

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE VIDRO FOTOVOLTAICO EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS DE PELE DE VIDRO COM DIFERENTES TIPOLOGIAS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

Leticia Garcia Perez (IC) e Erika Ciconelli de Figueiredo (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo simular e avaliar o potencial de geração fotovoltaica nas fachadas dos edifícios comerciais de pele de vidro no município de São Paulo, comparando os resultados de diferentes tipologias. O vidro com células fotovoltaicas de Silício Amorfo da Onyx Solar foi escolhido devido à sua maleabilidade, eficiência energética e fácil aplicação, para efetuar a simulação de substituição das envoltórias para a tecnologia que gera energia. Após uma pesquisa teórica do estudo de desempenho da tecnologia escolhida, foram selecionados três edifícios com pele de vidro, que apresentaram diferentes tipologias: Edifício São Paulo Corporate Tower, Edifício Rochaverá Corporate Tower e Edifício Pátio Victor Malzoni. A pesquisa foi composta por estudo individual de cada caso, observando: localização, implantação, redesenho da planta do pavimento, tipo dos edifícios e desenvolvimento de um volume 3D para a contabilização aproximada da área das fachadas. A partir da área das envoltórias, foi simulada a aplicação do vidro supracitado com o pico de potência, a fim de, descobrir o potencial de geração de energia a partir das fachadas. A partir do consumo padrão em edifícios de escritórios em relação ao ar-condicionado, iluminação e outros, desenvolveu-se uma comparação entre os valores obtidos de geração do vidro fotovoltaico e o consumo dos edifícios. Os resultados indicaram que, dentre os edifícios estudados, ainda que se tenham ganhos consideráveis, nenhuma das tipologias se enquadraram em edifício de energia zero (*net zero energy*).

Palavras-chave: Vidro Fotovoltaico. Energia Sustentável. Edifícios com pele de vidro.

ABSTRACT

This research has the objective of emulating and evaluating the potential of photovoltaic energy generation on building's facades with glass skin in the city of São Paulo, comparing the results of different building typologies. Onyx Solar's photovoltaic Amorphous Silicon glass was chosen due to its flexibility, energy efficiency and easy application, to carry out the simulation of the replacement of the envelopes for the technology that generates energy. After theoretical research and the study of the performance of the chosen technology, three glass-skinned buildings of different typologies were selected: São Paulo Corporate Tower, Rochaverá Corporate Tower and Pátio Victor Malzoni Building. The research consisted of the individual study of each case, such as location, implantation, redesign of the typical floor plan of the buildings and development of a 3D volume for the

approximate accounting of the area of the facades. From the area of the envelopes, the application of the glass with the power peak was simulated, to discover the potential for generating energy from the facades. From the standard consumption in office buildings in relation to air conditioning, lighting and others, a comparison was developed between the values obtained from the generation of photovoltaic glass and the consumption of buildings. The results indicated that, among the buildings studied, even though they had considerable energy gains, none of the typologies fit into a net zero energy building.

Keywords: Photovoltaic Glass, Sustainable Energy, Buildings Glazed Façades.

1. INTRODUÇÃO

Em 1838, o francês Alexandre Edmond Becquerel descobriu a energia fotovoltaica por meio de um experimento com eletrólitos de platina, que, quando expostos ao sol, ocorria um aumento da corrente elétrica. Com o passar dos anos, outros estudiosos aprimoraram a técnica testando outros materiais, como o inglês Willoughby Smith, que obteve o efeito fotovoltaico com Selênio. As primeiras células disponíveis comercialmente surgiram em 1956, porém com um custo muito alto. Essas primeiras células solares foram utilizadas em satélites norte-americanos e soviéticos, lançados na mesma década do seu surgimento (PORTAL SOLAR, 2018).

A energia fotovoltaica foi colocada inicialmente em segundo plano por ser mais dispendiosa do que as demais, como o gás natural e o carvão, que possuem baixos custos de extração. Na década de 1960, não havia consciência dos efeitos negativos que esses combustíveis provocavam ao meio ambiente. Na década de 70, com o aumento do preço dos combustíveis fósseis, por razões econômicas, surgiram discussões sobre energias renováveis e de fontes inesgotáveis. A Alemanha foi um dos países pioneiros na instalação dos sistemas fotovoltaicos, fato que colocou em lugar de destaque a energia solar, em um cenário internacional (PORTAL SOLAR, 2018). Iniciativas similares ocorreram em outros países, como o Japão, que fez investimentos em energias alternativas após o acidente de Chernobyl, reavaliando sua matriz energética (REVISTA EM DISCUSSÃO, 2015).

As fontes renováveis são apontadas como solução para a economia de energia e a diminuição dos efeitos ambientais, além de gerar maior eficiência energética. A utilização dessas fontes possibilita um caminho para maior desenvolvimento econômico (SANTOS, 2015). Dentre as fontes renováveis, a energia fotovoltaica, se destaca perante as demais, pois apresenta vantagens como: instalação rápida, funcionamento silencioso e fonte praticamente inesgotável. Além disso, os vidros fotovoltaicos, quando utilizados em edifícios, adicionam uma função complementar aos espaços, como as fachadas ou coberturas (BRANDÃO *et al.*, 2013).

Estudos recentes demonstram que entre 2003 e 2013, houve um aumento de 17% na produção total de energia, enquanto que as fontes renováveis obtiveram um crescimento de 56%. No mesmo período, a produção primária de energia solar apresentou um aumento de 395%, resultando no barateamento das peças e tornando a fonte cada vez mais acessível para as pessoas (ROSA; GASPARIN, 2016).

O Gráfico 1, apresenta a geração de energia elétrica por fonte no Brasil, em 2019. Pode-se observar que a energia solar, possui a menor geração de energia em comparação com as demais fontes. O Gráfico 2, por sua vez, indica a evolução da energia solar no Brasil, em GWh, de 2015 a 2019. Percebe-se que o aumento da produção é exponencial, principalmente entre os anos de 2016 e 2018, onde o salto de energia gerada foi de aproximadamente 4.000%.

Dessa maneira, o constante progresso dessa fonte renovável em conjunto com o grande potencial fotovoltaico do país, permite um cenário promissor para os próximos anos e grande investimento no setor.

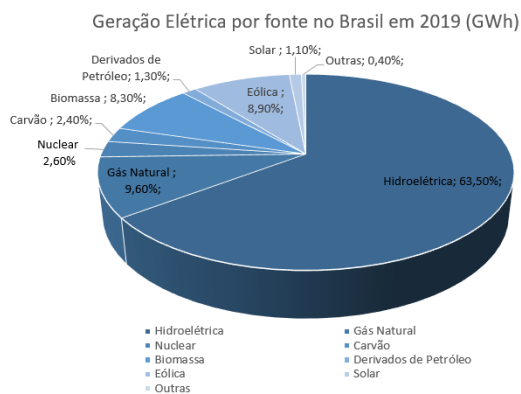


Gráfico 1: Geração Elétrica por fonte no Brasil em 2019 (GWh). Fonte: a partir de EPE, 2020.

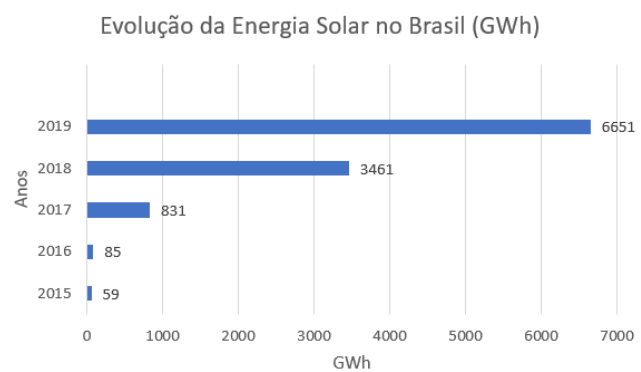


Gráfico 2: Evolução da Energia Solar no Brasil entre 2015 e 2019. Fonte: a partir de EPE, 2020.

Os edifícios com as envoltórias compostas por vidros apresentam influência direta no consumo de energia e no conforto dos usuários, logo, essas obras possuem grande potencial para atuar e propor soluções eficientes energeticamente (SACHT, 2012). O BIPV (*Building-IntegratedPhotovoltaics*) ou sistemas fotovoltaicos integrados às estruturas da fachada apresentam a possibilidade de obter maior eficiência energética.

Esses edifícios são caracterizados pela integração de células solares a elementos ou materiais da estrutura e das fachadas dos edifícios, maximizando a geração de energia. Além de reduzirem os gastos energéticos, estes vidros podem fornecer funcionalidades adicionais como: proteção solar, isolamento térmico, proteção contra chuva, sombreamento parcial das envoltórias ou a substituição de telhas nas coberturas (PORTAL SOLAR, 2011).

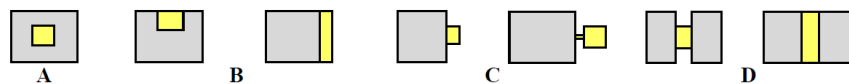
Em estudos realizados em diversos países, os edifícios comerciais de pequeno porte, simulados com a utilização do BIPV, obtiveram redução significativa no consumo energético,

é o caso de Tóquio no Japão, onde um dos edifícios demonstrou redução de 54% (DIDONÉ; WAGNER, PEREIRA, 2014) e em Fortaleza, no Brasil, uma redução de 43% com a utilização de janelas fotovoltaicas (NG, 2013 apud DIDONÉ; WAGNER, PEREIRA, 2014).

Outro conceito que está se tornando mais difundido, são os *Net Zero Energy Building* (NZEB), ou seja, edifícios de energia líquida zero. Esses edifícios produzem, no próprio local, uma quantidade de energia renovável equivalente a quantidade de energia total consumida anualmente. Nessa categoria de edifícios, a geração por fonte de carbono zero apresenta em destaque a geração de energia fotovoltaica (*WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE*, 2016).

Sendo assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial de geração fotovoltaica nas fachadas dos edifícios comerciais, Edifício São Paulo Corporate Tower, Edifício Rochaverá Corporate Tower e Edifício Pátio Victor Manzoni, localizados na cidade de São Paulo e comparar os resultados das diferentes tipologias de edifícios pele de vidro. O entorno imediato das edificações selecionadas não foi considerado. Além disso, a pesquisa visa aferir a possibilidade de atingir a autossuficiência dos edifícios estudados, enquadrando-os na categoria NZEB, indicando diretrizes projetuais para edifícios pele de vidro.

Com a finalidade de categorizar as tipologias selecionadas, Pisani e Figueiredo (2011) classificaram os edifícios de escritório da produção paulistana de 1979 a 2010 em 5 tipologias de acordo com a posição do core das edificações. Na figura 1, observa-se a tipologia classificada como “A”, cujo eixo de circulação vertical está localizado no centro do edifício, sem encostar em nenhum dos lados. Os edifícios selecionados nesta pesquisa - São Paulo Corporate Tower e Rochaverá Corporate Tower - estão enquadrados nessas tipologias. No entanto, o edifício Pátio Victor Malzoni é classificado na categoria Tipo “E”, pois não possuem um único eixo de circulação vertical e sim dois (PISANI; FIGUEIREDO, 2011).



e) Tipo E – aqueles edifícios que não se inserem nas classificações acima, como representaram apenas 5,21% da amostra não geraram novos tipos.

Figura1: Croquis dos tipos A, B, C, D e E segundo a localização do bloco de circulação vertical e apoio (amarelo) e a área para os escritórios (cinza). Fonte: PISANI; FIGUEIREDO, 2011.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Uma pesquisa realizada pela Agency (2017), apresentou um cenário mundial de crescimento da utilização de tecnologias de energias renováveis, como a eólica, a solar a fotovoltaica e a solar térmica (Gráfico 3) com perspectivas otimistas para as próximas décadas, possibilitando a efetivação do Acordo de Paris, e correspondendo às metas perante a temperatura do planeta.

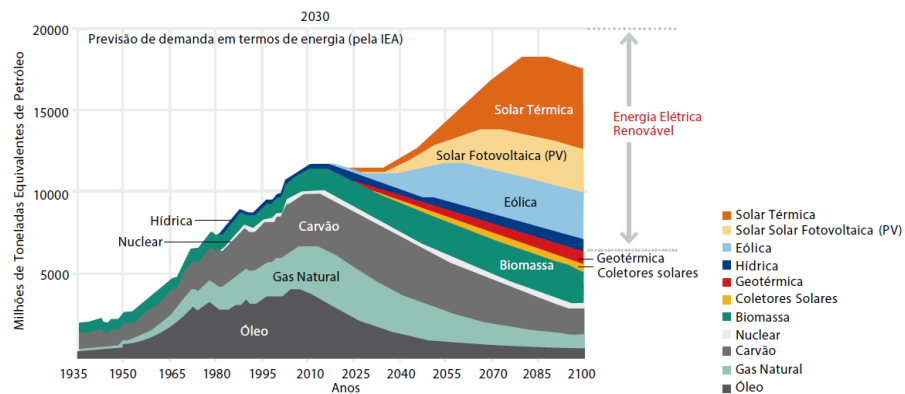


Gráfico 3: Participação de fontes renováveis na produção de energia elétrica mundial. Fonte: AGENCY, 2017 apud MENDONÇA, 2017, s/p.

A energia solar fotovoltaica apresenta um cenário promissor, sendo a segunda maior fonte de produção de energia elétrica para as próximas décadas. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o Brasil possui um grande potencial de irradiação solar por todo território, apresentando uma irradiação média entre 1500-2500 KWh/m². O estado brasileiro que apresenta a maior média de irradiação solar é a Bahia com 6,5 KWh/m², em contrapartida, a localidade com menor índice é o estado de Santa Catarina com 4,25 KWH/m². Se compararmos os índices de irradiação do Brasil com a Alemanha, que possui a maior capacidade de placas solares fotovoltaicas instaladas (900-1250 KWh/m²), verificamos que o melhor cenário alemão apresenta, um valor inferior ao pior índice do Brasil (MENDONÇA, 2017).

Apesar do grande potencial brasileiro, a energia fotovoltaica não é devidamente explorada no território por causa dos altos custos de instalação e um pequeno nicho de produção, conseqüentemente, baixa procura para a instalação dessa tecnologia. Contudo, um mecanismo para estimular a instalação desses sistemas seria um encorajamento fiscal por parte do governo. Em 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou uma norma reguladora que estabelece condições para o acesso de micro e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

A resolução cria no país um sistema de compensação de créditos que deverá impulsionar a instalação e a disseminação de pequenos sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais conectados à rede elétrica em todo o país (BRANDÃO *et al.*, 2013, p. 2).

O Projeto de Lei nº5.077/19, que está em trâmite no Senado, dispõe sobre o incentivo à geração de energia solar, por meio da criação do Programa de Incentivo a Fonte Fotovoltaica (PISF). Com a aprovação dessa Lei, poderia ocorrer maior procura para a instalação desses sistemas, principalmente em edifícios corporativos com envoltórias de pele de vidro, consequentemente se tornando uma tendência (TEIXEIRA; CORREIA, 2013).

Em ambientes urbanos, a geração de energia por meio dos módulos fotovoltaicos integrados aos edifícios, associada à ideia de instalar no local onde ela é consumida, fazem dessa tecnologia ideal para edifícios corporativos.

Os componentes fotovoltaicos podem ser instalados de diferentes maneiras: Integradas ao edifício (BIPV) e Adicionadas /Anexadas ao edifício BAPV (*Building Applied Photovoltaics*). Este último é amplamente aplicado em obras de retrofit e o primeiro, faz parte integrante da envoltória do edifício, podendo substituir os componentes da envoltória, oferecendo uma ampla gama de possibilidades aos arquitetos (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014).

A BIPV pode ser aplicada nas envoltórias dos edifícios, com a finalidade de maximizar localmente o uso da fonte solar, gerando energia elétrica. Considera-se que existem três gerações de células fotovoltaicas, sendo a primeira composta por painéis rígidos com células de silício cristalino, a segunda com filmes finos e a terceira, nomeada emergente, proveniente de uma tecnologia mais avançada, porém ainda em fase de testes (NAKANO, 2017).

O foco da pesquisa é a tecnologia fotovoltaica de silício amorfo (a-Si), classificada na segunda geração, como sendo um vidro fotovoltaico para substituir os vidros originais dos edifícios selecionados de modo teórico. A parte estrutural dessa célula é composta por três camadas sobrepostas de filmes de silício amorfo (Figura 2): filme dopado do tipo p¹, filme de silício intrínseco e filme dopado do tipo n². Na parte posterior adota-se uma folha de alumínio, a fim de conduzir a corrente elétrica e na parte frontal uma película de um óxido condutor transparente (TCO), geralmente de dióxido de estanho (SnO₂). Para finalizar o conjunto temos na parte frontal a proteção de um vidro fotovoltaico.

¹O filme dopado do tipo p é um processo químico de dopagem com a adição de impurezas de um elemento semiconductor, que no caso é o boro, para transformá-lo em mais condutor, entretanto, de forma mais controlada utilizando o procedimento de CVD.

²O filme dopado do tipo n utiliza o mesmo processo supracitado, porém a diferença é que o metal semiconductor utilizado nesse caso é o fósforo.

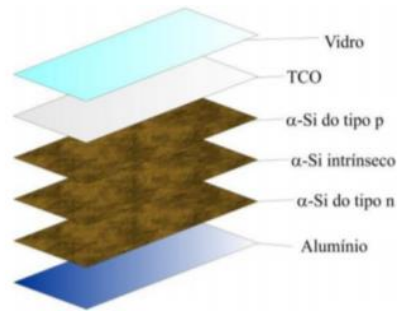


Figura 2: Estrutura da Célula de Silício Amorfo. Fonte: MACHADO; MIRANDA, 2014 apud NAKANO, 2017.

O vidro fotovoltaico consiste no depósito de Silício amorfo em vidro, utilizando um substrato, esse pode ser depositado através do uso de vapor químico, processo chamado de *Chemical Vapor Deposition* (CVD). O módulo solar pode ser constituído de diversos tipos de vidro, com duplos ou triplos. Nesses vidros são aplicados gás silano (SiH_4), que se deposita no vidro em uma alta temperatura, aproximadamente, 650 graus Celsius e em seguida ocorre a aplicação do substrato supracitado (SANTOS, 2015).

As células de silício amorfo apresentam vantagens em comparação às células da primeira geração, pois são produzidas de um “material que absorve a radiação solar de uma forma mais eficiente que o silício cristalino, o que possibilita a deposição de películas de silício amorfo muito mais finas sobre vários tipos de substratos (vidro, plástico, metal, etc.)” (OLIVEIRA, 2013, p. 28). Isto é, esta película pode ser aplicada sobre qualquer superfície, sem prejuízos a transparência dos materiais. Segundo o fabricante, os módulos da segunda geração são mais leves, comparados a primeira geração, e são flexíveis, podendo ter variações na forma, cor, tamanho, espessura e grau de transparência (ONYXSOLAR, 2021), fato que é de relevância para a presente pesquisa devido às diferentes tipologias de prédios. Outro dado relevante é a diferença de eficiência entre as gerações, sendo que a primeira apresenta entre 6 e 7%, a segunda 10% e 11% (SANTOS, 2015).

Portanto, dentre as possibilidades existentes de células fotovoltaicas, a de silício amorfo é a mais adequada para ser utilizada nas envoltórias dos edifícios, propostos nesta pesquisa, principalmente quando são consideradas as vantagens supracitadas.

3. METODOLOGIA

Essa pesquisa irá adotar um método teórico-experimental, que contempla uma substituição teórica dos vidros existentes por vidros fotovoltaicos de silício amorfo da Onyx Solar. O objetivo da pesquisa é avaliar o potencial de geração fotovoltaica nas fachadas dos edifícios comerciais pele de vidro, na cidade de São Paulo, comparando os resultados de

diferentes tipologias. Como elucidado na introdução, os edifícios se distinguem entre duas tipologias “A” e “E”.

Neste trabalho, não foi considerado o entorno imediato dos edifícios selecionados. A pesquisa aqui proposta visa demonstrar o potencial de geração de energia das fachadas dos edifícios localizados em São Paulo. Os resultados pretendem gerar diretrizes projetuais para envoltórias de edifícios pele de vidro, indicando aos projetistas novas possibilidades para economia de energia.

Foram selecionados três edifícios comerciais: edifício São Paulo Corporate Tower, edifício Rochaverá Corporate Tower e edifício Pátio Victor Manzoni.

O método adotado, a partir da pesquisa de campo e coleta de dados, foi aplicado nos três prédios estudados, como listados a seguir:

- 1) Levantamento do referencial teórico
- 2) Pesquisa de campo e coleta de dados
 - a) Levantamento fotográfico e de dados dos objetos de estudo, por meio do *software* Google Earth Pro e fotos autorais da visita ao local;
 - b) Pesquisa de plantas e cortes de todos os edifícios, com a intenção de um redesenho em escala utilizando a ferramenta AutoCAD;
 - c) Análise das plantas e levantamento das dimensões das fachadas;
 - d) Levantamento dos dados do vidro utilizado nas envoltórias, pesquisa da transmissão luminosa dos vidros;
 - e) Importação do arquivo do AutoCAD para o *software* Sketch Up, possibilitando a modelagem em 3D dos edifícios estudados;
 - f) Cálculo da área da superfície dos vidros da fachada;
 - g) Aplicação da porcentagem de eficiência de geração de energia do vidro de silício amorfo em toda a superfície dos prédios;
 - h) Obtenção do valor de gasto energético dos prédios segundo parâmetros pesquisados e cálculos expressados em uma tabela produzida no Excel;
- 3) Análise, discussão e comparação dos resultados;
- 4) Elaboração do artigo para a publicação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de verificar o potencial de geração de energia das edificações, foi proposta uma simulação de troca dos vidros existentes para o vidro fotovoltaico de Silício Amorfo da Onyx Solar, com a finalidade de determinar a quantidade de energia que será gerada pelas fachadas.

A potência fotovoltaica das células é medida na unidade Watt-pico (Wp), quando submetidas às condições padronizadas do teste em *Standard Test Conditions* (STC). O teste considera a temperatura da célula fotovoltaica em 25 graus Celsius, espectro de massa de ar 1.5 atmosferas³, irradiação solar padronizada de 1000W/m² (NEOSOLAR, 2013). Na Tabela 1 podemos verificar a ficha técnica fornecida pela Onyx Solar sobre o vidro de silício amorfo com 30% de transparência e pico de potência de Wp/m² (ONYXSOLAR, 2021).

CONFIGURAÇÃO DE ESPESSURA (mm)**	Coeficiente de Garantia Solar (SHGC)	Valor U m ²	Valor U ft ²	Reflexo de luz externa	Transparência	Pico de Potência
	%	**W/m ² K	Btu/h Ft ² F	%	%	(Wp/m ²)
3.2 +4	41%	5,7	1.00	7,60%	30%	28
6T+3.2+6T*	37%	5,2	0.92	7,30%	30%	28
6T+3.2+6T/12Air/6T	19%	2,7	0.48	7,30%	30%	28
6T+3.2+6T/12Air/6T Low-e	17%	1,6	0.28	7,30%	30%	28
6T+3.2+6T/12Argon/6T Low-e	17%	1,2	0.21	7,30%	30%	28
6T+3.2+6T/12Argon/4/12Argon/6T Low-e	17%	1	0.18	7,30%	30%	28

Tabela 1: Transparência alta do vidro fotovoltaico de silício amorfo Onyx Solar. Fonte: ONYXSOLAR, 2021, tradução autoral.

O vidro selecionado para a pesquisa foi o 6T+3.2+6T/12Air/6T Low-e, que é composto por 6mm de vidro temperado, 3.2 mm de vidro *float*, 6 mm de vidro temperado, 12 mm de ar entre a primeira camada e a segunda, e 6 mm de vidro temperado Low-e ou de baixa emissividade. O vidro Low-e possui em uma de suas faces, um revestimento que absorve raios infravermelhos, podendo controlar a transferência de temperatura de um ambiente para outro, aumentando o isolamento térmico, sem impedir a passagem de luz natural (REVISTA VIDRO IMPRESSO, 2020). Este vidro foi selecionado por possuir características térmicas e de transparência compatíveis com os vidros originais dos edifícios selecionados.

A unidade de potência criada especialmente para medição em painéis é o Watt-pico (Wp). “Isso ocorre porque os painéis solares podem variar em potência de acordo com a irradiação da luz solar e, até mesmo, o seu calor. Um mesmo painel pode gerar potências diferentes ao meio-dia e ao fim da tarde, por exemplo” (PORTAL SOLAR, 2021). Portanto, pode-se dizer que “1 kWp equivale a 1 kWh, pois se um painel de 1 kWp funcionar por 1 hora, ele produzirá 1000 Wh ou simplesmente 1 kWh” (PORTAL SOLAR, 2021).

A verificação da economia de energia se baseou principalmente no consumo de energia em edifícios de escritórios, como apresentado no Gráfico 4, que indica que o consumo de ar-condicionado se sobrepõe aos demais.

³O coeficiente de massa de ar é utilizado para caracterizar o potencial de células solares em condições padronizadas, como STC. No caso da AM 1.5, é referente a espessura de 1,5 atmosferas, equivale a um ângulo zenital solar de 48,2° e de acordo com o padrão expressado na ABNT NBR 10899 (NEVES, *et al.*, 2018).

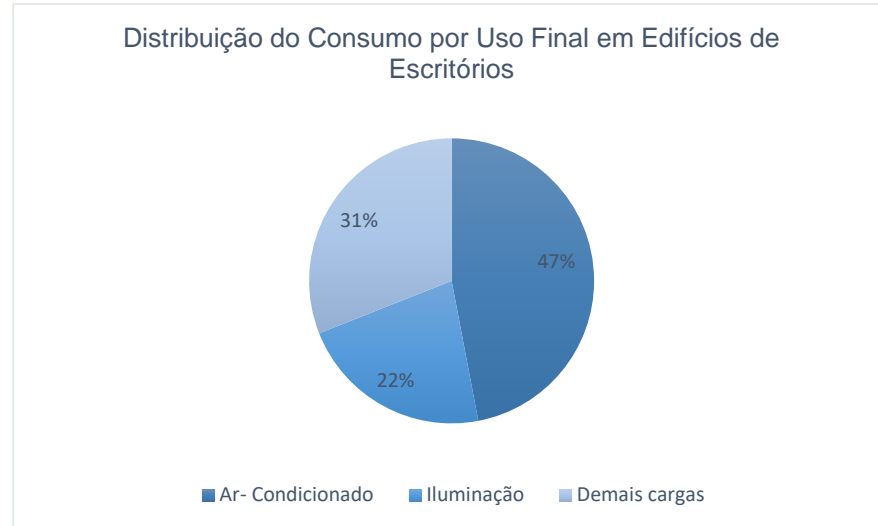


Gráfico 4: Distribuição do Consumo por Uso Final em Edifícios de Escritório. Fonte: a partir de ELETROBRÁS, 2009 apud FIGUEIREDO, 2016.

Com o intuito de constatar o gasto energético médio de energia de um edifício, utilizaram-se os dados da pesquisa de Veloso (2017), que demonstra o consumo de energia por área em edifícios de escritórios (Gráfico 5). O autor considera torres totalmente condicionadas, com modo misto de condicionamento e torres sem condicionamento de ar. Os edifícios selecionados para esta pesquisa são totalmente condicionados, isto é, de acordo com Veloso (2017), eles consomem 146,70 kWh/m²/ano de ar-condicionado. Esta pesquisa considerou o valor indicado por Veloso (2017) como o correspondente a 47% do consumo total da edificação, como apontado no Gráfico 5, como parâmetro para o cálculo de economia de energia, que este trabalho apresenta.

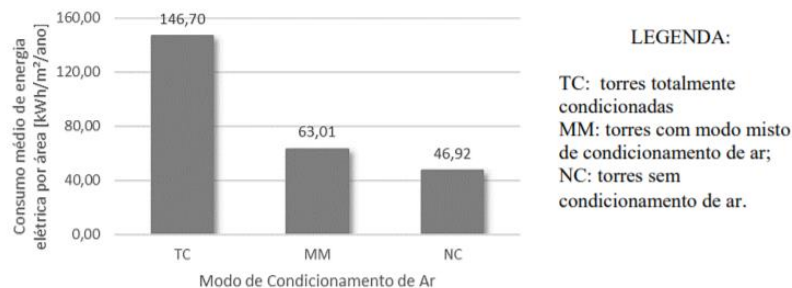


Gráfico 5: Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres das edificações (kWh/m²/ano) por modo de condicionamento de ar. Fonte: VELOSO, 2017.

Para comparar o consumo de energia dos edifícios e o potencial de geração fotovoltaica é necessário que os valores estejam na mesma unidade de medidas, kWp/m². É necessário ressaltar que edifícios de escritórios fazem uso dos aparelhos de ar-

condicionado apenas durante o horário comercial, ou seja, de segunda à sexta-feira durante aproximadamente 10 horas por dia; totalizando 22 dias por mês. Logo, temos:

Transformando o parâmetro de ano para horas:

$$146,70 \text{ kWh/m}^2/\text{ano} \Rightarrow 146,70 / 12 \text{ meses} \Rightarrow 12,225 \text{ kWh/m}^2/\text{mês} \Rightarrow 12,225 / 22 \text{ dias} \Rightarrow \\ \Rightarrow 0,555 \text{ kWh/m}^2/\text{dia} \Rightarrow 0,555 / 10\text{h} \Rightarrow 0,0555 \text{ kW/m}^2$$

Para transformar de kW/m² para kWp/m², é necessário considerar o painel nas condições ideais de funcionamento, isto é temperatura a 25°C e massa de ar de 1.5 atmosferas, além de considerar a potência máxima que vidro fotovoltaico é capaz de gerar de energia, em kWp (PORTAL SOLAR, 2020). Portanto 0,0555kW/m² é equivalente a 0,0555kWp/m², seguindo a padronização supracitada.

Consumo médio anual de energia elétrica por área das torres das edificações (kWh/m²/ano) por modo de condicionamento de ar. Fonte: VELOSO, 2017.

Consumo médio de energia elétrica por área			
Sistema de climatização (47%)	Sistema de iluminação (22%)	Outros (31%)	TOTAL
0,0555 kWp/m ²	0,0260kWp/m ²	0,0367 kWp/m ²	0,1182 kWp/m ²

Tabela 2: Consumo médio de energia elétrica por área. Fonte: autoria própria.

Foi utilizado uma proporção linear para estimar os demais consumos, isto é, iluminação e demais cargas. Na tabela 2, temos o valor total de consumo médio de energia por kWp/m², sendo assim, esse valor será aplicado na área dos edifícios em estudo, com a intenção de estimar o gasto energético dos edifícios de escritório. A área do pavimento tipo foi obtida no *software* AutoCAD. Essa planta foi importada para o programa SketchUp, para produzir a modelagem do edifício em 3D, com a intenção de calcular a área das envoltórias e, posteriormente, determinar o potencial de geração fotovoltaica dos edifícios.

A seguir, serão apresentados os edifícios em estudo aplicando o método supracitado, com os padrões de consumo e com a proposta de substituição dos vidros existentes por vidros fotovoltaicos da Onyx Solar, a fim de atingir o objetivo da pesquisa.

4.1 Edifícios São Paulo Corporate Tower



Figura 3: Fotos do Edifício São Paulo Corporate Tower. Fonte: Acervo próprio.

O complexo São Paulo Corporate Tower (Figura 3) está situado na Vila Olímpia, Av. Pres. Juscelino Kubitschek, número 1909 (Figura 4). O projeto foi concluído no ano de 2016 e tem como autores os escritórios Pelli Clarke Pelli Architects e Aflalo/ Gasperini. O conjunto de 257.799,00 m² possui 2 edifícios corporativos com 28 andares cada um e uma praça que soma mais de 19.000m² e grandes dimensões de áreas verdes (figura 5). Os edifícios possuem uma forma torcida, que traz dinamismo para a fachada (ARCHDAILY, 2016). Um dos maiores destaques do complexo são as envoltórias que utilizaram os vidros Sun Guard AG43, que bloqueiam 70% do calor incidente nas fachadas e com uma transmissão luminosa que varia em 39% a 41%, fator solar de 31% a 35% (AECWEB, 2021).



Figura 4: Vista aérea do Complexo São Paulo Corporate. Fonte: a partir de GOOGLE EARTH, 2020.

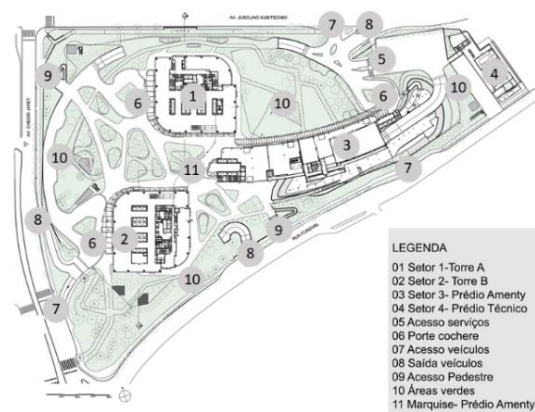


Figura5: Implantação do Complexo. Fonte: ARCHDAILY, 2016, s/p.

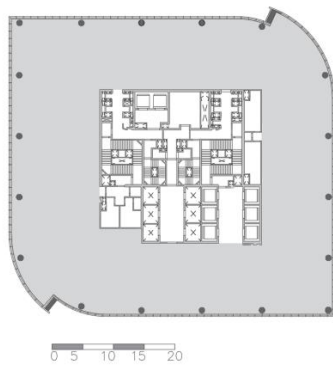


Figura 6: Planta tipo das Torres A e B do complexo São Paulo Corporate. Fonte: a partir de ARCHDAILY, 2016, s/p.

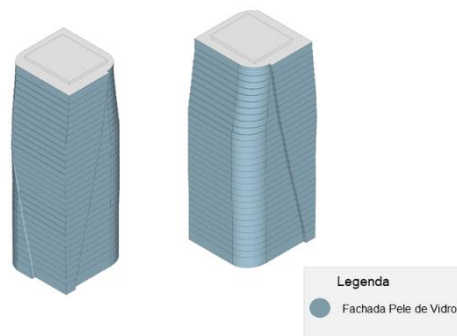


Figura 7: Imagem 3D do prédio com destaque das fachadas. Produção com o software SketchUp. Fonte: autoria própria.

A partir das informações fornecidas pelo site do escritório Aflalo/Gasperini foi possível fazer o redesenho da planta do edifício tipo (figura 6) e modelagem do prédio (Figura 7), com a finalidade de estabelecer a área das envoltórias e a área da laje do pavimento. Constatou-se que a área da fachada de um dos edifícios é, aproximadamente, 21892,54 m², duas torres possuem as mesmas dimensões, somando as áreas de fachada

das duas torres vamos ter 43.785,08 m². Levando em consideração a simulação de troca dos vidros de controle solar por vidros fotovoltaicos especificados no início dos resultados e discussões, as torres teriam um potencial de geração de energia de 12.259,82 kWp.

Edifício São Paulo Corporate Tower				
Gasto Energético Simulado	Gasto Energético Simulado em 1 Pavimento (2.500m ²)	Gasto Energético Simulado em 28 pavimentos (Torre A)	Gasto Energético Simulado em 28 pavimentos (Torre B)	Gasto Energético Simulado total.
Consumo médio de energia (0,1182 kWp/m ²)	295,5 kWp	8.274 kWp	8.274 kWp	16.548 kWp

Tabela 3: Gasto Energético Simulado, a partir das condições supracitadas. Fonte: autoria própria.

A partir da Tabela 3, podemos concluir que, o valor do consumo energético por meio dos parâmetros supracitados, são inferiores à simulação de geração de energia do vidro fotovoltaico de silício amorfo da Onyx Solar. Embora as trocas dos vidros não permitam que os edifícios se autossustentem, elas proporcionam uma autonomia energética de 74,08%.

4.2 Edifício Rochaverá Corporate Tower



Figura 08: Fotos do Edifício Rochaverá Corporate Tower. Fonte: Acervo Próprio.

O complexo Rochaverá Corporate Tower (Figura 8) está localizado Av. Dr. Chucr Zaidan, número 1170, Vila São Francisco (Figura 9). O projeto teve 3 fases para ser concluído, sendo a primeira em 2008, com a construção da Torre A e B, em 2010 com a Torre D e 2012 a Torre C. Os edifícios foram projetados pelo escritório Aflalo & Gasperini. Essa obra se caracteriza por um conjunto de quatro Torres corporativas, totalizando 228.000 m² construídos. Os edifícios possuem de 1.600 a 2.000 m² por andar, com alturas distintas, entre 42 e 120m. A parte externa consiste em uma praça principal, que possibilita o acesso aos prédios e às três praças menores, contabilizando 30.000 m² de áreas verdes (Figura 10).

As fachadas em vidro possuem vidros laminados reflexivos prata, de proteção solar *Cool Lite*, da Celebrace que apresenta uma transmissão luminosa de 21% (FIGUEIREDO,

2016), redução em até 80% a entrada de calor, impedindo em até 99,6% a entrada de raios ultravioletas e fator solar de 0,29 (CEBRACE, 2021).

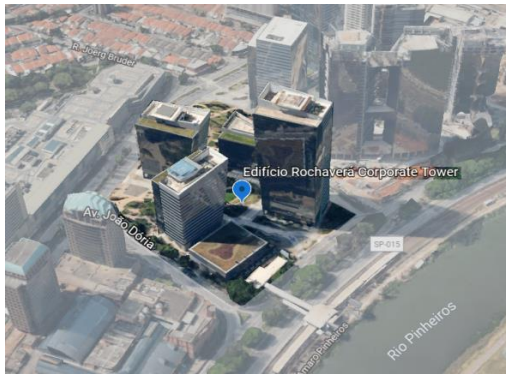


Figura 9: Vista aérea do Complexo Rochaverá. Fonte: a partir de Google Earth Pro, 2020.

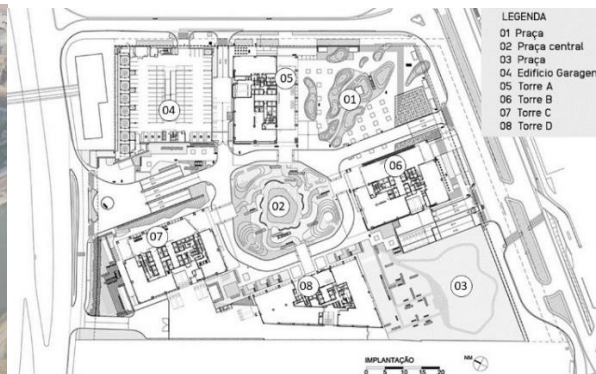


Figura 10: Implantação do Complexo. Fonte: Escritório Aflalo&Gasperini arquitetos, 2020.



Figura 11: Planta tipo correspondente às Torres A e B do Complexo Rochaverá. Fonte a partir PURARQUITETURA, 2015 apud FIGUEIREDO, 2016.

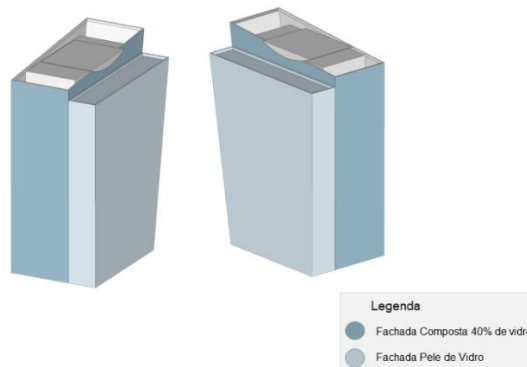


Figura 12: Imagem 3D do prédio com destaque das fachadas. Modelagem com o software SketchUp. Fonte: autoria própria.

A pesquisa levou em consideração as fachadas das torres A e B, cujos envoltórios desses edifícios possuem 40% de vidro e 60% em granito (FIGUEIREDO, 2016), no entanto, só foram contabilizados os trechos envidraçados. A partir das informações fornecidas por Figueiredo (2016), foi possível fazer o resenho da planta tipo do edifício (Figura 11) e a modelagem do prédio (Figura 12), identificando as diferentes constituições de fachada. A fachada composta somente por vidro totaliza 5.466,85 m² e a área envidraçada da fachada mista (composta por vidro e granito) totaliza 3.432,78 m². A área de todos os vidros na Torre A é de 8.899,63 m². Considera-se que as duas torres possuam as mesmas dimensões de área total das envoltórias em vidro dos edifícios A e B, que são de 17.799,26 m². Levando em consideração a simulação de troca dos vidros de controle solar por vidros fotovoltaicos especificados no início dos resultados e discussões, as torres teriam um potencial de geração de energia de 4.983,8 kWp.

Edifício Rochaverá Corporate Tower				
Gasto Energético Simulado	Gasto Energético Simulado em 1 Pavimento (1.563m ²)	Gasto Energético Simulado em 16 pavimentos (Torre A)	Gasto Energético Simulado em 16 pavimentos (Torre B)	Gasto Energético Simulado total.
Cosumo médio de energia (0,1182 kWp/m ²)	184,746 kWp	2.955,945 kWp	2.955,945 kWp	5.911,891 kWp

Tabela 4:Gasto Energético Simulado, conforme parâmetro expressados discussões e resultados.
Fonte: autoria própria.

A partir da Tabela 4, podemos concluir que o valor do consumo energético por meio dos parâmetros supracitados, são inferiores a simulação de geração de energia do vidro fotovoltaico de silício amorfo da Onyx Solar. Embora as trocas dos vidros não permitam que os edifícios se autossustentem, elas proporcionam uma autonomia energética de 84,3%.

4.3 Edifício Pátio Victor Malzoni



Figura 13: Fotos do Edifício Pátio Victor Malzoni. Fonte: Acervo Próprio

O Edifício Pátio Malzoni (Figura 13) está localizado na Av. Faria Lima, número 3.477, Itaim Bibi (Figura14). O projeto foi concluído em 2011, sendo o escritório Botti Rubin Arquitetos o autor do projeto. A obra de 167.693,36 m², consiste em um prédio subdivido em 2 blocos A e B, espelhos d'água, a casa bandeirista e conjunto de fonte e jardins (Figura 15). Os blocos possuem 18 pavimentos (sendo o último andar com pé direito duplo) e 6 subsolos, com até 5.000 m² de lajes corporativas (NICOLAI, 2017). A identidade do prédio se caracteriza pelo vão de 44m de largura e 33m de altura, que enquadra a Casa Bandeirista, datada do século XVIII feita em taipa, tombada em 1980 pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico Arqueológico, Artístico, da Secretaria do Estado da Cultura (CONDEPHAAT). Além disso, as fachadas são compostas por vidro *low-e* em duas tonalidades: um azul claro para o vão luz, que possui fator solar de 36% e transmissão Luminosa de 17% e o mais escuro, utilizado para cobrir elementos estruturais (vigas e pilares) com 31% de fator solar e 5% de transmissão luminosa (LIVE, 2019).



Figura 14: Vista aérea do Edifício Pátio Victor Malzoni. Fonte: a partir de Google Earth Pro, 2020.

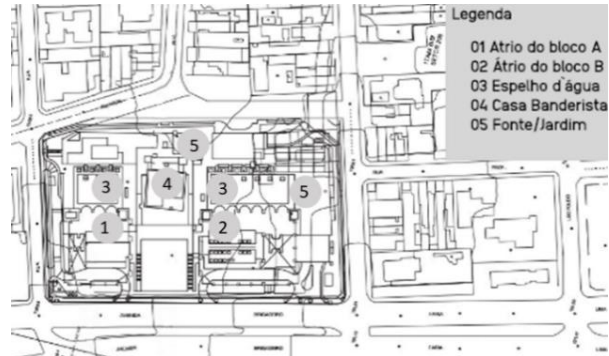


Figura 15: Implantação do Complexo. Fonte: a partir de NICOLAI, 2017.

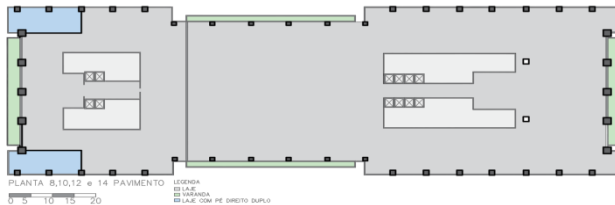


Figura 16: Planta que corresponde aos 8,10,12 e 14 pavimentos do Edifício Pátio Victor Malzoni. Fonte: a partir de NICOLAI, 2017.

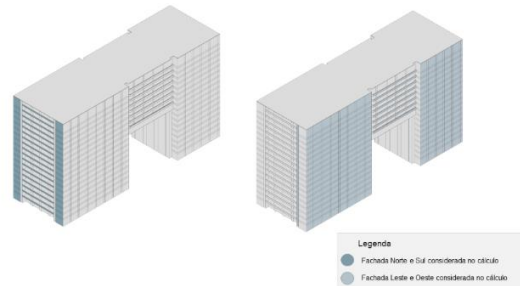


Figura 17: Imagem 3D do prédio com destaque das fachadas. Produção com o software Sketch Up. Fonte: autoria própria.

A partir das informações fornecidas por Nicolai (2017), foi possível fazer o redesenho da planta do pavimento tipo (Figura 16) e a modelagem do prédio (Figura 17), com a finalidade de contabilizar a área das envoltórias e a área do pavimento. Constatou-se que fachadas Norte e Sul somam 3.433,86 m² e a fachada Leste e Oeste somam 17.745,44 m². A área total das envoltórias é de aproximadamente, 21.179,3 m². Levando em consideração a simulação de troca dos vidros de controle solar por vidros fotovoltaicos especificados no início das discussões e resultados, o edifício teria um potencial de geração de energia de 5.930,2 kWp.

Edifício Pátio Victor Malzoni						
Gasto Energético Simulado	Gasto Energético Simulado no 1 Pavimento (área: 3.372,1m ²)	Gasto Energético Simulado no 2, 4 e 6 Pavimento (área: 4.041 m ²)	Gasto Energético Simulado no 3, 5 e 7 Pavimento (área 3.384,6 m ²)	Gasto Energético Simulado no 8,10,12,14,16,17 e 18 pav. (área: 5.849,5m ²)	Gasto Energético Simulado no 9, 11, 13 e 15 Pavimento (área: 5.385,4m ²)	Gasto Energético Simulado total.
Cosumo médio de energia (0,1182 kWp/m ²)	398,582 kWp	1.432,938 kWp	1.200,179 kWp	4.839,876 kWp	1.909,662 kWp	9.781,237 kWp

Tabela 5:Gasto Energético Simulado, conforme parâmetro expressados discussões.

A partir da Tabela 5, podemos concluir que o valor do consumo energético por meio dos parâmetros supracitados, são superiores à simulação de geração de energia do vidro fotovoltaico de silício amorfo da Onyx Solar. Embora as trocas dos vidros não permitam que os edifícios se autossustentem, elas proporcionam uma autonomia energética de 60,62%.

Como apresentado na introdução, os edifícios se enquadravam nas tipologias “A” e “E”, porém foi constatado que as diferentes tipologias não influenciam na capacidade de geração e consumo energético dos edifícios. Após os cálculos de cada estudo de caso, foi aferido que nenhuns dos edifícios conseguem se autossustentar a partir de geração de energia renovável fotovoltaica apenas nas fachadas, porém, como apresentado no Gráfico 6, o desempenho de autonomia dos edifícios foram todos superiores a 60%, o que indica grande economia energética. Entretanto, a pesquisa apresentou uma disparidade entre o potencial geração de energia e o consumo de energético, pode ser explicada devido a diferença entre a área dos pavimentos dos prédios estudados. Isso ocorre em razão da proporção da área do pavimento e do consumo, ou seja, quanto maior a área do pavimento maior é o consumo energético e menor será o potencial de geração de energia.

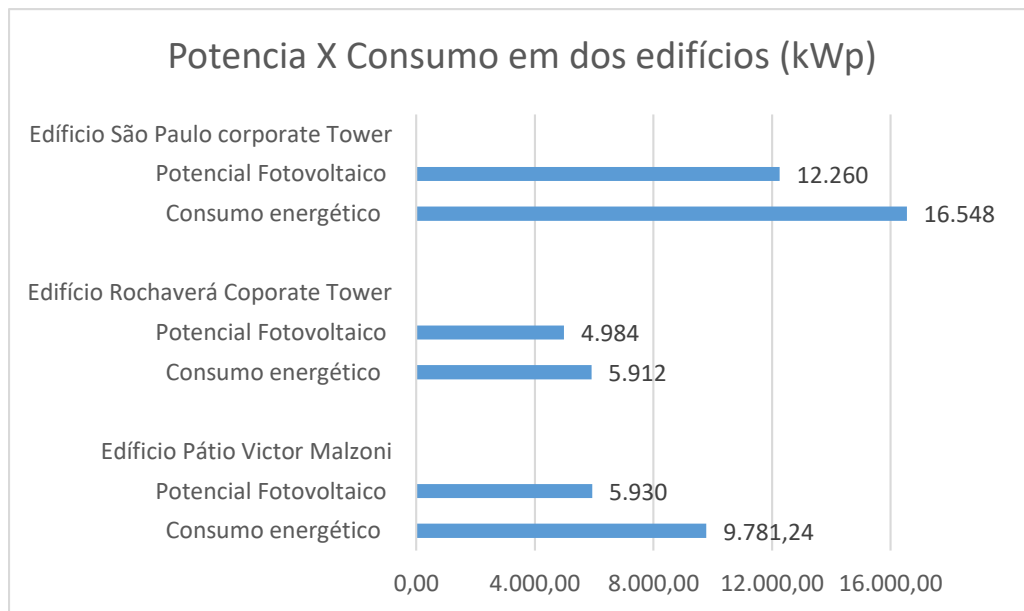


Gráfico 6: Potencial x Consumo dos edifícios (kWp). Fonte: autoria própria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresentou o potencial de geração de energia das fachadas de três edifícios de escritórios, a partir da substituição teórica dos vidros empregados por vidros fotovoltaicos. Embora os edifícios não tenham atingido a autossuficiência, eles apresentaram uma autonomia entre 60% e 84%, valor de relevância para a economia energética. A energia solar é uma das fontes mais promissoras, devido à sua fonte inesgotável, grande aplicabilidade, além do crescimento progressivo, que resultam no

barateamento dessa tecnologia. É importante ressaltar que há várias possibilidades de geração de energia, principalmente na arquitetura com a aplicação de células fotovoltaicas.

Em síntese, depois de realizada a pesquisa, simulação e análise dos resultados, conclui-se que os edifícios com maior potencial são aqueles que possuem um equilíbrio entre a área dos pavimentos e área das envoltórias, ou seja, quanto menor a área do pavimento, menor é o seu consumo energético. Um edifício pele de vidro, como os analisados nesta pesquisa, tem um potencial alto de geração energia, favorecendo a economia da edificação.

Embora o entorno imediato das edificações selecionadas não tenha sido considerado no presente estudo, ele demonstra o potencial fotovoltaico das fachadas dos edifícios pele de vidro e indica a possibilidade de economia de energia, caso fossem empregados vidros fotovoltaicos. O estudo aponta diretrizes projetuais para edifícios de escritórios e evidencia a importância do estudo aprofundado do potencial das fachadas e do consumo das edificações.

Por fim, cabe ressaltar que nesta pesquisa foi sugerida a simulação de troca dos vidros existentes por vidros fotovoltaicos, pois não havia informação suficiente sobre a aplicação da célula fotovoltaica nas envoltórias existentes dos edifícios. Esta película pode se moldar facilmente sobre qualquer superfície e seria interessante de ser explorada em pesquisas futuras.

Futuras pesquisas podem detalhar cada uma das edificações aqui apresentadas, vinculando seu consumo individual e o entorno, possibilitando compreender de forma aprofundada o potencial de economia de energia para edifícios localizados na cidade de São Paulo.

6. REFERÊNCIAS

AECWEB. Prédio Corporativo usa vidros Guardian e pontua na certificação LEED. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/empresa/guardian/8169/conteudo/predio-corporativo-usa-vidros-guardian-e-pontua-na-certificacao-leed/18037>> Acesso em: 15. Abr. 2021.

AFLALOGASPERINI. Rochaverá Corporate Tower. Disponível em: <<http://aflalogasperini.com.br/blog/project/rochavera-corporate-towers/>> Acesso em: 5. mar.2021.

ARCHDAILY. São Paulo Corporate Towers/ Pelli Clarke PelliArchitects+aflalo/gasperini arquitetos. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/799358/sao-paulo-corporate-towers-aflalo-gasperini-arquitetos-plus-pelli-clarke-pelli-architects?ad_medium=gallery>. Acesso em: 8 fev. 2021.

BRANDÃO, D.I; MARAFÃO, F.P; GONÇALVES, F.A. S; VILLALVA, M.G; GAZOLI, J.R. *Estratégia de controle multifuncional para sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica*. Revista eletrônica de Potência-SOBRAEP (*Brazilian Journal of Power Electronics*). Campo Grande, v. 18, no. 4, p.1206-1214, set/nov. 2013.

CEBRACE. *Cebrace Cool Lite* Linha S. Tabela Técnica de Proteção Solar Cebrace. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/Arquivos/Download/21/21.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2021.

DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. *Estratégia para edifícios de escritório energia zero no Brasil com ênfase em BIPV*. Revista Ambiente Construído. Associação Nacional de tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, v.14, n.3, p. 27-42, jul/set. 2014.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em 18 out. 2019.

REVISTA EM DISCUSSÃO. *Japão busca fontes mais seguras*. Revista em discussão, ano 6, no.25, junho de 2015. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/o-desafio-da-energia/mundo/japao-busca-fontes-mais-seguras>>. Acesso em 15 mar. 2021.

REVISTA VIDRO IMPRESSO. *O que é vidro low-e e onde aplicá-lo*. 2020. Disponível em: <https://vidroimpresso.com.br/noticia-setor-vidreiro/o-que-e-vidro-low_e-e-onde-aplica_lo?>. Acesso em 1 ago. 2021.

FIGUEIREDO, Erika Ciconelli de. *Peles de vidro: Otimização do desempenho da luz natural difusa em fachadas envidraçadas*. 2016. Dissertação (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

LIVE. Edifício Pátio Victor Malzoni - Que prédio é esse?. Disponível em: <<https://live.apto.vc/edificio-patio-victor-malzoni-que-predio-e-esse/>>. Acesso em 28 out. 2020.

MENDONÇA, Cauã Melgarejo. *Análise de Rendimento de um painel com o vidro danificado*. 2017. Monografia (Engenharia Elétrica, Área de Energia Renováveis) - Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, 2017.

NAKANO, Alvaro. *Simulação de desempenho energético de tecnologias fotovoltaicas em fachadas de edifícios fotovoltaicas em fachada de edifício no município de São Paulo*. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

NEOSOLAR. *Diferença entre W, Wp e Wh*. 2013. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/forum/component/kunena/10-D%C3%BAvidas-dos-produtos/126-diferen%C3%A7a-entre-w,-wp-e-wh>>. Acesso em 10 ago. 2021.

NEVES, Guilherme; VILELA, Waldeir; PEREIRA, Enio; BERNILuizAngelo. *Influência do espectro solar em módulos fotovoltaicos sob céu limpo, céu parcialmente nublado e céu nublado*. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado. 2018.

NICOLAI, Paola Oliveira de. *Estudos de desempenho ambiental: Retrofit no Edifício Pátio Malzoni*. 2017. Monografia (Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

OLIVEIRA, Ricardo Alexandre Mariz Simões Gonçalves de. *Desenvolvimento e otimização de células solares de filme fino de junção dupla (tandem) com silício amorfo e silício nanocristalino*. 2013. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis)- Faculdade de ciências e tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

ONYXSOLAR. Vidro Fotovoltaico de Silício Amorfo. Disponível em: <<https://www.onyx solar.es/vidrio-fotovoltaico/vidrio-de-silicio-amorfo>> Acesso em: 20 maio.2021.

PISANI, Maria Augusta Justi; FIGUEIREDO, Erika Ciconelli de. *Edifícios de escritório em São Paulo: tipologias de 1979 a 2010*. 2011. 11^a Conferência Internacional da LARES. São Paulo, Brasil, 2011.

PORTAL SOLAR. Como converter kWp em kWh?. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-converter-kwp-em-kwh#>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

PORTAL SOLAR. *História da energia solar*, 2018. Disponível em: <<https://pt.solar-energia.net/que-e-energia-solar/historia>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

PORTAL SOLAR. *Painéis solares integrados a construção*. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/paineis-solares-integrados-a-construcao---bipv.html>> Acesso em: 12 abr. 2020.

ROSA, Antonio Robson Oliveira da; GASPARIN, Fabiano Perin. *Panorama da energia solar fotovoltaico no Brasil*. Revista Brasileira de Energia Solar, ano 7, v. 7, no.2, p. 140-147, dezembro de 2016.

SACHT, Helenice Maria. *Módulos de Fachada para reabilitação Eco-Eficiente de edifícios*. 2012. Dissertação (Doutorado em Curso de Engenharia Civil)- Universidade do Minho, Braga, 2012.

SANTOS, Arthur Henrique Cursino dos. *Avaliação técnica e financeira da geração fotovoltaica integrada a fachadas de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São*

Paulo. 2015. Tese (Doutorado em Ciência)-Programa em Energia, Energia do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

TATEOKA, Rosana Simprini. *Edifícios de escritório na cidade de São Paulo no início do século XXI – 2001 a 2012: As principais características dos projetos atuais*. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2014.

TEIXEIRA, Regiane; CORREA, Vanessa. *Pele de vidro se torna padrão para edifícios corporativos em SP*. 2013. Disponível em: <<https://m.folha.uol.com.br/saopaulo/2013/05/1276495-pele-de-vidro-se-torna-padrao-para-edificios-corporativos-em-sp.shtml?gathStatIcon=true>>. Acesso em 25 abr. 2021.

VELOSO, Ana Carolina de Oliveira. *Avaliação do consumo de energia elétrica de edificações de escritório e sua correlação com as decisões de projeto*. 2017. Tese (Pós Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE. *Net Zero Energy Buildings*. 2016. Disponível em: <<https://www.wbdg.org/resources/net-zero-energy-buildings>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

Contatos: leticia garciaperez98@gmail.com e erika.figueiredo@mackenzie.br