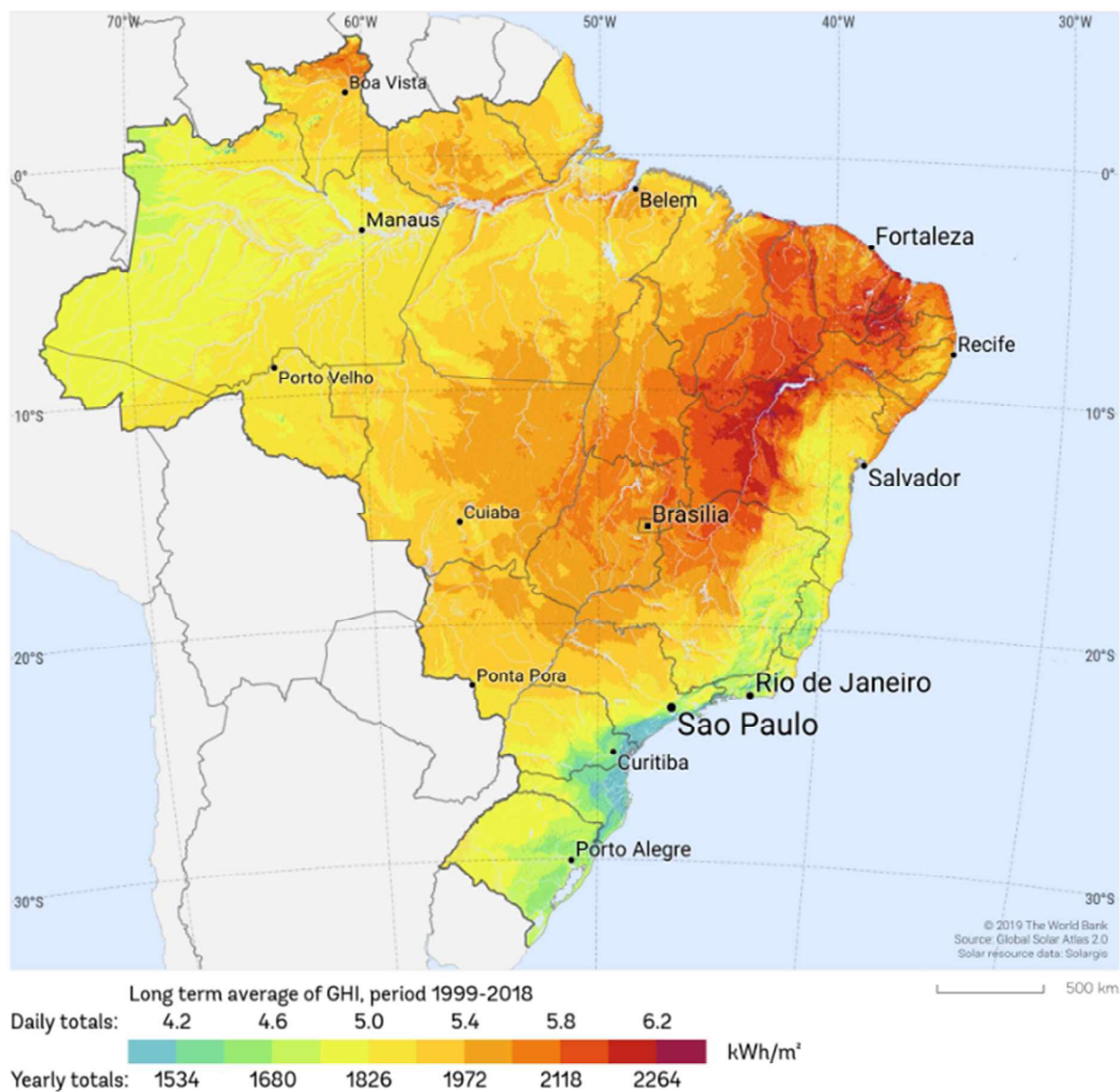
Para que exista geração de energia é necessário que uma superfície, composta por geradores fotovoltaicos, receba radiação solar, a qual por sua vez atinge a superfície terrestre de maneira não uniforme, variando de acordo com a localização geográfica, inclinação e orientação do plano que está recebendo a radiação (RÜTHER, 2004).

Ao gerador é dado o nome de módulo fotovoltaico, o qual é composto de um conjunto de células fabricadas de material semicondutor, que ao entrarem em contato com a radiação solar convertem a energia dos fótons em energia elétrica. Atualmente o material mais utilizado na fabricação destas células é o silício, o qual tem se mantido como tecnologia dominante no mercado nas últimas décadas (WILSON et al., 2020).

Uma superfície inclinada em um ângulo igual à latitude do local onde está instalado, orientada com a face para a linha do equador, geralmente recebe a maior quantidade possível de radiação solar ao longo de um ano (MEHLERI et al., 2010).

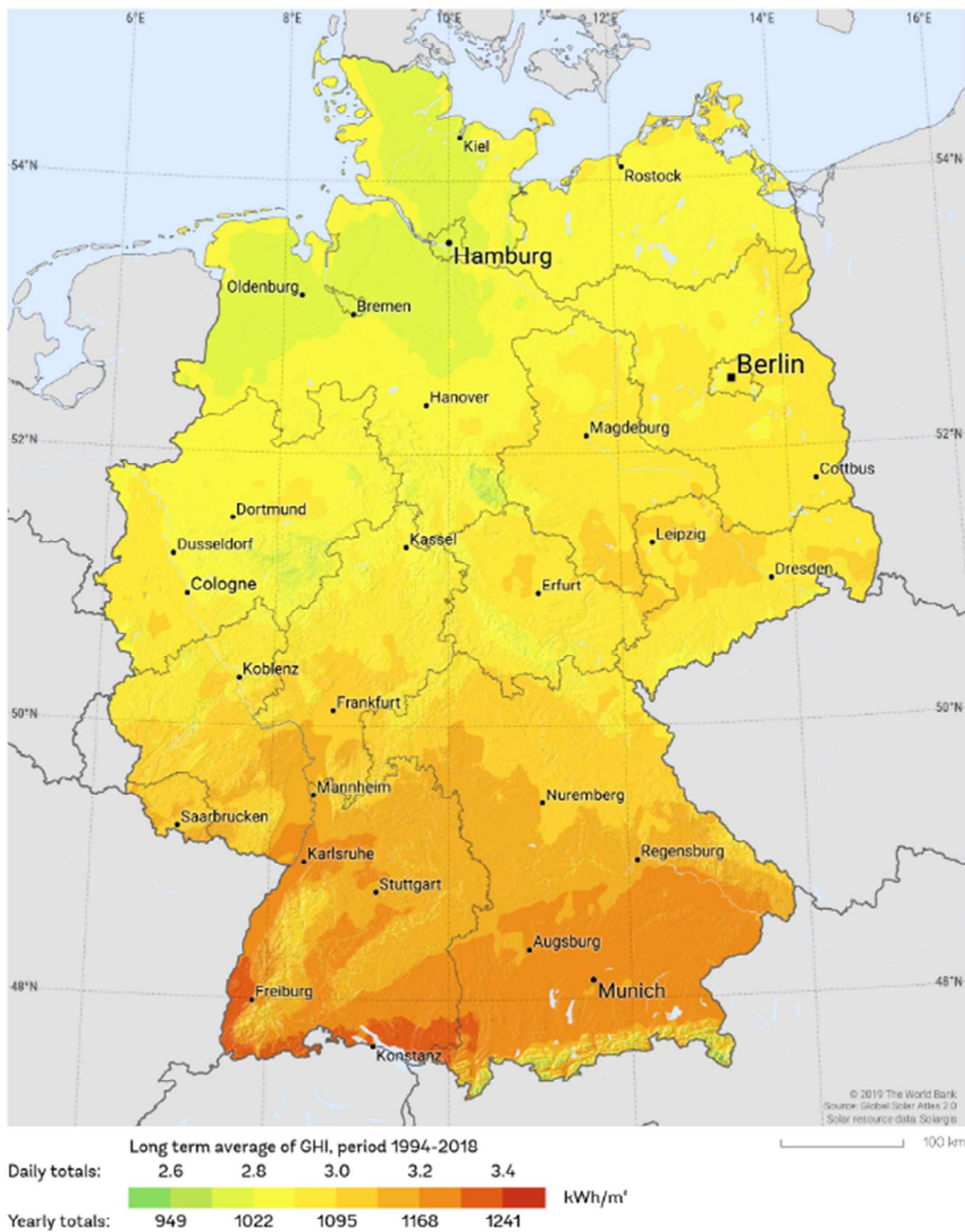
No caso brasileiro, existe um potencial que vem sendo explorado, apresentando um crescimento expressivo nos últimos anos, mas que ainda pode ser melhor aproveitado. O país possui uma incidência de radiação solar privilegiada, que em grande parte do território é maior do que em alguns países da União Europeia; os quais possuem capacidade instalada maior que a do Brasil. A Figura 6 e Figura 7 apresentam a Irradiação Global Horizontal do Brasil e da Alemanha, respectivamente. Nelas é possível perceber que o local mais favorecido com relação à radiação na Alemanha, recebe uma quantidade menor de radiação, quando comparado ao lugar que menos recebe no Brasil.

Figura 6 – Irradiação Global Horizontal no Brasil



Fonte: (Solargis, 2021)

Figura 7 – Irradiação Global Horizontal na Alemanha



Fonte: (Solargis, 2021)

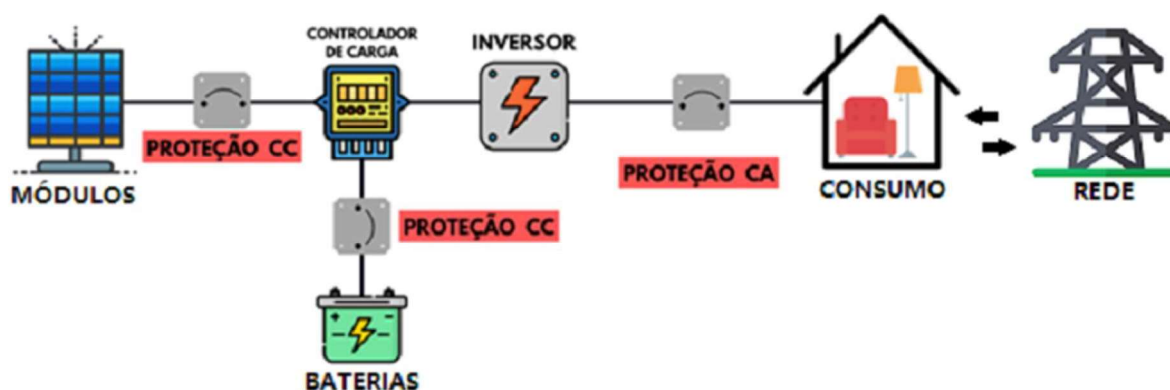
Ainda assim, a capacidade instalada de geração por meio dessa tecnologia na Alemanha era de 49GW, no final de 2019, enquanto no Brasil, em janeiro de 2022 a capacidade instalada era de pouco mais de 13 GW (REN21, 2021; ABSOLAR,2022). Portanto, o potencial de geração de energia elétrica a partir da fonte solar ainda é pouco explorado no país.

Dada a versatilidade dos sistemas solares fotovoltaicos, eles podem ser pequenos, da ordem de alguns kW, normalmente instalados para atender uma demanda pontual até usinas solares de larga escala, podem atingir a casa dos GW, ocupando assim grandes áreas.

2.3.1. Sistemas Solares Fotovoltaicos

Um sistema solar fotovoltaico é constituído de poucas partes, não sendo necessário elementos mecânicos móveis para haver geração. Portanto, a tecnologia é uma fonte silenciosa, não poluente e versátil. Apesar disso, outros equipamentos além dos módulos são necessários para que a energia gerada possa ser utilizada. Além da fiação, necessária para a conexão dos elementos do sistema, também são necessários inversores, sistemas de proteção elétrica (fusíveis, disjuntores, DPS's, etc.), elementos para a correta conexão dos cabos, sistemas de aterramento e baterias, que podem estar presentes ou não (RÜTHER, 2004). A Figura 8 apresenta um esquema dos elementos que constituem um sistema solar.

Figura 8 – Elementos de um sistema solar fotovoltaico



Fonte: (Adaptado de Energês, 2021)

Os sistemas podem ser isolados ou conectados à rede elétrica. Sistemas isolados, por não serem conectados à rede de distribuição, necessitam de um mecanismo de armazenamento de energia, para que a energia possa ser utilizada em momentos de não geração. Esse tipo de

sistema normalmente é instalado em locais de difícil acesso, onde não existe rede elétrica disponível (RÜTHER, 2004).

Para o caso de sistemas conectados à rede elétrica, quando tratamos de geração distribuída, podem existir diferentes tipos de políticas que gerenciam a injeção de energia na rede pública. No Brasil o modelo utilizado é o *net metering*, adotado também por países como Estados Unidos, Itália e Bélgica, onde a rede é utilizada como uma bateria, sendo a quantidade de energia injetada subtraída da energia consumida. No caso nacional, para cada 1kWh injetado na rede o consumidor adquire 1kWh de crédito. Em outros países, como por exemplo na Alemanha, Austrália e na maioria dos países Europeus, a estratégia adotada é a *Feed-in-tariff*, onde a energia injetada na rede é comprada do consumidor, gerando uma renda para quem possui um sistema conectado à rede (KUMAR SAHU, 2015).

A Figura 9 apresenta o primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede e também o primeiro integrado a uma edificação no Brasil; um sistema de 2kWp localizado em Florianópolis-SC, instalado em um dos edifícios que compõem o Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o qual está em operação desde 1997. Desde a sua instalação o sistema conta com sistema de aquisição de dados e continua sendo fundamental para estimativas de geração de outros sistemas propostos para as mesmas condições na cidade de Florianópolis (ZOMER, 2010).

Figura 9 – Primeiro Sistema fotovoltaico conectado à rede e integrado a uma edificação do Brasil, sistema de 2kWp.



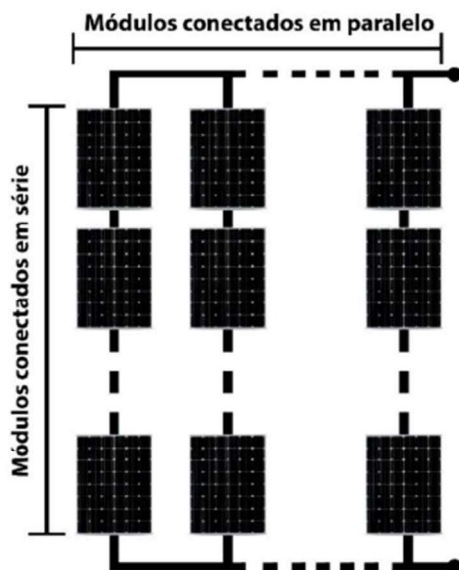
Fonte: (ZOMER, 2010)

Sistemas que contam com mecanismos de armazenamento não se limitam apenas àqueles isolados da rede; existem sistemas híbridos que podem estar conectados à rede ao mesmo tempo que possuem um sistema de armazenamento próprio. Neste caso outras dinâmicas de funcionamento dos sistemas podem ser adicionadas, com a possibilidade de armazenamento da energia gerada nas horas em que a tarifa de energia é mais baixa, utilizando

assim a energia proveniente da rede e em momentos em que a tarifa de energia é mais alta, pode-se utilizar a energia armazenada nas baterias (DO NASCIMENTO; RÜTHER, 2020).

Os módulos podem ser conectados em série e/ou paralelo, formando um arranjo que é organizado a fim de se elevar a potência e atingir níveis a tensão e corrente necessários para o funcionamento adequado dos outros componentes do sistema. Estes arranjos são definidos conforme as particularidades de cada sistema. A associação de vários módulos em série é chamada de série fotovoltaica ou *string* (VERÍSSIMO, 2017). A Figura 10 mostra uma representação de um arranjo de módulos em série e paralelo.

Figura 10 – Arranjo de módulos em série e paralelo



Fonte: (VERÍSSIMO, 2017)

A associação de várias *strings* pode ser vantajosa para projetos onde a posição dos módulos do sistema seja constante, como é o caso de grandes usinas, onde se busca a máximo de desempenho do sistema. Porém para sistemas onde existe a necessidade de atender a outros requisitos, como aqueles integrados a edificações, onde existe uma maior variação nas posições dos módulos, a distribuição dos módulos em diferentes *strings*, separando os módulos mais privilegiados com luz solar dos menos privilegiados consegue melhorar o desempenho do sistema, dado que a potência da *string* é limitada pelo módulo com o pior desempenho (ZOMER et al., 2014).

Também existe a possibilidade de utilização de microinversores que se limitam à aplicação em apenas alguns (tipicamente um, dois ou três) módulos. Apesar deste equipamento

tornar o sistema mais caro, ele diminui as perdas por indisponibilidade dado que apenas um pequeno número de módulos dentro do sistema será afetado em caso de problemas no microinversor, tornando as perdas individuais para cada módulo, o que evita perdas maiores para o sistema (ALBERTO; RABAÇA, 2014).

Em usinas solares instaladas em solo, os impactos na área de instalação ainda são existentes, embora o impacto ambiental seja consideravelmente reduzido quando comparado a outras fontes de energia. A supressão vegetal, a retirada da fauna do local, obras de terraplenagem, alteração da dinâmica de infiltração das águas pluviais, são algumas das medidas comumente tomadas antes do início da implantação de uma usina solar em um novo local. Além disso, existe o impacto visual causado pela usina durante a fase de operação e durante toda a sua vida útil (TURNEY; FTHENAKIS, 2011). A geração de energia solar a partir de usinas, tira dessa tecnologia uma das suas características mais excepcionais, que é a capacidade de gerar energia limpa e segura próximo ao consumidor final, evitando perdas de transmissão e distribuição. A

Figura 11 apresenta uma usina solar, onde é possível perceber o impacto causado pela usina na vegetação local.

Figura 11 – Impacto ambiental de uma usina solar fotovoltaica, comparativo entre 25/01/2013 (a) e 05/01/2021 (b)



(a)



(b)

(Google Earth, 2022)

Por outro lado, sistemas instalados em edificações não acarretam uma interferência ambiental tão explícita para a sua instalação, considerando que os espaços utilizados para a

fixação são tipicamente áreas existentes das edificações, portanto, já impactadas pela presença humana.

Quando instalados no envelope da edificação, sistemas solares podem ser classificados em dois grupos, sistemas fotovoltaicos integrados à edificação, em inglês *Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)* e sistemas fotovoltaicos aplicados à edificação *Building-Applied Photovoltaics (BAPV)*. Ambas as modalidades dizem respeito à integração junto ao envelope da edificação, com a diferença de que o sistema integrado respeita as características arquitetônicas da edificação e muitas vezes substitui componentes construtivos tradicionais enquanto que sistemas aplicados, são colocados sobre os elementos de acabamento (PENG; HUANG; WU, 2011).

2.3.2. Módulos fotovoltaicos

Além do silício, que atualmente domina o mercado, outros materiais podem ser utilizados para a fabricação de células fotovoltaicas. O tipo de material e a tecnologia utilizada para a fabricação das células influencia diretamente a eficiência de conversão de energia solar em eletricidade. Pesquisa e desenvolvimento dos componentes tem conseguido melhorar as taxas de conversão dos módulos fotovoltaicos e por consequência diminuir os custos para esse tipo de geração. Atualmente a eficiência dos módulos fotovoltaicos gira em torno de 20% (SINGH; GOYAL; KUMAR, 2021).

Dentre as tendências de desenvolvimento, estão as células em tandem que misturam materiais diferentes em sua composição, os quais funcionam em diferentes faixas de energia, aproveitando melhor a energia incidente sobre a célula. Estudos demonstram que a eficiência de células deste tipo pode chegar próximo dos 30%, elevando a eficiência dos módulos a 25% (BENDA; ČERNÁ, 2020).

Novos métodos construtivos e técnicas de montagem avançadas, permitem a concepção de módulos mais eficientes, com potências acima de 600Wp, o que diminui o custo de uma usina ao longo de sua vida útil. Outros possuem a capacidade de gerar energia pelas duas faces, tanto o lado onde a energia incide diretamente na superfície do módulo quanto a face oposta, permitindo a sistemas montados em solo a possibilidade de aproveitar a energia do albedo; estes são chamados de módulos bifaciais (SCHMELA, 2021; STEIN et al., 2021).

Com um apelo mais estético, novos módulos com especificação para a integração em edificações, com superfície com acabamento mais agradável do ponto de vista de harmonização arquitetônica e também com uma maior variação de formatos, permitem uma melhor adaptação

às concepções arquitetônicas, o que é fundamental para uma implementação mais ampla do BIPV (PELLE et al., 2020). A Figura 12 mostra a montagem de um protótipo de uma fachada com a utilização de módulos com acabamento superficial.

Figura 12 – Protótipo de uma fachada utilizando módulos BIPV



Fonte: (IEA, 2021)

Também voltados para a integração arquitetônica estão os módulos chamados semitransparentes, que permitem a passagem da luz solar além de gerar energia, podendo

substituir o vidro das janelas, como vantagem de gerar energia. Estes módulos, apesar de apresentarem uma eficiência mais baixa podem melhorar o desempenho térmico e energético da edificação durante o ano (PENG et al., 2019). A Figura 13 apresenta um exemplo de utilização desse tipo de módulo.

Figura 13 – Módulos semitransparentes



Fonte: (Solaronix, 2013)

2.3.3. Desempenho dos Sistemas Fotovoltaicos

Para se avaliar a qualidade de um sistema fotovoltaico são usualmente utilizadas duas métricas. A primeira é através de seu rendimento energético, conhecido pelo termo em inglês *Energy Yield*, e a segunda é pela determinação da sua taxa de desempenho, também conhecida pelo termo em inglês PR (*Performance Ratio*). Estes índices permitem a comparação de

sistemas com diferentes topologias, tecnologias, dimensões e localização (MARION et al., 2005).

O *Yield* é representado pelo quociente entre a energia gerada pelo sistema (kWh) em um determinado período de tempo e a potência instalada (kWp), que define a quantidade de energia gerada pelo sistema por unidade de potência nominal instalada (kWh/kWp), indicada na Equação 1. Este índice está diretamente relacionado à disponibilidade de irradiação solar na superfície dos módulos.

$$Yield = \frac{E}{P_0} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Yield: Rendimento energético, ou produtividade do sistema

E: Energia gerada (kWh) no período analisado

P₀: Potencia nominal instalada do sistema (kWp)

O PR apresenta a relação entre a quantidade real de energia gerada pelo sistema e a geração máxima teórica possível, sendo indicada em porcentagem (%). A PR contabiliza todas as perdas intrínsecas aos sistemas, como perdas por quedas de tensão, sujeira, perdas térmicas, eficiência do inversor, entre outras. A eficiência dos módulos é afetada negativamente pelo aumento da temperatura de operação, o que conseqüentemente afeta o desempenho do sistema (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009a, 2009b).

Quanto menores as perdas de um sistema, mais próximos do 100% é o PR. Entretanto, sob condições reais de operação não é possível se atingir tal nível devido às perdas inevitáveis que surgem durante o funcionamento do sistema. Para um sistema real, projetado adequadamente, considerando um bom funcionamento dos seus componentes, o PR atingido normalmente gira em torno de 80% (RÜTHER et al., 2010; ZOMER et al., 2014).

2.4. Building Integrated-Photovoltaics (BIPV) systems

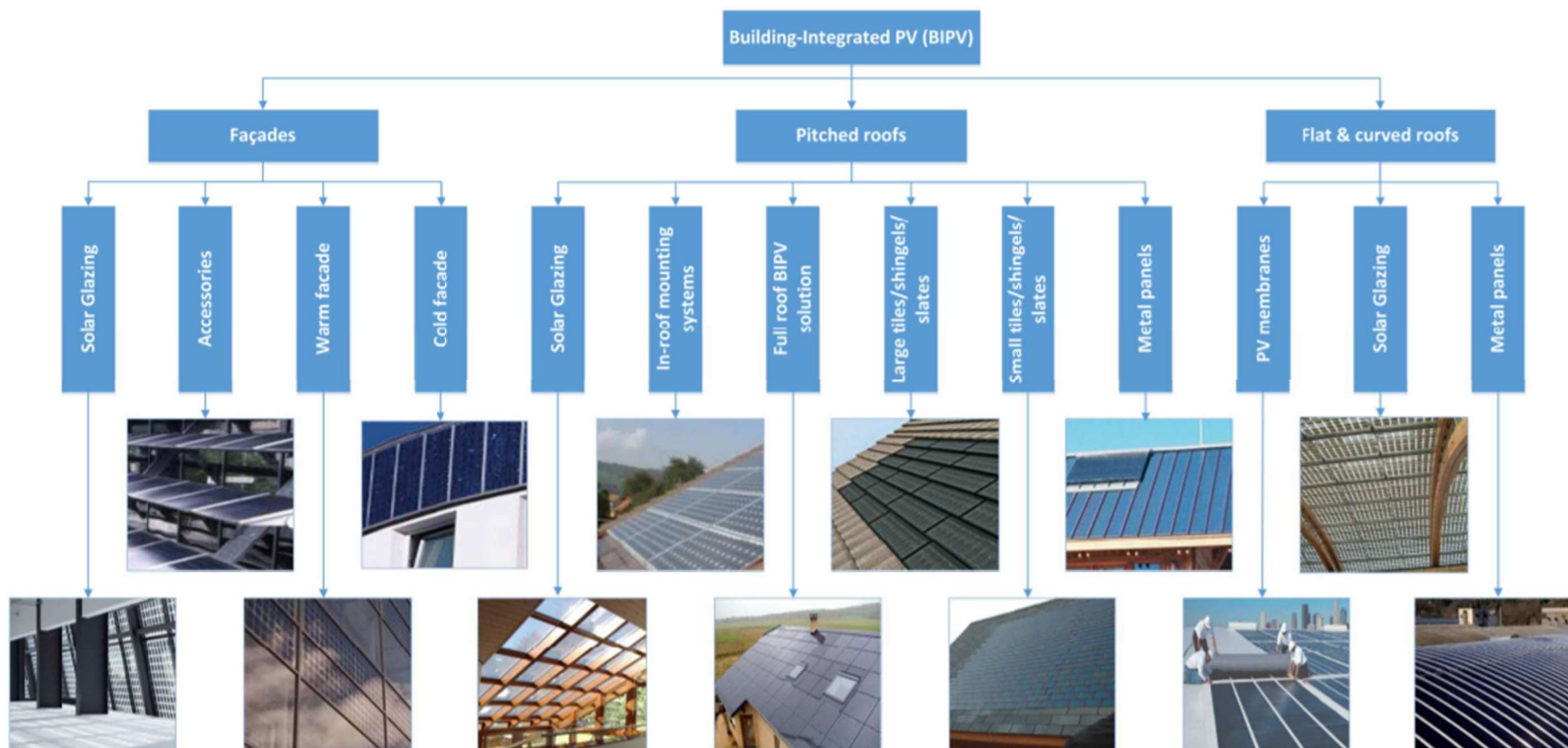
A tecnologia BIPV é a aplicação de módulos fotovoltaicos de forma integrada no envelope das edificações, normalmente substituindo algum elemento construtivo ou material tradicionalmente utilizado. Este conceito construtivo vai de encontro às estratégias de otimização do desempenho energético de edificações, pois a geração de energia elétrica a partir de sistemas solares, contribui para o balanço energético da edificação. Dependendo do tipo de aplicação essa integração pode inclusive reduzir as cargas térmicas da edificação, diminuindo o gasto energético com manutenção da temperatura do seu interior (BIYIK et al., 2017; MEI et al., 2003).

A grande maioria dos sistemas solares integrados a uma edificação, atualmente, estão instalados em edificações pré-existentes, concebidas anteriormente à instalação do sistema. Nestes casos a instalação pode divergir do conceito original da edificação, podendo trazer prejuízos arquitetônicos ao projeto e, por consequência, inviabilizar o sistema. Quando o projeto fotovoltaico é idealizado de forma síncrona ao projeto arquitetônico, a relação entre forma e função dos seus componentes pode ser potencializada, conduzindo ambos os projetos a melhores resultados (ZOMER et al., 2020b).

Este tipo de instalação além de energeticamente sustentável, também sinaliza ser economicamente viável, ao passo que demonstra que a instalação, além de reembolsar o investimento feito, pode vir a se tornar uma fonte de renda para a edificação, dependendo do tipo de política de gerenciamento da energia adotada, dado que os ganhos a partir da geração de energia continuam após o tempo de *payback* do sistema. (GHOLAMI; RØSTVIK, 2020).

Existem diversas maneiras de integrar os sistemas fotovoltaicos no envelope das edificações. Algumas possibilidades são mais intuitivas do que outras, como a aplicação em telhados, porém elas extrapolam para além desta área das edificações, podendo ser instalada em qualquer área disponível. As possíveis aplicações de módulos fotovoltaicos integrados à arquitetura vão desde coberturas até elementos de sombreamento, fachadas ou até mesmo em janelas com a utilização de módulos semitransparentes. O tipo de aplicação está estritamente ligado ao tipo de tecnologia utilizada. A Figura 14 apresenta uma classificação para as possibilidades de integração de módulos fotovoltaicos em edificações.

Figura 14 – Possibilidades de instalação de módulos fotovoltaicos em edificações.



Fonte: (FRONTINI et al., 2015)

Para que ocorra a disseminação desse tipo de sistema é importante que exista o desenvolvimento de novos produtos, cada vez mais específicos e com um grau de customização maior, sendo imprescindível a variabilidade e o apelo arquitetônico para que o aspecto visual da edificação seja aceito pelo público geral (KUHN et al., 2021).

Produtos BIPV são versáteis quanto ao *design*, indo desde sistemas que utilizam alguns poucos metros quadrados até sistemas que se incorporam a todo o envelope da edificação. Ao contrário dos módulos fotovoltaicos padrão, produzidos para usinas de energia solar, as soluções BIPV podem ser flexíveis em tamanho, forma e cor, o que significa que seu *design* pode ser adaptado à forma e ao *design* dos edifícios. Isso possibilita a geração de energia em telhados, fachadas e até mesmo através de janelas semitransparentes. Consequentemente, a área disponível para geração de energia limpa é maior do que para as tecnologias fotovoltaicas tradicionais. Futuramente, essa tecnologia irá se tornar um elemento indispensável para novos edifícios em áreas urbanas, onde o espaço tem se tornando raro. Assim, com um único investimento, as tecnologias BIPV exploram todo o potencial do edifício para geração de energia limpa, regulação térmica e isolamento (SOLARPOWER EUROPE; ETIP PV, 2019).

Existem propostas de padronização e modelos de normas ao redor do mundo que buscam tornar a instalação desse tipo de sistema mais segura e confiável para o usuário final, não limitando, mas orientando os fabricantes desses tipos de módulos para a entrada no mercado de modo a atender à ampla gama de possibilidades que o modelo oferece sem colocar em risco a segurança dos usuários (IEA, 2020b).

Diversos projetos pioneiros e inovadores vêm surgindo ao redor do mundo e, por consequência expondo, o potencial dessa tecnologia. Tais projetos servem de inspiração e permitem que ela seja naturalizada entre o público geral, indo desde edificações mais tradicionais até outros projetos mais ousados. A Figura 15, Figura 16 e Figura 17 e apresentam alguns projetos com a aplicação de sistemas BIPV.

Figura 15 – Umwelt Arena Switzerland



Fonte: (IEA, 2021)

O edifício Umwelt Arena Switzerland, em Spreitenbach na Suíça, conta com um telhado de design arquitetônico moderno, com uma abertura em formato octogonal de onde derivam 33 superfícies diferentes, com inclinações que variam de 6° a 62°. Elas se estendem quase até a altura do solo, em forma de uma cúpula, a qual é completamente coberto com módulos fotovoltaicos.

Este telhado conta com uma área de mais de 5300 m², coberta por 5239 módulos monocristalinos de 160 Wp de potência cada, totalizando um sistema com uma potência nominal de 737 kWp. Este sistema gera cerca de 540 MWh de energia por ano, duas vezes a energia consumida pela edificação, o que contribui para a redução dos custos operacionais do complexo.

Figura 16 – Frodeparken



Fonte: (IEA, 2021)

O edifício Frodeparken, localizado em Uppsala na Suécia, possui sua fachada frontal totalmente coberta por módulos fotovoltaicos, possuindo uma fachada com aparência que não difere muito dos edifícios tradicionais, assemelhando-se a uma pele de vidro. No entanto, o sistema que compõem a fachada possui uma potência de 100 kWp, contendo 1181 módulos com eficiência de 11,8% que juntos forma uma curvatura, apesar de os módulos serem planos. Assim, o sistema gera 70 MWh de energia por ano, abatendo 28% do consumo anual da edificação.

A decisão de adicionar o sistema fotovoltaicos a edificação ocorreu ainda na fase inicial do projeto, em 2006, sendo crucial para as tomadas de decisão que implementaram a tecnologia no envelope da edificação.

Figura 17 – Copenhagen International School



Fonte: (IEA, 2021)

Enquanto os projetos da Figura 15 e Figura 16 utilizam módulos tradicionais, o projeto do Copenhagen International School, Figura 17, localizado em Copenhagen na Dinamarca utiliza módulos fotovoltaicos coloridos, específicos para a aplicação BIPV em fachadas. Para compor sua fachada foram utilizados 12000 módulos, totalizando um sistema de 6000 m² que cobre todas as fachadas do prédio. Cada módulo tem dimensões de 720 x 700 mm, sendo fabricados de silício cristalino e que resultaram em um sistema com 720 kWp. A geração da fachada está garantindo o fornecimento de 50% da necessidade anual de energia do edifício.

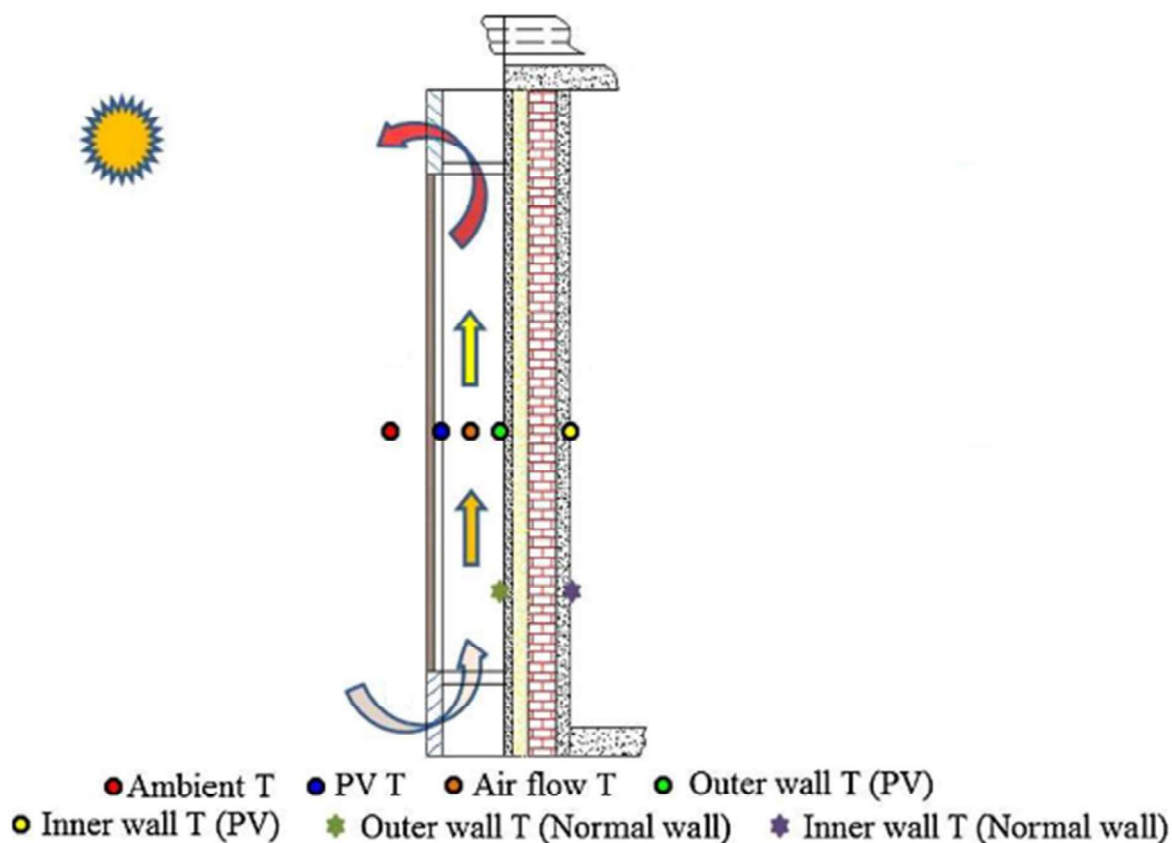
2.4.1. Fachadas Fotovoltaicas

Dado que as pessoas passam cada vez mais tempo dentro das edificações, o aumento dos gastos energéticos e a utilização de dispositivos com uso intensivo de energia para gerar conforto térmico tem aumentado o consumo de energia elétrica por parte dos edifícios. A utilização de módulos fotovoltaicos instalados nas fachadas dos edifícios é uma solução promissora, dado que geram energia elétrica ao mesmo tempo em que contribuem para a redução da carga térmica (IRSHAD et al., 2019).

O espaço existente entre a superfície externa da parede e plano posterior dos módulos, os quais constituem uma fachada fotovoltaica, permite que o fluxo de ar retire calor dos módulos e da superfície da parede; com isso há o aumento da eficiência dos módulos e redução dos ganhos de calor no verão e perdas de calor no inverno. O afastamento dos módulos da

parede externa tem grande influência no desempenho do sistema fotovoltaico (IRSHAD et al., 2019). A Figura 18 apresenta uma fachada ventilada fotovoltaica.

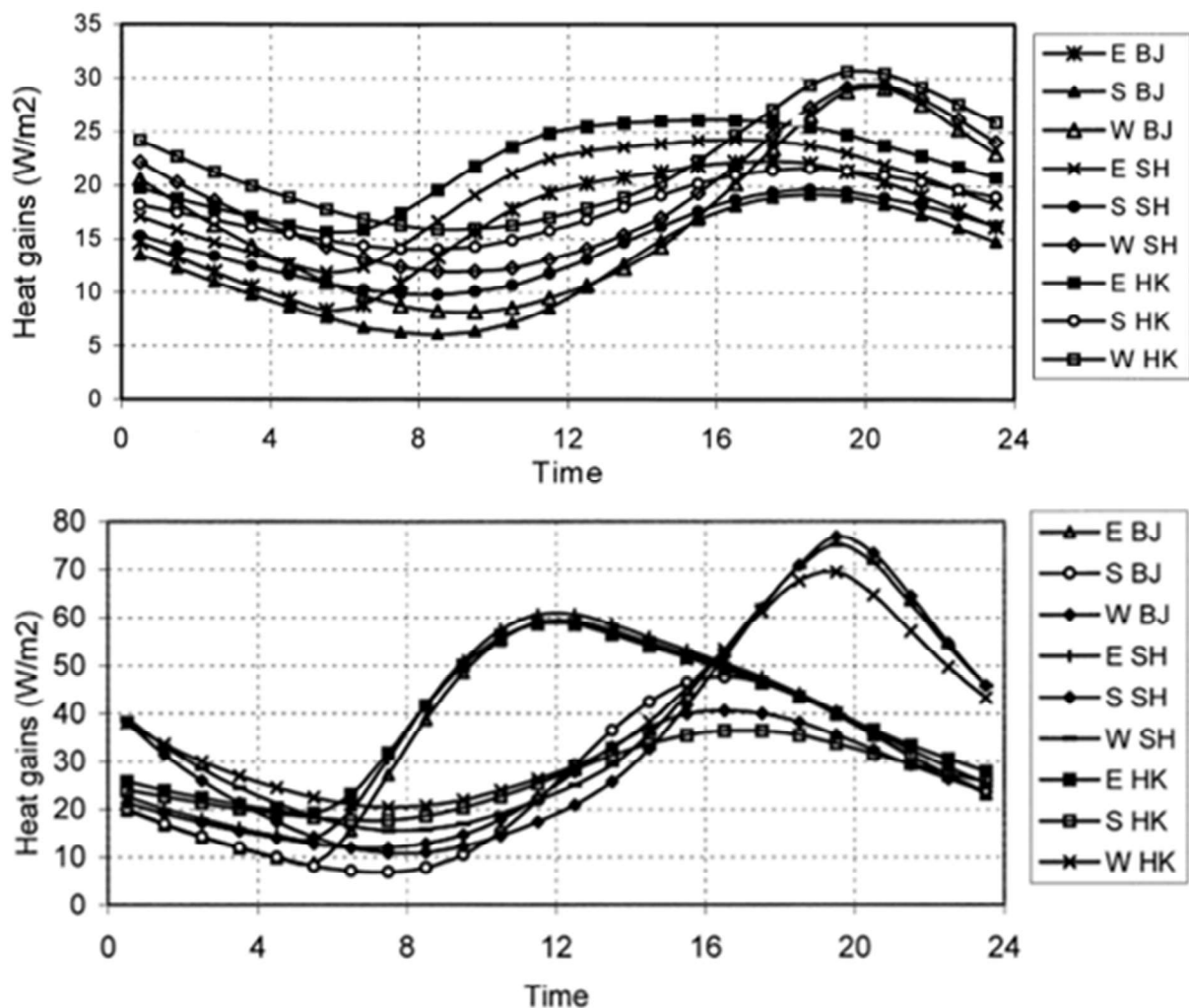
Figura 18 – Fachada fotovoltaica



Fonte: Adaptado de (HAN et al., 2013)

Considerando a comparação entre uma parede com um sistema fotovoltaico integrado e uma parede nua, as reduções de cargas de resfriamento podem variar entre 33% e 50% dependendo da localização do sistema no edifício. De maneira geral, quanto maior a radiação solar incidente sobre a parede, maior será a taxa de redução do ganho de calor (YANG; BURNETT; JI, 2000). A Figura 19 apresenta a comparação entre o ganho de calor através da parede para os dois casos; o sistema em questão possui um espaço de 12cm entre a fachada e os módulos e foi analisado para três cidades diferentes, Pequim (BJ), Shanghai (SH) e Hong Kong (HK).

Figura 19 – Comparação entre ganho de calor pela parede com fachada fotovoltaica (acima) e parede nua (abaixo)



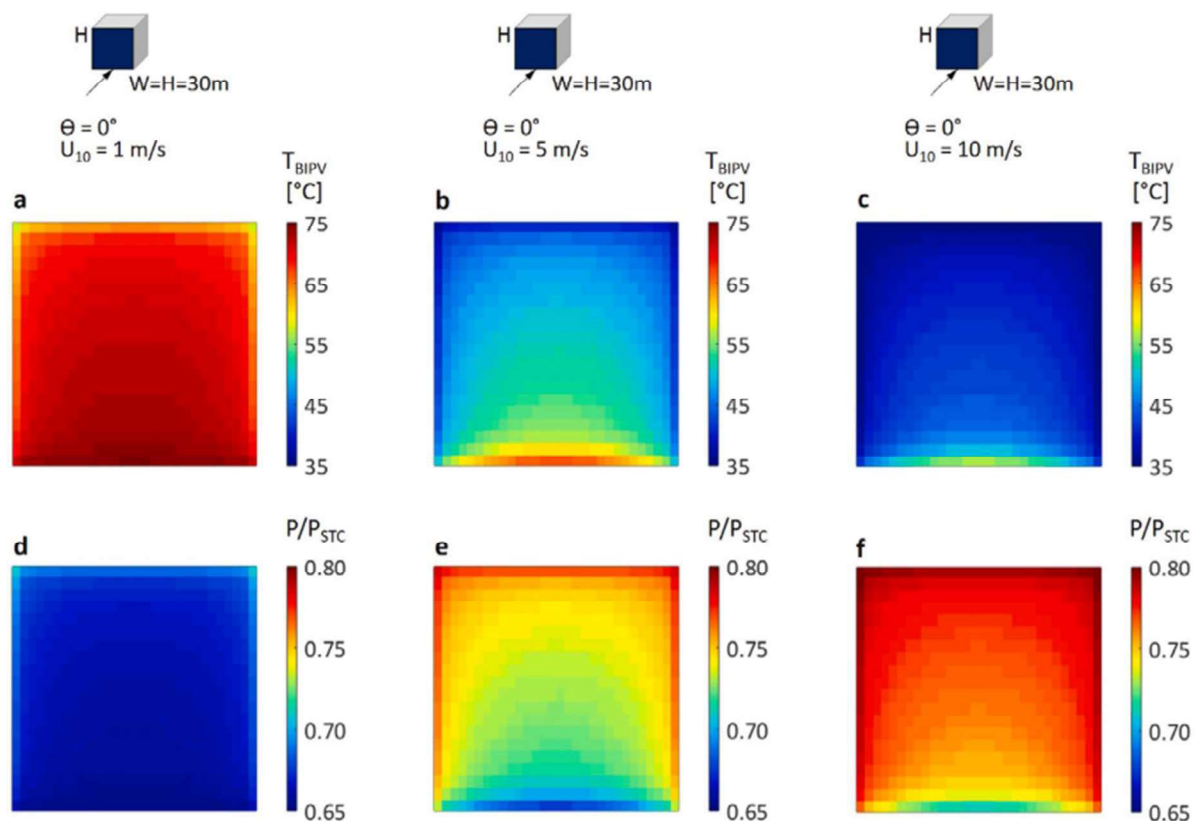
Fonte: (YANG; BURNETT; JI, 2000)

Ainda comparando os dois casos, para a cidade de Hong Kong, onde os ganhos de calor são positivos durante a maior parte do ano, sendo negativos durante o inverno; na comparação entre uma parede normal e outra com o sistema fotovoltaico instalado, a diferença entre os ganhos de calor representam em média o dobro para os períodos de verão, com 6,3 W/m² para a parede PV e 12,7 W/m² para a parede normal. Durante o inverno, as perdas térmicas através da parede também são reduzidas, sendo 32% menores para a parede PV quando comparadas a parede normal (PENG et al., 2013).

Dado que as fachadas fotovoltaicas se encontram embarcadas no envelope das edificações, seu desempenho é influenciado pelo comportamento do vento que atinge a fachada; em ambiente urbanos, o comportamento é influenciado por elementos exteriores ao

sistema, levando a condições que podem afetar o sistema de maneira não uniforme. A Figura 20 apresenta a influência da velocidade do vento em um sistema de fachada ventilada fotovoltaica.

Figura 20 – Influência da velocidade do vento na temperatura e no *Energy Yield* em um sistema de fachada fotovoltaica.



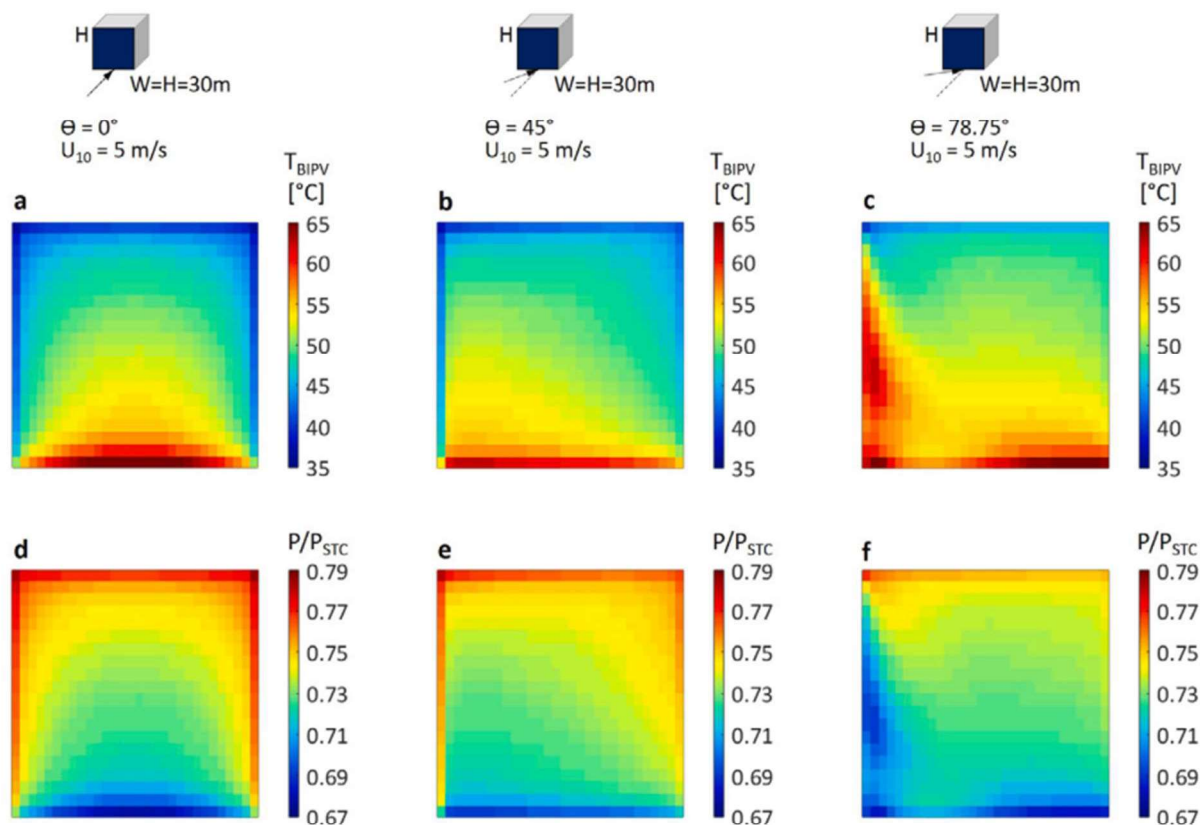
Fonte: (GONÇALVES et al., 2021)

Estando a direção do vento perpendicular à superfície dos módulos do sistema; conforme a velocidade do vento aumenta é possível perceber que a temperatura dos módulos diminui, levando o sistema a um melhor desempenho energético. Também é perceptível que para os módulos que estão na região inferior da fachada a temperatura é maior do que daqueles que estão na parte superior, podendo levar a perdas por *mismatch* no sistema (GONÇALVES et al., 2021).

Além da velocidade do vento, outro fator que influencia no desempenho da fachada é a direção do vento, que também altera a distribuição da temperatura pela fachada, porém em menor grau, mas que também pode levar a perdas por *mismatches* (GONÇALVES et al., 2021).

A Figura 21 apresenta a influência da direção do vento em um sistema de fachada ventilada fotovoltaica.

Figura 21 – Influência da direção do vento na temperatura e no *Yield* de um sistema de fachada fotovoltaica.

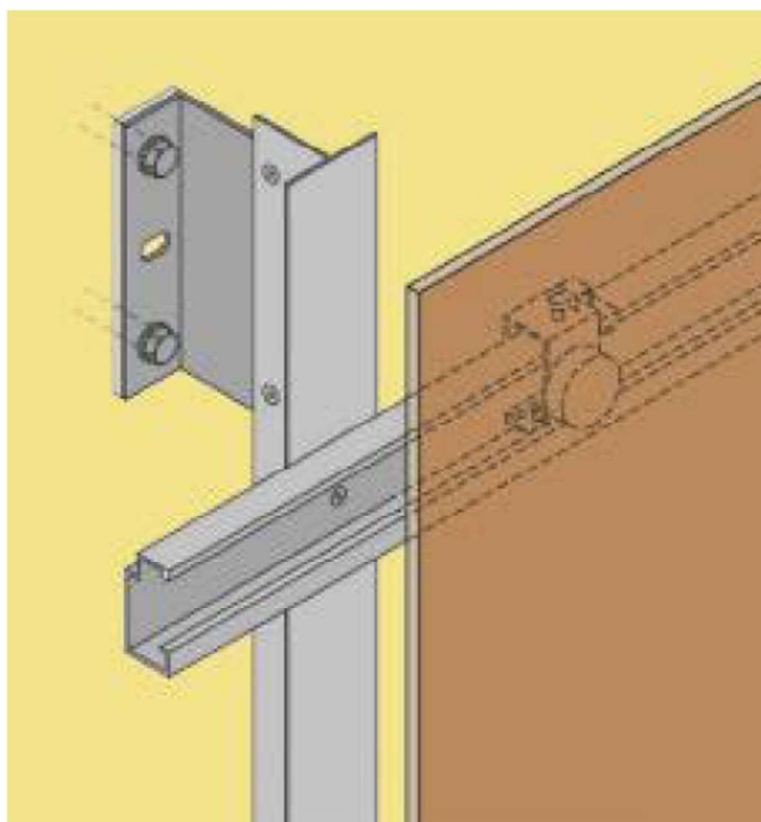


Fonte: (GONÇALVES et al., 2021)

Embora a o vento possa levar a perdas por diferenças de temperatura entre os módulos do sistema, a ventilação melhora o desempenho do sistema em geral, levando a aumentos de 2% a 4% por ano (SHAHRESTANI et al., 2017).

A partir da possibilidade de se instalar sistemas em fachadas de edificações, sistemas de montagem mais práticos e otimizados foram surgindo, adaptando a estrutura e o módulo para aplicação em fachadas, mimetizando modelos construtivos tradicionalmente utilizados em fachadas ventiladas. Estes podem ser fixados em diversos tipos de substratos desde que tenham sido calculados os esforços relativos a cada elemento, sejam eles elementos estruturais ou de vedação, fabricados em concreto, aço ou até mesmo madeira. A Figura 22 apresenta os elementos de fixação para módulos BIPV.

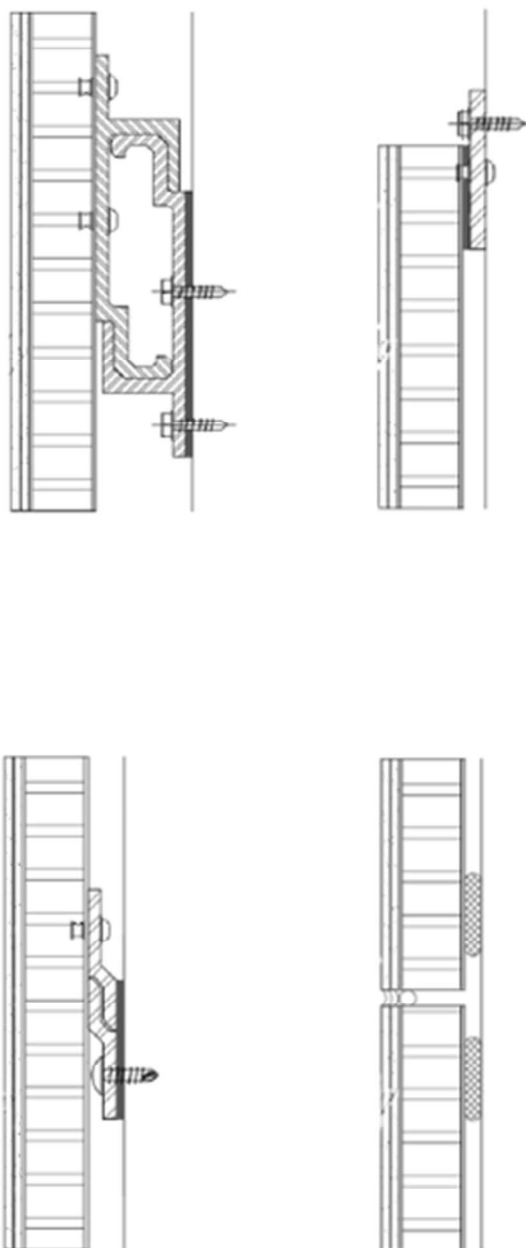
Figura 22 – Mecanismo de fixação de módulos fotovoltaicos BIPV



Fonte: (SolarLab, 2021)

Para a fixação desse tipo de do sistema nas fachadas é utilizada uma estrutura de alumínio pré-montada na parte externa da edificação onde posteriormente são posicionados os módulos. O método de encaixe varia conforme o fabricante e o modelo. A Figura 23 mostra alguns elementos utilizados para fixar os módulos nas estruturas metálicas.

Figura 23 – Elementos de fixação e métodos de encaixe de módulos BIPV



Fonte: Adaptado de (Mitrex, 2022)

Com relação a organização das strings, além do dimensionamento de acordo com a capacidade do inversor, também levado em conta a posição em que a um determinado grupo de módulos é posicionado na fachada, agrupando aqueles que possuem orientação e inclinação semelhantes. A Figura 24 apresenta a divisão de um sistema de fachadas ventilada fotovoltaica de acordo com os inversores.

Figura 24 – Divisão do sistema conforme inversores



Fonte: Adaptado de (GHOLAMI et al., 2020)

A divisão de acordo com a arquitetura da edificação é bastante perceptível na região que abrange os inversores 5 e 6 e na região dos inversores 9 e 10.

3. Método

A análise a ser realizada utilizará dados coletados entre 2019 e 2021, com uma avaliação mensal. Foram coletados: dados de radiação solar, geração de energia, variáveis ambientais (velocidade e direção do vento, temperatura ambiente), temperatura do lado posterior dos módulos, temperatura das paredes; sendo os sensores divididos entre as paredes cobertas pelos dois sistemas e a parede nua, na parte externa e interna; totalizando oito medições no total.

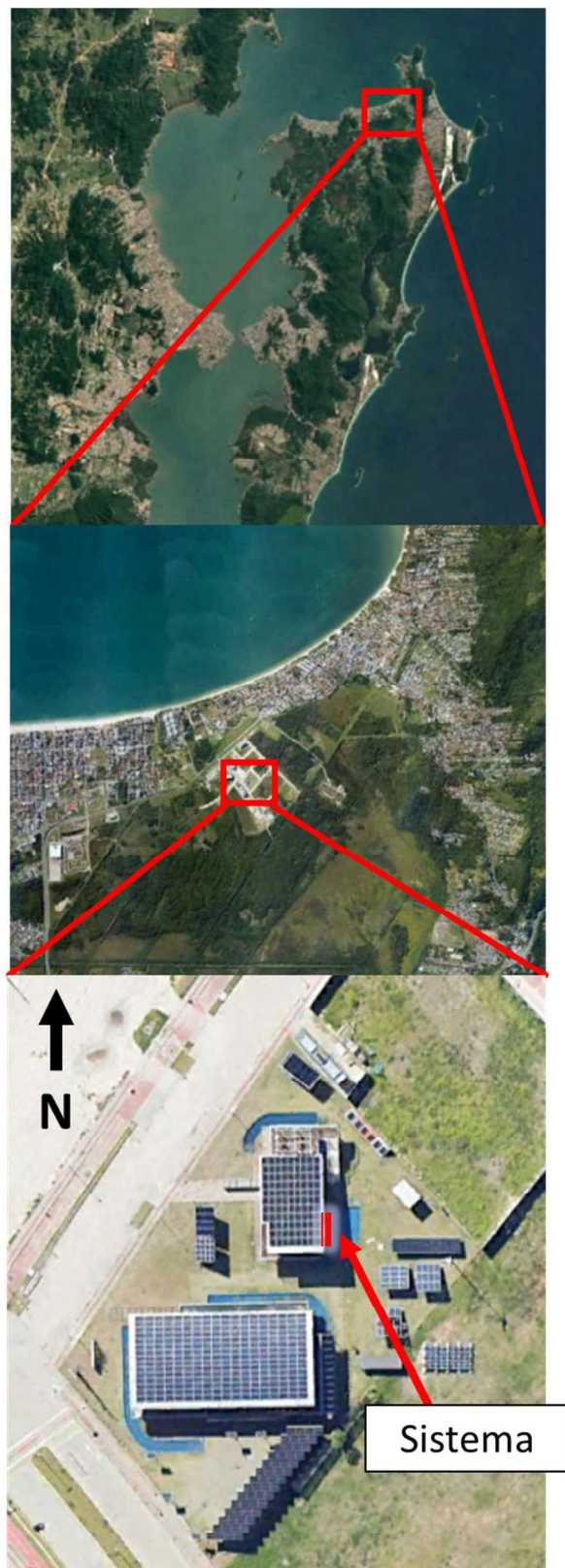
A primeira etapa do trabalho consiste na organização e coleta dos dados relevantes para o trabalho. As duas fachadas estão em funcionamento no laboratório Fotovoltaica UFSC, em Florianópolis – SC, e possuem sistema de aquisição de dados desde 2018. Para este trabalho foi escolhido preferencialmente o período de 01 janeiro de 2020 até 31 dezembro de 2020, por possuir um ano de dados razoavelmente consolidados, em que a maior parte dos sensores, necessários para este trabalho, estavam em funcionamento síncrono por um período suficiente para a análise. Em alguns meses, porém, foram substituídos por meses de outros anos, dado a carência de dados. O elemento de estudo pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 – Sistema de fachada ventilada (à esquerda) e estanque (à direita) de módulos fotovoltaicos instalada no Fotovoltaica – UFSC em Florianópolis, Brasil



Os módulos estão instalados em condição de fachada ao lado leste da edificação, ou seja, com 90° de inclinação e 90° de desvio azimutal. Nesta condição, o sistema não aproveita totalmente a energia solar, ficando na sombra durante o período vespertino. A Figura 26 mostra a localização do sistema na ilha de Florianópolis, Santa Catarina.

Figura 26 – Localização do sistema em Florianópolis, Santa Catarina



A fachada é composta por dois sistemas individuais, cada um composto por uma única *string* de 4 módulos, com potência de 315 Wp cada, fabricados de silício multicristalino com 16,3% de eficiência, sendo ligados a um inversor SMA de 1,2 kWp. Assim, a potência instalada de cada um dos sistemas é de 1,26 kWp. O que diferencia um sistema do outro é a estrutura de fixação; uma delas permite a passagem de ar pela parte posterior dos módulos (S1), enquanto que a outra conta com um fechamento completo, impedindo a passagem de ar entre os módulos e a parede (S2). Os dois sistemas estão a uma distância de 16cm da parede externa da edificação.

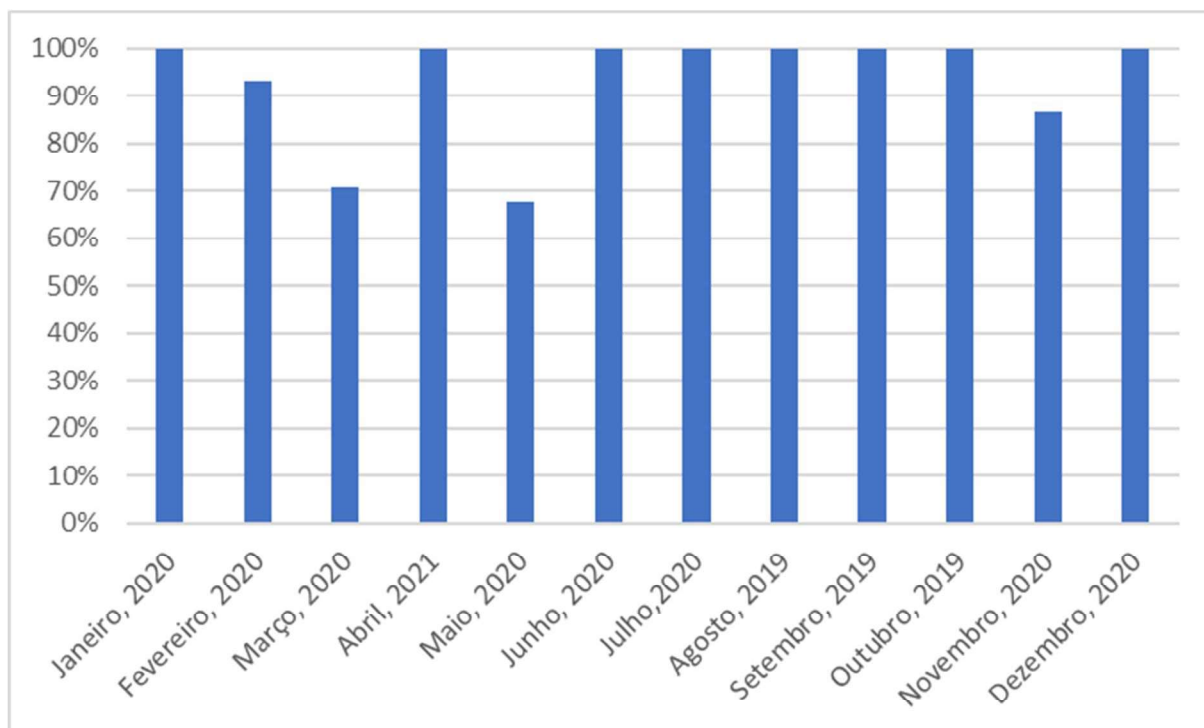
3.1. Análise Elétrica

3.1.1. Radiação Solar

Os dados de irradiância foram coletados a partir de um piranômetro posicionado na mesma inclinação e orientação dos módulos; eles foram coletados em uma resolução temporal de cinco minutos, exceto para os meses de março o qual foi coletado com uma resolução temporal de um minuto, agosto em que os dados foram coletados com resolução temporal de quinze minutos e setembro que teve parte dos dados coletados com resolução temporal de cinco minutos e parte com resolução temporal de quinze minutos. Para a análise, os dados foram integrados mensalmente.

Para evitar os meses que possuem vários dias sem leitura, alguns foram substituídos por meses de outros anos, afim de se obter um ano completo de dados. Os meses de março e maio foram os que tiveram um número maior de dias sem aquisição de dados. A Figura 27 apresenta a porcentagem de dias com dados de irradiância disponíveis em cada mês.

Figura 27 – Porcentagem dos dias com dados de irradiância disponíveis em cada mês.

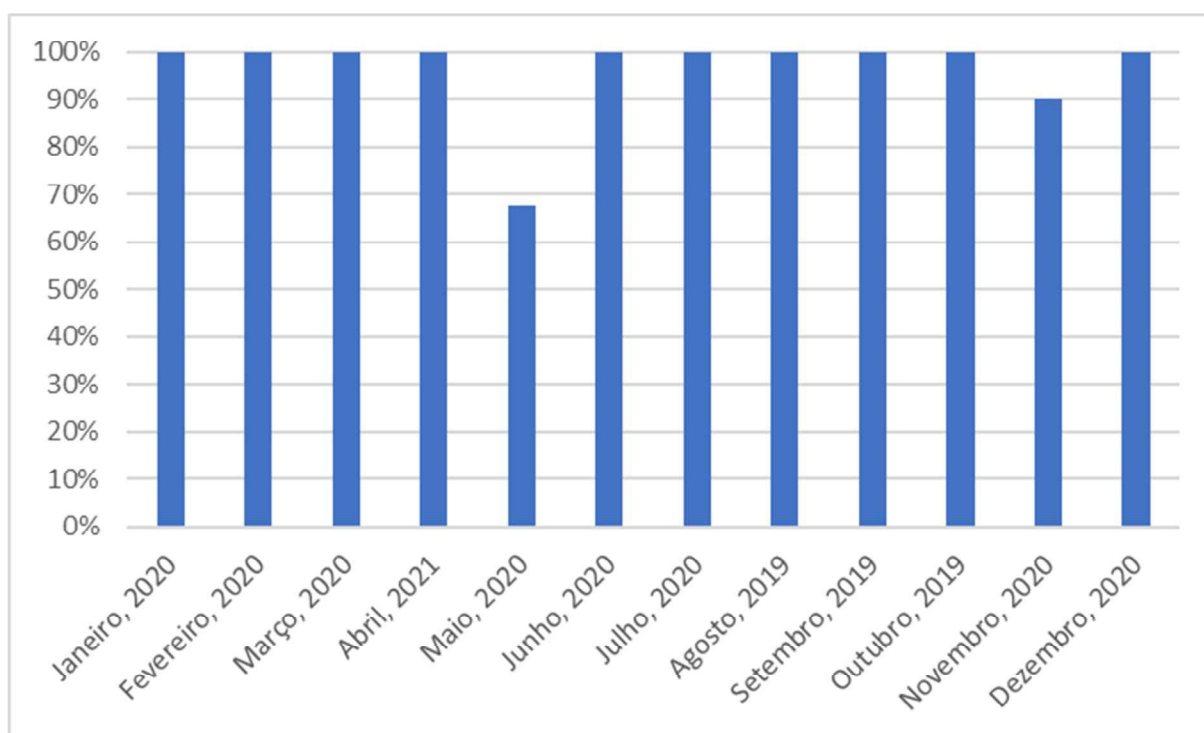


3.1.2. Geração de energia ao longo do tempo

Os dados de geração foram calculados através dos valores de geração de energia acumulada em cada um dos inversores. Para se obter o valor mensal, foi feita a diferença entre o último valor armazenado ao final do mês e o valor inicial no início do mês, de forma que cada mês correspondesse ao mês considerado nos dados de irradiância.

Ambos os sistemas estiveram desligados, portanto sem geração, durante dez dias do mês de maio e três dias do mês de novembro. A Figura 28 apresenta a porcentagem de dias com dados de geração disponíveis em cada mês.

Figura 28 – Porcentagem dos dias com dados de geração disponíveis em cada mês.



3.1.3. Rendimento Energético (*Energy Yield*)

Com base nos dados de geração disponíveis e na potência de cada um dos sistemas instalados, o *energy yield* foi calculado mês a mês para cada sistema individualmente, utilizando a Equação 1.

3.1.4. Taxa de Desempenho (*Performance Ratio* - PR)

Considerando os dados de irradiância e a geração mensal dos sistemas, foi calculado o PR mês a mês individualmente para cada um dos sistemas.

3.1.5. Variáveis Ambientais

Por possuir uma diferença construtiva entre as fachadas, permitindo a passagem ou não de ar na parte posterior nos módulos, as condições ambientais podem influenciar no desempenho de cada sistema de maneira diferente. A fim de avaliar esta possibilidade, os dados de velocidade do vento, direção do vento e temperatura ambiente foram tratados da mesma forma que os dados de irradiância e geração, a fim de se obter uma relação entre a geração de energia e as condições ambientais. Os dados foram coletados com uma resolução temporal de um minuto. A Figura 29 apresenta a porcentagem dos dias com dados de velocidade e direção do vento disponíveis em cada mês e a Figura 30 apresenta as porcentagens dos dias com dados de temperatura ambiente disponíveis em cada mês.

Figura 29 – Porcentagem dos dias com dados de velocidade e direção do vento disponíveis em cada mês.

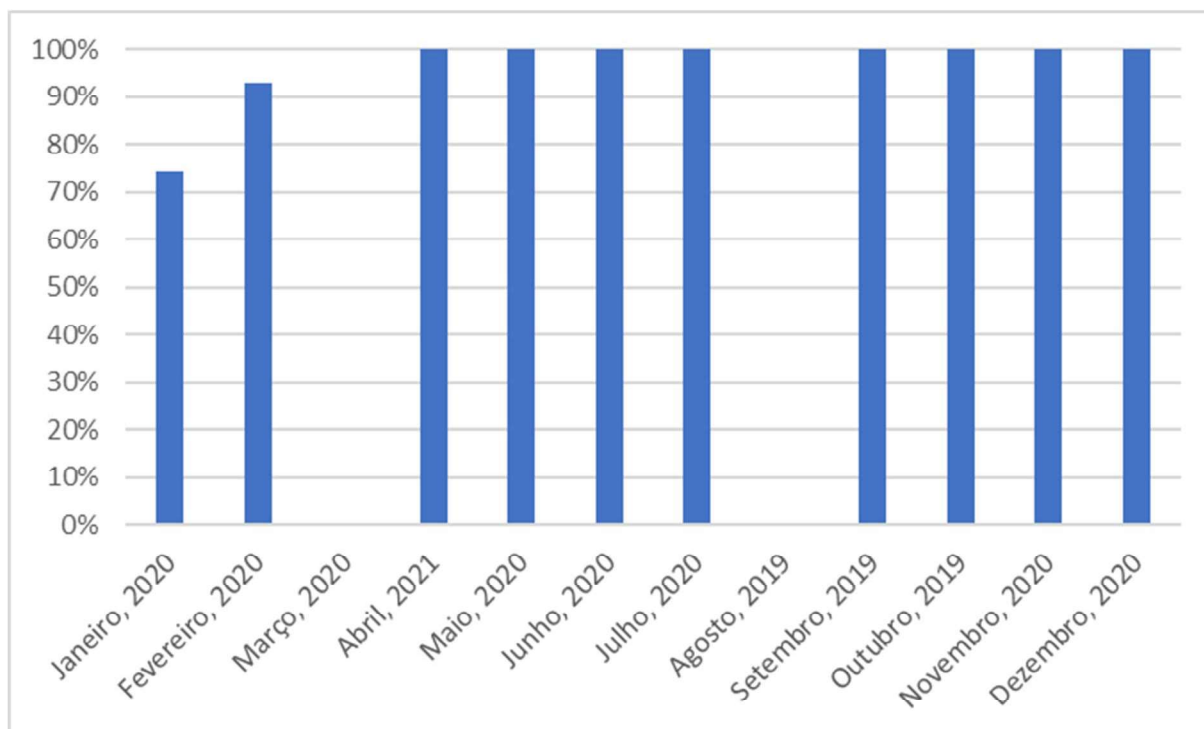
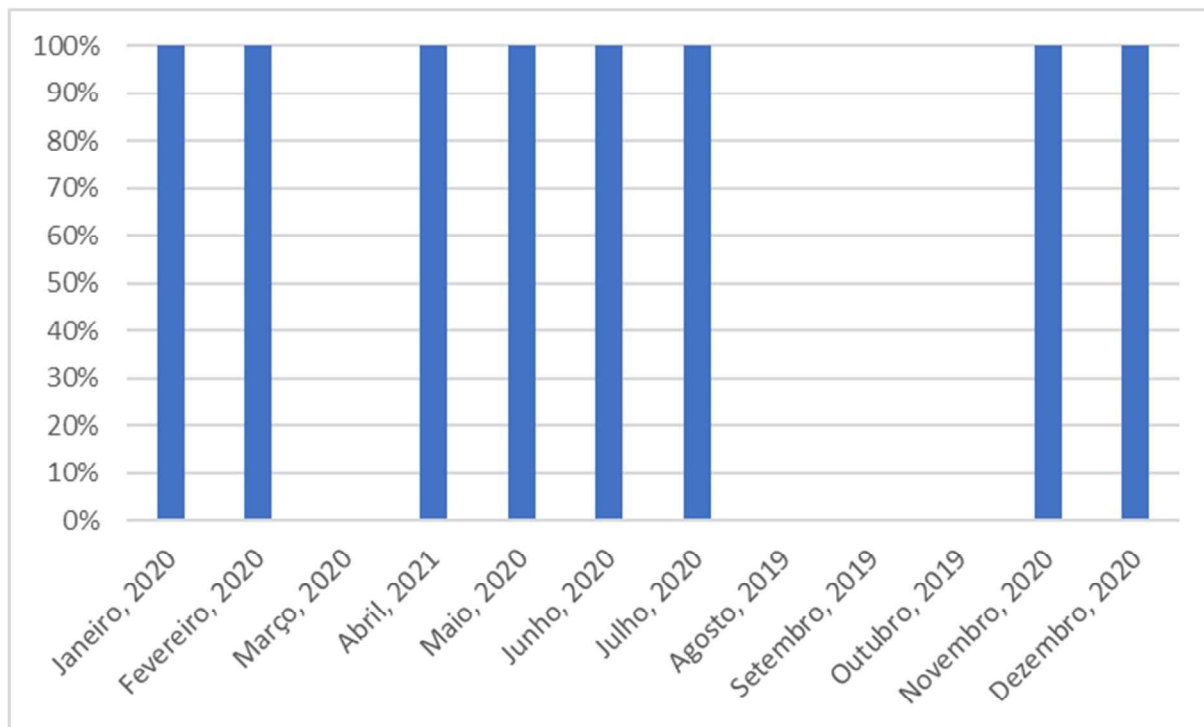
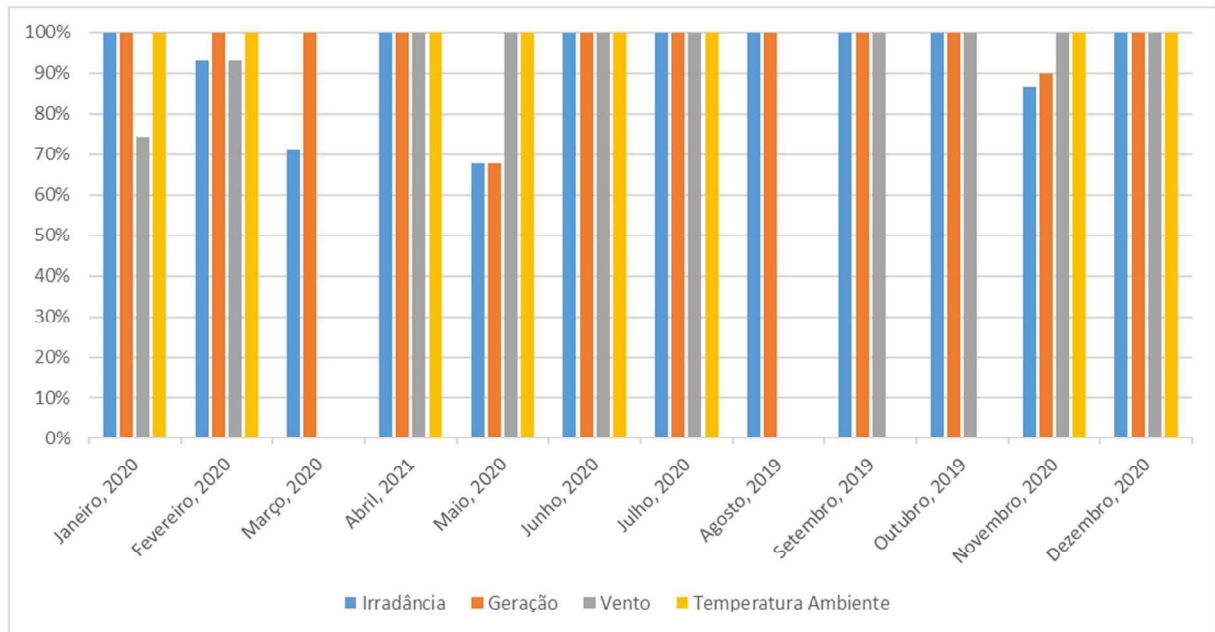


Figura 30 – Porcentagem dos dias com dados de temperatura ambiente disponíveis em cada mês.



Como a análise irá levar em conta os dados coletados por diversos sensores diferentes, o estudo fica dependente da disponibilidade de todas as informações para o um mesmo período. Assim, analisando a disponibilidade dos dados, exposto na Figura 31, os meses para melhor avaliar a influência ambiental no sistema são os meses de Janeiro, Fevereiro, Abril, Junho, Julho, Novembro e Dezembro.

Figura 31 – Comparação da disponibilidade de dados em relação ao mesmo período de tempo



3.2. Análise Térmica

As fachadas possuem um total de oito sensores de temperatura, sendo dois posicionados na parte posterior dos módulos, dois posicionados na parede externa da edificação atrás dos módulos, outros dois posicionados na parede do lado interno da edificação atrás dos módulos e outros dois na parede nua, sem nenhum módulo na frente, sendo um do lado externo e outro do lado interno da parede. Os dados de temperatura foram coletados com uma resolução temporal de cinco minutos, exceto para sensores posicionados na parede nua, que tiveram uma resolução temporal de um minuto. Como os sensores da parede nua estavam conectados a um datalogger diferente, a disponibilidade de dados para o mesmo período também foi diferente.

A Figura 32 e Figura 33 apresentam a porcentagem de dias com dados disponíveis para os diferentes conjuntos de sensores.

Figura 32 – Porcentagem dos dias com dados de temperatura dos módulos e das paredes relacionadas a eles disponíveis em cada mês.

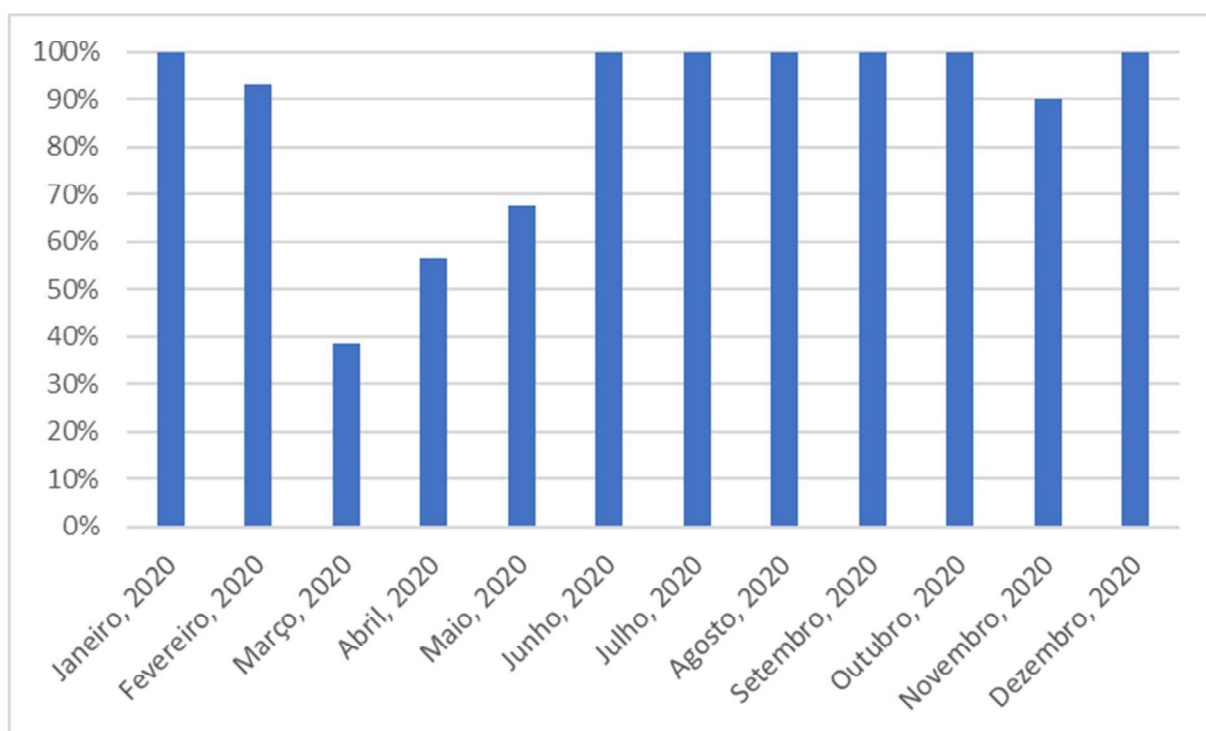
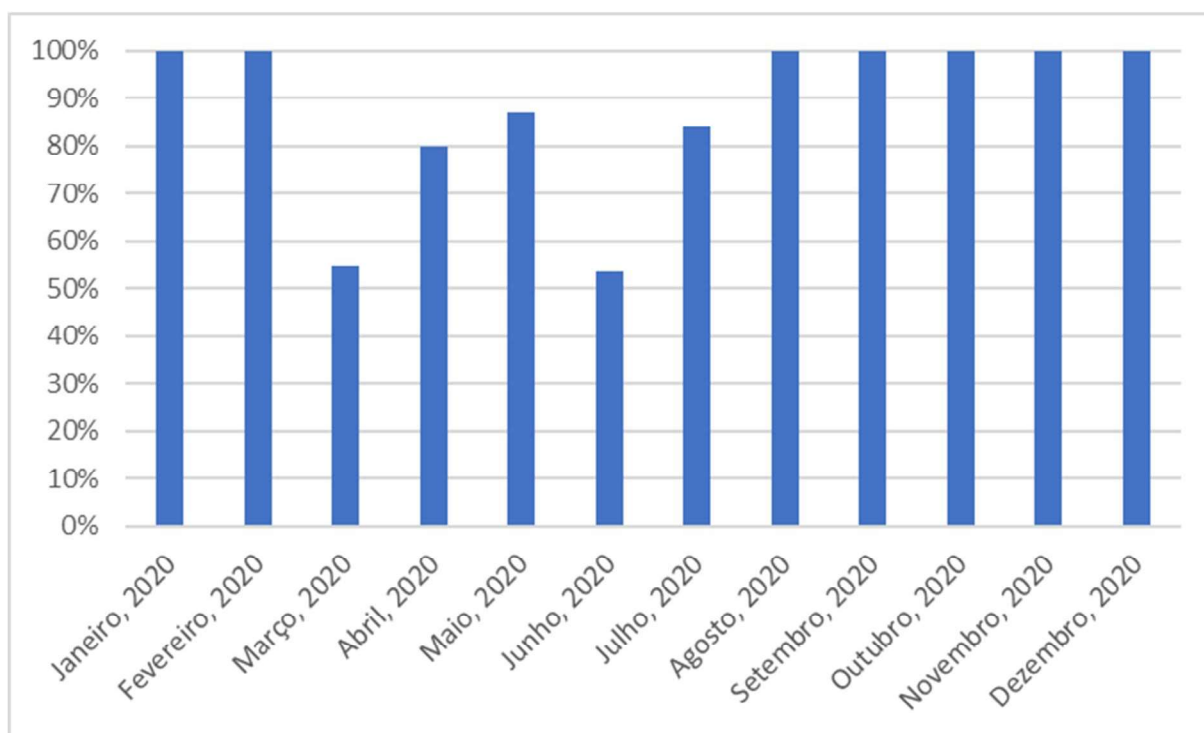


Figura 33 – Porcentagem dos dias com dados de temperatura da parede nua disponíveis em cada mês.



3.2.1. Comparação entre as diferentes topologias

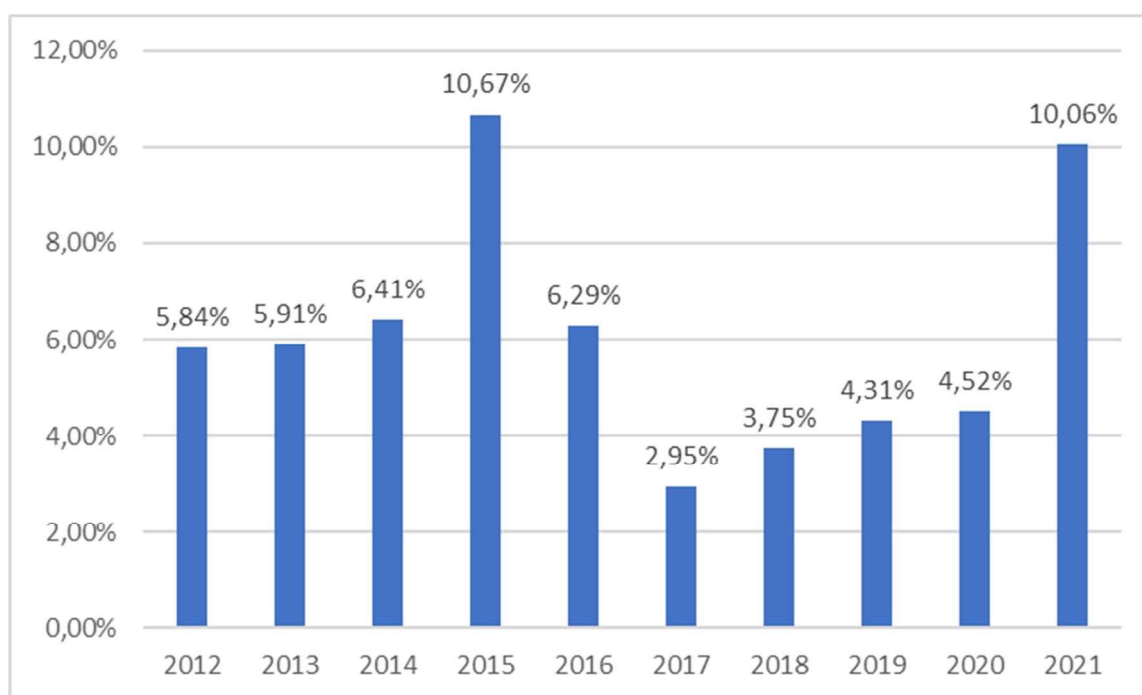
Foi comparada a médias das temperaturas mensais dos sensores relativos a cada uma das fachadas. Primeiro foram analisadas as temperaturas relativas a fachada S1, posteriormente foram analisadas as temperaturas relativas a fachada S2 e por último foi feita uma comparação entre a temperatura da parede da porção influenciada pelos módulos em relação à parede nua.

3.3. Análise Econômica

Para realizar o estudo de viabilidade, foi utilizado como Taxa Mínima de atratividade (TMA) o índice de reajuste anual da poupança, equivalente a 6,17% em 2022.

Foram definidos três cenários para o reajuste da tarifa de energia elétrica, considerando a taxa de inflação dos últimos dez anos, apresentado na Figura 34. Os cenários consideraram o índice de inflação de 3%, 5% e 10%.

Figura 34 – Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) 2012 - 2021



Fonte: (IBGE, 2022)

O período escolhido para análise foi 30 anos, por ser o tempo de garantia considerado pelo fabricante dos módulos.

3.3.1. Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) traz para o momento atual todo o fluxo de caixa do investimento inicial. Considerando o valor do dinheiro, pois utiliza a Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

Se o valor do VPL for maior que zero, significa que o investimento terá sido lucrativo ao final do período analisado, ou seja apresenta viabilidade econômica. Caso o valor seja

negativo o investimento não é economicamente viável. Para o cálculo do VPL foi utilizada a Equação 2.

$$VPL = \sum_{n=1}^T \frac{FC_n}{(1+TMA)^n} - FC_0 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

VPL: Valor Presente Líquido;

T: Duração total, em anos;

n : Período considerado, em anos;

FC_n : Valor do fluxo de caixa no período;

TMA: Taxa Mínima de Atratividade;

n : Período considerado, em anos;

FC_0 : Custo Inicial.

3.3.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que torna o VPL zero. Ela mostra percentual de retorno de um investimento, considerando a mesma periodicidade do fluxo de caixa, ou seja, representa o percentual anual de rentabilidade do projeto. Para uma TIR maior que TMA o investimento é economicamente viável, quando a TIR apresenta um valor menor a TMA o investimento não é viável economicamente. Para o cálculo da TIR foi utilizada a Equação 3.

$$\sum_{n=1}^T \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} - FC_0 = VPL = 0 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

T: Duração total, em anos;

n : Período considerado, em anos;

FC_n : Valor do fluxo de caixa no período;

TIR: Taxa Interna de Retorno;

FC_0 : Custo Inicial;

VPL: Valor Presente Líquido.

3.3.3. Payback Descontado

O Payback descontado é o período (n) em que o VPL se iguala a zero, ou o tempo que um investimento leva para ser pago, considerando o valor do dinheiro ao longo do tempo, ou seja, incluindo a TMA no cálculo. Para o cálculo do Payback Descontado foi utilizada a Equação 4

$$VPL = \sum_{n=1}^T \frac{FC_n}{(1+TMA)^n} - FC_0 = 0 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

VPL: Valor Presente Líquido;

FC_0 : Custo Inicial;

T: Duração total, em anos;

n : Período considerado, em anos;

FC_n : Valor do fluxo de caixa no período;

TMA: Taxa Mínima de Atratividade.

4. Discussão dos Resultados

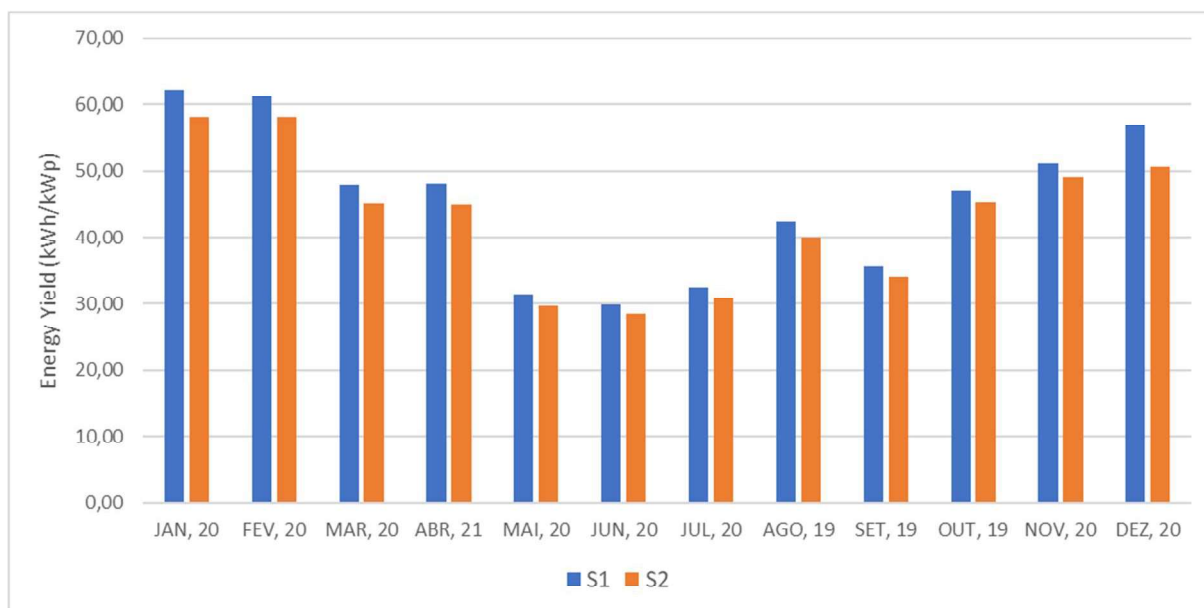
4.1. Análise Elétrica

A temperatura tem influência direta no desempenho das células fotovoltaicas. O comportamento de ambas as fachadas pode ser influenciado pelas condições ambientais como o vento e a temperatura ambiente. As trocas de calor por convecção são as que ocorrem de maneira mais distinta entre as fachadas; dado a possibilidade de circulação de ar na parte posterior da fachada ventilada (S1), que permite ao sistema um grau maior de refrigeração, o calor é retirado do módulo através do fluxo de ar existente na parte posterior do sistema, o que não ocorre na fachada estanque (S2).

Na fachada estanque, a região entre a parede e os módulos funciona como uma estufa, já que não permite a dissipação do ar quente da parte posterior dos módulos, assim, a temperatura no interior desta câmara tende a aumentar, a dificuldade de trocas de calor com o ambiente externo também é dificultada pelo sistema construtivo.

Ao analisar o *Energy Yield* de ambas as fachadas é possível perceber que o rendimento delas é melhor durante os meses de verão, quando a disponibilidade de radiação solar é maior. Portanto vale destacar que mesmo estando posicionadas de forma idêntica o rendimento do sistema S1 é consideravelmente maior durante todos os meses do ano, chegando a ultrapassar 11% de diferença durante o mês de dezembro. A Figura 35 apresenta o *Energy Yield* para ambas as fachadas, calculado mês a mês, durante o período de um ano.

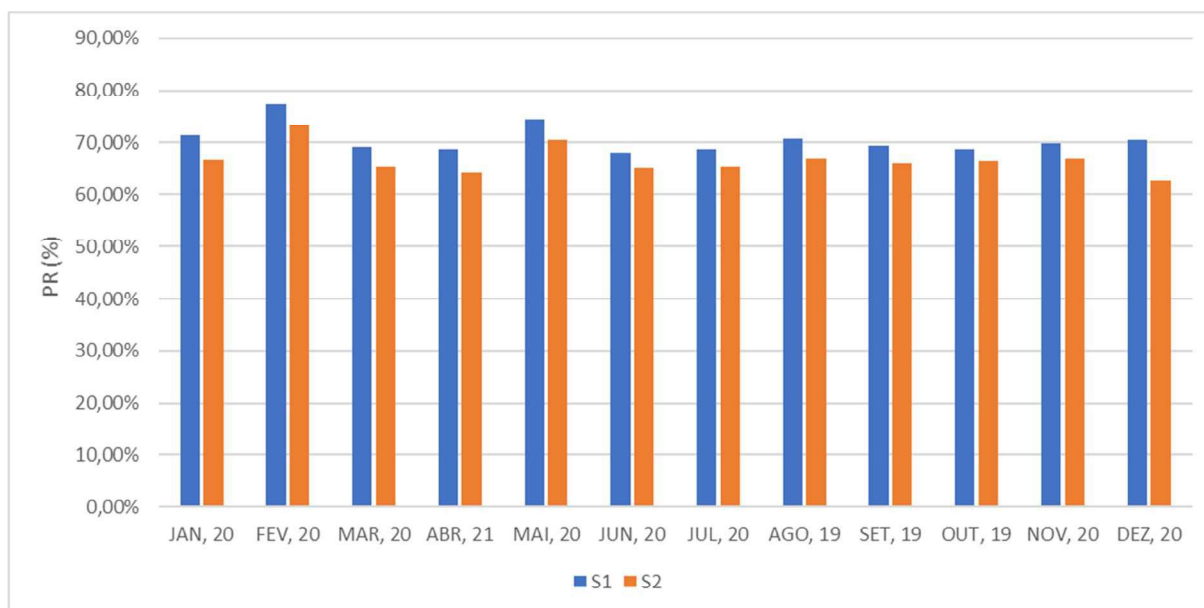
Figura 35 – *Energy Yield* mensal de ambas as fachadas para o período de um ano



É possível perceber que o sistema S1 tem um melhor aproveitamento da potência instalada em todos os meses do ano, não ficando abaixo do sistema S2 em nenhum momento. A diferença de desempenho entre os sistemas fica mais evidente nos meses de janeiro e dezembro, quando a diferença chega a ser em média 9% para os respectivos meses. Esta diferença no desempenho gera uma diferença anual de 6%, com um *Yield* anual de 546kWh/kWp para o sistema S1 e 514kWh/kWp para o sistema S2.

Com relação à PR dos sistemas, ambos ficaram um pouco abaixo daquilo que se espera de um sistema solar fotovoltaico operando sob influência das condições climáticas e variáveis ambientais. Apesar disso, a PR de ambos os girou em torno dos 70%. Novamente é possível perceber que o sistema S1 se sobressai em relação ao sistema S2, a diferença construtiva entre as fachadas interfere diretamente no desempenho elétrico do sistema. A Figura 36 apresenta o PR mensal de ambas as fachadas para o período de um ano.

Figura 36 – PR mensal de ambas as fachadas para o período de um ano



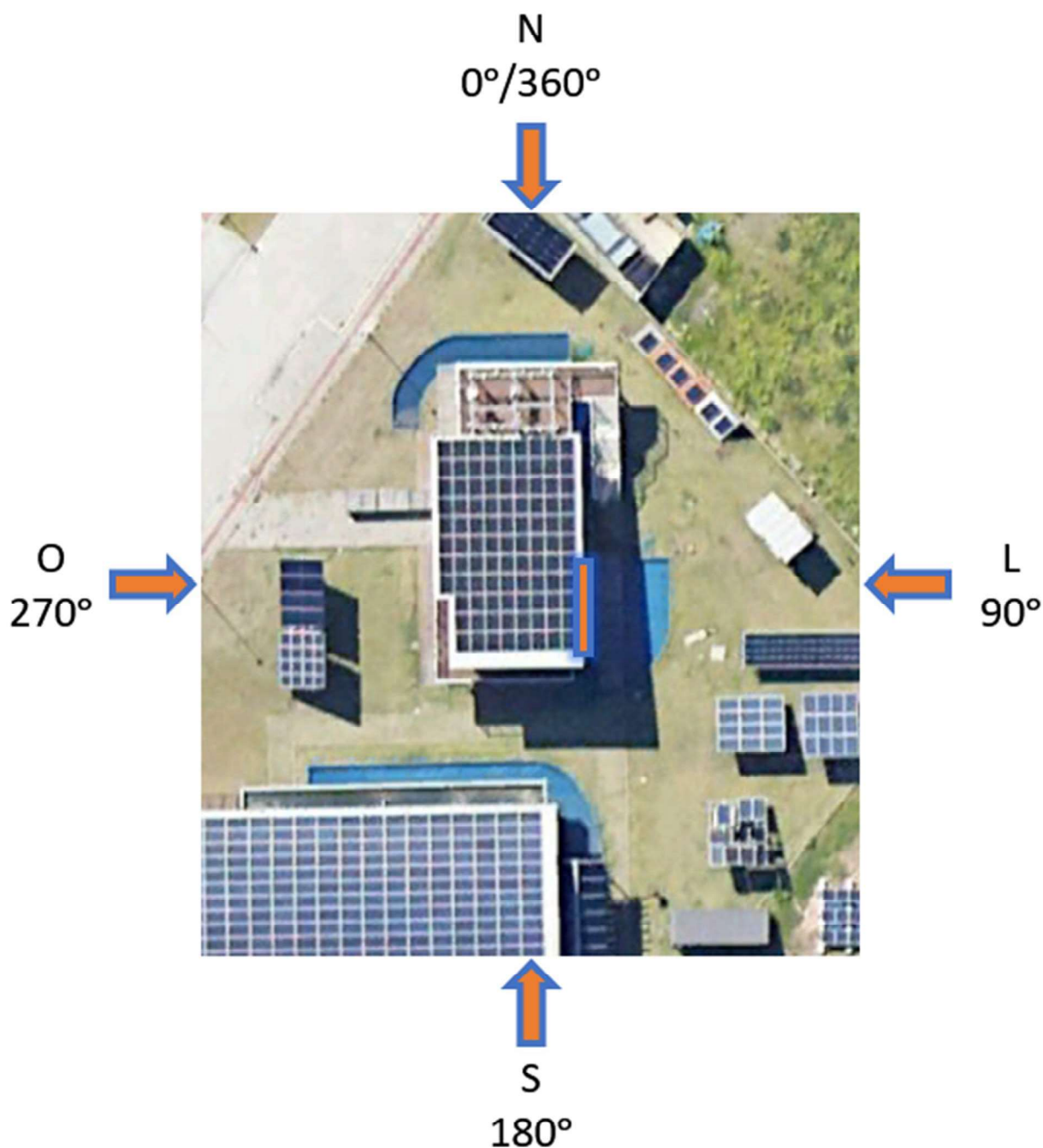
Enquanto o sistema S1 ficou com um PR anual de 71%, o sistema S2 ficou na casa dos 67%, ou seja, o desempenho do sistema S1 no período considerado é 5,8% maior, uma diferença relevante em termos de desempenho de sistemas solares fotovoltaicos.

4.1.1. Influência ambiental

Devido à posição da fachada, os ventos que causam maior influência no seu comportamento térmico são os provenientes da direção leste, os quais atingem ambas as fachadas de forma perpendicular à sua superfície. Os provenientes das direções nordeste e sudeste atingem a fachada de maneira transversal, portanto a refrigeração causada por estes ventos é menor e ainda podem vir a gerar perdas por *mismatch* no sistema, dado a diferença de temperatura entre os módulos de uma mesma *string*, que passa a ocorrer por causa da retirada de calor de forma desigual do plano da fachada. Os ventos vindos das direções norte e sul tem menos influência, pois a troca de calor por convecção é pouco eficiente, dado que o sentido do fluxo de ar está paralelo ao plano dos módulos.

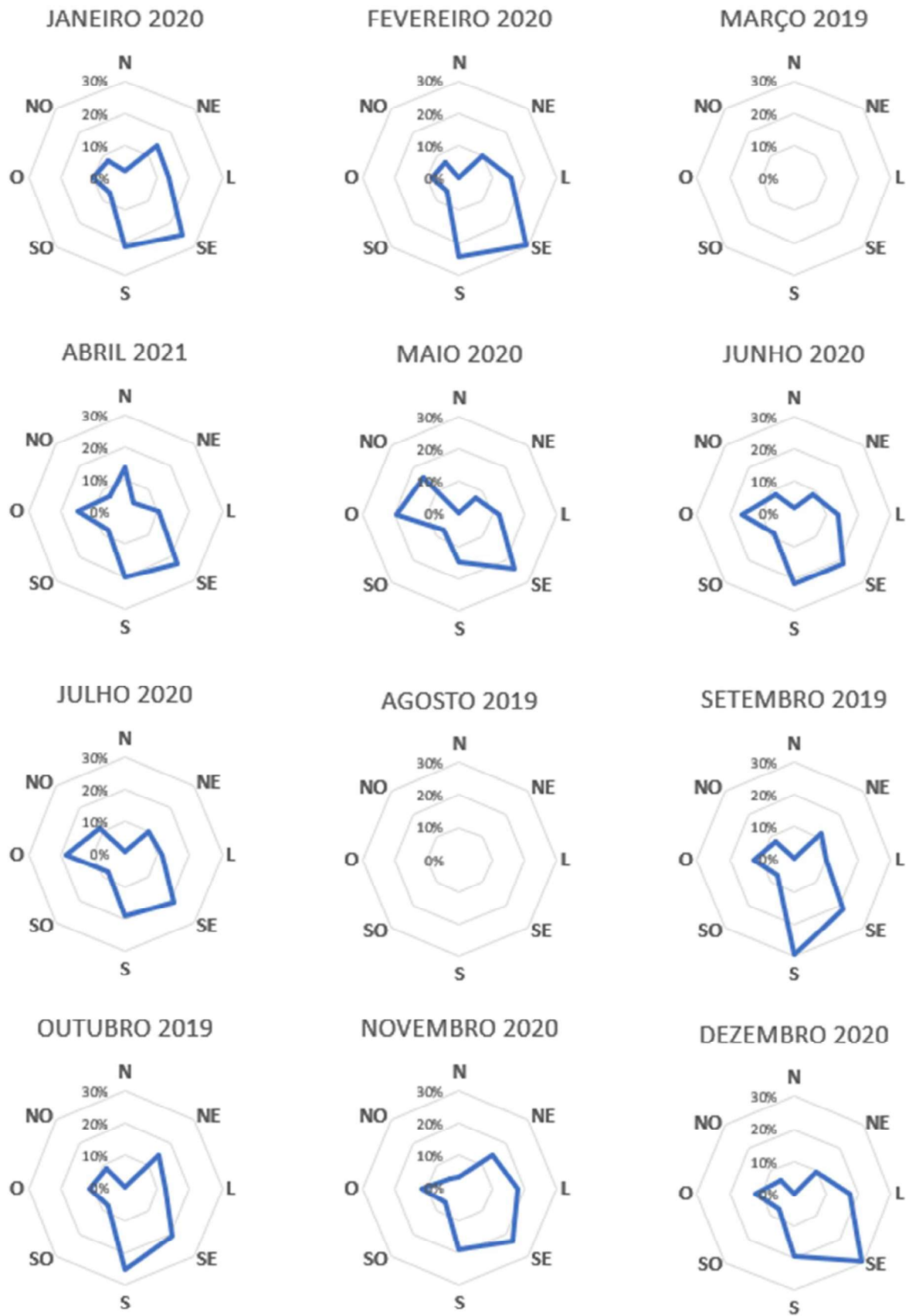
Vento provenientes das direções noroeste, oeste e sudoeste tendem a ter uma influência ainda menor no desempenho dos sistemas, podendo ser considerada nula, pois o edifício onde os sistemas estão instalados os protege das rajadas provenientes destas direções. A Figura 37 apresenta a orientação do vento em relação à fachada.

Figura 37 – Orientação do vento em relação a fachada



As correntes de vento que atingem o sistema, considerando a sua direção e intensidades ao longo do dia, podem influenciar no comportamento elétrico da fachada, portanto é relevante analisar com maior nível de detalhe o comportamento do vento ao longo do ano. A Figura 38 apresenta a recorrência dos ventos no local onde a fachada está instalada. É possível perceber que os ventos predominantes são provenientes do sudeste ficando com ocorrência acima de 20% durante a maioria dos meses do ano. Apenas durante os meses de setembro e outubro os ventos predominantes são os vindos da direção sul.

Figura 38 – Predominância da direção dos ventos



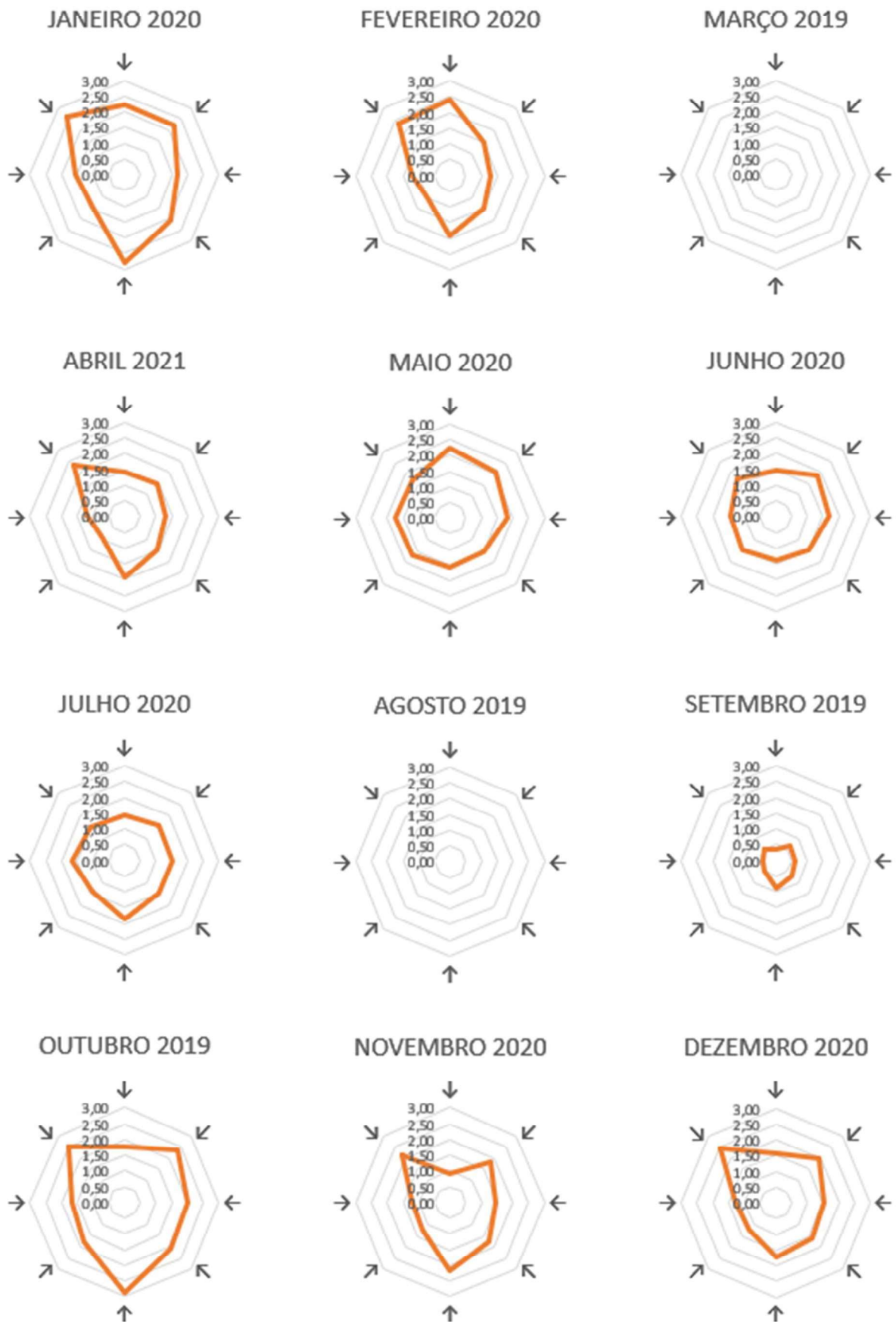
Ventos provenientes da direção sul também são bastante pronunciados em todos os meses, apesar de serem menos relevantes para a troca de calor. Ventos provenientes do norte tem uma recorrência muito baixa e quase não ocorrem durante o ano, quando comparados as demais direções. Estas duas direções, norte e sul, tem pouca influência na retirada de calor das fachadas, ainda que os ventos da direção sul contribuam para a troca do ar da câmara do sistema S1.

Durante os meses de abril, maio, junho, julho é possível perceber que há um aumento dos ventos provenientes do lado oeste da edificação, neste período sua recorrência se aproxima dos 20%. Há um aumento repentino dos ventos proveniente dessa direção no mês de maio, que se mantém até o mês de julho, diminuindo conforme se aproxima o verão.

De maneira geral os ventos que tem maior potencial para refrigeração do sistema são os provenientes do nordeste, leste e sudeste. Quando os ventos provenientes destas direções são majoritários durante o mês, esperasse que sua influência no desempenho do sistema seja maior.

Outro fator que pode influenciar no desempenho da fachada é a velocidade do vento; em média os ventos mais intensos ocorrem durante o mês de outubro. Conforme visto, os ventos que atingem a fachada em suas direções favoráveis são predominantes nos meses mais quentes, entre outubro e abril. No entanto, sua intensidade só é relevante durante alguns meses dentro deste período. A Figura 39 apresenta a velocidade do vento de acordo com a sua direção.

Figura 39 – Velocidade média do vento de acordo com sua direção



Espera-se que o durante os meses mais quentes do ano, o impacto do vento na temperatura dos módulos seja maior. A Figura 40 e Figura 41 mostram o PR de ambas as fachadas em relação a temperatura ambiente e a velocidade dos ventos que mais tem influência no desempenho das fachadas e a intensidade média do vento em relação a sua recorrência respectivamente.

Figura 40 – Variáveis ambientais x PR dos sistemas

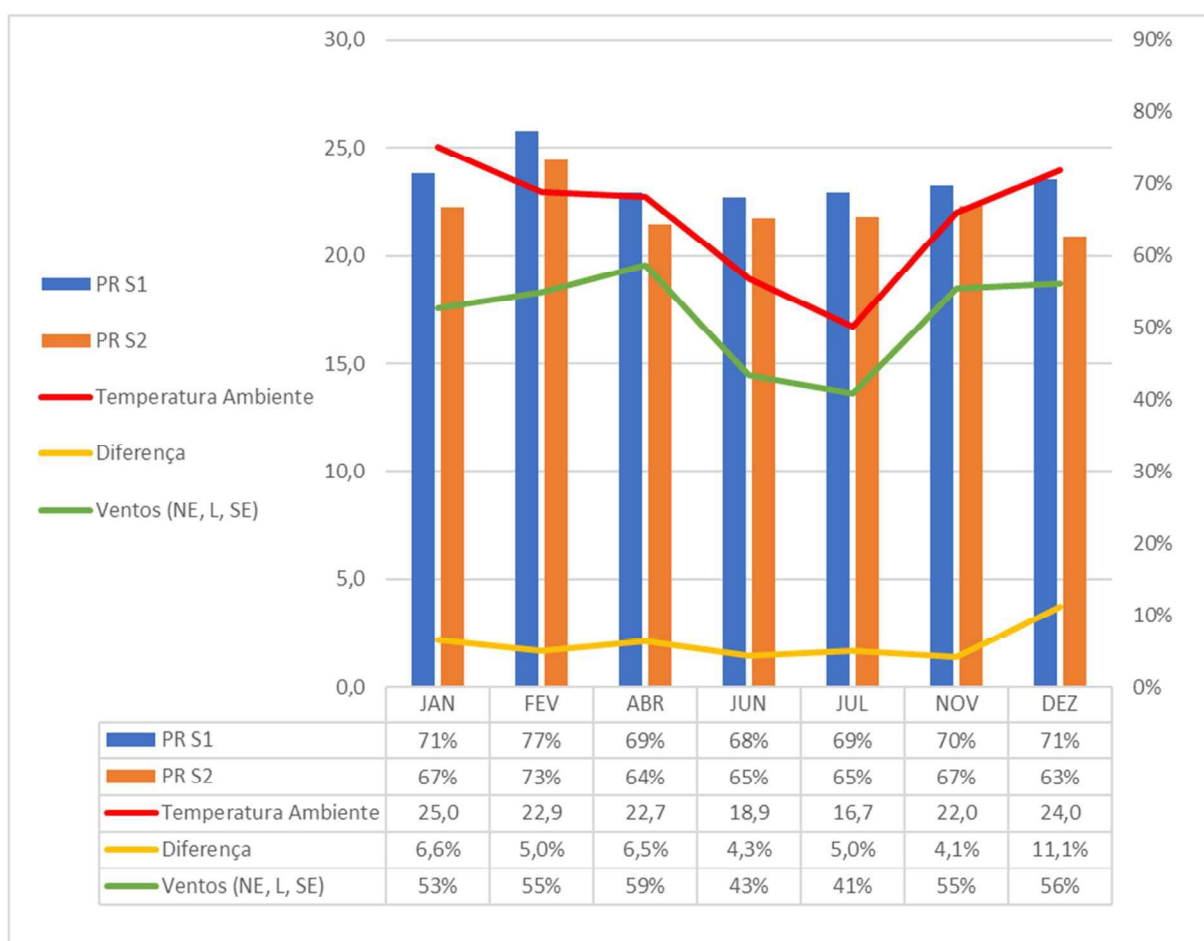
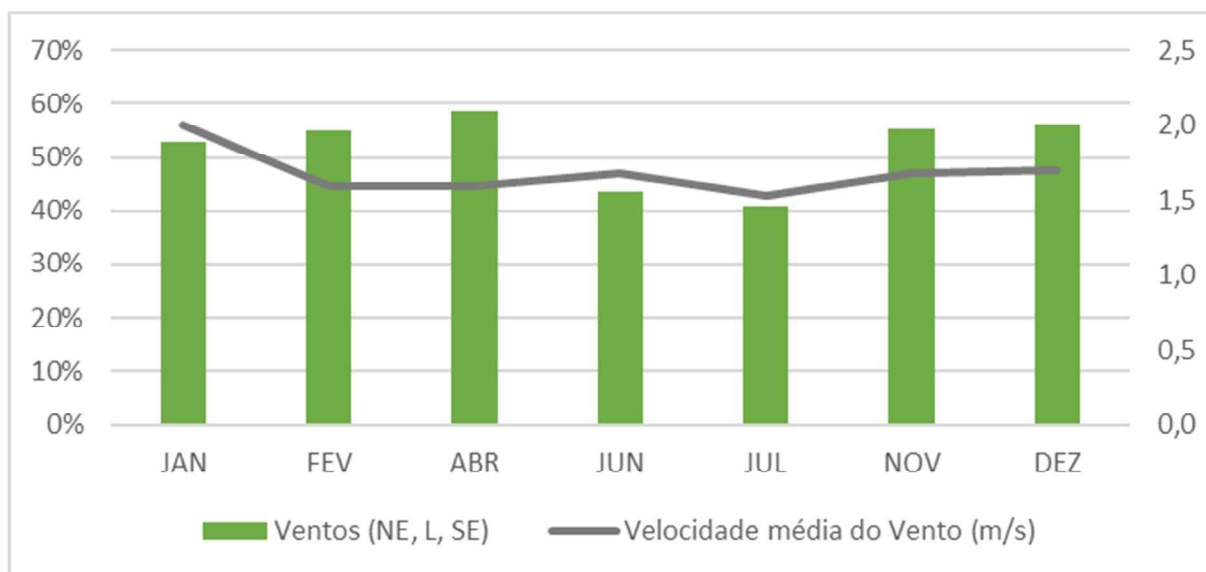


Figura 41 – Velocidade média do vento em relação à recorrência



Apesar de o vento interferir na temperatura dos módulos, ao analisar a relação entre os ventos que atingem a fachada, a temperatura ambiente e o desempenho do sistema o resultado apresentado na Figura 40 é inconclusivo. Em um primeiro momento parece não haver relação entre as variáveis ambientais selecionadas e o desempenho da fachada.

Para o mês de novembro e dezembro por exemplo, a diferença de desempenho entre os sistemas foi de 4,1% e 11,1%, respectivamente, enquanto que a recorrência e a intensidade dos ventos permaneceram praticamente nos mesmos valores.

Em relação a fevereiro e novembro, meses onde os valores das variáveis ambientais são ainda mais semelhantes a diferença entre o desempenho dos sistemas entre esses meses foi de 9% para o sistema S1 e de 8% para o sistema S2, ou seja, as variáveis ambientais não apresentaram relação direta com o desempenho do sistema.

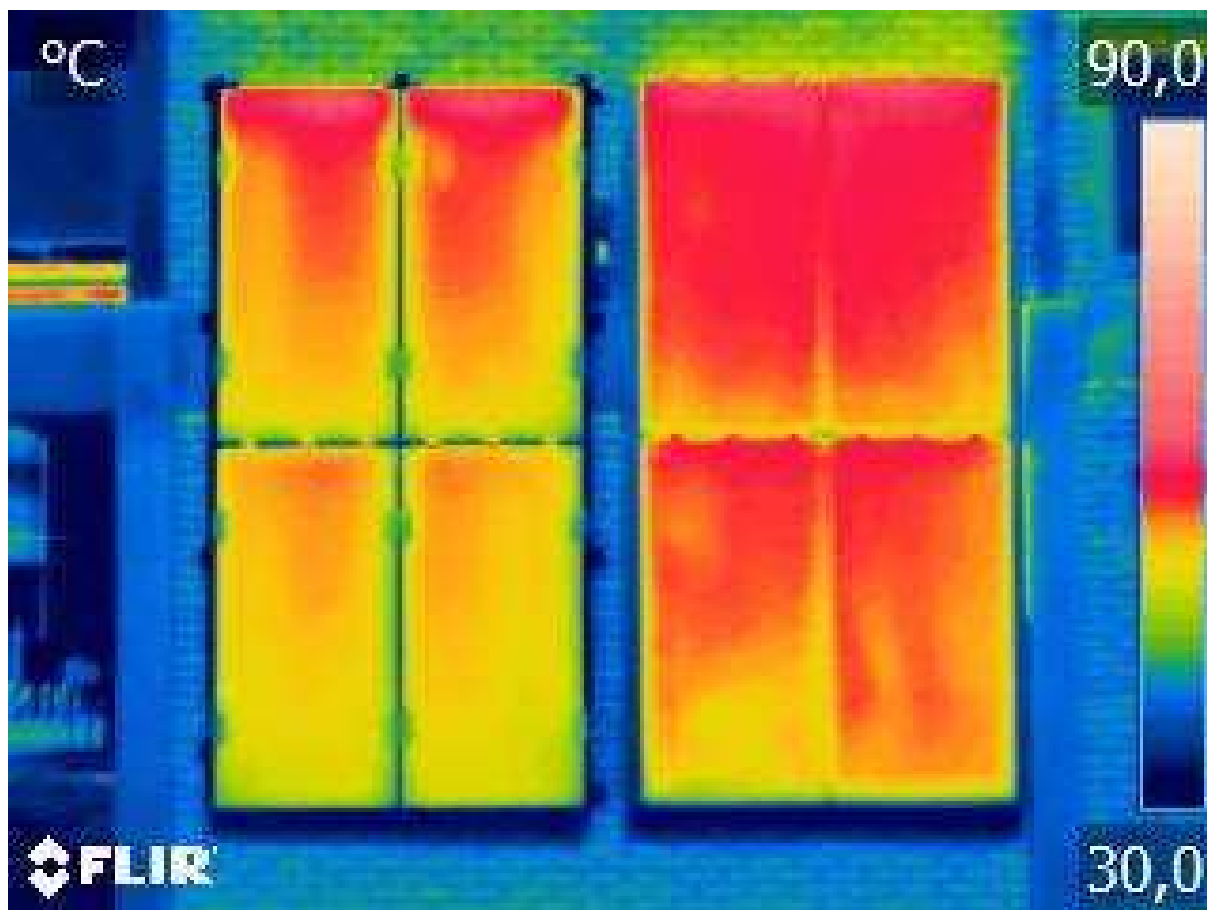
A diferença de desempenho que ocorre entre os sistemas demonstra estar mais relacionada a convecção natural e a temperatura do módulo em si do que em relação às variáveis ambientais consideradas.

Dado a tipologia construtiva das fachadas, o fato de a fachada S1 permitir a dissipação do ar quente através das aberturas laterais, ajuda na diminuição da temperatura dos módulos, o que interfere diretamente no desempenho do sistema.

Em média o PR do sistema S1 foi 6% maior do que o sistema S2. Portanto é possível afirmar que as trocas de calor, facilitadas pela topologia construtiva da fachada S1, melhoraram o desempenho do sistema ao longo de todo o período analisado. A Figura 42 apresenta uma

fotografia feita com uma câmera termográfica, onde é possível identificar claramente a diferença de temperatura existente entre o sistema S1, à esquerda e S2, à direita.

Figura 42 – Foto da fachada feita com câmera termográfica



É possível perceber que existe uma diferença de temperatura, não somente entre os módulos de cada sistema, mas também na superfície de cada módulo individualmente. Para ambos os sistemas, a porção superior de todos os módulos apresenta uma temperatura mais alta que a da porção inferior.

Para o sistema S1, os módulos inferiores apresentam uma temperatura mais baixa que os módulos da parte superior, estes por sua vez, mostram um gradiente de temperatura mais intenso com o ápice do sistema apresentando a maior temperatura do sistema S1. Esta condição se dá pois conforme o ar atrás retira calor dos módulos, ele aumenta a sua temperatura, diminuindo sua capacidade de extrair o calor.

Para o sistema S2 a condição é semelhante, no entanto é perceptível a temperatura maior quando comparada ao sistema S1, dado a topologia construtiva que dificulta a saída do ar quente.

Conforme apresentado anteriormente, diferenças de temperatura entre os módulos de uma mesma *string* levam o sistema a perdas por *mismatch*, deste modo em fachadas compostas por um número maior de módulos, essa diferença passa a ser ainda mais significativa.

4.2. Análise Térmica

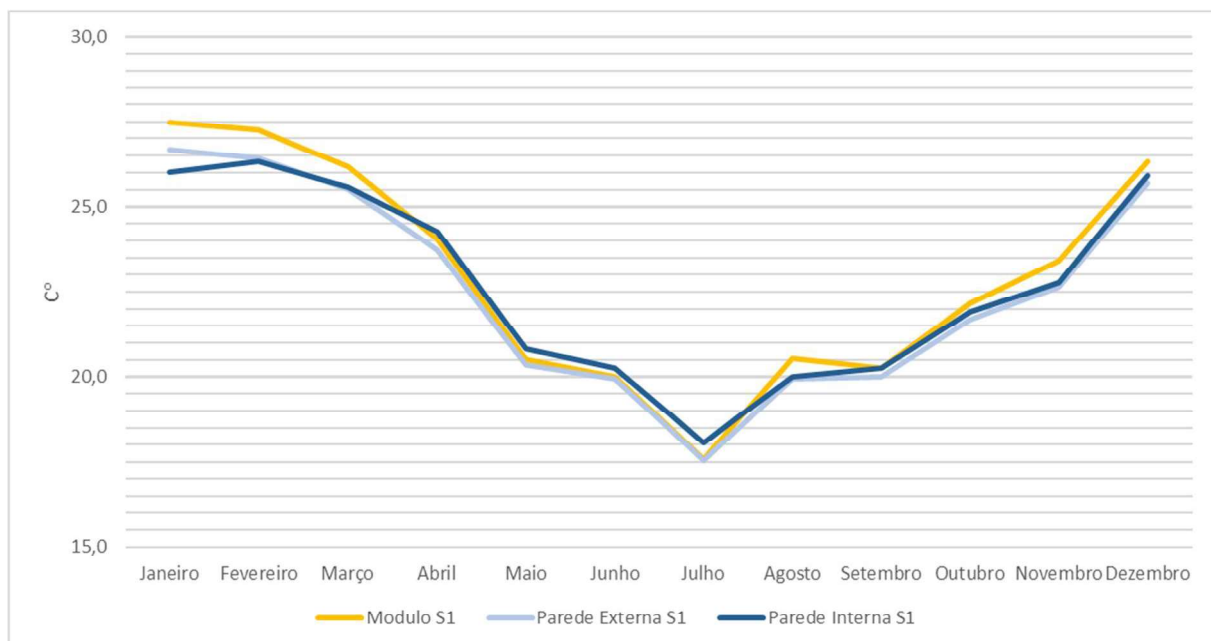
Além da geração de energia, as fachadas ventiladas fotovoltaicas possuem um impacto positivo no desempenho térmico da edificação. Ao mesmo tempo em que os módulos fotovoltaicos aproveitam a radiação solar para a geração de energia, eles protegem a parede externa da edificação desta mesma radiação, diminuindo o calor que é absorvido pela parede.

Esta dupla funcionalidade só existe para esse tipo de tecnologia, nenhuma outra fonte renovável pode ser utilizada como material de revestimento de uma edificação. A geração de energia *in loco* e a melhora do desempenho térmico aproximam a edificação de um conceito mais sustentável e vão de encontro ao conceito de edificação de energia zero.

4.2.1. Fachada com o Sistema S1

Com relação as temperaturas relativas ao sistema S1, temos as médias mensais de cada elemento medido representado na Figura 43. É possível perceber que durante o ano a temperatura dos módulos e da parede externa apresentam uma maior amplitude enquanto que a variação da temperatura da parede interna é menor.

Figura 43 – Temperatura média mensal dos elementos relacionados a Fachada S1



Durante os meses mais quentes, a temperatura média dos módulos aumenta consideravelmente, com os valores se afastando das outras medidas. Essa condição é explicada pelo fato de os módulos receberem radiação solar de forma direta, enquanto os outros elementos estão protegidos dessa influência por estarem posteriores a posição dos módulos.

Durante o inverno a temperatura média dos módulos e da parede externa se aproximam, ficando muito próximas entre si e abaixo da temperatura da parede interna, durante este período a irradiância é menor e gera menor influência da temperatura média do módulo. Também durante o inverno a temperatura média da parede interna fica maior do que a dos outros elementos indicando que a perda de calor da edificação para o ambiente é dificultada na área da edificação revestida pela fachada S1. Essa condição ajuda a manter a inércia térmica da edificação que é evidenciada pela menor amplitude térmica que a parede interna enfrenta durante o ano.

De maneira geral a temperatura da parede interna fica 2,9% mais quente que a parede externa durante o mês de julho e 0,9% mais fria durante o mês de dezembro.

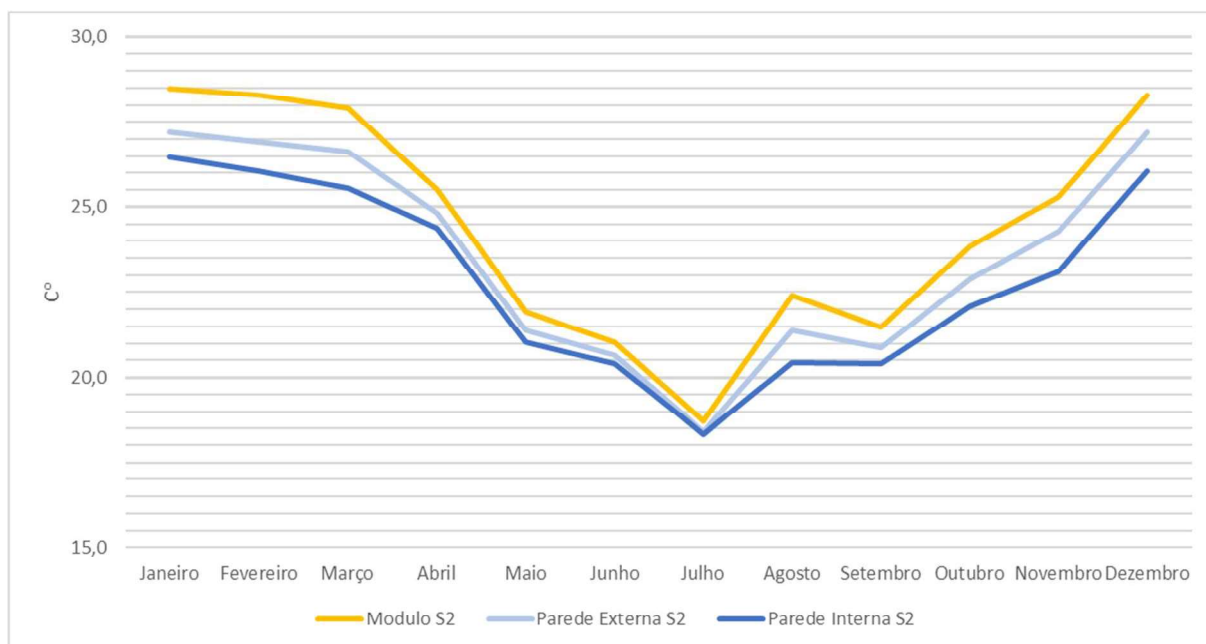
4.2.2. Fachada com o Sistema S2

Com relação as temperaturas relativas a fachada S2, temos as médias mensais de cada elemento medido representado na Figura 44. É possível perceber que, diferente do que acontece na fachada S1, durante o ano a temperatura de todos os elementos apresenta uma amplitude semelhante, com a temperatura do módulo se mantendo acima dos outros elementos durante todos os meses do ano.

Durante os meses mais quentes, assim como na fachada S1, a temperatura média dos módulos aumenta, com os valores se afastando das outras medidas. Já durante o inverno a temperatura média dos elementos se aproximam, ficando muito próximas entre si, com os módulos mantendo as temperaturas mais altas em relação aos outros elementos, enquanto estes registram praticamente a mesma temperatura. Ainda assim, durante o inverno, a temperatura média da parede interna se mantém abaixo dos outros elementos, esta condição acontece, pois, a câmara da fachada S2 consegue manter os módulos e a parede externa em uma temperatura mais elevada durante o dia, por isso as medidas se aproximam das medidas da parede interna. Essa condição indica um isolamento térmico mais eficiente da fachada S2 durante os meses de inverno.

Assim a temperatura da parede interna fica 0,4% mais quente que a parede externa durante o mês de julho e 4,2% mais fria durante o mês de dezembro.

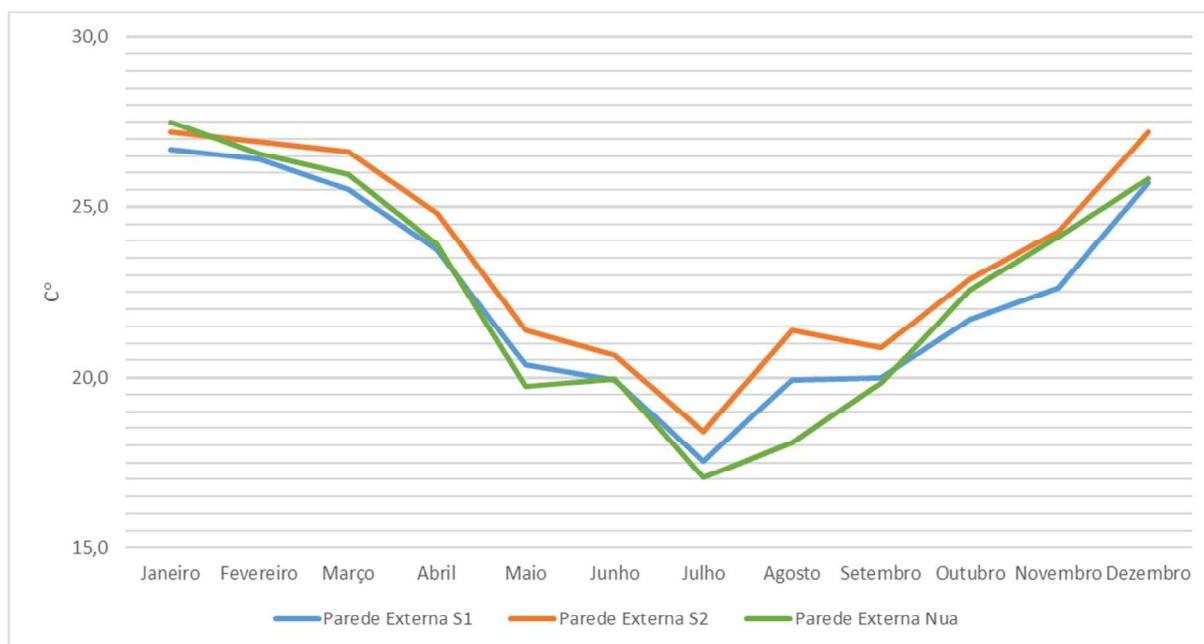
Figura 44 – Temperatura média mensal dos elementos relacionados a fachada S2



4.2.3. Comparação com a Parede Nua

Fazendo a comparação dos dados da parede externa para a porção influenciada pelas fachadas S1 e S2 com relação a parede nua é possível perceber que a influência ambiental na parede que não possui nenhum tipo de sistema instalado é maior do que para as outras paredes. A Figura 45 apresenta a média mensal da temperatura da parede externa da edificação.

Figura 45 – Temperatura média mensal da parede externa da edificação



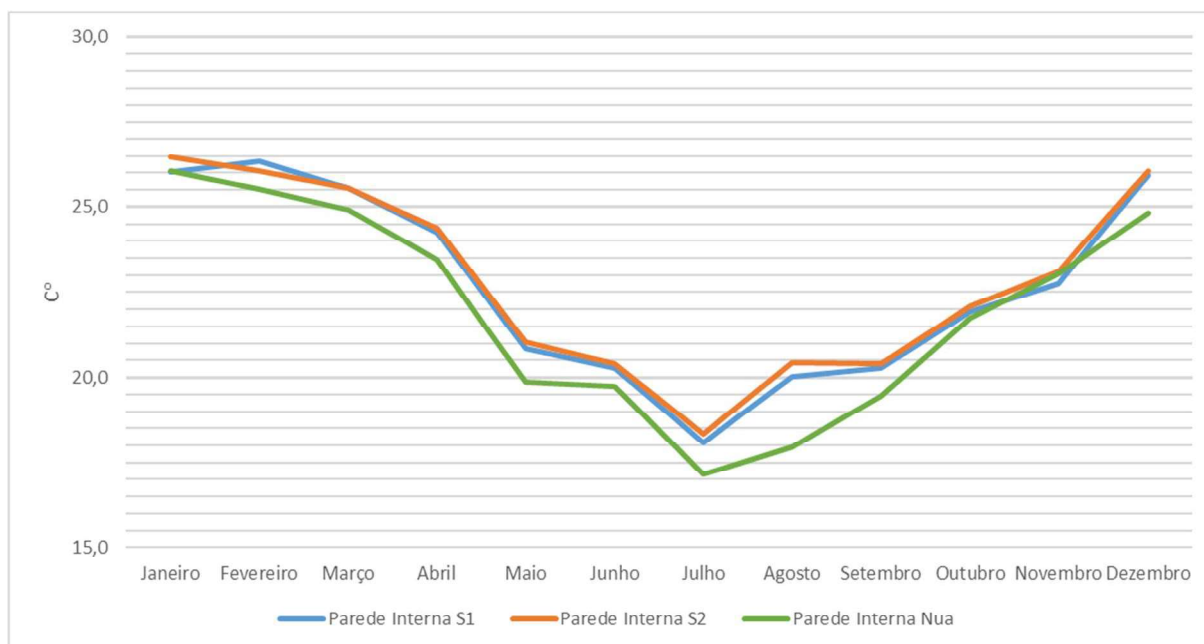
A parede coberta pelo sistema S1 apresenta a menor temperatura média entre os meses de outubro até abril, justamente no período onde as temperaturas são mais altas a fachada ventilada demonstra ser um melhor isolante para as influencias ambientais sofridas pela parede.

Durante o inverno, quando as temperaturas mais baixas são mais extremas, a parede coberta pelo sistema S2 apresenta as maiores temperaturas, neste caso a proteção gerada pela fachada estanque é mais efetiva para este período do ano.

Por outro lado, é possível perceber que as temperaturas mais altas são atingidas pela parede externa coberta pelo sistema S2, com exceção do mês de janeiro. Mesmo sem nenhuma proteção contra a radiação solar, na maior parte do período de verão a parede nua ainda mantém uma temperatura menor do que a parede coberta pelo sistema S2, isso acontece pois os a fachada estanque dificulta as trocas de calor com o ambiente, o que não acontece na parede nua; esta por sua vez apesar de receber a radiação solar diretamente em sua superfície consegue manter uma troca de calor eficiente, diminuindo a temperatura ao longo do dia enquanto que a fachada estanque ocorre um efeito estufa, aumentando a temperatura conforme o tempo de exposição a luz solar.

Ao avaliar a parede interna, temos um comportamento que não é esperado, se levarmos em conta o que acontece na parede externa. A Figura 46 apresenta a média mensal da temperatura da parede interna da edificação.

Figura 46 – Temperatura média mensal da parede interna da edificação



É possível perceber que a temperatura média da parede interna nua se mantém abaixo das outras duas medidas durante o ano inteiro, isso se deve a presença de um aparelho de ar condicionado instalado na sala onde fica a parede interna. Outro fator é a posição do sensor de temperatura que se encontra na parte inferior da parede, sofrendo ainda mais influência das temperaturas mais baixas geradas pelo ar condicionado.

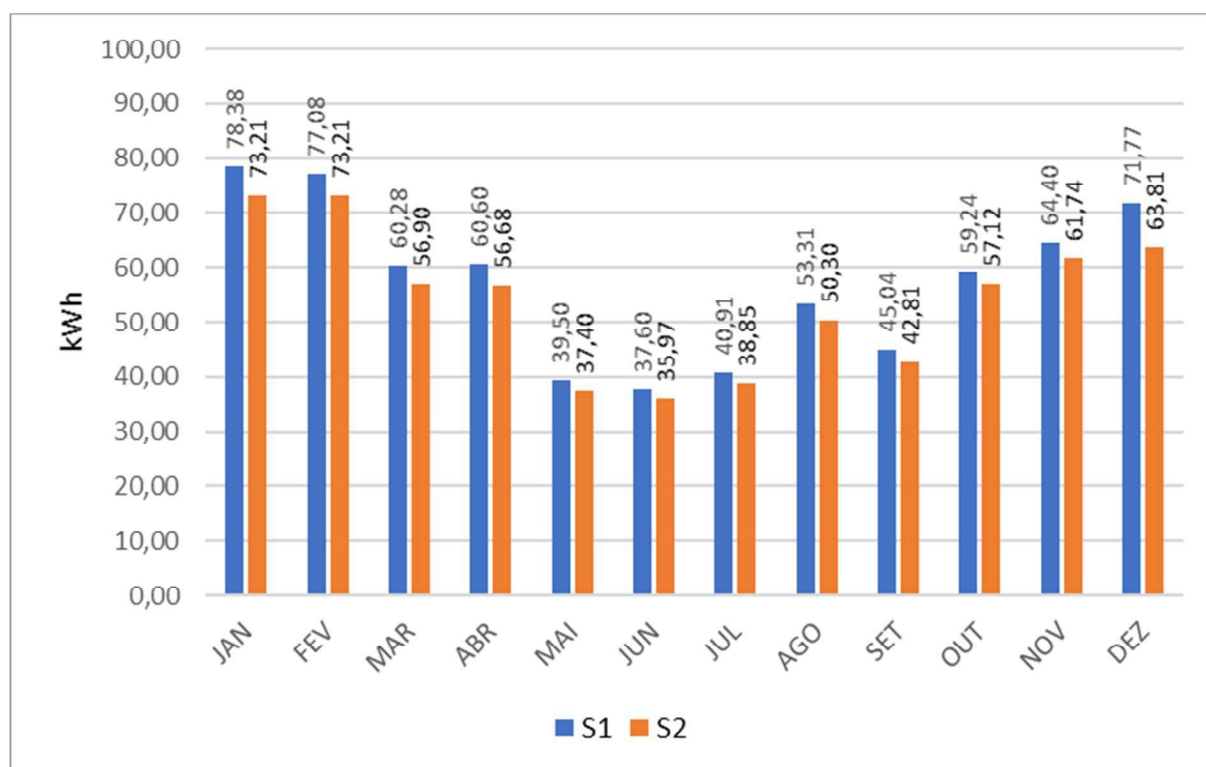
Ainda assim, é possível perceber que a parede interna relativa a fachada S1 se manteve com temperatura abaixo parede interna coberta pelo sistema S2 em quase todos os meses do ano, exceto fevereiro.

4.3. Análise Econômica

Em média o custo de um sistema fotovoltaico de até 50kWp ficou na ordem de 3,88 R\$/Wp para o consumidor final em 2021 (GREENER, 2020). Assim considerando que os sistemas fotovoltaicos instalados são idênticos, podemos considerar que cada um deles custou R\$ 4.888,80. Dado que existe uma diferença entre as estruturas, a fachada estanque terá um custo 10% maior do que a fachada ventilada devido a quantidade de material utilizada para fazer o acabamento, correspondendo a um preço final de R\$ 5.377,68.

O custo da energia elétrica em 2021 na concessionária CELESC, para unidades consumidoras residenciais foi de R\$ 0,53. Considerando a geração de energia de cada um dos sistemas, 688,1 kWh/ano para o sistema S1 e 648,0 kWh/ano para o sistema S2, temos que a economia anual fica em R\$ 366,23 e R\$ 344,89 para cada sistema respectivamente. A Figura 47 apresenta a geração de energia de cada um dos sistemas durante o período de um ano.

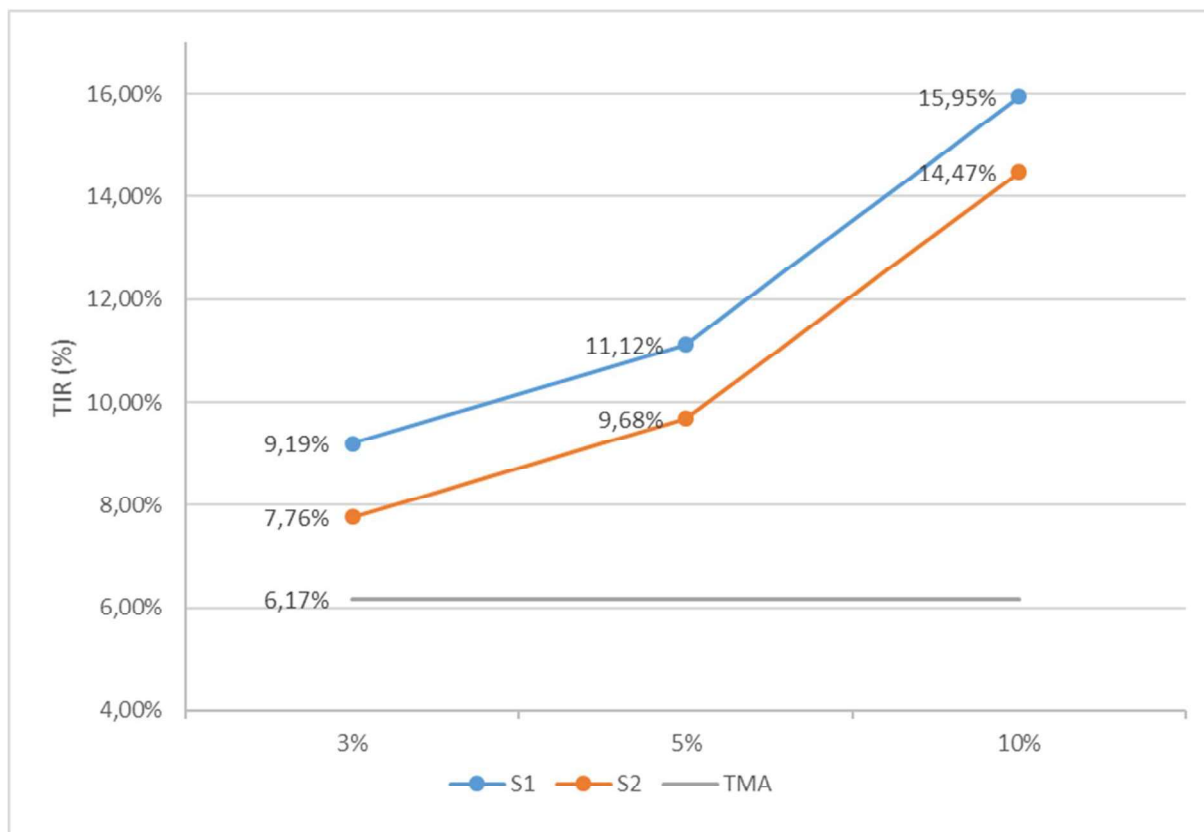
Figura 47 – Geração de energia



Para todos os cenários analisados, ambos os sistemas apresentaram uma TIR maior que a TMA considerada, indicando que o investimento é viável, a Figura 48 apresenta a TIR para os três cenários considerados. Mais uma vez a fachada com o sistema S1 apresentou um

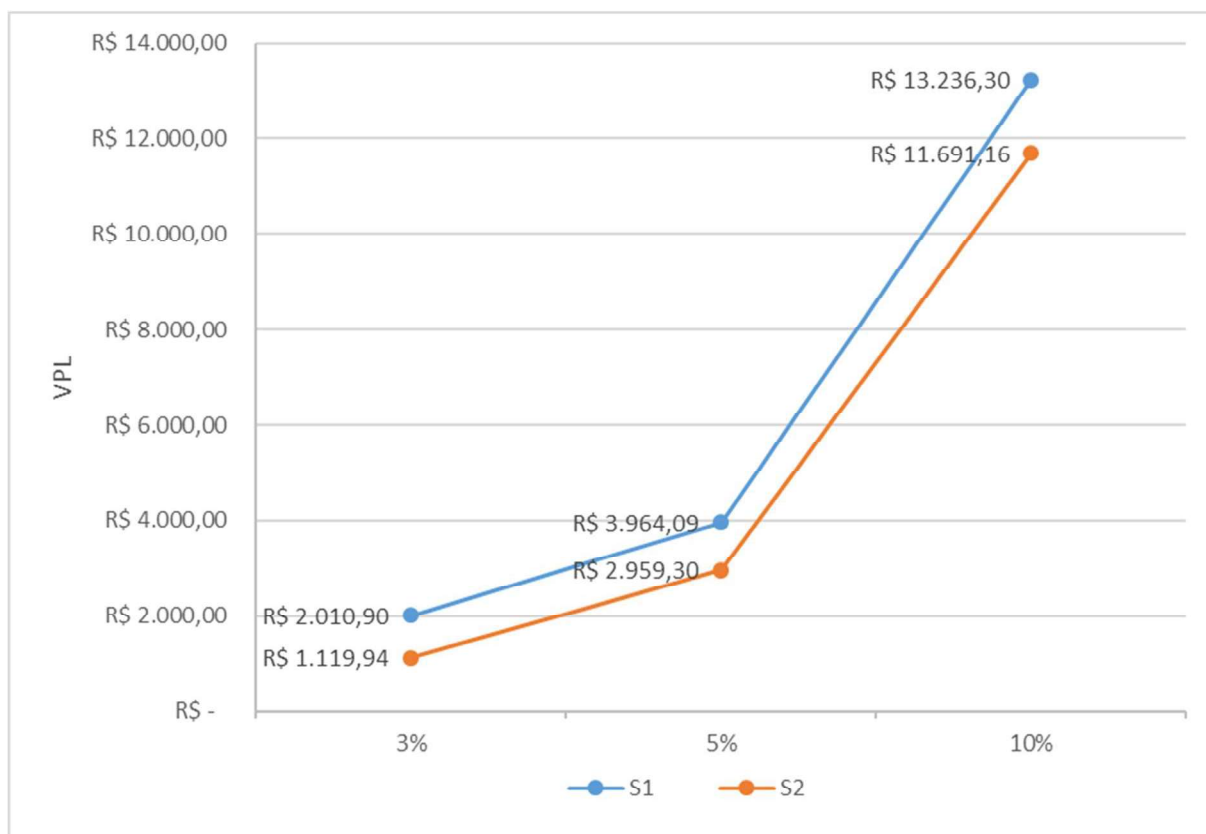
retorno melhor que a fachada S2, com uma taxa de 18,5% maior no cenário com IPCA em 3%, 14,9% no cenário com IPCA em 5% e 10,2% no cenário com o IPCA em 10%.

Figura 48 – Taxa interna de Retorno (TIR)



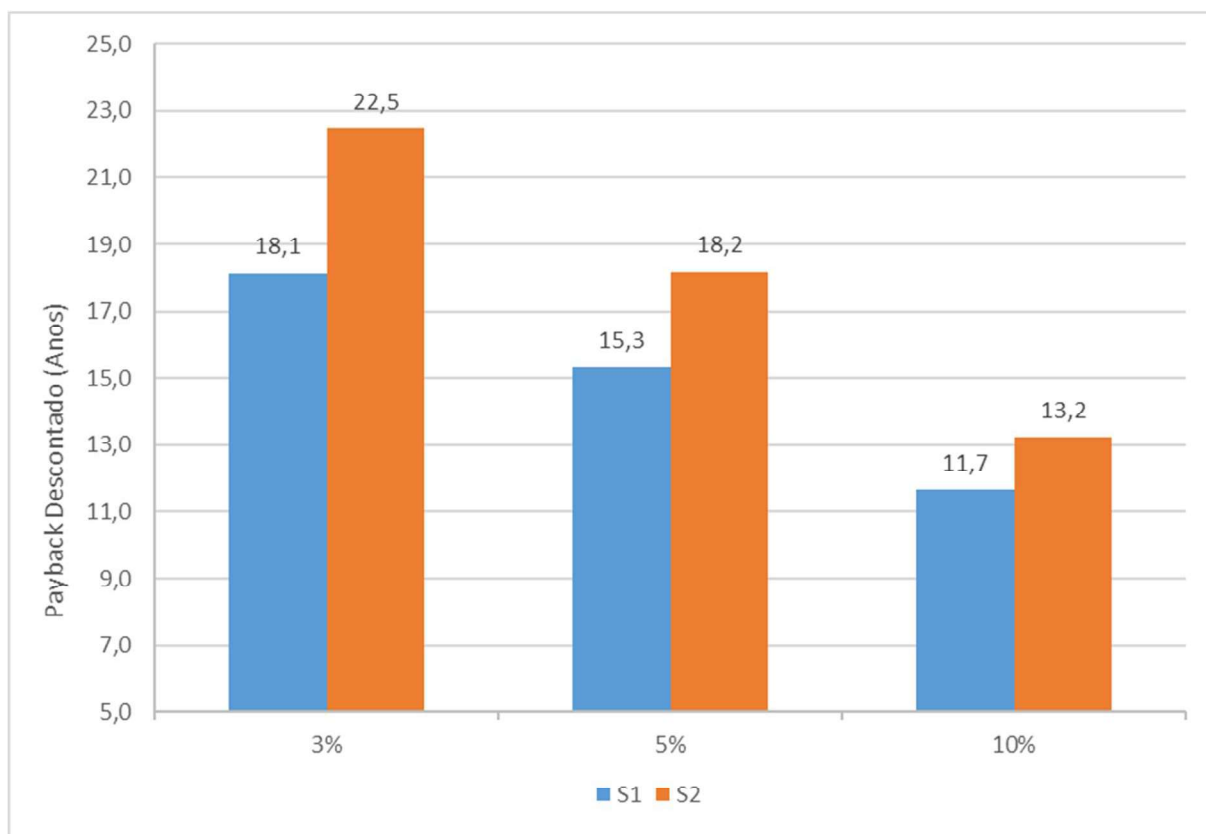
O VPL também apresentou valores positivos em todos os cenários, para ambos os sistemas, o que corrobora com a viabilidade desse tipo de sistema, a Figura 49 apresenta o VPL para os três cenários considerados. A fachada com o sistema S1 apresentou um VPL quase 80% maior no cenário com o IPCA em 3%. Para os cenários de IPCA em 5% e 10% o valor ficou 34% e 13,2% maior respectivamente, para a fachada com o sistema S1.

Figura 49 – Valor Presente Líquido (VPL)



Para o período de payback, apresentado na Figura 50, é possível perceber que conforme aumenta o IPCA, mais rápido se dá o pagamento da instalação da fachada. Da mesma maneira que nos outros índices, o custo inicial mais elevado da fachada com o sistema S2 e a menor geração devido ao acabamento acabam tornando o investimento neste modelo menos atrativo que o da fachada com o sistema S1.

Figura 50 – Payback Descontado



No cenário com o IPCA em 3% a diferença de tempo de payback chega a 24%, no entanto, para ambas as fachadas o período é bastante longo. No cenário com IPCA a 10%, ainda que a diferença entre os períodos caia para 13,5%, a diminuição no tempo de payback torna o investimento mais atrativo.

5. Considerações Finais

O desenvolvimento das fontes de energias renováveis e o aumento da sua importância no cenário internacional faz com que todos os setores que consomem energia de alguma forma questionem os atuais hábitos de consumo. Para a construção civil, a integração de sistemas fotovoltaicos em seu envelope, tem cada vez mais se mostrado uma alternativa economicamente viável e com potencial para elevar as edificações a um patamar de autonomia energética.

O Brasil, especialmente privilegiado com elevados índices de irradiância, ainda possui um potencial a ser explorado a partir da fonte solar fotovoltaica. O crescimento apresentado nos últimos anos, tanto da GD quanto da GC, demonstra que essa fonte de energia tem estabelecido sua posição no cenário nacional.

Por mais que, tradicionalmente integrados aos telhados das edificações, sistemas fotovoltaicos demonstraram ser também viáveis em condições menos ideais, como as apresentadas nesse trabalho. Ainda que a geração seja aproximadamente 50% de um módulo idealmente posicionado, sua geração ainda é capaz de tornar esse tipo de sistema economicamente viável.

Para edificações com pouca área de telhado a integração na fachada permite ao edifício gerar a sua própria energia, aproveitando assim uma área já ocupada pela presença humana e transformando o edifício em um gerador de energia elétrica, sem prejuízos para os usuários da edificação ou para as populações do entorno.

A diferença no desempenho nos sistemas analisados mostrou ser bastante relevante, dado que no período de um ano a diferença média nas métricas de desempenho chegou a 6%. Essa diferença é incomum em sistemas fotovoltaicos posicionados de maneira idêntica, portanto ficou claro que a topologia construtiva utilizada reflete diretamente tanto no desempenho do sistema quando na sua viabilidade econômica.

Considerando o fato de o sistema estar instalado em uma região com os índices de radiação mais baixos do país, os resultados apresentados foram satisfatórios. Caso o sistema estivesse instalado na fachada norte da edificação, a geração de ambos os sistemas seria maior dado o melhor aproveitamento da irradiância nessa condição. Outro local onde os sistemas teriam um melhor desempenho é em regiões do país com baixa latitude, neste caso a fachada leste ou oeste seriam ideais, dado que nesta orientação estas superfícies recebem mais irradiância.

É importante destacar que esperava-se encontrar uma influência direta, das variáveis ambientais escolhidas, no desempenho da fachada, o que não ocorreu. Por mais que estas variáveis influenciem na temperatura superficial dos módulos, para este estudo elas não apresentaram impacto relevante no desempenho dos sistemas. Esta influência talvez deva ser melhor avaliada.

Em períodos mais quentes do ano a fachada S1 se apresentou como uma melhor alternativa para proteger a edificação de ganhos térmicos, no entanto para períodos de inverno, a fachada S2 se mostrou uma melhor alternativa, porém a geração de energia é menor. Uma possível alternativa para isso seria um modelo híbrido que se comporte como a fachada S1 durante os momentos em que o inversor esteja ativo e, em momentos de não geração, se comporte como a fachada S2.

O gradiente de temperatura apresentado na Figura 42 também levanta um alerta para perdas por *mismatch*. As perdas podem ser ainda mais consideráveis em sistemas maiores, portanto deve ser avaliado a melhor forma de se fazer o arranjo das *strings* do sistema.

Durante o estudo foram encontradas algumas fabricantes de módulos para este tipo específico de aplicação, com um maior apelo estético. Alguns destes módulos apresentaram diferentes formas de fixação e ainda a possibilidade de preenchimento da parte posterior dos módulos, não deixando espaço para passagem de ar, mas ocupando o espaço com outro material isolante. Estas topologias não foram verificadas neste estudo.

Do ponto de vista econômico, apesar de os três cenários propostos apresentarem viabilidade, o tempo de payback ainda é bastante alto. Ainda assim a geração de energia elétrica é uma vantagem pois tem a possibilidade de se tornar um ativo, dependendo das regras de compensação de energia, o que não ocorre com outros tipos de revestimento.

Não foram considerados nesta análise a diminuição da carga de resfriamento utilizada para refrigerar o ambiente interno da edificação. Porém o fato de as fachadas diminuïrem os ganhos térmicos da edificação irá impactar diretamente nos sistemas de refrigeração e por consequência melhorar a viabilidade econômica do sistema.

Fica claro que esse tipo de aplicação para os sistemas fotovoltaicos é uma estratégia plausível e que deve se popularizar conforme novos produtos surjam no mercado. No entanto, é necessário estar atento ao comportamento elétrico do sistema e o seu desempenho sob estas condições.

A partir da popularização das fachadas fotovoltaicas e da disseminação de suas vantagens diante de outros tipos de revestimentos, edifícios que antes não cogitariam a

instalação de um sistema solar fotovoltaico, poderão assumir um papel de pequenas centrais geradoras, ao mesmo tempo em que melhoram as condições ambientais para os ocupantes. Dessa forma grandes centros urbanos passam a se comportar como usinas de energia, diminuindo a dependência de grandes centrais geradoras, e por consequência, diminuindo também o seu impacto ambiental. Assim, a construção civil avança mais uma etapa em direção a estabelecer seu papel no cenário de transição energética mundial.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- a) Comparar o grau de degradação dos módulos sob a condição de fachada em relação aos módulos idealmente posicionados;
- b) Modelo de fachada adaptativa que alterne entre ventilada e estanque;
- c) Avaliação das composições das *strings* de uma fachada ventiladas fotovoltaica;
- d) Influência do sombreamento para a geração fotovoltaica em fachadas de edifícios inseridos em grandes centros urbanos;
- e) Ciclo de vida das fachadas do ponto de vista de elemento.

Referências Bibliográficas

ABNT. ABNT NBR 15575 Edificações habitacionais - Desempenho. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2013.

AGREEMENT, P. **Paris Agreement United Nations Framework Convention on Climate Change**, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf>

ALBERTO, S.; RABAÇA, C. Comparação técnico-económica entre Sistemas com Inversores Centrais e Sistemas com Inversores String. 2014.

BARRAGÁN-ESCANDÓN, E. A. et al. Energy self-supply estimation in intermediate cities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 129, n. April, 2020.

BENDA, V.; ČERNÁ, L. PV cells and modules – State of the art, limits and trends. **Heliyon**, v. 6, n. 12, 2020.

BIYIK, E. et al. **A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems Engineering Science and Technology, an International Journal Elsevier B.V.**, , 2017.

BP. **Statistical Review of World Energy 2020**. [s.l: s.n.].

BRITO, M. C. et al. The importance of facades for the solar PV potential of a Mediterranean city using LiDAR data. **Renewable Energy**, v. 111, p. 85–94, 2017.

DEBBARMA, M.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P. Comparison of BIPV and BIPVT: A review. **Resource-Efficient Technologies**, v. 3, n. 3, p. 263–271, set. 2017.

DO NASCIMENTO, Á. D. J.; RÜTHER, R. Evaluating distributed photovoltaic (PV) generation to foster the adoption of energy storage systems (ESS) in time-of-use frameworks. **Solar Energy**, v. 208, n. January, p. 917–929, 2020.

DOE. **A common definition for Zero Energy Buildings**. [s.l: s.n.].

EPBD. **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union.**, 2010.

EPE. Balanço energético nacional: Ano base 2018. **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**, p. 67, 2019.

FRONTINI, F. et al. Solar Energy Application Centre The Netherlands Report 2015, SUPSI-SEAC BIPV Product Overview for Solar Facades and Roofs. p. 1–47, 2015.

GHOLAMI, H. et al. Lifecycle cost analysis (LCCA) of tailor-made building integrated photovoltaics (BIPV) façade: Solsmaragden case study in Norway. **Solar Energy**,

v. 211, n. August, p. 488–502, 2020.

GHOLAMI, H.; RØSTVIK, H. N. Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe. **Energy**, v. 204, p. 117931, 2020.

GONÇALVES, J. E. et al. Performance of building integrated photovoltaic facades: Impact of exterior convective heat transfer. **Applied Energy**, v. 287, n. January, p. 116538, 2021.

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída**. [s.l: s.n.].

HAN, J. et al. Performance of ventilated double-sided PV façade compared with conventional clear glass façade. **Energy and Buildings**, v. 56, p. 204–209, jan. 2013.

IEA. **World Energy Balances**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://data.iea.org/payment/products/103-world-energy-statistics-and-balances-2018-edition-coming-soon.aspx>>.

IEA. **Multifunctional Characterisation of BIPV**. [s.l: s.n.].

IEA. **Successful Building Integration of Photovoltaics - A collection of International Projects**. [s.l: s.n.].

IPCC. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 1–765, 2019.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2019 International Renewable Energy Agency**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf>.

IRENA. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050 International Renewable Energy Agency**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>>.

IRSHAD, K. et al. Study of thermoelectric and photovoltaic facade system for energy efficient building development: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 1376–1395, fev. 2019.

JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1154–1169, mar. 2011.

KUHN, T. E. et al. Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110381, 2021.

KUMAR SAHU, B. A study on global solar PV energy developments and policies

with special focus on the top ten solar PV power producing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 621–634, 2015.

KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A. European smart cities: The role of zero energy buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 15, n. 2015, p. 86–95, 2020.

LASKI, J.; BURROWS, V. **From Thousands to billions. Coordinated Action towards 100% Net Zero Carbon Buildings By 2050** World Green Building Council. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://www.worldgbc.org/sites/default/files/From Thousands To Billions WorldGBC report_FINAL issue 310517.compressed.pdf](http://www.worldgbc.org/sites/default/files/From_Thousands_To_Billions_WorldGBC_report_FINAL_issue_310517.compressed.pdf)>.

LAU, S.-K. et al. Optimization and Evaluation of Naturally Ventilated BIPV Façade Design. **Energy Procedia**, v. 150, p. 87–93, set. 2018.

MARION, B. et al. Performance parameters for grid-connected PV systems. **Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, n. February, p. 1601–1606, 2005.

MEDVED, S.; DOMJAN, S.; ARKAR, C. Contribution of energy storage to the transition from net zero to zero energy buildings. **Energy and Buildings**, v. 236, p. 110751, 23 jan. 2021.

MEHLERI, E. D. et al. Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays. **Renewable Energy**, v. 35, n. 11, p. 2468–2475, 2010.

MEI, L. et al. **Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV façade** **Energy and Buildings**, 2003.

PELLE, M. et al. Coloured BIPV technologies: Methodological and experimental assessment for architecturally sensitive areas. **Energies**, v. 13, n. 17, 2020.

PENG, C.; HUANG, Y.; WU, Z. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3592–3598, dez. 2011.

PENG, J. et al. Investigation on the annual thermal performance of a photovoltaic wall mounted on a multi-layer façade. **Applied Energy**, v. 112, p. 646–656, 1 dez. 2013.

PENG, J. et al. Study on the overall energy performance of a novel c-Si based semitransparent solar photovoltaic window. **Applied Energy**, v. 242, n. August 2018, p. 854–872, 2019.

PETRICHENKO, K.; ÜRGE-VORSATZ, D.; CABEZA, L. F. Modeling global and regional potentials for building-integrated solar energy generation. **Energy and Buildings**, v. 198, p. 329–339, 2019.

PORTOLAN DOS SANTOS, Í.; RÜTHER, R. Limitations in solar module azimuth

and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. **Renewable Energy**, v. 63, p. 116–124, mar. 2014.

REN21. **Renewables 2019 Global Status Report**. [s.l: s.n.].

REN21. **Renewables 2020 - Global Status Report**. [s.l: s.n.].

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. [s.l: s.n.].

RÜTHER, R. et al. Long-term performance of the first grid-connected, building-integrated amorphous silicon PV installation in Brazil. **Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, n. 1997, p. 2283–2286, 2010.

SCHMELA, M. **Very High-Power Solar Modules 2021 Edition**. [s.l: s.n.].

SCOGNAMIGLIO, A.; MUSALL, E.; RØSTVIK, H. N. Photovoltaics and (Nearly) Net Zero Energy Buildings : Architectural Considerations. **ZEMCH 2012 International Conference. 20th -22nd August 2012, Glasgow, UK**, p. 286–303, 2012.

SHAHRESTANI, M. et al. Experimental and numerical studies to assess the energy performance of naturally ventilated PV façade systems. **Solar Energy**, v. 147, p. 37–51, 2017.

SINGH, B. P.; GOYAL, S. K.; KUMAR, P. Solar pv cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 2843–2849, 2021.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar Energy**, v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009a.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 23–29, 1 jan. 2009b.

SOLANGI, K. H. et al. **A review on global solar energy policy Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011.

SOLARPOWER EUROPE; ETIP PV. **Solar Skins: An opportunity for greener cities**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[STEIN, J. S. et al. **Bifacial PV modules & systems Experience and Results from International Research and Pilot Applications**. \[s.l: s.n.\].](https://www.solarpowereurope.org/solar-skins-an-opportunity-for-greener-cities-2/#:~:text=The%20Solar%20Skins%20report%20focuses,to%20achieve%20carbon-neutral%20cities.>>.</p>
</div>
<div data-bbox=)

TURNEY, D.; FTHENAKIS, V. Environmental impacts from the installation and

operation of large-scale solar power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3261–3270, 2011.

VAN SUMMEREN, L. F. M. et al. Community energy meets smart grids: Reviewing goals, structure, and roles in Virtual Power Plants in Ireland, Belgium and the Netherlands. **Energy Research and Social Science**, v. 63, n. May 2019, p. 101415, 2020.

VERÍSSIMO, P. H. A. **Avaliação de uma usina solar fotovoltaica comparando diferentes topologias de sistemas de fixação utilizando duas diferentes tecnologias FV**. [s.l.: s.n.].

WILSON, G. M. et al. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 53, n. 49, 2020.

YANG, H.; BURNETT, J.; JI, J. Simple approach to cooling load component calculation through PV walls. **Energy and Buildings**, v. 31, n. 3, p. 285–290, 2000.

ZOMER, C. et al. The balance between aesthetics and performance in building-integrated photovoltaics in the tropics. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 22, n. 7, p. 744–756, 2014.

ZOMER, C. et al. Performance assessment of partially shaded building-integrated photovoltaic (BIPV) systems in a positive-energy solar energy laboratory building: Architecture perspectives. **Solar Energy**, v. 211, n. December 2019, p. 879–896, 2020a.

ZOMER, C. et al. Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre. **Solar Energy**, v. 212, n. June, p. 258–274, 2020b.

ZOMER, C. D. **Megawatt Solar: Geração Solar Fotovoltaica Integrada a uma Edificação Inserida em Meio Urbano e Conectada à Rede Elétrica**. [s.l.: s.n.].

Anexo A – Datasheet Módulo Fotovoltaico

P6D-36-SERIES-4BB



Build Your Dreams

156.75P



A virada de jogo: BYD 430

- 4 - Vida útil de até 40 anos
- 3 - Degradação anual mínima de 0,3%
- 0 - Livre de PID e microfissuras



Maior rentabilidade

- Degradação anual mínima de 0,3%
- Maior retorno de investimento
- Fácil instalação
- Maior tensão máxima na "String"
- Baixo custo para o sistema



Maior durabilidade

- Design exclusivo de vidro duplo que elimina as microfissuras no material
- Até 40 anos de vida útil



Maior eficiência

- Sem perda de UV
- Maior potência útil



Maior confiabilidade

- Livre de PID e microfissuras
- Sem uso de EVA

18.3% Eficiência celular média de 18,3%
Excelente desempenho óptico

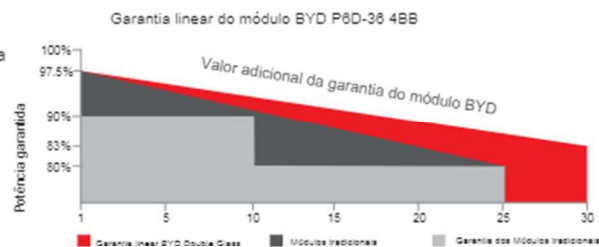
0-5W Tolerância positiva (0~5W)
Confiabilidade na potência de saída

12 anos Garantia do produto: 12 anos
Garantia linear: 30 anos

Grid Sistemas residenciais
Sistemas comerciais On/Off-grid
Usinas solares

3rd TÜV - teste com carga de neve de 5.400 Pa
TÜV - teste com carga de vento de 5.400 Pa
CSA Teste de resistência mecânica=1.5*3600Pa=5400 Pa

IEC IEC 61215 (Edition 2005), IEC 61730, UL1703



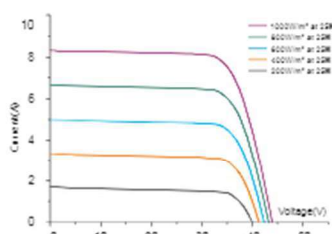
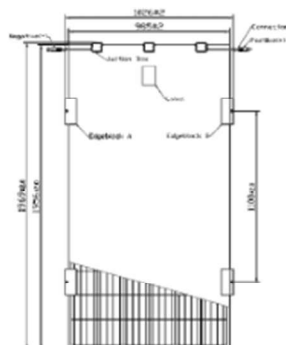
SOBRE BYD

Gigante global especializada em energia limpa, a BYD foi fundada em 1995 e rapidamente se tornou a maior fabricante mundial em baterias recarregáveis, sistemas estacionários e de painéis fotovoltaicos. Desde 2015, a BYD surpreendeu o mundo ao se consolidar como a maior fabricante mundial de automóveis elétricos (incluindo híbridos plug-in), caminhões e ônibus elétricos. A empresa está presente em cinco continentes, 50 países e 250 cidades e tem entre seus sócios o americano Warren Buffet. Com mais de 220 mil funcionários distribuídos em 30 fábricas ao redor do globo (sendo 20 mil engenheiros pesquisadores), a chinesa BYD é a segunda maior produtora de componentes para celulares, tablets e laptops no mundo e premiada globalmente como uma das empresas mais inovadoras do mundo. No Brasil, a BYD abriu sua primeira fábrica em Campinas, interior de São Paulo, em 2015, para produção de ônibus elétrico e comercialização de veículos e empilhadeiras. Em abril de 2017 a BYD Energy do Brasil inaugurou sua segunda unidade para produção de módulos fotovoltaicos para a geração de energia solar fotovoltaica.

P6D-36-SERIES-4BB

310-340W

156.75P



Ficha técnica

Célula	Silício policristalino 156,75x156,75mm / 6.2 inch
Nº de células	72 (6x12) unidades
Dimensões do módulo	1956mmx985mmx7.5mm / 77.1inchx38.8inchx0.3inch
Peso	33.1kg / 73 lbs
Vidro frontal	Vidro temperado de 3.2 mm c/ revestimento anti-reflexo
Caixa de junção	ZH-011B-5, TS03-13, TS03-13B
Conector	IP67
Diodos Bypass	3 unidades
Tipo de conexão	PV-ZH202, TL-CABLE01S, TS01
Área de seção do cabo	4 mm² / 0.0062 Sq in
Comprimento do cabo	2x400 mm / 2x15.7 inch

Coefficientes de temperatura

Temperatura de Operação Normal	43 °C ± 2 °C
Coefficiente de temperatura da CC	0.088%/°C
Coefficiente de temperatura da CA (NOCT)	-0.30%/°C
Coefficiente de temperatura do pico de potência	-0.37%/°C

Informações do produto

Contêiner	40' HC
Módulos / Paleta	32
Paleta / Contêiner	18
Módulos / Contêiner	576

STC

Item	Módulo	BYD 310P8D-36	BYD 315P8D-36	BYD 320P8D-36	BYD 325P8D-36	BYD 330P8D-36	BYD 335P8D-36	BYD 340P8D-36
Tensão de circuito aberto (VOC)		46,78V	46,09V	46,39V	46,69V	46,98V	47,28V	47,58V
Tensão no pico de potência (Vmáx)		36,38V	36,58V	36,78V	36,98V	37,18V	37,38V	37,53V
Corrente de curto-circuito (Isc)		8,98A	9,07A	9,15A	9,23A	9,31A	9,39A	9,47A
Corrente no pico de potência (Imáx)		8,52A	8,61A	8,70A	8,79A	8,88A	8,97A	9,05A
Potência máxima (Pmáx)		310 Wp	315 Wp	320 Wp	325 Wp	330 Wp	335 Wp	340 Wp
Eficiência do módulo		18,1%	18,3%	18,6%	18,9%	17,1%	17,4%	17,6%
Temperatura de operação		-40°C ~ 85°C						
Limite da corrente inversa		15A						
Tensão máxima do sistema		1000VDC/1500VDC						
Tolerância da potência		0~5 W						
Classe de aplicação		A						

STC: Irradiância 1000W/m², temperatura de operação 25 °C, AM-1.5, Redução média de eficiência: 5% por 200W/m²

NOCT

Item	Módulo	BYD 310P8D-36	BYD 315P8D-36	BYD 320P8D-36	BYD 325P8D-36	BYD 330P8D-36	BYD 335P8D-36	BYD 340P8D-36
Tensão de circuito aberto (VOC)		42,8V	43,0V	43,3V	43,5V	43,8V	44,1V	44,0V
Tensão no pico de potência (Vmáx)		34,4V	34,6V	34,9V	35,1V	35,3V	35,6V	35,7V
Corrente de curto-circuito (Isc)		7,28A	7,34A	7,40A	7,47A	7,54A	7,60A	7,67A
Corrente no pico de potência (Imáx)		6,74A	6,80A	6,85A	6,93A	6,99A	7,05A	7,14A
Potência máxima (Pmáx)		231,8Wp	235,3Wp	239,3Wp	243,2Wp	247,1Wp	251,1Wp	254,8Wp

NOCT: Irradiância 800W/m², temperatura de operação 20°C, velocidade de vento 1m/s.



BYD DO BRASIL

Av. Antônio Buscato, 230 / Terminal Intermodal de Cargas, Campinas

Build Your Dreams



+55-19-3514 2550



vendas@byd.com



www.byd.com/br

VERSÃO 2.0 2017

Anexo B – Datasheet Inversor



SB 1200 / SB 1700

Safe

- > Integrated ESS DC load-disconnecting unit
- > Galvanic isolation

Universal

- > For indoor and outdoor installation
- > Suitable for generator grounding

Reliable

- > Tried and tested technology
- > Maintenance free, thanks to convection cooling



SUNNY BOY 1200 / 1700

Proven technology for secure investments

Universally applicable: the Sunny Boy inverters 1200 and 1700 are used in the most diverse AC grids thanks to their galvanic isolation. In addition, the devices are suitable for the simple grounding of the generator. Their integrated ESS DC load-disconnecting unit simplifies installation and reduces its cost at the same time. Equipped with the OptiTrac MPP tracking process, it will always find the optimal working point, even under dynamic weather conditions. In this way, it reliably converts solar energy into solar earnings.

Anexo C – Tabela com valores máximos, mínimos e médias das medidas de temperatura da fachada para cada elemento

Dados	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temp. máxima módulo S1	47,5	47,1	43,9	40,7	35,8	37,8	35,3	39,4	39,2	41,6	253,3	49,2
Modulo S1	27,5	27,3	26,2	23,1	20,5	20,0	17,6	20,5	20,3	22,2	23,4	26,3
Temp. mínima módulo S1	18,4	15,8	17,6	9,9	7,8	10,9	5,6	9,6	9,3	13,2	0,0	17,7
Temp. máxima módulo S2	53,1	51,7	55,5	52,3	44,6	44,1	43,4	50,3	49,5	53,3	277,2	60,1
Modulo S2	28,5	28,3	27,9	24,8	21,9	21,0	18,7	22,4	21,5	23,8	25,3	28,3
Temp. mínima módulo S2	18,6	15,8	18,2	10,9	8,7	11,8	6,4	10,5	10,0	13,6	0,0	18,6
Temp.máxima Parede Interna S2	30,8	30,7	29,9	28,6	25,1	24,9	23,6	24,0	25,6	27,2	249,8	30,6
Parede Interna S2	26,5	26,1	25,5	23,6	21,0	20,4	18,3	20,4	20,4	22,1	23,1	26,0
Temp. minima Parede interna S2	22,3	21,0	22,4	18,0	15,2	15,6	12,1	15,4	15,4	18,0	0,0	21,1
Temp. máxima Parede externa S2	36,7	36,8	39,0	36,0	31,3	31,2	29,1	32,4	33,2	34,9	38,8	40,9
Parede Externa S2	27,2	26,9	26,6	24,1	21,4	20,7	18,4	21,4	20,9	22,9	24,3	27,2
Temp. minima Parede externa S2	20,4	18,4	20,5	14,4	12,1	14,0	9,3	13,0	13,0	16,1	0,0	20,0
Temp. máxima Parede externa S1	30,2	30,8	29,1	28,5	24,9	25,2	23,6	23,7	25,9	27,1	248,9	30,3
Parede Interna S1	26,0	26,3	25,6	23,3	20,8	20,3	18,1	20,0	20,3	21,9	22,8	25,9
Temp. minima Parede externa S1	22,3	21,2	22,4	17,2	14,4	15,3	11,2	14,7	14,9	17,7	0,0	21,0
Temp. máxima Parede externa S1	34,7	34,7	33,2	30,5	27,3	29,5	25,4	27,9	30,1	29,7	33,9	36,1
Parede Externa S1	26,7	26,4	25,5	22,7	20,4	19,9	17,5	19,9	20,0	21,7	22,6	25,7
Temp. minima Parede externa S1	19,8	18,4	19,9	12,9	10,7	13,1	7,9	11,8	12,0	15,5	0,0	18,5
Temp. máxima Parede externa Nua	50,1	46,7	46,5	44,2	37,1	35,9	34,3	39,2	39,5	44,4	45,5	48,6
Temp.Parede Externa Nua	27,5	26,6	26,0	23,9	19,7	20,0	17,1	18,1	19,8	22,5	24,1	25,8
Temp. mínima Parede externa Nua	18,0	16,5	17,8	10,9	8,9	12,2	6,5	6,3	10,1	13,5	12,2	17,9
Temp. máxima Parede interna Nua	31,0	29,6	32,0	29,2	24,4	23,8	22,2	23,5	24,6	27,6	29,3	30,1
Parede Interna Nua	26,1	25,5	24,9	23,4	19,9	19,7	17,2	18,0	19,4	21,7	23,0	24,8
Temp. máxima Parede externa Nua	21,6	20,6	20,9	15,7	13,0	15,2	10,0	10,0	13,6	16,4	16,3	19,9