

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CONRADO CASAROTTO ALARCON
JOÃO GABRIEL MARANGONI JUNQUEIRA DE ANDRADE
LUCAS MILAN SOUZA GREGO
RAFAEL CARVALHO PASSOS

**Estudo da viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos nas
coberturas de edifícios da Escola Politécnica**

São Paulo
2019

CONRADO CASAROTTO ALARCON
JOÃO GABRIEL MARANGONI JUNQUEIRA DE ANDRADE
LUCAS MILAN SOUZA GREGO
RAFAEL CARVALHO PASSOS

**Estudo da viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos nas
coberturas de edifícios da Escola Politécnica**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Daniel Setrak Sowmy

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Catálogo-na-publicação

Alarcon, Conrado

Estudo da viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas de edifícios da Cidade Universitária / C. Alarcon, L. Milan, J. Andrade, R. Passos -- São Paulo, 2019.

86 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Energia Solar I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t. III.Milan, Lucas
IV.Andrade, João V.Passos, Rafael

Nomes: Conrado Casarotto Alarcon
 João Gabriel Marangoni Junqueira De Andrade
 Lucas Milan Souza Grego
 Rafael Carvalho Passos

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovado em:

Banca Examinadora

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof.Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente ao nosso orientador Professor Doutor Daniel Setrak Sowmy por nos auxiliar a concretizar este trabalho, fornecendo suporte nos momentos que lhe coube e por suas correções e incentivos durante a realização do trabalho.

Aos professores da universidade, em especial os professores das disciplinas de Física das Construções e Simulação Computacional de Desempenho Energético do Edifício, por despertar o interesse para realização deste Trabalho de Formatura.

Aos nossos pais e irmãos, pelo incentivo e apoio incondicional.

E a todos os colegas que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
SUMÁRIO	5
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 METODOLOGIA	17
1.3.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DE PROJETO	17
1.3.2 NORMAS DE APLICAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	18
1.3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DA CIDADE UNIVERSITÁRIA	19
1.3.4 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTÁICA	19
1.3.5 ESTUDO DE CASO	20
1.3.6 EXTRAPOLAÇÃO PARA DEMAIS LOCAIS	21
1.3.7 FORMAS DE FINANCIAMENTO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	23
2.1.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	23
2.1.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	26
2.1.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	27
2.1.4 PERDA DE EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS AO LONGO DO TEMPO	28
2.2 EXPERIÊNCIA NA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO	30
2.3 EXPERIÊNCIA EM OUTROS CAMPI	34
2.4 REGULAMENTAÇÃO E LEIS	40
2.4.1 SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	40
2.4.2 ATUAÇÃO DE EMPRESAS PRIVADAS JUNTO À UNIVERSIDADE	42
3 ESTUDO DE CASO NA CIDADE UNIVERSITÁRIA	44
3.1 EDIFÍCIO PAULA SOUZA	44
3.1.1 DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO ANALISADO	45
3.1.2 DEMANDA ENERGÉTICA DO EDIFÍCIO	49

SUMÁRIO

3.1.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA	52
3.1.4	IMPACTO FINANCEIRO	55
3.2	OUTROS EDIFÍCIOS DA ESCOLA POLITÉCNICA.....	61
3.2.1	DEMANDA ENERGÉTICA	61
3.2.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA	62
3.2.3	IMPACTO FINANCEIRO DO SISTEMA	73
4	CONCLUSÕES	77
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	ANEXO A – ÁREAS DE COBERTURA DOS EDIFÍCIOS DA USP	83
	ANEXO B – REPRESENTAÇÃO E MAPAS DO EDIFÍCIO PAULA SOUZA.....	86

RESUMO

De 1839, quando se iniciava sua história, até os dias de hoje, a energia fotovoltaica passou por transformações que a tornaram acessível até mesmo a pessoas que desejam reduzir custos em suas residências. Ainda assim, a representatividade dessa tecnologia para a matriz energética mundial ainda é pouco significativa frente a outras fontes, como carvão e derivados de petróleo. Entretanto, hoje se sabe que tais fontes de energia estão relacionadas a problemas ambientais que incluem a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o aquecimento global. Globalmente, a indústria de energia é responsável por mais de 30% da emissão de GEE, de acordo com dados do IPCC. Partindo de tais motivações, este trabalho teve como estudo a viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas de edifícios da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira, principal campus da Universidade de São Paulo. A definição da área a ser estudada considerou dois principais fatores: A crise financeira pela qual a USP passa há alguns anos, que ressalta a importância de soluções de curto e longo prazo para recuperar sua saúde financeira, e a vasta extensão territorial do campus, que somada à ausência de edifícios altos, indica bom potencial de geração de energia fotovoltaica. Para criar o embasamento teórico e prático necessário para a proposição de uma solução viável, foi realizada uma revisão bibliográfica. Em seguida, um estudo de caso foi realizado tendo como objeto de estudo um dos edifícios da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira. Foram estudadas a demanda energética do edifício e as áreas disponíveis na cobertura para a instalação de um sistema fotovoltaico. Dessa forma, foi possível propor uma solução e calcular o impacto financeiro de sua implementação. A solução para o Edifício Paula Souza apresentou período de retorno de 8 anos, taxa interna de retorno de 14,9% e potencial de geração de cerca de 47% da demanda energética do edifício. Já os resultados para os outros edifícios apresentaram período de retorno de 7 anos, taxa interna de retorno de 15,1% e potencial de geração suficiente para atender mais de 90% da demanda da Escola Politécnica.

Palavras-chave: energia solar; sistemas fotovoltaicos; análise de viabilidade.

ABSTRACT

Since 1839, when its history began, the study of photovoltaic energy went through several transformations that made it available even to people who want to reduce their energy consumption costs at home. Even so, this technology is still not representative to the world energy consumption when compared to other sources, such as coal and petroleum. However, it is known today that those sources of energy are related to several environmental problems, such as greenhouse gases and global warming. Globally, the energy industry is responsible for more than 30% of greenhouse gas emissions. With that in mind, this work intends to study the feasibility of the installation of photovoltaic systems on the roofs of the buildings of Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira, the main campus of Universidade de São Paulo. To define the area of study, two main factors were taken into consideration: the financial crisis that has been striking USP in the last few years, which indicates the importance of proposing short and long term solutions to restore the financial health of the university, and the vast territorial extension of the campus which, added to the absence of tall buildings, presents itself with great potential of photovoltaic energy generation. The first step was creating a literature review, which helped to build theoretical and practical basis to the study. Finally, a case study was performed in one of the buildings of Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira, which included an assessment of energy demand and a study of the available areas on top of the building. Therefore, it was possible to propose a solution and to calculate the financial impact of its implementation. As a result, Edifício Paula Souza solution presented a payback period of 8 years, an internal return rate of 14,9% and a potential to generate 47% of the building's energy demand. When applied to other buildings, the solution presented better results, with a payback period of 7 years, an internal return rate of 15,1% and a potential to supply more than 90% of the total school's energy demand.

Keywords: solar energy; photovoltaic systems; feasibility analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta mundial total de energia primária ao decorrer dos anos.....	14
Figura 2 - Imagem de satélite da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (USP)	15
Figura 3 - Curva de corrente vs. tensão	24
Figura 4 - Curva de potência vs. tensão.....	24
Figura 5 - Custo de uma célula fotovoltaica ao longo do tempo	26
Figura 6 - Relação da chuva com as perdas de energia causadas pela sujeira dos painéis.....	29
Figura 7 - Exemplo de painéis com poeira distribuída de forma não homogênea	30
Figura 8 - Sistema instalado no prédio da administração do Instituto de Energia e Ambiente	31
Figura 9 - Sistema instalado sobre o gramado do IEE, com potência instalada de 156 kWp.....	32
Figura 10 - Sistema instalado sobre o gramado do IEE, com potência instalada de 150 kWp	33
Figura 11 - Sistema instalado sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin, com potência instalada de 156 kWp	33
Figura 12 - Painéis sobre o estacionamento de ButteCollege	35
Figura 13 - University of Arizona Solar Park.....	37
Figura 14 - Preço da energia solar nos Estados Unidos, no valor da moeda de 2017 em centavos por kW	38
Figura 15 - Painéis Solares instalados na universidade de Melbourne	39
Figura 16 - Potencial instalado da UFSC	40
Figura 17 - Vista da área estimada da FEA utilizando o software Google Earth	44
Figura 18 - Consumo mensal e custo financeiro de energia elétrica do Edifício Paula Souza, situado na Escola Politécnica da USP.....	45
Figura 19 - Vista superior do Edifício Paula Souza	46
Figura 20 - Vista frontal da entrada do Edifício Paula Souza	46

Figura 21 - Localização da Escola Politécnica (vermelho) e locais de medição do Cresesb (azul)	47
Figura 22 - Irradiação média de localidades próximas à Escola Politécnica em kWh/m ² .dia	48
Figura 23 - Radiação em função da inclinação do painel medidas a 5,4km da Escola Politécnica.....	49
Figura 24 - Áreas consideradas como disponíveis para instalação dos sistemas fotovoltaicos	53
Figura 25 - Vista superior da disposição dos módulos fotovoltaicos em cada retângulo de área disponível na cobertura. Escala: 1:100	54
Figura 26 - Vista lateral da disposição dos módulos fotovoltaicos em cada retângulo de área disponível na cobertura. Escala: 1:300.....	55
Figura 27 - Prédios da engenharia elétrica e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos	62
Figura 28 - Prédios da Administração e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos	63
Figura 29 - Prédio da Engenharia Civil e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos	64
Figura 30 - Prédio da hidráulica e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos	65
Figura 31 - Prédios das engenharias de minas, materiais e e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos	66
Figura 32 - Prédios da engenharia mecânica e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos	67
Figura 33 - Prédios do biênio e da engenharia de produção e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos	68
Figura 34 - Representação dos cortes do edifício	86
Figura 35 - Mapa do andar superior do edifício	86
Figura 36 - Mapa do andar térreo do edifício.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do primeiro ano de produção do sistema localizado sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin	34
Tabela 2 - Dados coletados relativos ao andar térreo	50
Tabela 3 - Dados coletados relativos ao andar superior	50
Tabela 4 - Premissas adotadas para cálculo do consumo energético relativo à iluminação	51
Tabela 5 - Cálculos da estimativa do consumo total proveniente da iluminação	51
Tabela 6 - Premissas adotadas para cálculo do consumo energético relativo aos sistemas de ar condicionado	51
Tabela 7 - Cálculos da estimativa do consumo total proveniente dos sistemas de ar condicionado	51
Tabela 8 - Cálculos da estimativa do consumo total do prédio em comparação com consumos de Luz e ar-condicionado	52
Tabela 9 - Cálculo do potencial de geração de energia por ano para o sistema instalado sobre a cobertura do Edifício Paula Souza	56
Tabela 10 - Cálculos do CAPEX para instalação do sistema	57
Tabela 11 - Cálculos do OPEX para instalação do sistema	58
Tabela 12 - Economia anual gerada pelo sistema.....	59
Tabela 13 - Período de retorno do investimento.....	60
Tabela 14 - Consumo energético em MWh dos principais prédios da EPUSP em 2017	61
Tabela 15 - Quadro resumo da área total disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos na EPUSP e percentual médio de área com sombras.....	69
Tabela 16 - Potencial de geração energética do sistema ano a ano e perdas associadas à queda do desempenho em função do tempo e sujeira - 1	71
Tabela 17 - Potencial de geração energética do sistema ano a ano e perdas associadas à queda do desempenho em função do tempo e sujeira - 2	72
Tabela 18 - Gastos com instalação do sistema e compra dos equipamentos	74
Tabela 19 - Gastos manutenção do sistema ao longo da vida útil de 25 anos.....	74

Tabela 20 - Economia anual gerada a partir da instalação do sistema	75
Tabela 21 - Fluxo de caixa esperado com a execução do sistema	76
Tabela 22: Lista de áreas estimadas utilizando o software Google Earth. Fonte: Adaptado de CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA, 2018, p. 47	83
Tabela 23: Continuação da lista de áreas estimadas utilizando o software Google Earth. Adaptado de CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA, 2018, p. 47 – 1.	84
Tabela 24: Continuação da lista de áreas estimadas utilizando o software Google Earth. Adaptado de CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA, 2018, p. 47 – 2.	85

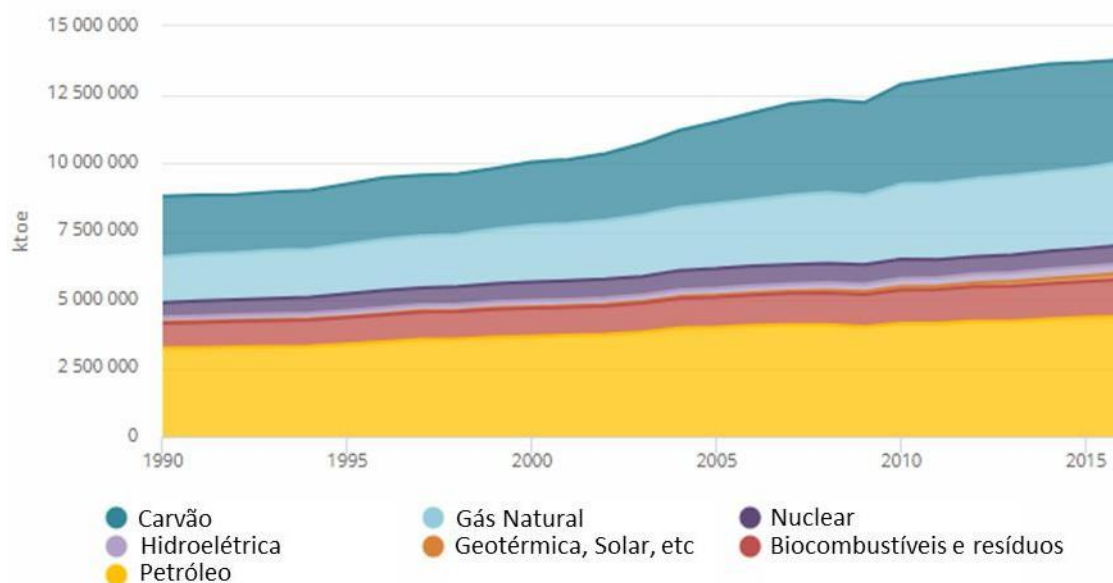
1 INTRODUÇÃO

Em 1839 iniciava-se a história da energia fotovoltaica através do físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, que verificou a produção de uma diferença de potencial em placas metálicas mergulhadas em eletrólito, quando expostas à luz. Mais de 100 anos depois, em 1953, nascia a primeira célula solar moderna, quando o físico americano Gerald Pearson mergulhou uma placa de silício em um banho quente de lítio, gerando uma superfície com elétrons livres na placa. Pearson notou, então, que ao ser exposta à luz, a amostra produzia corrente elétrica.

Anos mais tarde, nas décadas de oitenta e noventa, com o fortalecimento da ideia de diminuir a utilização de combustíveis fósseis devido às mudanças climáticas, o investimento em desenvolvimento de tecnologias para geração de energia mais limpa cresceu significativamente. Em 1982 foi instalada na Califórnia a primeira central solar de grande envergadura (1MWp) e alguns anos depois, em 1990 e 1993, Alemanha e Japão lançavam os programas de “telhados solares”, incentivando o uso da energia fotovoltaica (VALLÊRA, A.M.; BRITO, M.C. 2006).

Apesar de tantos anos de história, a energia solar ainda é pouco relevante frente a outras fontes energéticas, como o carvão. Dados da International Energy Agency (IEA) mostram que, em 2016, apenas 1,6% da matriz energética mundial corresponde a fontes de baixo impacto ambiental associado, como solar, eólica e geotérmica, conforme apresentado pela Figura 1. Ainda, segundo a IEA, o Brasil apresenta uma realidade semelhante, tendo apenas cerca de 1,3% de sua matriz energética oriunda de fontes desse tipo. As hidrelétricas, que representam a maior parte da energia gerada no Brasil, são consideradas fontes renováveis, porém apresentam alto impacto ambiental associado.

Figura 1 - Oferta mundial total de energia primária ao decorrer dos anos



Fonte: International Energy Agency (<https://www.iea.org/>)

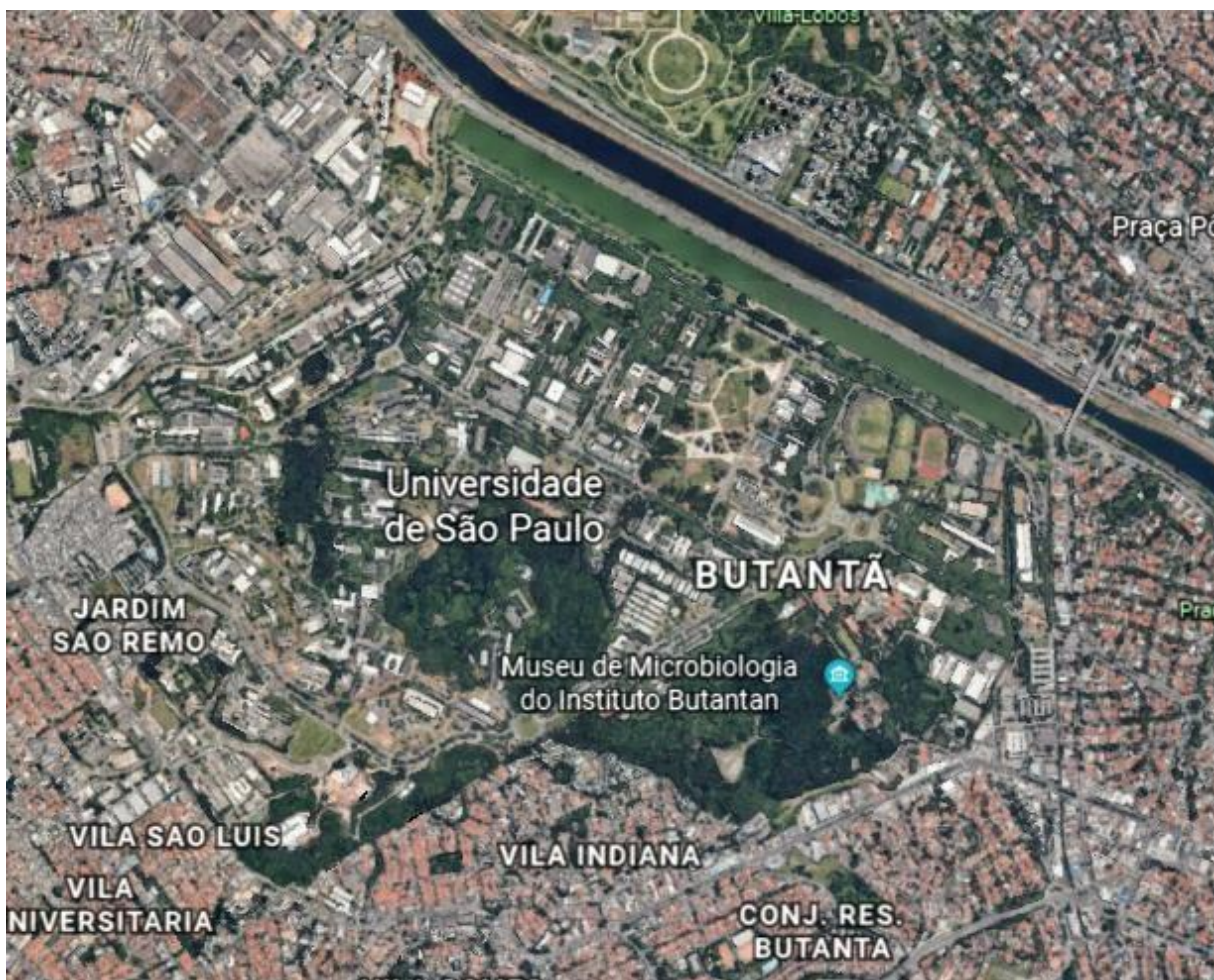
Apesar de apresentar um custo de implantação de 5 a 20 vezes maior do que o das fontes tradicionais, os sistemas de geração de energia através de painéis fotovoltaicos apresentam potencial de economia no longo prazo. Além de não necessitar de combustível, como ocorre nas termelétricas, a geração de energia solar apresenta um custo de manutenção significativamente menor (MARON VICHI, 2009).

No contexto da utilização da energia elétrica, tem-se a Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, principal campus da Universidade de São Paulo, como objeto de estudo. O campus, localizado na zona oeste de São Paulo, abriga cerca de 65 000 alunos de graduação, além de professores, alunos de pós-graduação e funcionários diretos e indiretos¹.

O campus é utilizado pela USP desde 1944 e hoje abriga grande parte dos cursos oferecidos pela Universidade. Com uma área de aproximadamente 3 700 000 m² de terreno, a Cidade Universitária apresenta elevado potencial de geração de energia solar, com 860 628 m² de área construída. A Figura 2 apresenta uma imagem de satélite do campus, retirada do Google Earth.

¹ Anuário Estatístico da USP. Disponível em: <https://uspdigital.usp.br/anuario/AnuarioControle>

Figura 2 - Imagem de satélite da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (USP)



Fonte: Google Maps, 2019 (<https://www.google.com.br/maps/>).

De acordo com dados de 2017 da Superintendência do Espaço Físico da Universidade de São Paulo, o consumo de energia elétrica mensal do campus é de cerca de 6 milhões de kWh, o que representa um custo de aproximadamente 3 milhões de reais para os cofres públicos.

Nesse contexto, e considerando que a Universidade deve ser responsável pelo desenvolvimento tecnológico e científico do país, realizou-se um estudo da viabilidade de instalação de painéis solares na Cidade Universitária, estimando o impacto financeiro a ser gerado.

1.1 JUSTIFICATIVA

No contexto atual do planeta, a sustentabilidade dita várias das vertentes do avanço da sociedade. Em função de uma série de problemas ambientais, tais como a emissão de gases de efeito estufa (GEE), o aquecimento global, o desmatamento de florestas e a perda de fauna e flora naturais, as inovações na engenharia, de forma geral, são pensadas de forma a minimizar os impactos ambientais das soluções atualmente existentes.

No Brasil, a geração de energia é responsável pela emissão de aproximadamente 32,8% dos gases de efeito estufa produzidos em todo o país². Pensando nisso, é irrefutável a importância de se substituir as fontes não renováveis – ou renováveis com outros impactos ambientais além da emissão de GEE – de energia por fontes de energia limpa.

Ainda sobre a Energia Limpa no Brasil, a expansão do uso de fontes como a energia eólica e a energia solar é notória. Apenas em 2017, a utilização da energia eólica aumentou 21%, enquanto a da energia solar aumentou impressionantes 1700%. A previsão de especialistas é que até 2026 essas duas fontes componham até 18% da geração total de energia no país³.

Pensando nessas tendências, como centro detentor e criador de avanço científico e tecnológico, a USP não pode ficar para trás na evolução energética pela qual passam o Brasil e o Mundo. Em seu principal campus, a Cidade Universitária, há um enorme potencial de geração de energia solar subutilizado, tendo em vista principalmente dois fatores: a vasta extensão territorial da Cidade Universitária e com forte incidência de raios solares.

Apesar da já mencionada importância da sustentabilidade, outro tema deve ser colocado em pauta quando se sugere intervenções em uma entidade

²Panorama das emissões de gases de efeito estufa e ações de mitigação no Brasil. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/2018/04/panorama-das-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-e-acoes-de-mitigacao-no-brasil/>

³Eólica e solar: o futuro da produção energética no Brasil é a energia limpa. Disponível em: <https://www.greenme.com.br/informar-se/energia-renovavel/7107-eolica-solar-futuro-producao-energia-brasil>

pública que é foco de tantas discussões: o custo financeiro trazido pelas mudanças propostas. Pensando na situação financeira delicada da Universidade de São Paulo, na qual 96% do orçamento anual é utilizado para pagar salários e o déficit previsto é de 288 milhões de reais⁴, soluções que reduzam os gastos da entidade são fundamentais. É pensando nisso também, a implementação de sistemas fotovoltaicos na Cidade pode se apresentar como uma boa solução, e a viabilidade econômica da mesma e período de retorno do investimento inicial serão calculados para fomentar a análise.

1.2 OBJETIVOS

Através do estudo de caso realizado no edifício Paula Souza e da presente referência bibliográfica, o objetivo deste trabalho é:

- Analisar a viabilidade da utilização de sistemas fotovoltaicos para geração de energia nas coberturas da Escola Politécnica;
- Estimar o impacto financeiro do projeto;
- Avaliar se a solução é rentável para a instituição.

1.3 METODOLOGIA

1.3.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DE PROJETO

Tendo em vista a já mencionada Crise Financeira⁵ pela qual passa a USP há alguns anos, e levantando ainda em questão o recente contingenciamento de verbas⁶ das universidades federais, que pode futuramente ocorrer também nas universidades estaduais, é fundamental propor soluções a curto e a longo prazo que visem a saúde financeira da Universidade.

⁴ Crise na USP: 10 medidas urgentes para reverter o declínio da instituição. Disponível em: <https://vejasp.abril.com.br/cidades/crise-usp-especialistas/>

⁵ Crise na USP: 10 medidas urgentes para reverter o declínio da instituição. Disponível em: <https://vejasp.abril.com.br/cidades/crise-usp-especialistas/>

⁶ Entenda o corte de verbas das universidades federais e saiba como são os orçamentos das 10 maiores. Disponível em: <https://g1.globo.com/educacao/noticia/2019/05/15/entenda-o-corte-de-verba-das-universidades-federais-e-saiba-como-sao-os-orcamentos-das-10-maiores.ghtml>

Neste projeto, foi abordado como região de estudo a Escola Politécnica localizada no Campus principal da Universidade de São Paulo – a Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira. Tal recorte geográfico foi pensado dadas algumas características do campus: sua vasta extensão territorial⁷, correspondente a 3.700.000m², a ausência de altos edifícios que poderiam prejudicar a incidência de raios solares no topo de outros edifícios, a vasta área terrestre subutilizada, que poderia ser usada para geração de energia solar, entre outras.

Outra importante delimitação de escopo refere-se às formas de geração de energia a serem analisadas no estudo. Dentre as possíveis fontes de geração, neste projeto foi abordado exclusivamente o potencial de geração pela energia solar fotovoltaica. Essa fonte foi escolhida principalmente em detrimento da alta incidência solar na cidade de São Paulo e do vigente amplo crescimento e expansão da utilização de painéis de energia solar⁸ no Brasil.

1.3.2 NORMAS DE APLICAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Para a execução do dimensionamento da quantidade de painéis instalados em função da área, para o cálculo dos custos de manutenção, instalação e da tecnologia e para a quantificação de painéis instalados necessários para atingir a demanda energética do campus, foram seguidas as normas de aplicação de energia fotovoltaica disponibilizadas pela ABNT. Mais especificamente, as normas utilizadas serão a NBR 10899 – “Energia solar fotovoltaica – Terminologia”, a NBR 16149 – “Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição” e a NBR 16274 – “Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho”. Além disso, foram utilizadas as Resoluções Normativas N° 482 e 687 de 17 de abril de 2012 e 24 de novembro de 2015,

⁷Mapa da Cidade Universitária. Disponível em: <http://www.puspc.usp.br/mapa-campus/>

⁸Energia Solar deve crescer 44% no Brasil em 2019 com impulso da geração distribuída. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,energia-solar-deve-crescer-44-no-brasil-em-2019-com-impulso-de-geracao-distribuida,70002683737>

respectivamente, estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

1.3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DA CIDADE UNIVERSITÁRIA

Com a finalidade de definir o potencial total de geração energético por fonte fotovoltaica, foi realizado então o levantamento de alguns dados da Cidade Universitária, tais como:

- Radiação incidente ao longo do ano, disponibilizada pela ANEEL no Atlas Anual de Energia Solar⁹;
- Área útil total disponível para a implantação de painéis solares, levantada manualmente com auxílio do software Google Earth TM;
- Histórico de consumo de energia de alguns institutos da Cidade Universitária e do campus como um todo, divulgado pela Superintendência do Espaço Físico da Universidade de São Paulo;
- Preço pago por kWh na USP, também divulgado em relatórios da Superintendência do Espaço Físico da Universidade de São Paulo.

1.3.4 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTÁICA

Para a execução da análise, foi necessário também fazer um mapeamento de algumas das tecnologias de geração de energia solar disponíveis no mercado. Os principais pontos levados em consideração serão:

- Tempo de vida da tecnologia;
- Potencial de geração de energia elétrica da tecnologia;
- Custos de instalação dos painéis;
- Custos de operação (sazonalidade e custos de manutenção);

⁹Atlas de Energia Solar da ANEEL. Disponível em:
http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_2.htm

Uma vez detalhadas as tecnologias disponíveis, será possível escolher a que melhor se encaixa nas necessidades do caso em questão.

1.3.5 ESTUDO DE CASO

Como forma de validar as premissas adotadas e a viabilidade do trabalho, foi realizado então um estudo de caso detalhado para um dos principais edifícios da USP, tanto no que tange ao gasto energético, quanto em relação à área útil disponível para a instalação dos painéis solares.

Esse estudo foi de suma importância para identificar a existência de anomalias na análise ou a necessidade de se considerar outros fatores, como por exemplo, a área mínima de um edifício para que compense a execução da instalação dos painéis.

Analogamente ao descrito acima, para o estudo de caso teremos:

- Levantamento da área útil do prédio escolhido;
- Detalhamento dos gastos energéticos do edifício;
- Dimensões dos painéis solares escolhidos;
- Quantidade de painéis a serem instaladas na cobertura do prédio;
- Características da incidência solar sobre os painéis;
- Potencial de geração de energia total do edifício;
- Valor do montante financeiro poupado anualmente com a instalação dos painéis no edifício;
- Custos de implantação e de manutenção dos painéis;
- Período de retorno do investimento inicial;
- Conclusão acerca da viabilidade financeira.

1.3.6 EXTRAPOLAÇÃO PARA DEMAIS LOCAIS

Feito o estudo de caso inicial, validadas as premissas e refinadas as variáveis de projeto, é possível extrapolar os resultados obtidos para outros edifícios da Escola Politécnica.

Assim, obtém-se em larga escala, a capacidade de geração total dos prédios analisados em termos de energia solar e o período de retorno do investimento inicial.

Para tal, foram utilizados os resultados obtidos com maior nível de detalhe no estudo de caso. Alguns indicadores traçados para o edifício foram extrapolados para os demais a partir das áreas construídas de cada um deles e das áreas disponíveis para instalação de painéis.

1.3.7 FORMAS DE FINANCIAMENTO

Em 2017 foi anunciado pela Pró-Reitoria de Pesquisa e pela Agência USP de Inovação (Auspín) o programa USP + Empresas, projeto que se apresenta como uma oportunidade para empresas firmarem parcerias com a universidade. Entretanto, a relação com a USP ainda não é amplamente acessível para as empresas. Portanto, este trabalho também teve o intuito de facilitar essa conexão por meio do contato com potenciais investidores.

Como forma de facilitar o aporte das tecnologias, foram estudadas maneiras de conseguir o capital de investimento – ou parte dele – para a implementação da solução, tais como investimentos de P&D¹⁰ ou investimentos providos da iniciativa privada. Recentemente, por exemplo, foi estabelecida no conjunto de normas da USP a Resolução Nº 7661, de 22 de maio de 2019, que estabelece regras para a atuação de empresas privadas junto à universidade¹¹.

¹⁰Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d>

¹¹Resolução Nº 7661, de 22 de maio de 2019. Disponível em: <http://www.leginf.usp.br/?resolucao=resolucao-no-7661-de-22-de-maio-de-2019>

A ANEEL possui um programa de P&D estruturado, no qual o projeto em estudo se adequa aos critérios de contemplação do programa, observa-se: “O objetivo do Programa de P&D é alocar adequadamente recursos humanos e financeiros em projetos que demonstrem a originalidade, aplicabilidade, relevância e a viabilidade econômica de produtos e serviços, nos processos e usos finais de energia. Busca-se promover a cultura da inovação, estimulando a pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico brasileiro, criando novos equipamentos e aprimorando a prestação de serviços que contribuam para a segurança do fornecimento de energia elétrica, a modicidade tarifária, a diminuição do impacto ambiental do setor e da dependência tecnológica do país.” (ANEEL, 2019).

Para a procura de investidores da iniciativa privada, inicialmente foram contatadas empresas que tenham iniciativas de redução aos impactos do meio ambiente consistentes. Entende-se que essas empresas têm não apenas a oportunidade de fortalecer sua marca no âmbito acadêmico, mas também no ambiente “extra-universitário”, por tratar-se de uma iniciativa ambiental de grandes proporções e que atrai boa atenção da mídia. Tal implementação também não tem obrigatoriedade alguma de ocorrer em uma única etapa. Para reduzir o impacto sobre o caixa da Universidade, é possível fazer a implantação por etapas, priorizando inicialmente os edifícios com maior potencial de geração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

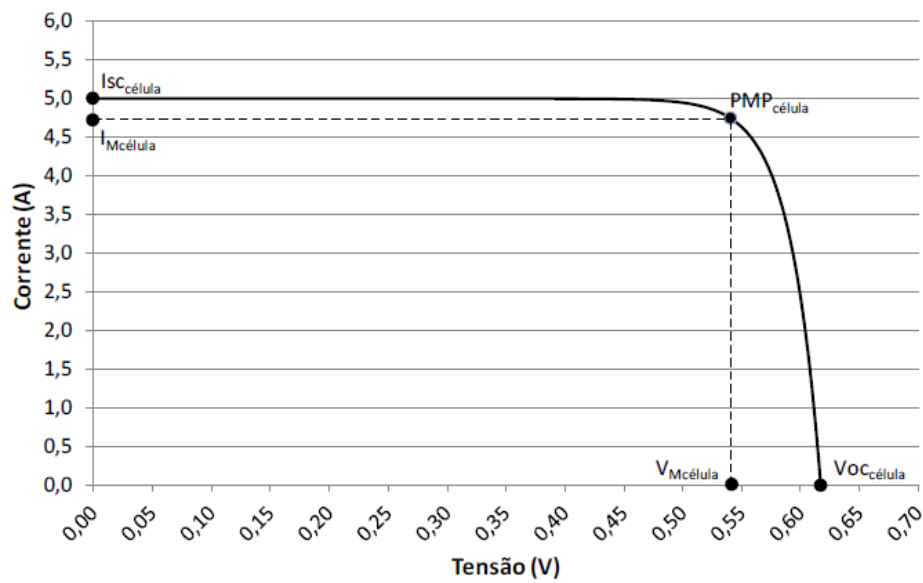
2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A palavra Fotovoltaica foi originada pela junção de “phos”, que em grego significa luz, e de “voltaico”, palavra criada em homenagem a Alessandro Volta, um químico e físico pioneiro da eletricidade (NOGUEIRA et al., 2001). De acordo com o Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica do Cresesb (2008, p.1) a energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, graças ao efeito fotovoltaico apresentado pelas células fotovoltaicas.

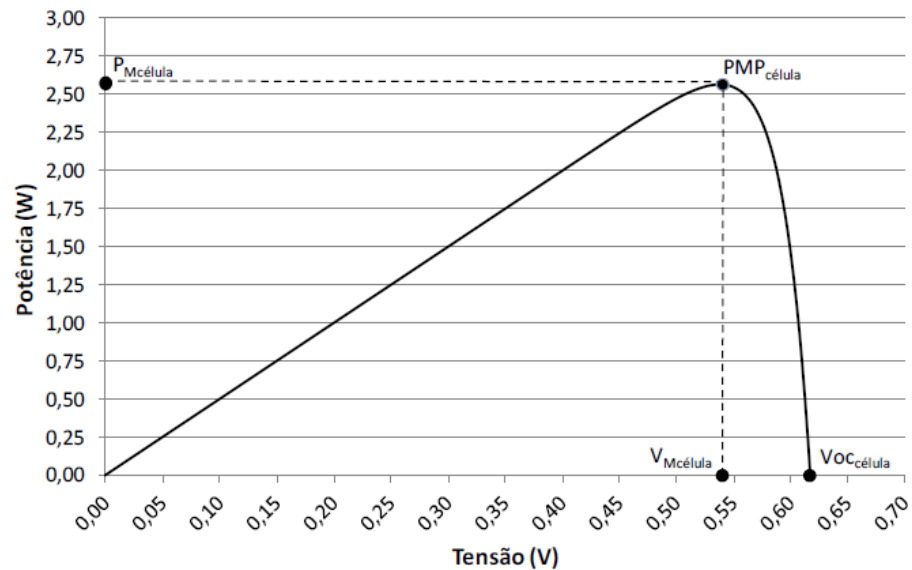
De acordo com ALMEIDA, Marcelo Pinho (2012), as células fotovoltaicas possuem uma curva característica de corrente vs. tensão (A x V), na qual existem 3 pontos que merecem destaque: a tensão de circuito aberto, na qual corrente e potência são nulas, a corrente de curto-circuito, onde tensão e potência são nulas e o ponto de máxima potência. Para melhor visualização do ponto de máxima potência, pode-se também traçar uma curva de potência vs. tensão. As Figuras 3 e 4 apresentam um exemplo das curvas citadas.

Figura 3 - Curva de corrente vs. tensão



Fonte: ALMEIDA, Marcelo Pinho

Figura 4 - Curva de potência vs. tensão



Fonte: ALMEIDA, Marcelo Pinho

Para absorção da energia solar fotovoltaica o Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica do Cresesb (2008, p.4) define os 3 principais tipos de células fotovoltaicas:

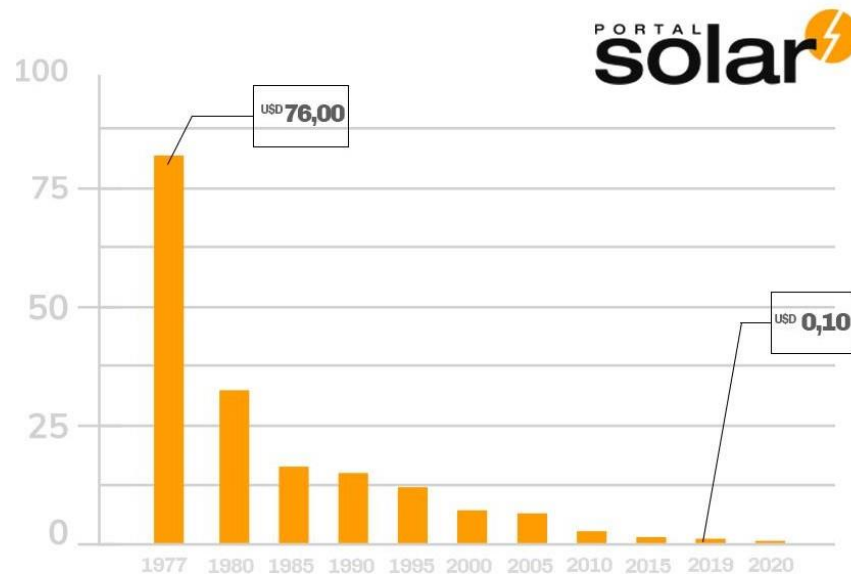
A primeira célula fotovoltaica a ser comercializada foi a de silício monocristalino, que segundo o tutorial do Cresesb é historicamente a célula mais utilizada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade, por ter um processo de fabricação básico e bem constituído. Este tipo de célula pode chegar a 15% de eficiência em escala industrial e 18% quando feitas em laboratórios.

O segundo tipo de célula que apareceu no mercado foi a célula de silício policristalino, que é mais barata, por ter basicamente as mesmas técnicas de fabricação da célula de silício monocristalino, exceto pelo fato de que ela possui controle menos rígido. Este tipo de célula pode chegar a 12,5% de eficiência quando construído em escala industrial.

O último tipo é a célula de silício amorfo, que difere das outras células por apresentar um grau de desordem muito elevada na estrutura dos átomos. Entretanto, possui duas principais desvantagens em relação ao uso das células mono e poli cristalinas de silício: têm baixa eficiência de conversão quando comparada às outras células e são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação.

Por serem os tipos de células fotovoltaicas mais usuais no mercado, para a realização deste trabalho, consideramos apenas estes três tipos de células nos estudos de caso. Na figura 5 abaixo, é possível ver a evolução de preço das células fotovoltaicas com o passar do tempo.

Figura 5 - Custo de uma célula fotovoltaica ao longo do tempo



Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>

2.1.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Como, de acordo com o Cresesb, em uma única célula fotovoltaica a tensão é baixa e a corrente de saída é baixa, são feitos agrupamentos entre as células para a formação de um módulo. Os arranjos das células podem ser em série ou paralelos.

No arranjo em paralelo a tensão é constante e as correntes produzidas pelas células são somadas de forma que a corrente máxima suportada é de cerca de 3A. Na conexão em série, somam-se as tensões de cada célula, podendo chegar a um valor de 12V.

Os módulos fotovoltaicos utilizam, em sua maioria, um polímero termoplástico como encapsulante frontal chamado EVA. Tal encapsulante é aplicado sobre as células e coberto por vidro temperado. Posteriormente, é utilizado PVF (fluoreto de polivinil) e por último uma borda metálica que oferece maior rigidez e facilita a fixação. Uma caixa fixada na parte posterior dos módulos abriga os terminais positivo e negativo e os diodos de by-pass de acordo com ALMEIDA, Marcelo Pinho (2012).

Para a utilização dos módulos também se fazem necessárias a utilização de dois diodos. O diodo de passo que serve como caminho alternativo para a corrente, caso alguma célula defeituosa esteja limitando a corrente na ligação em série. Pode-se fazer o uso de um diodo de bloqueio de corrente, caso o módulo receba uma corrente muito maior da qual ele é capaz de gerar, comprometendo a eficiência das células.

Assim como as células, os módulos também são caracterizados a partir de curvas $A \times V$ e $P \times V$. Tais curvas são obtidas através da combinação das curvas das células que compõem o módulo. A Equação 1 a 5 apresentam a relação entre os valores, retiradas de ALMEIDA, Marcelo Pinho (2012).

$$V_{oc_{módulo}} = \text{número de células FV em série} \times V_{oc_{célula}} \quad (1)$$

$$I_{sc_{módulo}} = \text{número de séries em paralelo} \times I_{sc_{célula}} \quad (2)$$

$$V_{M_{módulo}} = \text{número de células FV em série} \times V_{M_{célula}} \quad (3)$$

$$I_{M_{módulo}} = \text{número de séries em paralelo} \times I_{M_{célula}} \quad (4)$$

$$P_{M_{módulo}} = \text{número total de células FV} \times P_{M_{célula}} \quad (5)$$

Sendo:

FV = Future Value (capital formado é posterior à série);

$V_{oc_{módulo}}$ = tensão de circuito aberto de gerador FV;

$I_{sc_{módulo}}$ = Corrente de curto-circuito da célula FV;

$V_{M_{módulo}}$ = Tensão de máxima potência da célula FV;

$I_{M_{módulo}}$ = Corrente de máxima potência da célula FV;

$P_{M_{módulo}}$ = Potência máxima da célula FV.

2.1.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um conjunto de módulos fotovoltaicos passa a ser chamado de sistema fotovoltaico quando passa a ocorrer geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

De acordo com o tutorial de energia fotovoltaica do CRESESB é possível classificar os sistemas fotovoltaicos em três tipos, os quais serão descritos nos parágrafos seguintes.

Um sistema isolado é um tipo de sistema que não está interligado à rede

(Sistema “Off-Grid”), e utilizam um banco de baterias para armazenar a energia gerada durante o dia, para que esta possa ser utilizada. Este tipo de sistema também requer um controlador de carga para que não haja danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda. Caso este sistema precise alimentar equipamentos que utilizam uma corrente elétrica alternada, se faz necessária a instalação de um inversor, o qual é responsável por otimizar a potência final produzida.

Um sistema híbrido é um tipo de sistema que não está conectado à rede, porém apresenta várias fontes de geração de energia, como eólica, fotovoltaica, térmica e outros. Entretanto, o sistema híbrido trabalha o arranjo entre todas estas fontes de energia, visando maximizar a energia gerada e armazená-la. Como o foco do trabalho é apenas direcionado à energia fotovoltaica, não utilizaremos este tipo de sistema.

Os sistemas interligados à rede, também são conhecidos como sistemas “on grid”, não utilizam nenhum tipo de bateria e/ou armazenamento, sendo toda a energia gerada transferida à rede. Este controle é feito a partir de inversores que permitem que o sistema elétrico instalado receba energia quando necessário e entregue a geração excedente a rede nos picos de geração. Como será visto no capítulo 2.3, a energia excedente que o sistema entrega à rede pode ser utilizada como crédito futuramente.

O custo de implantação de um sistema interligado à rede é de aproximadamente metade do custo de um sistema isolado, já que não são necessárias a compra e a manutenção de baterias¹². Dessa forma, e considerando o fato de que nossa rede não apresenta nenhum problema grave de intermitência de energia, utilizaremos sistemas interligados à rede.

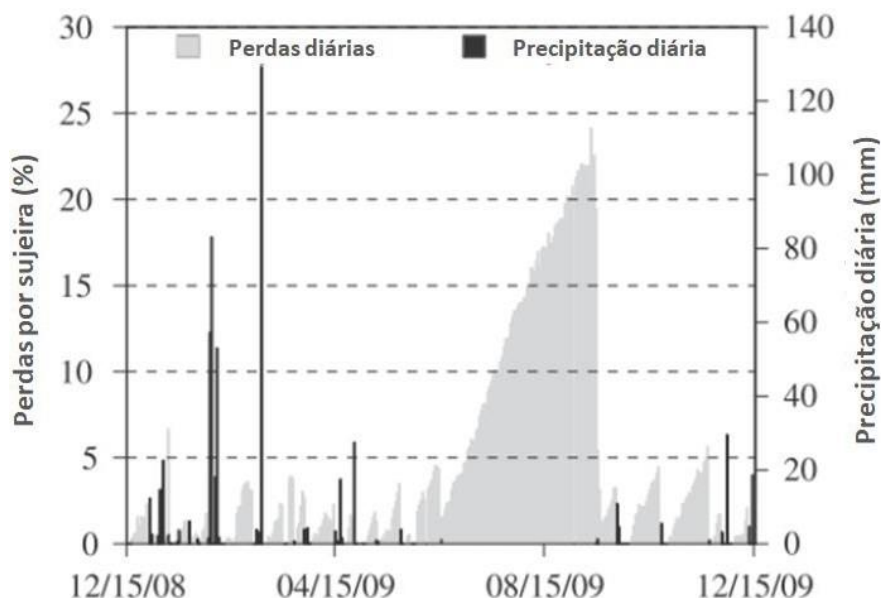
2.1.4 PERDA DE EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS AO LONGO DO TEMPO

O desempenho de um sistema fotovoltaico não é constante ao longo do tempo, e um dos fatores que o influencia é o acúmulo de sujeira na superfície dos painéis. De acordo com ZORRILLA-CASANOVA et al. (2011), a média de perda de radiação diária ao longo de um ano devida à falta de limpeza dos painéis gira em torno de 4%. Após longos períodos de seca, tais perdas podem

¹² Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede ou Isolados? Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/diferenca-sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-e-isolados/>

ultrapassar 20%, já que a chuva auxilia na remoção de sujeira dos equipamentos. O gráfico da Figura 6 apresenta uma relação entre a precipitação média diária e as perdas de radiação solar.

Figura 6 - Relação da chuva com as perdas de energia causadas pela sujeira dos painéis



Fonte: ZORRILLA-CASANOVA et al. (2011).

Além das perdas de energia, a sujeira não uniforme nos painéis pode também reduzir a vida útil do sistema, conforme apresentado pelo artigo escrito por LORENZO, E.; MORETÓN, R. e LUQUE, I (2014). Os autores afirmam que camadas não homogêneas de poeira sobre os painéis causam não apenas uma redução nas correntes, mas também quedas de tensão que podem ser muito mais relevantes, gerando perdas de eficiência significativamente maiores do que as estimadas quando se considera os módulos separadamente. Além disso, pode ocorrer o fenômeno de hot-spots, o que leva a diferenças de temperatura de até 20° entre células, reduzindo a vida útil do equipamento. A Figura 7 apresenta um exemplo de sujeira não uniforme em um sistema fotovoltaico.

Figura 7 - Exemplo de painéis com poeira distribuída de forma não homogênea



Fonte: LORENZO, E.; MORETÓN, R. e LUQUE, I (2014)

Além das perdas devidas ao acúmulo de sujeira nos módulos, também ocorre a degradação natural dos equipamentos, o que pode diminuir a eficiência ao longo dos anos. Será considerado, neste trabalho, que no primeiro ano de operação o sistema perde 3% e nos anos subsequentes 0,7% de sua eficiência inicial¹³.

2.2 EXPERIÊNCIA NA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

O Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo se apresenta como um exemplo importante para o estudo de sistemas fotovoltaicos em campi universitários. Em 1995, seu Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) iniciou suas atividades e, em 1997, recebeu apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

No ano seguinte, o LSF possuía um sistema com potência de 750 Wp que foi instalado pela primeira vez à rede elétrica. A partir de 2003 e após sucessivas ampliações, o sistema já possuía potência de 12 kWp e atendia

¹³De acordo com o Portal Solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/quanto-tempo-duram-os-paineis-solares-.html>

cerca de 50% do consumo energético do prédio da administração do IEE¹⁴. A Figura 8 apresenta uma foto do sistema citado.

Figura 8 - Sistema instalado no prédio da administração do Instituto de Energia e Ambiente



Fonte: <http://lsf.iee.usp.br/?q=pt-br/sistemas-fotovoltaicos-conectados-%C3%A0-rede>

Em 2015 o IEE dava mais um passo importante para a Universidade de São Paulo e para a energia solar brasileira como um todo: foi inaugurada, no dia 28 de maio, uma usina solar fotovoltaica de 540 kWp. A usina é composta por três sistemas instalados no IEE e um no Instituto de Estudos Brasileiros, no prédio da Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin e gera cerca de 1% da energia consumida pelo Campus. Para os quatro sistemas foram utilizados módulos da marca Yingli, modelo YL260C-30b, de 260 Wp cada.

De acordo com o professor Roberto Zilles, chefe da divisão científica de planejamento, Análise e Desenvolvimento Energético do IEE, o custo de implantação da usina foi de cerca de R\$ 7.000,00 por kWp, totalizando

¹⁴ Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede | LSF. Disponível em: <http://lsf.iee.usp.br/?q=pt-br/sistemas-fotovoltaicos-conectados-%C3%A0-rede>

aproximadamente R\$ 3,8 milhões¹⁵. O professor Roberto Zilles possui extensa experiência no assunto, tendo orientado diversos trabalhos que serão citados neste texto, como BENEDITO, 2009, ALMEIDA, 2012 e PIN, 2017. As Figuras 9 a 11 apresentam fotos dos sistemas que compõem a usina.

Figura 9 - Sistema instalado sobre o gramado do IEE, com potência instalada de 156 kWp



Fonte: PIN (2017).

¹⁵Você sabia que a USP possui uma usina de energia solar? | Portal Solar – Tudo Sobre Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/voce-sabia-que-a-usp-possui-uma-usina-de-energia-solar.html>

Figura 10 - Sistema instalado sobre o gramado do IEE, com potência instalada de 150 kWp



Fonte: PIN (2017).

Figura 11 - Sistema instalado sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin, com potência instalada de 156 kWp



Fonte: PIN (2017).

Conforme apresentado por PIN, Mario Luiz Ferrari em sua dissertação de doutorado, os dados do primeiro ano de produção apresentaram-se satisfatórios para o sistema instalado sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José

Mindlin. Esse sistema é composto por 10 inversores, cada um ligado a 3 fileiras de 20 módulos fotovoltaicos.

O fator de capacidade atingido foi de 13,3%, que se encontra entre 13% e 18%, limites esperados no Brasil, de acordo com BENEDITO, 2009. Já a taxa de desempenho anual atingida foi de 75,5%, que de acordo com ALMEIDA, 2012, se enquadra nos limites definidos para bons sistemas fotovoltaicos. Os dados foram divulgados pelo Instituto de Energia e Ambiente e estão apresentados pela Tabela 1.

Tabela 1 - Dados do primeiro ano de produção do sistema localizado sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin

Mês	Produção (kWh)	Fator de capacidade	Produtividade (kWh/kWp)	Taxa de desempenho (%)
mai/15	12.450	10,7	79,8	83,4
jun/15	12.690	11,3	81,3	75,7
jul/15	11.920	10,3	76,4	76,8
ago/15	17.110	14,7	109,7	70,8
set/15	13.400	11,9	85,9	81,5
out/15	16.360	14,1	104,9	76,3
nov/15	13.580	12,1	87,0	75,0
dez/15	16.490	14,2	105,7	73,2
jan/16	17.040	14,7	109,2	75,5
fev/16	17.000	15,7	109,0	74,4
mar/16	16.750	14,4	107,4	72,7
abr/16	17.740	15,8	113,7	70,4
ANO	182.530	13,3	1.169,9	75,5

Fonte: PIN (2017).

2.3 EXPERIÊNCIA EM OUTROS CAMPI

Como foi possível concluir através do capítulo anterior, a utilização de energia solar pode reduzir os custos energéticos de um prédio. Portanto são apresentados casos em que há a utilização de energia solar consolidada no campus.

O primeiro caso apresentado é o da Butte College, localizada na cidade de Chico na Califórnia, que em 2011 se tornou a primeira faculdade a produzir mais energia do que consome, graças aos painéis que estão instalados desde 2005. A faculdade começou com o projeto em 2005 para que as matrizes de

energia solar produzissem 25% da energia consumida no campus. A segunda etapa do projeto foi concluída em 2008 e, a partir de então, os painéis solares já estavam produzindo energia equivalente a 43% da energia consumida no campus. Contudo, foi só após a conclusão da terceira fase, em 2011, quando o campus totalizou 25,000 painéis solares, que a energia solar passou a sustentar todo o campus, tendo previsão de geração de 102% do consumo total. Os painéis solares estão instalados nos telhados dos prédios, montados no chão ou cobrindo as áreas de estacionamento¹⁶, conforme Figura 12.

Figura 12 - Painéis sobre o estacionamento da Butte College



Fonte: <https://environmentamerica.org/energy-101/campus-solar-energy>

O potencial instalado do projeto gera aproximadamente 6,5 milhões de kWh por ano, o que é o suficiente para alimentar 941 casas médias americanas, resultando em um custo final de 27,3 milhões de dólares, entretanto devido à dimensão dos painéis solares, estima-se que serão economizados até 100 milhões de dólares nos próximos 30 anos. Atualmente os painéis cobrem cerca de 75% dos gastos energéticos do prédio, pois com o

¹⁶On campus solar energy. Disponível em: <https://environmentamerica.org/energy-101/campus-solar-energy>

American Recovery and Reinvestment Act, em 2017 a faculdade construiu diversos prédios novos.

A Butte College recebeu diversos prêmios durante a realização deste projeto, que incluem Association for the Advancement of Sustainability in Higher Education (AASHE) 2009 Campus Leadership Award, 2009, Environmental Protection Agency (EPA) Green Power Partnership Award, 2008 e National Wildlife Association Campus Chill-Out Award. Além disso, diversos prédios da faculdade obtiveram a certificação LEED¹⁷.

Outro exemplo da utilização de energia solar em um campus americano é o do campus da Universidade de Arizona, representado na Figura 13, localizado em Tucson, onde foi feita uma parceria entre a universidade e a Tucson Electric Power para o estudo e desenvolvimento de energia solar na região. O projeto foi dividido em 2 fases. A primeira com o foco em instalar várias tecnologias diferentes de geração de energia solar, em condições idênticas, para que possam ser feitos estudos comparativos entre as opções. A segunda fase possui como principal objetivo apresentar os custos e efetividades de cada sistema para o mercado¹⁸.

O projeto conta com 95,000 painéis solares instalados e possui 25 MegaWatts de potência, o que suficiente para que todo o parque tecnológico seja alimentado e que o projeto também forneça energia para 4,600 casas de moradores da cidade de Tucson.

¹⁷Delby, Lisa. Butte College Shines with 25,000 Solar Panels. Disponível em: <http://www.butte.edu/feeds/2011/renewableEnergy.html>

¹⁸Solar Zone at UA Tech Park. Disponível em: <https://techparks.arizona.edu/leading-edge/solar-zone>

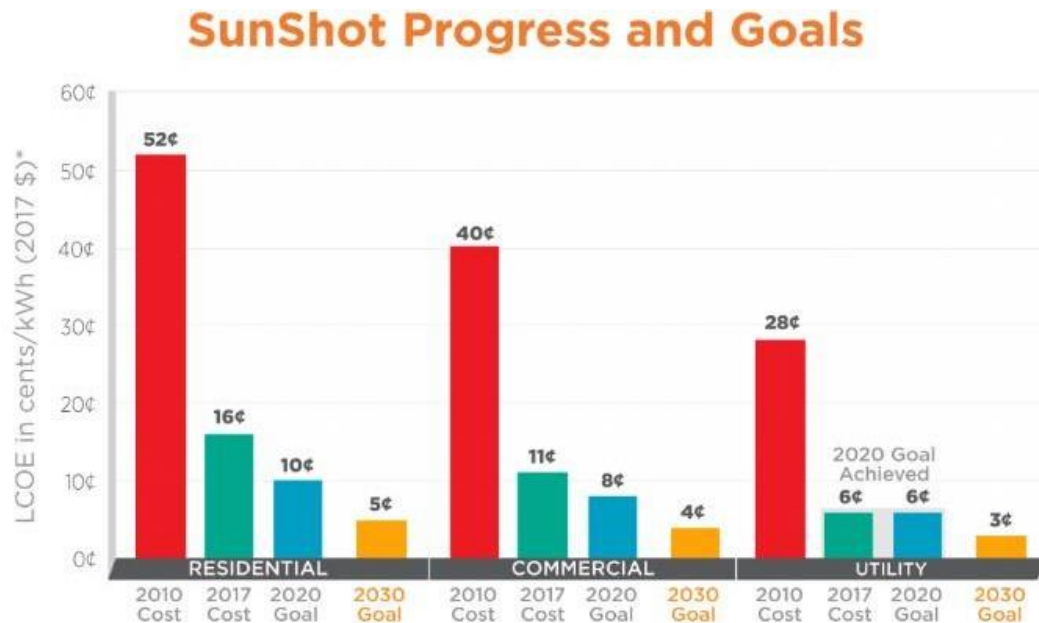
Figura 13 - University of Arizona Solar Park



Fonte: <https://techparks.arizona.edu/leading-edge/solar-zone>

Para os casos americanos também vale destacar que o departamento de energia dos Estados Unidos lançou um projeto chamado Sun Shot Initiative, que visava reduzir os custos de energia solar no país em 75% para que ela fosse competitiva com outras formas de energia sem a necessidade de subsídios. Um ano após o lançamento da iniciativa o departamento de energia publicou o Sun Shot Vision Study, que discute as metas de que a energia solar atingisse 14% do consumo total americano e 27% até o ano de 2050, e o estudo diz que naquele momento eram necessárias tecnologias revolucionárias para que a energia solar atingisse o preço e competitividade necessários. No dia 12 de setembro de 2017, o departamento de energia americano publicou uma nota anunciando que a iniciativa Sun Shot atingiu a meta com sucesso e chegou ao custo de utilização de 0,06 dólares por kWh 3 anos antes do esperado (Figura 14) e que continuarão com os esforços para atingir as outras metas.

Figura 14 - Preço da energia solar nos Estados unidos, no valor da moeda de 2017 em centavos por kW



Fonte: <https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-initiative>

Um exemplo que podemos citar no hemisfério sul é o da Universidade de Melbourne na Austrália. No Plano de Sustentabilidade da Universidade de Melbourne 2017-2020 a universidade estima que suas emissões, diretas e indiretas, devido ao consumo energético no ano de 2015 chegaram a 114,000 toneladas (equivalente a 100,000 MWh de energia), para reduzir estas emissões a universidade elaborou um plano de sustentabilidade, no qual define metas anuais de redução de energia e do aumento da energia sustentável no campus.

Ainda de acordo com o Plano de Sustentabilidade, a universidade recebeu 9,1 milhões de dólares australianos da Clean Energy Finance Corporation (CEFC), para a instalação de painéis solares fotovoltaicos (mostrados na Figura 15) de diversos tamanhos com a intenção de diminuir os gastos com energia. O plano de sustentabilidade define como metas zerar as emissões de carbono devido às energias elétricas, e a neutralidade de carbono até 2030. Contudo, de acordo com o Sustainability Report de 2017 da Universidade, foi observado um aumento das emissões devido ao uso de energia elétrica para 119,483 toneladas em 2016, e uma redução para 118,517 toneladas (cerca 0,8%) no ano em que os painéis começaram a ser instalados.

Finalmente ao olhar o Sustainability Report do ano de 2018, é possível observar que durante o ano de 2018, foram concluídas todas as obras do projeto de energia solar, sendo que no ano de 2018 houve a instalação de painéis solares em mais 13 locais entre os campi da Universidade de Melbourne, que ao final do projeto a universidade possui um total de 7,000 painéis fotovoltaicos fazendo com que sejam emitidas aproximadamente 2,900 toneladas de carbono a menos por ano (segundo o Sustainability Report).

Apesar da Universidade de Melbourne não ter conseguido atingir a meta de reduzir o consumo de energia nos campi, ela mostra estar em dia com as metas de zerar as emissões de gás carbônico até 2021 e atingir a neutralidade das emissões de carbono até 2030, e para que seja possível atingir as metas definidas a universidade define como próximo passo, o investimento em energia eólica.

Figura 15 - Painéis Solares instalados na universidade de Melbourne



Fonte: <https://sustainablecampus.unimelb.edu.au/key-areas/energy>

Também temos exemplos dentro do Brasil, como por exemplo, o laboratório de energia fotovoltaica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que conta com uma área de 993m², mostrada na Figura 16 de painéis solares e produz mais energia do que consome, sendo a energia excedente utilizada como créditos com a distribuidora, e tais créditos são utilizados para o abatimento na fatura de energia no campus de Trindade-SC¹⁹.

Figura 16 - Potencial instalado da UFSC



Fonte: <https://blog-solar.engie.com.br/projetos-fotovoltaicos-vamos-solarizar-as-universidades/>

2.4 REGULAMENTAÇÃO E LEIS

2.4.1 SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Como citado anteriormente, uma das possibilidades a serem exploradas pela administração da Cidade Universitária é a de utilizar o sistema de compensação de energia elétrica, que permite ceder à distribuidora local a energia gerada em períodos de não utilização em troca de um abatimento na conta a ser paga pela instituição.

¹⁹ Projetos fotovoltaicos: vamos solarizar as universidades? Disponível em: <https://blog-solar.engie.com.br/projetos-fotovoltaicos-vamos-solarizar-as-universidades/>

As condições gerais para a utilização desse sistema são apresentadas nas Resoluções Normativas N° 482 e 687 de 17 de abril de 2012 e 24 de novembro de 2015, respectivamente, estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

Primeiramente, observa-se que a Universidade está apta a aderir ao sistema por se enquadrar na seguinte definição, de acordo com o §1º do Art. 6º da RN 687: “autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada”.

Outra condição importante para a utilização do sistema é a de que a geração de energia deve enquadrar-se nas definições de microgeração distribuída ou minigeração distribuída, de acordo com as seguintes definições presentes no Art. 2º da RN 482: “microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras”. “Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras”. Em relação a esses limites, é importante ressaltar que é vedada a divisão de central geradora em unidades de menor porte para se enquadrar nas definições aqui citadas, sendo a distribuidora nesses casos responsável por negar a adesão do ao Sistema.

Com relação ao acesso ao sistema de distribuição, a Resolução Normativa 482/2012 afirma no Art. 5º que os custos de eventuais ampliações ou reforços no sistema de distribuição em função exclusivamente da conexão

de microgeração distribuída não deverão fazer parte do cálculo da participação financeira do consumidor, sendo integralmente arcados pela distribuidora.

Uma vez aprovada a adesão ao Sistema, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 meses, de acordo com o Art. 6º da RN 482.

No que se refere à utilização do Sistema, a compensação deve se dar primeiramente no posto tarifário em que ocorreu a geração e, posteriormente, nos demais postos tarifários, devendo ser observada a relação dos valores das tarifas de energia publicadas nas Resoluções Homologatórias que aprovam os processos tarifários, se houver, de acordo com o inciso XI do Art. 7º da RN 482.

Em caso de encerramento da adesão no sistema, aplicam-se as seguintes regras, presentes no inciso XIII do Art.7º da RN 482: “eventuais créditos de energia ativa existentes no momento do encerramento da relação contratual do consumidor devem ser contabilizados pela distribuidora em nome do titular da respectiva unidade consumidora pelo prazo máximo de 60 (sessenta) meses após a data do faturamento, exceto se houver outra unidade consumidora sob a mesma titularidade e na mesma área de concessão, sendo permitida, nesse caso, a transferência dos créditos restantes”.

2.4.2 ATUAÇÃO DE EMPRESAS PRIVADAS JUNTO À UNIVERSIDADE

Uma das possibilidades para apoiar o desenvolvimento do projeto consiste no envolvimento da iniciativa privada nos investimentos a serem realizados com os sistemas fotovoltaicos. Nesse sentido, existem algumas normas que regulamentam a atuação da universidade em conjunto com empresas privadas.

Incluída recentemente no conjunto de normas da USP, a Resolução Nº 7661, de 22 de maio de 2019 dispõe sobre o compartilhamento e a permissão do uso da infraestrutura, equipamentos, materiais e demais instalações

existentes nas dependências da Universidade de São Paulo com empresas emanações voltadas para a inovação tecnológica. No Artigo 1º da norma, o item III informa que a USP pode “permitir a implantação ou readequação de infraestrutura física em imóvel ou terreno da USP e a aquisição e instalação de equipamentos para utilização em atividades de pesquisa ou de inovação tecnológica, inclusive em parceria com empresas públicas ou privadas com ou sem fins lucrativos, voltadas para atividade de pesquisa, desenvolvimento e inovação, que objetivem a geração de produtos, processos e serviços inovadores, a transferência e a difusão de tecnologia, e a implantação e a consolidação de ambientes promotores da inovação”.

Para concretizar tais parcerias, é necessário estabelecer um contrato que contenha informações relevantes acerca dos investimentos no projeto, conforme exposto pelos seguintes parágrafos retirados do artigo 3º da norma: “§ 1º – Os recursos de custeio e capital necessários para a execução do projeto, bem como sua fonte, deverão estar especificados no instrumento jurídico a ser firmado.” “§ 2º – Todas as licenças legais relacionadas ao projeto devem ser apresentadas para a aprovação do projeto”.

3 ESTUDO DE CASO NA CIDADE UNIVERSITÁRIA

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso na cidade universitária, para discutir as viabilidades técnicas financeiras, legais e de utilização dos painéis de energia fotovoltaica na cidade universitária.

Em CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA, 2018, p. 47, podemos encontrar um levantamento dos edifícios da USP e suas áreas de cobertura, bem como as áreas úteis de recortes de locais subutilizados na Cidade Universitária. A lista de locais e áreas levantadas está apresentada no Anexo A.

O levantamento das áreas citado acima foi feito realizando-se a demarcação de áreas úteis através do Google Earth. Abaixo, na Figura 17 apresenta-se como exemplo o levantamento da área útil da FEA no software:

Figura 17 - Vista da área estimada da FEA utilizando o software Google Earth



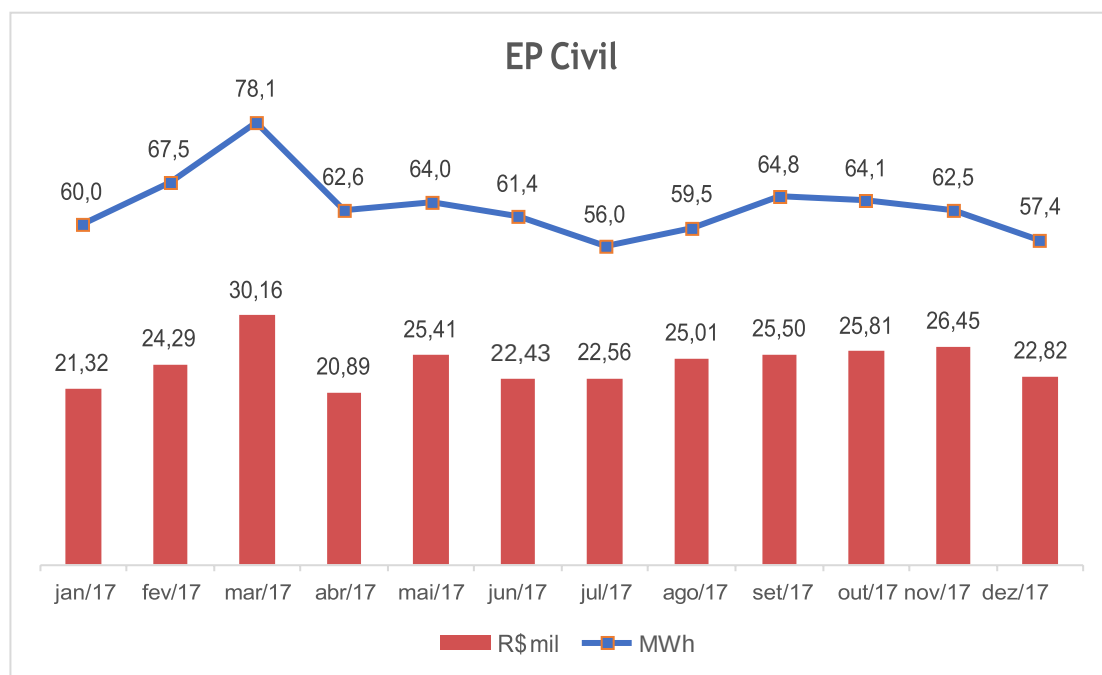
Fonte: CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA (2018)

3.1 EDIFÍCIO PAULA SOUZA

Para este primeiro estudo de caso foi escolhido o Edifício Paulo A. Souza, por possuir a maior área de cobertura disponível dentre os prédios da Cidade

Universitária. As contas mensais de energia elétrica do edifício, bem como o consumo energético em 2017, estão presentes no gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Consumo mensal e custo financeiro de energia elétrica do Edifício Paula Souza, situado na Escola Politécnica da USP

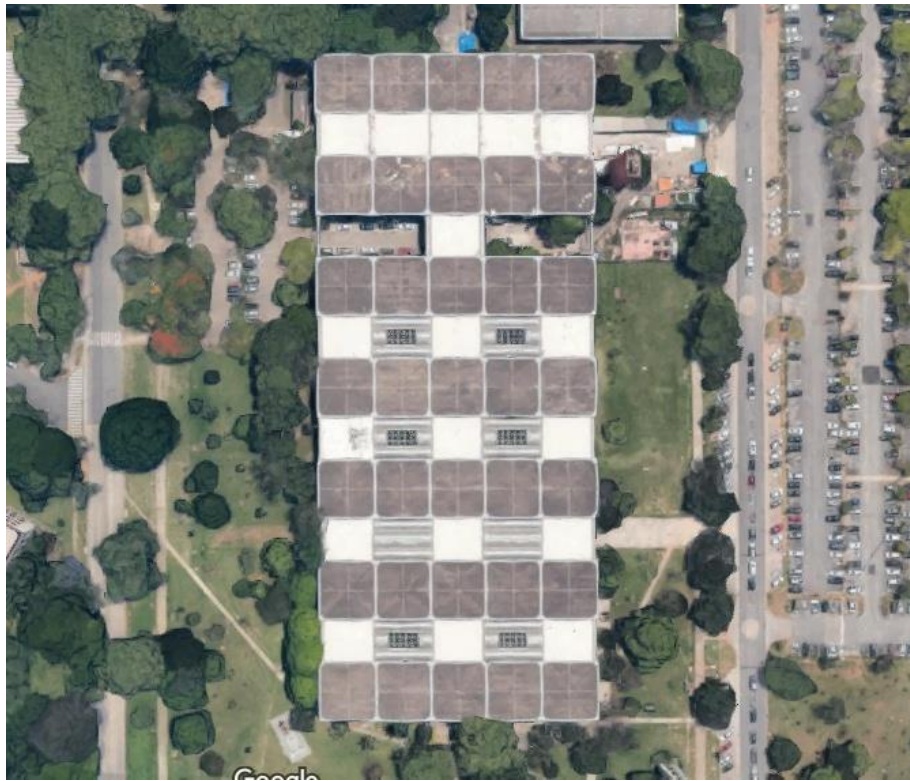


Fonte: <http://www.sef.usp.br/puerhe/energia/puerhe-energia-sistema-de-monitoramento-line-das-instalacoes/informe-mensal-de-energia-eletrica/>

3.1.1 DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO ANALISADO

O edifício possui uma cobertura extensa, com área de aproximadamente 13.500 m² de área construída, conforme estimativa calculada a partir das imagens de satélite do Google Maps (Anexo A). A Figura 19 apresenta uma vista superior de satélite do edifício analisado.

Figura 19 - Vista superior do Edifício Paula Souza



Fonte: Google Maps (2019)

Figura 20 - Vista frontal da entrada do Edifício Paula Souza



Fonte: Marcos Santos/USP Imagens.

A partir dos dados apresentados e da estimativa de geração de energia através do sistema fotovoltaico, é possível estimar a economia proporcionada, bem como o período de retorno do investimento realizado.

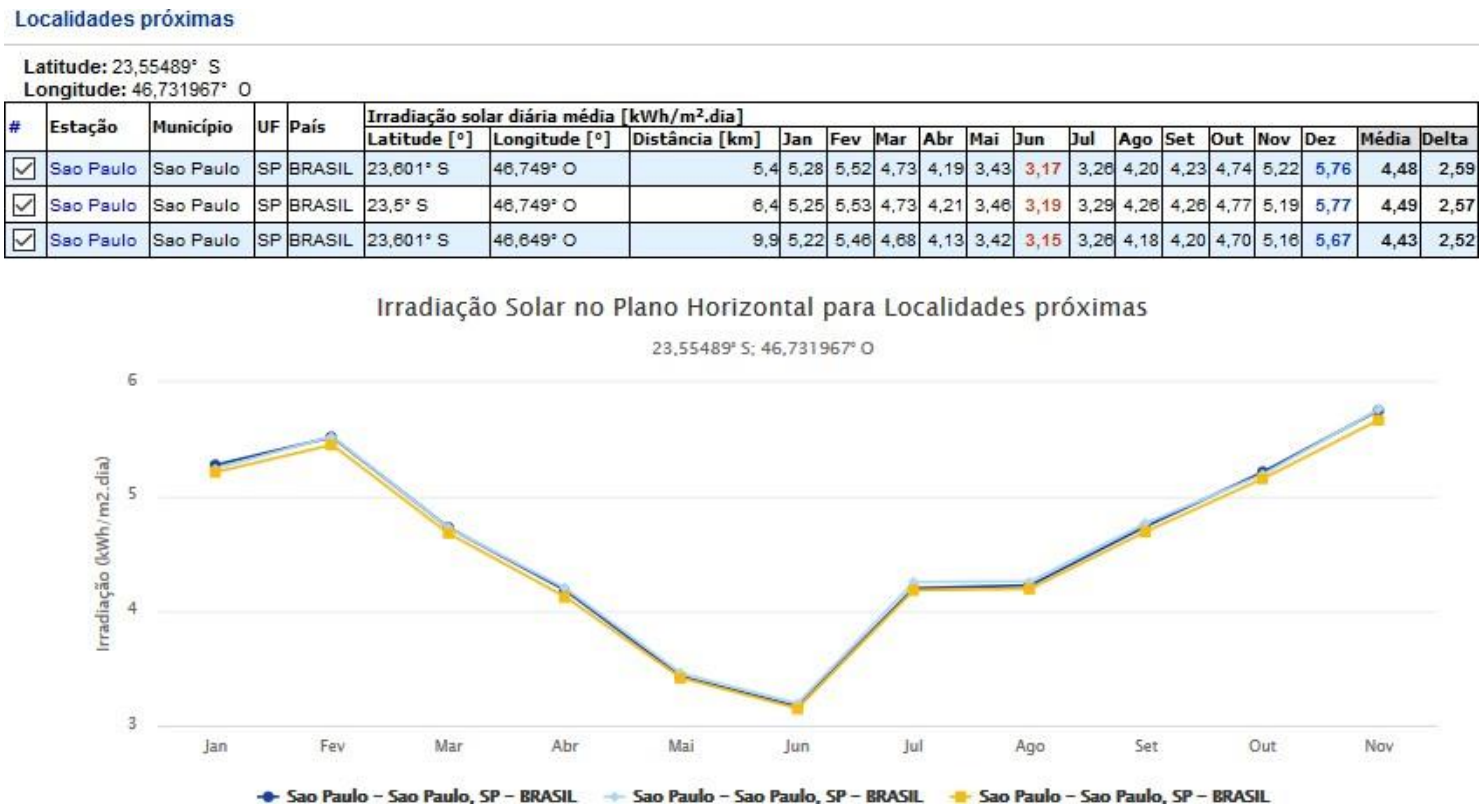
No site do Cresesb é possível fazer uma busca por coordenadas, para definir os valores de incidência solar em regiões próximas ao local de busca como mostrado na Figura 21 abaixo.

Figura 21 - Localização da Escola Politécnica (vermelho) e locais de medição do Cresesb (azul)



Fonte: Google Maps (2019).

Figura 22 - Irradiação média de localidades próximas à Escola Politécnica em kWh/m².dia



Fonte: Cresesb

Portanto, consideramos para os cálculos feitos neste trabalho a radiação incidente média do local mais próximo, com distância de 5,4 km do edifício estudado, conforme apresentado pela Figura 22. Além disso, o site do Cresesb também disponibiliza os cálculos para as diversas inclinações dos painéis solares. Desta forma, para os cálculos feitos mais adiante, será considerada a inclinação de maior média anual, na localização mais próxima à Escola Politécnica (21° N, como mostrado na Figura 19), porém de maneira conservadora o trabalho adotará a mesma irradiação observada nas placas já instaladas na biblioteca brasileira, 4,18 kWh/m².dia, por se tratar de um local próximo e considerando a hipótese de que a taxa de irradiação média anual não sofreria muitas alterações.

Figura 23 - Radiação em função da inclinação do painel medidas a 5,4km da Escola Politécnica

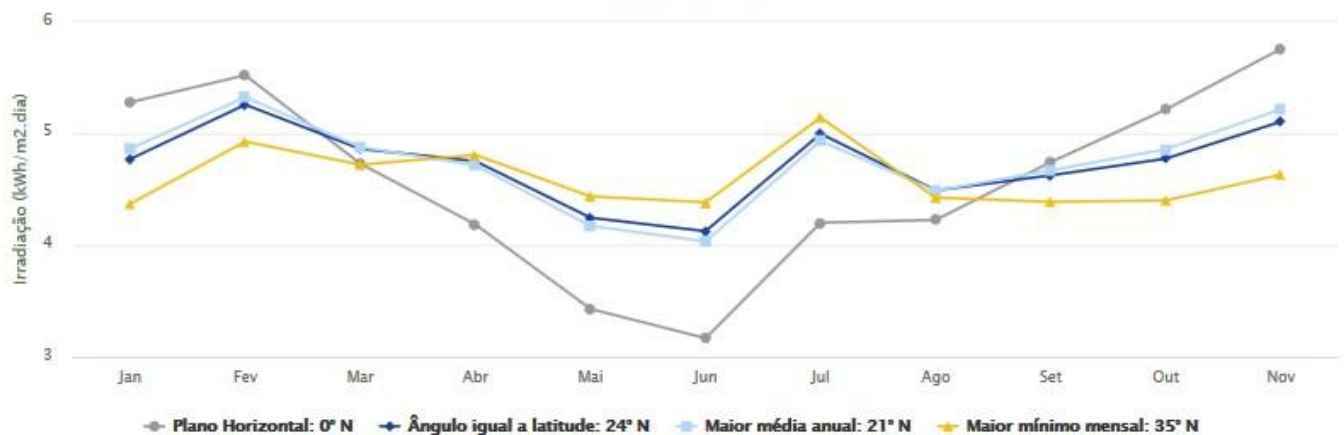
Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Sao Paulo
 Município: Sao Paulo , SP - BRASIL
 Latitude: 23,601° S
 Longitude: 46,749° O
 Distância do ponto de ref. (23,55489° S; 46,731967° O) :5,4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
☒	Plano Horizontal	0° N	5,28	5,52	4,73	4,19	3,43	3,17	3,26	4,20	4,23	4,74	5,22	5,76	4,48	2,59
☒	Ângulo igual a latitude	24° N	4,77	5,26	4,86	4,75	4,25	4,13	4,14	5,00	4,49	4,63	4,78	5,11	4,68	1,13
☒	Maior média anual	21° N	4,86	5,33	4,88	4,71	4,17	4,03	4,06	4,93	4,49	4,67	4,86	5,22	4,68	1,29
☒	Maior mínimo mensal	35° N	4,37	4,93	4,72	4,81	4,44	4,38	4,37	5,14	4,43	4,39	4,40	4,63	4,58	,78

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Sao Paulo–Sao Paulo, SP-BRASIL

23,601° S; 46,749° O



Fonte: Cresesh

3.1.2 DEMANDA ENERGÉTICA DO EDIFÍCIO

Para entender a demanda energética do edifício de acordo com o uso, realizamos uma análise simplificada considerando apenas o gasto proveniente da iluminação e dos sistemas de ar condicionado. Foi contabilizado o número de lâmpadas e de ar condicionados de todos os ambientes, com auxílios de mapas do edifício fornecidos pela CAEC (Anexo B), e a partir de dados coletados e de premissas adotadas, foi calculado o consumo total para cada um desses usos. As tabelas 2 a 7 apresentam os dados coletados, as premissas adotadas e os cálculos realizados para estimar o consumo total.

Tabela 2 - Dados coletados relativos ao andar térreo

Espaços	Ar Condicionado (unidades)	Lâmpadas (unidades)
Biblioteca	4	302
CEC	1	50
Corredores e Demais Espaços	0	198
Departamentos*	100	522
Restaurante Civil	2	92
Banheiros	0	24
Laboratórios e demais salas	44	1.260
Total	151	2.448

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Obs: Para os departamentos, o número de ar condicionado e lâmpadas são referentes a todos ambientes do local (salas de professores, corredores, salas de reunião, secretarias e banheiros).

Tabela 3 - Dados coletados relativos ao andar superior

Espaços	Ar Condicionado (unidades)	Lâmpadas (unidades)
Corredores e demais espaços externos	0	354
Banheiros	0	96
Salas de aula e de laboratório	90	1.470
Salas Centrais*	4	32
Depósitos Centrais	7	80
Espaço Superior Direito*	7	204
Total	108	2.236

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Obs: O “espaço superior direito” situa-se atrás da rampa amarela, com salas, depósitos e corredores. As salas centrais se referem à Sala Pró Aluno, almoxarifados e depósitos que são conectados. Estes foram os únicos espaços que os integrantes do grupo não tiveram acesso direto (com exceção da sala Pró Aluno), fazendo assim uma aproximação com base na área dos espaços em comparação ao número de lâmpadas e ar condicionados de outras salas de dimensões semelhantes.

Tabela 4 - Premissas adotadas para cálculo do consumo energético relativo à iluminação

Premissas adotadas	
Utilização simultânea - período letivo	70%
Utilização simultânea - período de férias	60%
Período letivo (meses)	9
Período de férias (meses)	3
Dias úteis / mês	22
Utilização diária (h/dia)	12

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Tabela 5 - Cálculos da estimativa do consumo total proveniente da iluminação

Cálculos	
Total de lâmpadas	4.684
Dias úteis letivos	198
Dias úteis período de férias	66
Potência das lâmpadas (W)	18
Consumo Período letivo (kWh)	140.228
Consumo Período de férias (kWh)	40.065

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Tabela 6 - Premissas adotadas para cálculo do consumo energético relativo aos sistemas de ar condicionado

Premissas adotadas	
Utilização anual (meses/ano)	6
Utilização diária (h/dia)	10
Utilização simultânea no térreo	80%
Utilização simultânea do andar superior	50%
Dias úteis / mês	22

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Tabela 7 - Cálculos da estimativa do consumo total proveniente dos sistemas de ar condicionado

Cálculos	
Total de ACs no térreo	151
Total de ACs no piso superior	108
Potência (W)	1.600
Consumo total (kWh)	437.606

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Os cálculos foram realizados para todo o edifício analisado. Para o caso do ar condicionado, foi considerado que a utilização simultânea no térreo é muito maior que no andar superior, principalmente devido aos departamentos. Se somarmos as contribuições do sistema de ar condicionado e de iluminação do edifício, o consumo total anual estimado é igual a 618 MWh.

A Superintendência do Espaço Físico da USP reportou, em 2017, um consumo anual de 760 MWh para o edifício analisado, conforme apresentado pela Figura 15. Dessa forma, o consumo estimado para a iluminação e para os sistemas de ar condicionado é coerente com a realidade, já que representa 81% do consumo real reportado. O restante da demanda energética provém de outros pontos de consumo que não foram considerados nesta análise, como por exemplo, os equipamentos utilizados nos laboratórios do edifício. Esses dados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Cálculos da estimativa do consumo total do prédio em comparação com consumos de Luz e ar-condicionado

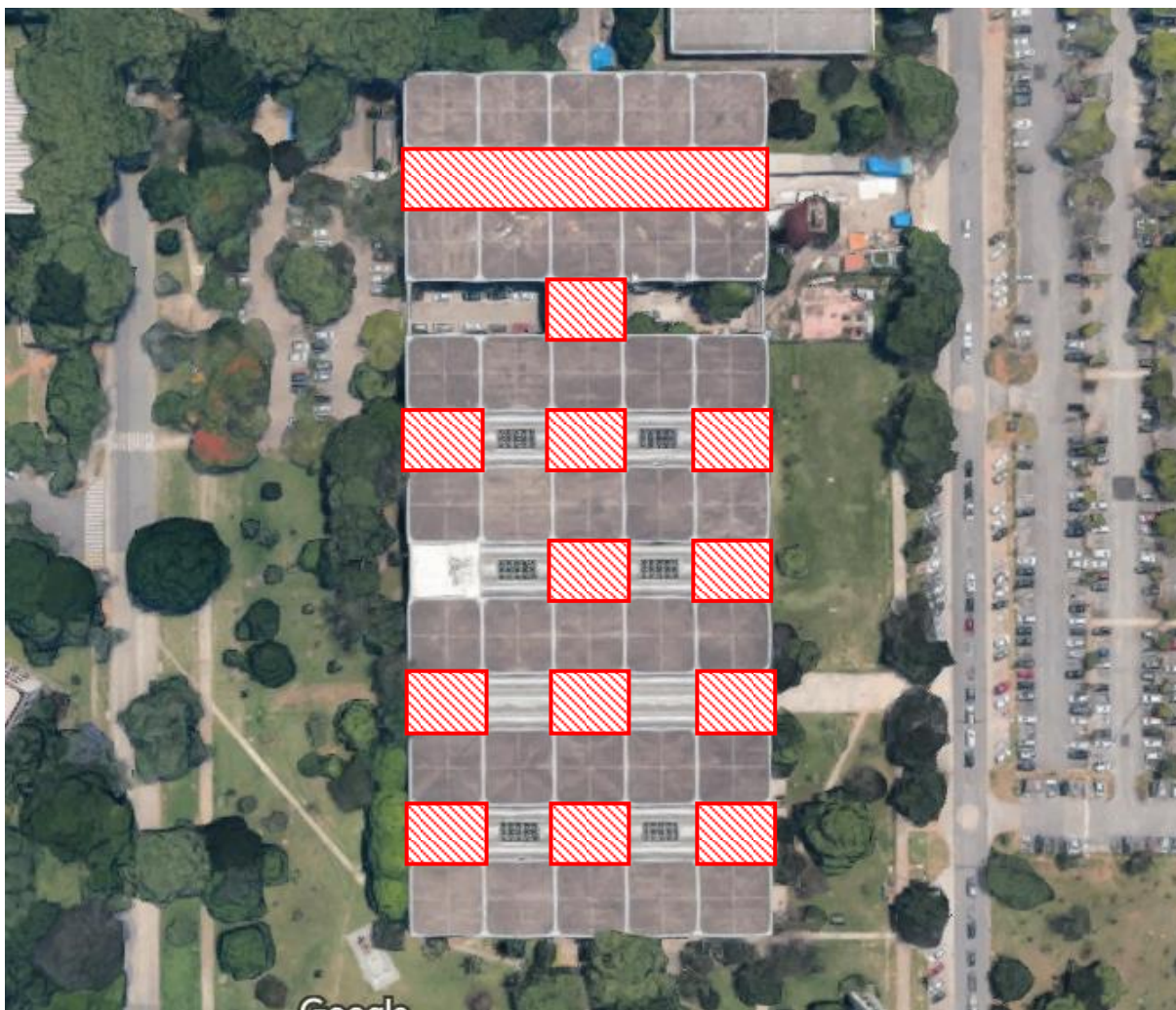
Estimativas de consumo	
Consumo anual civil (MWh)	760
Consumo estimado (MWh) AC + Luz	618
% Luz + AC	81%

Fonte: Elaboração própria (2019)

3.1.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

As áreas úteis consideradas para o dimensionamento do sistema na cobertura do edifício Paula Souza estão representadas pela Figura 24. Cada um dos retângulos possui aproximadamente 15,5 x 13 m de área, de acordo com medições feitas através do software Google Earth.

Figura 24 - Áreas consideradas como disponíveis para instalação dos sistemas fotovoltaicos



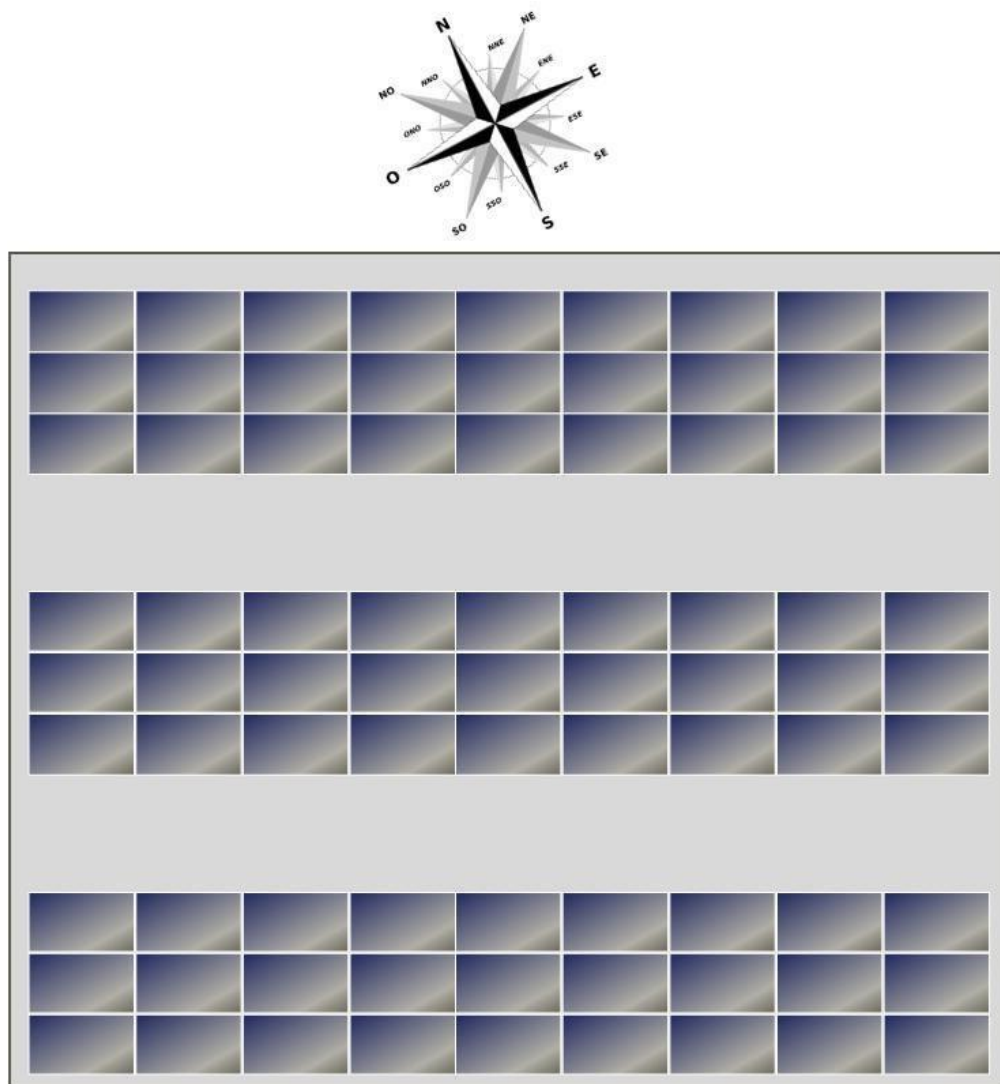
Fonte: Google Earth

Para estimar o potencial de geração de energia através da utilização dessas áreas, assumimos para cada retângulo disponível uma disposição com 9 strings de 9 módulos cada. Foi escolhido o módulo Yingli YL260C-30b. Por ser o mesmo utilizado pelos sistemas instalados no IEE e na Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin, a manutenção e troca de equipamentos seria facilitada. Nessa situação, seria instalado um total de 81 módulos por retângulo de área disponível.

Os módulos, de dimensões (1650 x 990 x 50) mm, seriam instalados de maneira análoga ao sistema do gramado do IEE, ou seja, com cada estrutura suportando 3 strings (Figura 25). Tal disposição permite alocar mais painéis na cobertura por diminuir o sombreamento, além de minimizar custos com

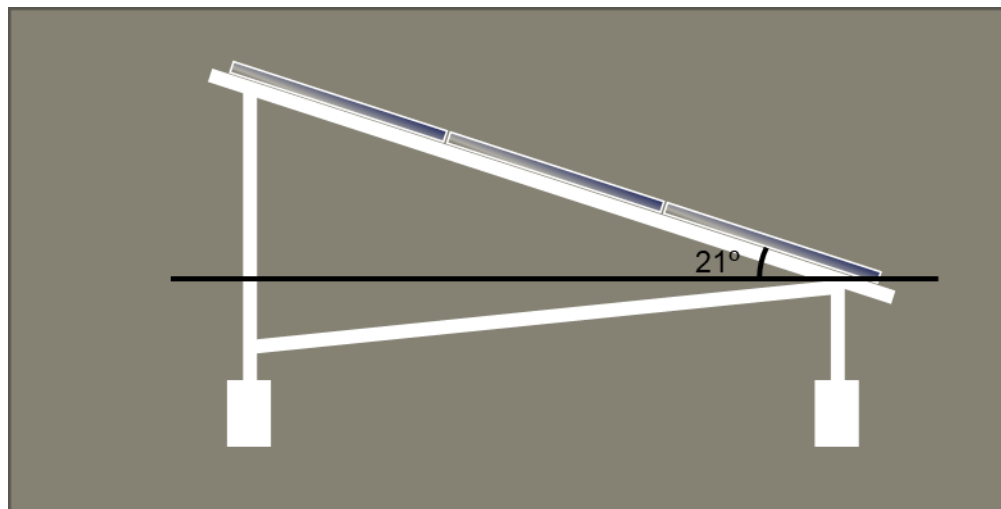
estruturas de suporte. Como os painéis terão orientação similar aos instalados sobre o telhado da Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin, foi considerada a mesma inclinação desse sistema, de 18° em relação ao plano horizontal, para trabalhar nos cálculos posteriores com a irradiação de $4,18 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$, como apresentado anteriormente.

Figura 25 - Vista superior da disposição dos módulos fotovoltaicos em cada retângulo de área disponível na cobertura. Escala: 1:100



Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 - Vista lateral da disposição dos módulos fotovoltaicos em cada retângulo de área disponível na cobertura. Escala: 1:300



Fonte: Elaboração própria.

Conforme apresentado pela Figura 25, a cobertura analisada possui 17 retângulos de área disponível. Dessa forma, o sistema seria composto por 1377 módulos, totalizando 358 kWp de potência instalada. Se considerarmos a mesma produtividade obtida pelo sistema instalado sobre o telhado da Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin, como indicado pela Tabela 1 no capítulo 2.2, será possível produzir aproximadamente 419 MWh de energia por ano, que corresponde a mais de 50% do consumo anual do edifício. Entretanto, foram também consideradas as perdas de eficiência em um período de 25 anos, valores que foram incorporados aos cálculos de impacto financeiro apresentados no capítulo adiante.

3.1.4 IMPACTO FINANCEIRO

Com a produção de energia ao ano estimada e com o pré-dimensionamento do sistema de geração de energia executado, torna-se possível partir para a avaliação da viabilidade financeira do projeto.

A primeira etapa foi definir o potencial de geração de energia do sistema, considerando as perdas por degradação dos equipamentos e pela sujeira acumulada. Conforme apresentado no capítulo 2.1.4, no primeiro ano de operação as perdas por degradação são iguais a 3%, sendo que nos anos

subsequentes esse valor fica constante e igual a 0,7%. Já as perdas por acúmulo de sujeira foram consideradas constantes igual a 4% em cada ano, valor equivalente à média calculada por ZORRILLA-CASANOVA et al (2011). A Tabela 9 apresenta os cálculos de geração de energia considerando tais perdas.

Tabela 9 - Cálculo do potencial de geração de energia por ano para o sistema instalado sobre a cobertura do Edifício Paula Souza

Ano	Perda de eficiência	Perda acumulada	Potencial de Geração (MWh)	Potencial de Geração (MWh) com perdas por sujeira
Instalação	0%	0%	418,82	402,07
Ano 1	3%	3%	406,26	390,01
Ano 2	0,70%	3,70%	403,33	387,19
Ano 3	0,70%	4,40%	400,40	384,38
Ano 4	0,70%	5,10%	397,46	381,57
Ano 5	0,70%	5,80%	394,53	378,75
Ano 6	0,70%	6,50%	391,60	375,94
Ano 7	0,70%	7,20%	388,67	373,12
Ano 8	0,70%	7,90%	385,74	370,31
Ano 9	0,70%	8,60%	382,81	367,49
Ano 10	0,70%	9,30%	379,87	364,68
Ano 11	0,70%	10,00%	376,94	361,86
Ano 12	0,70%	10,70%	374,01	359,05
Ano 13	0,70%	11,40%	371,08	356,24
Ano 14	0,70%	12,10%	368,15	353,42
Ano 15	0,70%	12,80%	365,21	350,61
Ano 16	0,70%	13,50%	362,28	347,79
Ano 17	0,70%	14,20%	359,35	344,98
Ano 18	0,70%	14,90%	356,42	342,16
Ano 19	0,70%	15,60%	353,49	339,35
Ano 20	0,70%	16,30%	350,56	336,53
Ano 21	0,70%	17,00%	347,62	333,72
Ano 22	0,70%	17,70%	344,69	330,90
Ano 23	0,70%	18,40%	341,76	328,09
Ano 24	0,70%	19,10%	338,83	325,28
Ano 25	0,70%	19,80%	335,90	322,46

Fonte: Elaboração própria (2019)

Os custos de CAPEX podem ser facilmente calculados, dado que temos a quantidade de painéis que serão instalados e a quantidade de inversores suficientes o montante de energia gerada. Tomando referências de mercado²⁰ para a aquisição desses dispositivos foi possível obter o valor de

²⁰<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl280p-29b-280wp.html> e <https://www.pontofrio.com.br/construcao/Iluminacao/AcessoriosdeIluminacao/inversor-solar-sma-aldo->

compra dos mesmos. Foi adotada uma perspectiva conservadora no que tange os valores dos painéis e dos inversores, dado que os preços considerados são valores unitários, e fazendo a aquisição de grande quantidade seria possível obter valores consideravelmente menores para a compra destes dispositivos.

Nesta análise preliminar, vamos nos ater aos valores apresentados abaixo, mas para análises posteriores é de suma importância contatar empresas que executem o serviço de instalação e a venda dos dispositivos em questão. Dessa forma, é possível conhecer os ganhos com o volume da aquisição, que são definidos com a extrapolação dos resultados iniciais para os demais edifícios da Cidade Universitária.

A partir destas considerações, pode-se observar na tabela abaixo os gastos de CAPEX oriundos da instalação do sistema no Edifício Paula Souza. O custo de instalação foi considerado equivalente a 15% do custo com equipamentos.

Tabela 10 - Cálculos do CAPEX para instalação do sistema

Parâmetros para dimensionamento	Valores
Área útil de cobertura do prédio Civil (m ²)	3.335
Placas instaladas Civil (un)	1.377
Placas instaladas (un/m ²)	0,41
Área útil disponível (considerando sombreamento) (m ²)	3.335
Quantidade de placas instaladas (un)	1.377
Potência inversor (kWp)	75
Quantidade de inversores (un)	5
Vida útil inversor (anos)	15
Quantidade de inversores V.U. 25 anos	10
Preço inversor (R\$)	34.000,00
Desconto ICMS (compra gerador)	18%
Gastos inversores (R\$)	278.800,00
Preço painel solar (R\$)	519,00
Gastos painéis solares (R\$)	586.023,66
Instalação (R\$)	129.723,55
CAPEX Total (R\$)	994.547,21

Fonte: Elaboração própria (2019)

solar-stp25000tl-30-sunny-25kw-trif380v-2mppt-3-entradas-monitoramento-14529002.html?utm_medium=cpc&utm_source=gp_pla&IdSku=14529002&idLojista=14000&utm_campaign=ferr_casa_e_construcao_shopping&gclid=Cj0KQCQjwo7foBRD8ARIsAHTy2wkPPJmgfijos2j4ekA1VMjBmH1RXxqWsmrWCbvp7Da8wxbSnMKu43MaAiFEALw_wcB

Obtidos os gastos de CAPEX, devemos calcular os custos de OPEX, compostos principalmente pelos custos de manutenção do sistema. Tais custos foram estimados em 1% do valor do investimento realizado²¹. O resultado encontra-se apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Cálculos do OPEX para instalação do sistema

Parâmetros para dimensionamento	Valores
Manutenção (anual)	9.945,47
Manutenção V.U. 25 anos	248.636,80

Fonte: Elaboração própria (2019)

Na figura 18, exposta no capítulo 3.1 deste relatório, é possível observar que o menor consumo energético reportado pela Superintendência do Espaço Físico da USP no ano de 2017 foi de 56,0 MWh mensais. Com a geração de energia calculada para o sistema, no mês de pico de geração não teríamos mais que 56,0 MWh gerados. Sendo assim, adota-se que toda a energia produzida é convertida em economia de consumo da rede da USP. Da mesma figura, é possível inferir que o valor médio pago pelos gastos energéticos do Edifício Paula Souza é de R\$386,13 / kWh.

Portando então da quantidade de energia a ser gerada pelo sistema, que resultará em economia de gastos energéticos, e do custo da energia economizado, obtemos a economia anual gerada pelo sistema. A Tabela 12 apresenta tal economia em cada ano de operação.

²¹ De acordo com Energon Brasil. Disponível em: <http://energonbrasil.com.br/quanto-custa-a-manutencao-no-sistema-solar-fotovoltaico/>

Tabela 12 - Economia anual gerada pelo sistema

Ano	Potencial de Geração (MWh)	Energia economizada (MWh)	Economia anual (R\$)	Economia acumulada (R\$)
Instalação	402,07	0,00	0,00	0,00
Ano 1	390,01	390,01	150.594,21	150.594,21
Ano 2	387,19	387,19	149.507,45	300.101,66
Ano 3	384,38	384,38	148.420,69	448.522,35
Ano 4	381,57	381,57	147.333,92	595.856,27
Ano 5	378,75	378,75	146.247,16	742.103,44
Ano 6	375,94	375,94	145.160,40	887.263,84
Ano 7	373,12	373,12	144.073,64	1.031.337,47
Ano 8	370,31	370,31	142.986,88	1.174.324,35
Ano 9	367,49	367,49	141.900,11	1.316.224,46
Ano 10	364,68	364,68	140.813,35	1.457.037,81
Ano 11	361,86	361,86	139.726,59	1.596.764,40
Ano 12	359,05	359,05	138.639,83	1.735.404,23
Ano 13	356,24	356,24	137.553,06	1.872.957,29
Ano 14	353,42	353,42	136.466,30	2.009.423,59
Ano 15	350,61	350,61	135.379,54	2.144.803,13
Ano 16	347,79	347,79	134.292,78	2.279.095,91
Ano 17	344,98	344,98	133.206,01	2.412.301,92
Ano 18	342,16	342,16	132.119,25	2.544.421,17
Ano 19	339,35	339,35	131.032,49	2.675.453,66
Ano 20	336,53	336,53	129.945,73	2.805.399,39
Ano 21	333,72	333,72	128.858,96	2.934.258,35
Ano 22	330,90	330,90	127.772,20	3.062.030,56
Ano 23	328,09	328,09	126.685,44	3.188.716,00
Ano 24	325,28	325,28	125.598,68	3.314.314,68
Ano 25	322,46	322,46	124.511,92	3.438.826,59

Fonte: Elaboração própria (2019)

Dividindo-se os custos de instalação pela economia anual gerada pelo sistema, podemos obter o tempo de retorno do investimento gerado pela implementação da solução escolhida. Na Tabela 13 está apresentado o fluxo de caixa do sistema ao longo dos anos.

Tabela 13 - Período de retorno do investimento

Data	Receita/Despesa (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
Instalação	-994.547,21	-994.547,21
Ano 1	140.648,74	-853.898,47
Ano 2	139.561,98	-714.336,49
Ano 3	138.475,22	-575.861,27
Ano 4	137.388,45	-438.472,82
Ano 5	136.301,69	-302.171,13
Ano 6	135.214,93	-166.956,20
Ano 7	134.128,17	-32.828,03
Ano 8	133.041,40	100.213,37
Ano 9	131.954,64	232.168,01
Ano 10	130.867,88	363.035,89
Ano 11	129.781,12	492.817,01
Ano 12	128.694,35	621.511,36
Ano 13	127.607,59	749.118,95
Ano 14	126.520,83	875.639,78
Ano 15	125.434,07	1.001.073,85
Ano 16	-139.400,00	861.673,85
Ano 17	124.347,30	986.021,15
Ano 18	123.260,54	1.109.281,69
Ano 19	122.173,78	1.231.455,47
Ano 20	121.087,02	1.352.542,49
Ano 21	120.000,26	1.472.542,75
Ano 22	118.913,49	1.591.456,24
Ano 23	117.826,73	1.709.282,97
Ano 24	116.739,97	1.826.022,94
Ano 25	115.653,21	1.941.676,15

Fonte: Elaboração própria (2019)

Por definição, o tempo de retorno do investimento equivale ao momento em que o fluxo de caixa acumulado deixa de ser negativo. Portanto, estima-se que em aproximadamente oito anos será recuperado o investimento realizado. Além disso, pode-se calcular a Taxa Interna de Retorno, conforme apresentado pela Equação 6, que consiste em um indicador de rentabilidade do investimento.

$$\sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (6)$$

Sendo:

t o período, em anos.

FC_t o fluxo de caixa no período t , em reais.

TIR a Taxa Interna de Retorno.

A partir do fluxo apresentado anteriormente pela Tabela 12, foi possível concluir que a Taxa Interna de Retorno para o investimento realizado é igual a 9,75%.

3.2 OUTROS EDIFÍCIOS DA ESCOLA POLITÉCNICA

3.2.1 DEMANDA ENERGÉTICA

Para dar continuidade ao desenvolvimento do estudo de caso, foram escolhidos os outros edifícios da Escola Politécnica. A escolha se deve ao fato de que, por pertencerem todos ao mesmo instituto, a implementação de eventuais projetos poderia ser facilitada. A Tabela 14 apresenta os custos mensais em MWh no ano de 2017 com energia elétrica pelos principais edifícios da Escola Politécnica, informado pela Superintendência do Espaço Físico da USP.

Tabela 14 - Consumo energético em MWh dos principais prédios da EPUSP em 2017

Edifício	Área construída (m²)	Área útil disponível (m²)	jan/17	fev/17	mar/17	abr/17	mai/17	jun/17	jul/17	ago/17	set/17	out/17	nov/17	dez/17	Total
Biênio	9.100	4.411	34,9	46,3	60,9	41,7	41,9	39,8	34,7	40,6	48,7	50,1	47	40,4	527
Civil	13.500	3.335	60	67,5	78,1	62,6	64	61,4	56	59,5	64,8	64,1	62,5	57,4	757,9
Mecânica / Naval	6.800	6.283	84	91,7	100,7	79,1	69,3	74,2	74,2	63,8	78,7	79,7	80	73,1	948,5
Minas / Metalurgia	9.900	8.908	89,3	95	103,4	82	87,1	77	81,8	85,8	84,4	92,5	83,9	78,4	1.040,60
Elétrica	10.300	9.061	85,8	101	103,3	92,1	89,6	77,2	68,3	75,4	89,3	95,1	92,8	90,2	1.060,40
Total	49.600	31.998	354	402	446,4	357,5	351,9	329,6	315	325,1	365,9	381,5	366,2	339,5	4.334,40

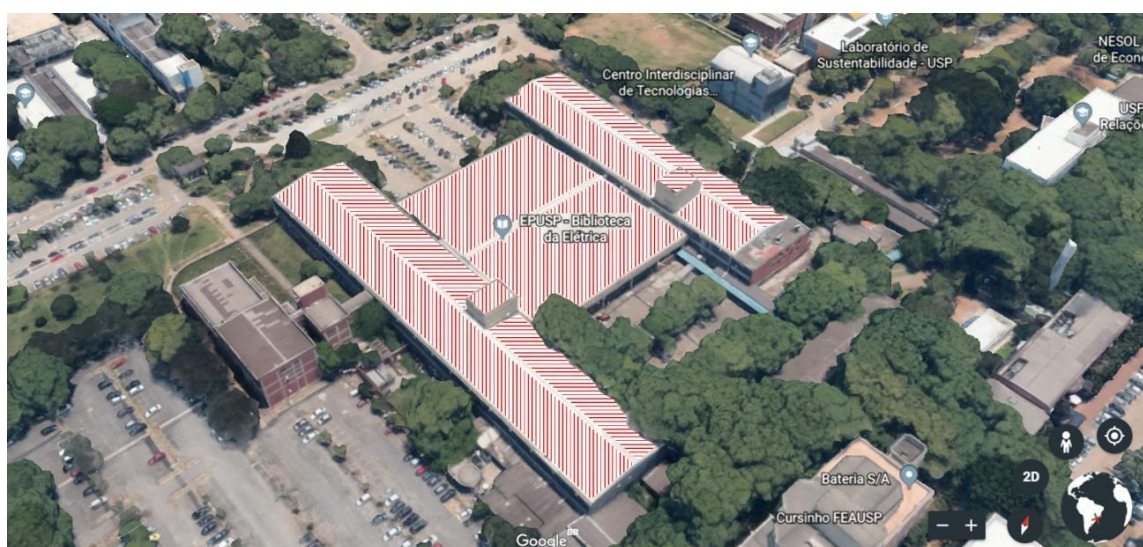
Fonte: Superintendência do Espaço Físico da USP

3.2.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Com a finalidade de detalhar o potencial de geração de energia alocando painéis fotovoltaicos na cobertura dos edifícios da EPUSP, foi feito um levantamento mais aprofundado da área útil da cobertura dos edifícios da faculdade. Dividiu-se os prédios em 7 regiões principais, sendo: Prédios do biênio e Engenharia de Produção, Prédios da Engenharia Elétrica, Prédios da Administração, Prédios da Mecânica, Hidráulica, Prédios da Minas, Materiais e Metalurgia e Prédio da Civil e Ambiental. Passaremos, então, um a um, detalhando a área utilizada.

No edifício da engenharia elétrica (Figura 27), temos a como área útil para a instalação de painéis solares a região hachurada abaixo.

Figura 27 - Prédios da engenharia elétrica e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos



Fonte: Google Earth

Nota-se a presença de árvores que podem provocar sombras em um dos edifícios, bem como de dois locais com nível superior ao da cobertura, que também podem gerar sombras em placas instaladas em suas imediações. Com o auxílio do software Google Earth, estima-se que a área disponível destacada acima seja de cerca de 9.743m², sendo que aproximadamente 649m², em média, estariam em sob a sombra provocada pelas árvores e pelos locais elevados.

Quando falamos dos edifícios da administração (Figura 28), podemos observar a presença de algumas árvores no interior do edifício que também podem provocar alguma sombra. Parte da cobertura também não foi utilizada por não se apresentar adequada para a instalação das placas. Tem-se:

Figura 28 - Prédios da Administração e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos



Fonte: Google Earth

Estima-se, então, que a área total disponível para a instalação de placas seja de aproximadamente 3.105m^2 , com aproximadamente 148m^2 em regiões de sombras, provocadas tanto pela presença das árvores quanto pelos desníveis no perfil da cobertura.

O prédio da civil (Figura 29) já foi descrito previamente no estudo de caso, a imagem abaixo retrata as áreas apropriadas para a instalação das placas de energia solar, e a área útil total é de aproximadamente 3.435m^2 , com cerca de 100m^2 em média com sombra pelos desníveis da cobertura.

Figura 29 - Prédio da Engenharia Civil e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos



Fonte: Google Earth

O edifício da hidráulica (Figura 30) apresenta um ótimo potencial para a instalação de placas fotovoltaicas, tanto pela dimensão do galpão, quanto pela ausência de obstáculos a instalação na cobertura e/ou de árvores nos arredores que pudessem provocar sombras nas placas em momentos de alta radiação. Observa-se:

Figura 30 - Prédio da hidráulica e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos



Fonte: Google Earth

A área destacada acima possui cerca de 4.556m², e conforme mencionado, não deve sofrer com sombras, dado que é mais alto que todas as outras coisas ao seu redor.

Os prédios da Minas, Materiais e Metalurgia (Figura 31) também são ótimas opções para viabilizar o projeto, principalmente em função da extensão territorial dos mesmos e ampla área para instalação das placas. Nota-se a presença de algumas árvores “dentro” do edifício e também nos arredores, o que pode provocar sombras.

Figura 31 - Prédios das engenharias de minas, materiais e e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos



Fonte: Google Earth

Com o auxílio do Google Earth, estimou-se que a área disponível para a instalação das placas é de cerca de 9.887m^2 , com aproximadamente 979m^2 com sombras em média ao longo do dia.

Ao observarmos os prédios da mecânica, temos mais uma vez uma área muito expressiva para a instalação dos painéis. Isso mesmo desconsiderando boa parte da área da cobertura dos edifícios da mecânica – especificamente dos dois prédios à esquerda. Esses prédios foram desconsiderados principalmente pela alta presença de árvores nos entornos dos edifícios, provocando uma quantidade expressiva de áreas com sombra.

Figura 32 - Prédios da engenharia mecânica e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos



Fonte: Google Earth

Mesmo sem a área desses edifícios, a área hachurada total chega a 6.553m^2 , e estima-se que em média cerca de 270m^2 estarão em regiões com sombras ao longo do dia.

Tratando então, por último, dos prédios do biênio e da engenharia de produção, nota-se que o prédio da produção não foi considerado, principalmente em função do amplo volume de árvores mais altas que o edifício e que estão muito próximas ao prédio, que ocasionariam em sombras e, consequentemente, na perda de eficiência do sistema. O prédio do cirquinho também não foi considerado nos cálculos, e parte da área da cobertura dos prédios do biênio também não, como é possível observar nas imagens abaixo. Essas áreas da cobertura foram desconsideradas em função da inclinação das mesmas e do fato de estarem imediatamente ao lado de estruturas de alvenaria mais altas que a cobertura, que ocasionariam sombras.

Figura 33 - Prédios do biênio e da engenharia de produção e área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos



Fonte: Google Earth

Adotando, então, as áreas hachuradas acima como disponíveis para a instalação de painéis fotovoltaicos, temos cerca de 5.257m^2 de área útil, com aproximadamente 846m^2 de sombra média ao longo do dia, devido a presença de estruturas e árvores mais altas que a cobertura nas imediações do edifício.

Consolidando, então, a área total disponível nos edifícios escolhidos, temos pouco mais de 42.500m^2 de área disponível para a instalação de placas fotovoltaicas. É importante salientar que nem toda essa área será convertida em painéis solares efetivamente. Assim como apresentado no estudo de caso do edifício da Civil, boa parte dessa área não virá a produzir, de fato, energia através da radiação solar. Para consideração de tal efeito, os valores encontrados no detalhamento da cobertura do prédio da civil servirão como parâmetro para uma relação de área total e área efetivamente coberto por painéis.

Dentre os 42.500m^2 disponíveis, aproximadamente 3.000m^2 em média estarão em regiões com sombra. Isso não significa que 3.000m^2 serão excluídos da área disponível para instalação dos painéis – inclusive porque a região com sombra varia com o passar do dia, em função da variação da

posição do sol em relação à Terra –, mas sim que, utilizando a área de 42.500m², consideraremos uma radiação incidente sobre 39.500m². Apresenta-se o seguinte quadro resumo:

Tabela 15 - Quadro resumo da área total disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos na EPUSP e percentual médio de área com sombras

Local	Área disponível (m ²)	Área média sob sombra (m ²)	(%) de área com sombra
Engenharia Elétrica	9.743	649	7%
Administração	3.105	148	5%
Civil	3.335	100	3%
Hidráulica	4.556	0	0%
Minas, Materiais e Metalurgia	9.887	979	10%
Mecânica	6.553	270	4%
Biênio e Engenharia de Produção	5.257	846	16%
TOTAL	42.536	2.992	7%

Fonte: Elaboração própria (2019)

De maneira simplificada, considerou-se um cálculo preliminar para estimar o potencial de geração de energia através da aplicação de painéis fotovoltaicos em todas as coberturas analisadas. Para tanto, foram utilizadas a mesma quantidade de painéis por m² de área útil e a mesma produtividade do sistema projetado para o prédio da engenharia civil.

No Edifício Paula Souza, para o qual um estudo mais detalhado foi realizado no capítulo 3.1, a potência instalada foi de 358 kWp, o que equivale a 107,35 Wp cada m² de área útil da cobertura. Dessa forma, adotando uma mesma relação para os demais edifícios, seria possível alocar, nos 42.536 m² de área totais, cerca de 4.244kWp, equivalente à instalação de 1.377 placas fotovoltaicas.

Seguindo a mesma produtividade observada no sistema fotovoltaico da Biblioteca Brasileira, seria capaz de gerar cerca de 4.966MWh. Conforme apresentado pela Tabela 18 no início deste capítulo, o consumo total no ano de 2017 para os principais edifícios da EPUSP foi igual a 4.334 MWh. Portanto, a

energia gerada seria suficiente para atender a maior parte da demanda de energia da Escola Politécnica.

Faz-se necessário, entretanto, considerar as perdas de eficiência do sistema em função do tempo. A geração descrita acima já apresenta o potencial de geração real – não nominal – das placas, dado que vem de um sistema em funcionamento na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo. Ainda assim, com o tempo, o desempenho da geração cairá. O site Portal Solar²² define a perda da eficiência de um sistema como equivalente a 3% da geração instalada no primeiro ano e 0,7% de perda da geração instalada nos anos subsequentes, até o fim da vida útil da instalação. Outra perda considerada, analogamente ao estudo para o edifício Paula Souza, é a decorrente da poeira.

Sendo assim, já considerando as perdas por sombreamento e por queda de desempenho do sistema em função do tempo, o potencial de geração do sistema seria, ano a ano, o representado abaixo, na tabela 16.

²²<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/quanto-tempo-duram-os-paineis-solares-.html>

Tabela 16 - Potencial de geração energética do sistema ano a ano e perdas associadas à queda do desempenho em função do tempo e sujeira - 1

Ano	Perda de eficiência	Perda por sujeira	Potencial de Geração (MWh)
Instalação	0,0%	4%	4.767,47
Ano 1	3,0%	4%	4.624,44
Ano 2	0,7%	4%	4.591,07
Ano 3	0,7%	4%	4.557,70
Ano 4	0,7%	4%	4.524,33
Ano 5	0,7%	4%	4.490,95
Ano 6	0,7%	4%	4.457,58
Ano 7	0,7%	4%	4.424,21
Ano 8	0,7%	4%	4.390,84
Ano 9	0,7%	4%	4.357,47
Ano 10	0,7%	4%	4.324,09
Ano 11	0,7%	4%	4.290,72
Ano 12	0,7%	4%	4.257,35
Ano 13	0,7%	4%	4.223,98
Ano 14	0,7%	4%	4.190,60
Ano 15	0,7%	4%	4.157,23
Ano 16	0,7%	4%	4.123,86
Ano 17	0,7%	4%	4.090,49
Ano 18	0,7%	4%	4.057,12
Ano 19	0,7%	4%	4.023,74
Ano 20	0,7%	4%	3.990,37
Ano 21	0,7%	4%	3.957,00
Ano 22	0,7%	4%	3.923,63
Ano 23	0,7%	4%	3.890,25
Ano 24	0,7%	4%	3.856,88
Ano 25	0,7%	4%	3.823,51

Fonte: Elaboração própria (2019)

Percebe-se que ainda assim o potencial de geração atende à demanda de 4.344 MWh da Escola Politécnica até o 9º ano a partir da instalação do sistema. Depois disso, seria necessário contar então também com as fontes advindas da matriz energética convencional ou com uma redução do consumo existente atualmente. Para não haverem recursos ociosos nos primeiros anos e melhorar o resultado da solução, optou-se por reduzir a quantidade de placas e de inversores, chegando ao potencial de geração anual apresentado na tabela 17 abaixo.

Tabela 17 - Potencial de geração energética do sistema ano a ano e perdas associadas à queda do desempenho em função do tempo e sujeira - 2

Ano	Perda de eficiência	Perda por sujeira	Potencial de Geração (MWh)
Instalação	0,0%	4%	4.512,00
Ano 1	3,0%	4%	4.376,64
Ano 2	0,7%	4%	4.345,06
Ano 3	0,7%	4%	4.313,47
Ano 4	0,7%	4%	4.281,89
Ano 5	0,7%	4%	4.250,30
Ano 6	0,7%	4%	4.218,72
Ano 7	0,7%	4%	4.187,14
Ano 8	0,7%	4%	4.155,55
Ano 9	0,7%	4%	4.123,97
Ano 10	0,7%	4%	4.092,38
Ano 11	0,7%	4%	4.060,80
Ano 12	0,7%	4%	4.029,22
Ano 13	0,7%	4%	3.997,63
Ano 14	0,7%	4%	3.966,05
Ano 15	0,7%	4%	3.934,46
Ano 16	0,7%	4%	3.902,88
Ano 17	0,7%	4%	3.871,30
Ano 18	0,7%	4%	3.839,71
Ano 19	0,7%	4%	3.808,13
Ano 20	0,7%	4%	3.776,54
Ano 21	0,7%	4%	3.744,96
Ano 22	0,7%	4%	3.713,38
Ano 23	0,7%	4%	3.681,79
Ano 24	0,7%	4%	3.650,21
Ano 25	0,7%	4%	3.618,62

Fonte: Elaboração própria (2019)

Para atingir esse potencial de geração energética seriam necessárias, ao todo, 15.454 placas fotovoltaicas do modelo Yingli YL260C-30b, já mencionado no dimensionamento do sistema para o edifício Paula Souza, disposto no item 3.1. deste relatório. Para realização do retorno da energia gerada ao sistema, como já mencionado previamente, faz-se necessário a instalação de inversores. Utilizando inversores de 75 kWp, seriam necessários 54 inversores operando em conjunto para atender ao volume de energia gerado. Como já mencionado, esses inversores possuem uma vida útil inferior à dos outros componentes do sistema, equivalente a 15 anos²³. Seria necessário, portanto,

²³<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/69/3349-energia-solar-termica-fotovoltaica-inversores-grid-tie-perdas-diferenca-funcao-como-funciona-captacao-kit-geracao-energia-eletrica-eletricidade->

trocar esses inversores uma vez ao longo do funcionamento do sistema, e o custo de aquisição se daria para 108 inversores, e não para 54.

3.2.3 IMPACTO FINANCEIRO DO SISTEMA

Para a realização da análise dos impactos financeiros da execução do sistema, foram levantados os custos de investimento inicial (CAPEX) e os custos de manutenção e operação do sistema (OPEX). Em seguida, foi calculada a economia anual de energia em função do potencial de geração já descrito. Para atender aos objetivos deste estudo, foi então avaliada a viabilidade financeira da instalação do sistema, e analisado o tempo de *payback* do investimento e a rentabilidade proporcionada pela instalação do mesmo.

Analogamente ao que foi descrito para o edifício Paula Souza, temos que o preço de inversores de 75 kWp varia entre R\$34.000,00 e R\$40.000,00²⁴. O preço adotado neste estudo será de R\$34.000,00, devido aos ganhos de escala que se teria dado o amplo volume de equipamentos adquiridos. Quanto às placas fotovoltaicas, conforme também já mencionado previamente, o preço corresponde à R\$519,00 por placa.

A aquisição destes equipamentos deve ser feita em conjunto, pois conforme prevê o convênio ICMS 101/97²⁵, válido até 31/12/2028, há isenção de ICMS na compra de geradores fotovoltaicos. Comprando os inversores e os módulos em conjunto, haverá então a isenção de 18% - ICMS 2019 do estado de São Paulo – dos valores mencionados acima. Sendo assim, os custos atrelados à aquisição dos equipamentos são apresentados na Tabela 18.

vantagens-fonte-renovavel-limpa-meio-ambiente-sustentavel-onde-comprar-custo-investimento-instalacao-residencia.html

²⁴<https://www.portalsolar.com.br/o-inversor-solar.html>

²⁵<http://app1.sefaz.mt.gov.br/Sistema/legislacao/legislacaotribut.nsf/07fa81bed2760c6b84256710004d3940/f219de0bc8dbf2ce832567940040cc22?OpenDocument>

Tabela 18 - Gastos com instalação do sistema e compra dos equipamentos

Parâmetros para dimensionamento	Valores
Área útil prédio Civil (m ²)	3.335
Painéis instalados Civil (un)	1.377
Painéis instalados (un/m ²)	0,41
Área útil disponível - Poli (m ²)	39.544
Quantidade de painéis possível (un)	16.328
Quantidade de painéis instalados (un)	15.454
Potência inversor (kWp)	75
Quantidade de inversores (un)	54
Vida útil inversor (anos)	15
Quantidade de inverores V.U. 25 anos	108
Preço inversor (R\$)	34.000,00
Desconto ICMS (compra gerador)	18%
Gastos inversores (R\$)	3.011.040,00
Preço painéis solar (R\$)	519,00
Gastos painéis solares (R\$)	6.576.913,32
Instalação (R\$)	1.438.193,00
CAPEX Total (R\$)	11.026.146,32

Fonte: Elaboração própria (2019)

Com relação aos custos de manutenção do sistema, adota-se novamente o valor de 1% do custo total de instalação anualmente. Sendo assim, para o período de 25 anos, são dispostos na tabela 19 os custos de manutenção.

Tabela 19 - Gastos manutenção do sistema ao longo da vida útil de 25 anos

Parâmetros para dimensionamento	Valores
Manutenção (anual)	110.261,46
Manutenção V.U. 25 anos	2.756.536,58

Fonte: Elaboração própria (2019)

Adotando o valor de R\$386,13 / kWh pago pela Universidade de São Paulo pela energia consumida como economia, a economia acumulada ano a ano durante a vida útil do sistema fotovoltaico, assumindo constância dos gastos energéticos na Escola Politécnica, é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 - Economia anual gerada a partir da instalação do sistema

Ano	Potencial de Geração (MWh)	Energia economizada (MWh)	Economia anual (R\$)
Intalação	4.512,00	0,00	0,00
Ano 1	4.376,64	4.334,00	1.673.487,42
Ano 2	4.345,06	4.334,00	1.673.487,42
Ano 3	4.313,47	4.313,47	1.665.560,94
Ano 4	4.281,89	4.281,89	1.653.365,41
Ano 5	4.250,30	4.250,30	1.641.169,88
Ano 6	4.218,72	4.218,72	1.628.974,35
Ano 7	4.187,14	4.187,14	1.616.778,82
Ano 8	4.155,55	4.155,55	1.604.583,29
Ano 9	4.123,97	4.123,97	1.592.387,76
Ano 10	4.092,38	4.092,38	1.580.192,23
Ano 11	4.060,80	4.060,80	1.567.996,70
Ano 12	4.029,22	4.029,22	1.555.801,17
Ano 13	3.997,63	3.997,63	1.543.605,64
Ano 14	3.966,05	3.966,05	1.531.410,11
Ano 15	3.934,46	3.934,46	1.519.214,58
Ano 16	3.902,88	3.902,88	1.507.019,05
Ano 17	3.871,30	3.871,30	1.494.823,52
Ano 18	3.839,71	3.839,71	1.482.627,99
Ano 19	3.808,13	3.808,13	1.470.432,46
Ano 20	3.776,54	3.776,54	1.458.236,93
Ano 21	3.744,96	3.744,96	1.446.041,40
Ano 22	3.713,38	3.713,38	1.433.845,87
Ano 23	3.681,79	3.681,79	1.421.650,34
Ano 24	3.650,21	3.650,21	1.409.454,82
Ano 25	3.618,62	3.618,62	1.397.259,29

Fonte: Elaboração própria

Com a estrutura de economia apresentada acima, com os gastos anuais para manutenção e os custos iniciais para instalação e aporte dos equipamentos, é possível encontrar o tempo necessário para o *payback* e o retorno financeiro da solução apresentada. Na tabela 21 é apresentado o fluxo de caixa esperado com a realização do investimento. Os custos no ano 16 são referentes à aquisição de novos inversores.

Tabela 21 - Fluxo de caixa esperado com a execução do sistema

Data	Receita/Despesa (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
Instalação	-11.026.146,32	-11.026.146,32
Ano 1	1.563.225,96	-9.462.920,36
Ano 2	1.563.225,96	-7.899.694,40
Ano 3	1.555.299,48	-6.344.394,92
Ano 4	1.543.103,95	-4.801.290,97
Ano 5	1.530.908,42	-3.270.382,55
Ano 6	1.518.712,89	-1.751.669,66
Ano 7	1.506.517,36	-245.152,30
Ano 8	1.494.321,83	1.249.169,53
Ano 9	1.482.126,30	2.731.295,83
Ano 10	1.469.930,77	4.201.226,60
Ano 11	1.457.735,24	5.658.961,84
Ano 12	1.445.539,71	7.104.501,55
Ano 13	1.433.344,18	8.537.845,73
Ano 14	1.421.148,65	9.958.994,38
Ano 15	1.408.953,12	11.367.947,50
Ano 16	-1.505.520,00	9.862.427,50
Ano 17	1.396.757,59	11.259.185,09
Ano 18	1.384.562,06	12.643.747,15
Ano 19	1.372.366,53	14.016.113,68
Ano 20	1.360.171,00	15.376.284,68
Ano 21	1.347.975,47	16.724.260,15
Ano 22	1.335.779,94	18.060.040,09
Ano 23	1.323.584,41	19.383.624,50
Ano 24	1.311.388,88	20.695.013,38
Ano 25	1.299.193,35	21.994.206,73

Fonte: Elaboração própria (2019)

Como se pode perceber, o *payback* se dá em 8 anos quando se trata do sistema como um todo. Após esse período, o retorno financeiro é transformado em lucro. Isso reflete em uma **margem de lucro** de **56,6%** para a vida útil total do sistema fotovoltaico, de 25 anos. A Taxa de Retorno do Investimento (**TIR**) calculada foi de **10,01%**.

4 CONCLUSÕES

A execução do sistema fotovoltaico em questão, na cobertura dos edifícios da Escola Politécnica da USP, apresentou um potencial de atender, inicialmente, toda a demanda energética dos edifícios do Biênio, da Mecânica e Naval, da Minas e Metalurgia, da Civil e Ambiental e da Elétrica. Como a geração da energia cai, em função de perda de desempenho com o tempo, ao fim da vida útil de 25 anos do sistema ainda seria atendida mais de 83% da demanda total de energia dos edifícios mencionados, supondo mesmo montante de gastos energéticos de 2017.

O montante da economia energética, por si só, juntamente ao pioneirismo de tornar uma faculdade de engenharia brasileira autossuficiente do ponto de vista energético, são fortes pontos a favor da execução do sistema. De toda forma, como todo projeto de Engenharia, a viabilidade da execução é imprescindível. Para tal, é possível contar tanto com as experiências prévias na universidade – na Biblioteca Brasileira e no IEE – quanto com as experiências internacionais mencionadas nesse relatório, que sustentam a possibilidade real de execução do sistema de geração fotovoltaico.

Dando a solução como viável do ponto de vista da execução, é necessário analisar também a viabilidade financeira da implementação do sistema. Os resultados encontrados demonstraram a que a solução é, na verdade, não simplesmente viável, como também uma oportunidade de investimento com bom potencial de retorno financeiro. Conforme apresentado previamente, a taxa de retorno do investimento foi próxima de 10%. Poucos investimentos proporcionam tais ganhos, principalmente comparando-se a alguns índices reconhecidos pelo mercado, como o CDI (6,20%²⁶ de set/18- out/19), Taxa SELIC (4,50%²⁷ em 2019) e IPCA (2,54%²⁸ de set/18-out/19).

²⁶<http://www.portaldefinancas.com/cdi1819.htm>

²⁷<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>

²⁸<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>

O projeto demonstra-se, dessa forma, como uma solução viável dos pontos de vista técnico e financeiro. O principal limitante é então o investimento inicial necessário para execução do sistema, tendo em vista o contexto atual da Universidade, de dificuldade financeira e de corte de verbas de universidades públicas por parte dos governos. Como principal alternativa para este impeditivo, apresentam-se as parcerias público-privadas (PPP). Seguindo esse modelo de execução apresentado previamente, a esfera privada ficaria responsável pelo financiamento da implementação da solução, enquanto a Universidade compartilharia os benefícios da solução aqui comprovados.

A Universidade, munida de uma solução com bons indicadores de retorno financeiro, ambiental e para sua própria imagem como entidade, possui uma boa oportunidade em mãos, principalmente encontrando parceiros na esfera privada.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados á rede**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012.
Disponível em:<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015.
Disponível em:<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>

Anuário Estatístico da USP. Disponível em:
<https://uspdigital.usp.br/anuario/AnuarioControle>

Atlas de energia solar da ANEEL. Disponível em:
http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_2.htm

CRESESB. Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica, 2008.

DELBY, Lisa. Butte College Shines with 25,000 Solar Panels. Disponível em:
<http://www.butte.edu/feeds/2011/renewableEnergy.html>

EDUCACLIMA. Panorama das emissões de gases de efeito estufa e ações de mitigação no Brasil. Disponível em:
<http://educaclima.mma.gov.br/2018/04/panorama-das-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-e-acoes-de-mitigacao-no-brasil/>

F.M. Vichi, M.T.C. Mansor, Energia, meio ambiente e economia: Brazil no contexto mundial. Quim. Nova, 2009.

Florio, Daia. Eólica e solar: o futuro da produção energética no Brasil é a energia limpa. Disponível em:<https://www.greenme.com.br/informar-se/energia-renovavel/7107-eolica-solar-futuro-producao-energia-brasil>

Mapa da Cidade Universitária. Disponível em: <http://www.puspc.usp.br/mapa-campus/>

MEIRA, H. A.; CAMBAUVA, I.; KAWAKAMI, V. R. **Auto-suficiência energética da USP**. São Paulo, Brasil: USP, 2018.

NOGUEIRA, Ana Flávia et al. Celulas solares de "Gratzel" com eletrolitopolimerico. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas. 2001.

NORMAS USP: RESOLUÇÃO Nº 7661, DE 22 DE MAIO DE 2019. Disponível em: <http://www.leginf.usp.br/?resolucao=resolucao-no-7661-de-22-de-maio-de-2019>

On campus solar energy. Disponível em: <https://environmentamerica.org/energy-101/campus-solar-energy>

PIN, Mario Luiz Ferrari. **Levantamento do potencial de geração fotovoltaica com sistemas de microgeração aplicados à arquitetura nos edifícios do Campus São Paulo da USP**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Projetos fotovoltaicos: vamos solarizar as universidades? Disponível em: <https://blog-solar.engie.com.br/projetos-fotovoltaicos-vamos-solarizar-as-universidades/>

QUANTO CUSTA A MANUTENÇÃO NO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO? | Energion Brasil. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/quanto-tempo-duram-os-paineis-solares-.html>

QUANTO TEMPO DURAM OS PAINÉIS SOLARES? | Portal Solar – Tudo Sobre Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/quanto-tempo-duram-os-paineis-solares-.html>

Reuters. Energia Solar deve crescer 44% no Brasil em 2019 com impulso da geração distribuída. Disponível em:<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,energia-solar-deve-crescer-44-no-brasil-em-2019-com-impulso-de-geracao-distribuida,70002683737>

Solar Zone at UA Tech Park. Disponível em:<https://techparks.arizona.edu/leading-edge/solar-zone>

Souza, Ronilsondi. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede ou Isolados? [Comparação]. Disponível em:<https://blog.bluesol.com.br/diferenca-sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-e-isolados/>

Sustainability Plan 2017 2020 – Melbourne University. Disponível em:
https://s3.ap-southeast-2.amazonaws.com/hdp.au.prod.app.um-ourcampus.files/7814/8479/5725/UoM_Sustainability_Plan_2017-2020_Interactive.pdf?utm_source=website&utm_campaign=interactive_plan&utm_medium=button

Sustainability Report 2017 – Melbourne University. Disponível em:https://s3.ap-southeast-2.amazonaws.com/hdp.au.prod.app.um-ourcampus.files/1915/3308/4701/Sustainability_Report_2017.pdf

Tenente, Luiza e Figueiredo, Patrícia. Entenda o corte de verbas das universidades federais e saiba como são os orçamentos das 10 maiores. Disponível em:<https://g1.globo.com/educacao/noticia/2019/05/15/entenda-o-corte-de-verba-das-universidades-federais-e-saiba-como-sao-os-orcamentos-das-10-maiores.ghtml>

USP –Superintendência do Espaço Físico. Disponível em:
<http://www.sef.usp.br/puerhe/energia/puerhe-energia-sistema-de-monitoramento-line-das-instalacoes/informe-mensal-de-energia-eletrica/>

VELLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio Século de História Fotovoltaica. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa, 2004.

Zakabi, Rosana. Crise na USP: 10 medidas urgentes para reverter o declínio da instituição. Disponível em: <https://vejasp.abril.com.br/cidades/crise-usp-especialistas/>

ZORRILLA-CASANOVA, José et al. Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. Progress in photovoltaics: Research and applications, v. 21, n. 4, p. 790-796, 2013.

ANEXO A – ÁREAS DE COBERTURA DOS EDIFÍCIOS DA USP

N	Nome do prédio	Área construída aproximada (m²)
1	Escola Politécnica - Engenharia Civil	13.500
2	Escola Politécnica - Engenharia Elétrica	9.300
3	Biomédicas	8.500
4	Faculdade de Economia e Administração (FEA)	8.000
5	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU)	7.000
6	Escola Politécnica - Engenharia Mecânica	6.200
7	Geociências	6.000
8	Bloco Química 3, 4, 5 e 6	6.000
9	Prédios Perto MAC	5.800
10	Ciências Biomédicas ICB IV 2	5.800
11	Escola de Educação Física e Esportes da USP	5.550
12	Instituto Oceanográfico (IO)	5.500
13	Bloco Química 1 e 2	4.500
14	História e Geografia	4.000
15	Instituto de Física (IF)	3.800
16	Quadras cobertas do CEPE	3.500
17	COCESP 5	3.500
18	Prédio do CRUSP 4	3.400
19	Hidráulica 2	3.400
20	Instituto de Matemática e estatística 1 (IME)	3.170
21	Escola Politécnica - Engenharia de Minas	3.100
22	Instituto de Astronomia e Geofísica 1 (IAG)	3.090
23	Prédio do CRUSP 5	3.000
24	COCESP 3	3.000
25	Faculdade de Educação	2.800
26	COCESP 1	2.800
27	Ciências Biomédicas Prédio 2	2.800
28	Faculdade de Economia e Administração 2 (FEA)	2.700
29	Anfiteatros do biênio	2.700
30	Prédio do CRUSP 1	2.600
31	Rua do matão 1	2.600
32	Prédio da Filosofia	2.500
33	Prédio atrás da FEA	2.300
34	Marquise da ECA	2.200
35	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo 2 (FAU)	2.200
36	Prédio da Letras 1	2.200
37	Instituto de Astronomia e Geofísica 2 (IAG)	2.130
38	Prédio novo atrás da FEA	2.100
39	Hidráulica 1	2.100
40	COCESP 2	2.100
41	MAE	2.100
42	Administração da FFLCH	2.100
43	Administração da Escola Politécnica	2.000
44	Poli Júnior	2.000
45	COCESP 4	2.000
46	Semi Industrial Química	2.000
47	Departamento de Zoologia	2.000
48	Ciências Biomédicas ICB IV	2.000
49	Blocos da Farmácia 14, 15 e 16	1.950
50	Prédio da Letras 3	1.900

Tabela 22: Lista de áreas estimadas utilizando o software Google Earth. Fonte: Adaptado de CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA, 2018, p. 47.

N	Nome do prédio	Área disponível aproximada (m²)
51	Escola Politécnica - Engenharia Química - Blocos 20 e 21	1.900
52	Blocos da Farmácia 13 e 17	1.900
53	Biociências Prédio 2	1.770
54	COCESP 3	1.700
55	Instituto de matemática e estatística - Ciência da computação	1.650
56	Faculdade de Educação - Edifício Mello de Moraes	1.600
57	Instituto de Pesquisas Tecnológicas 1 (IPT)	1.600
58	Rua do matão 6	1.600
59	Ciências Biomédicas Prédio 1	1.600
60	Instituto de Psicologia 2 (IP)	1.500
61	Prédio Rotatória Rio Pequeno 1	1.500
62	Prédio Rotatória Rio Pequeno 2	1.500
63	Centro Tecnológico da Marinha 2 (CTMSP)	1.500
64	Instituto de Psicologia 3 (IP)	1.400
65	Instituto de Psicologia 4 (IP)	1.400
66	Biomédicas 2	1.400
67	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares 2 (IPEN)	1.400
68	Escola Politécnica - Biênio	1.300
69	Instituto de Pesquisas Tecnológicas 2 (IPT)	1.300
70	COPESP 2	1.300
71	CIETEC 1	1.300
72	Escola Politécnica - Engenharia Química - Blocos 19 e 22	1.300
73	Marquise da Química	1.300
74	Grupos de extensão engenharia mecânica	1.200
75	CIETEC 3	1.200
76	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares 3 (IPEN)	1.200
77	Escola Politécnica - Cirquinho	1.100
78	Instituto de Pesquisas Tecnológicas 3 (IPT)	1.100
79	Instituto de Física (IF) - Morro da Coruja	1.100
80	Prédio em frente à Faculdade de Educação	1.000
81	Rua do matão 2	1.000
82	Instituto de Física (IF) - Morro da Coruja 4	1.000
83	Conjunto das Químicas prédio 1	1.000
84	Biociências Prédio 3	990
85	Ciências Biomédicas ICB IV 3	960
86	Refeitório das Químicas	900
87	Instituto de Psicologia - Prédio em L	900
88	Odontologia 1	900
89	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares 1 (IPEN)	900
90	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares 4 (IPEN)	900
91	Prédio da Letras 2	880
92	Prédio do CRUSP 3	850
93	Herbário	850
94	Instituto de Psicologia 1 (IP)	800
95	Hospital Universitário HU	800
96	Odontologia 2	800
97	Bloco da Farmácia 12	800
98	Prédio do CRUSP 2	700
99	Refeitório da Prefeitura	700
100	Rua do matão 4	700

Tabela 23: Continuação da lista de áreas estimadas utilizando o software Google Earth.

Adaptado de CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA, 2018, p. 47 – 1.

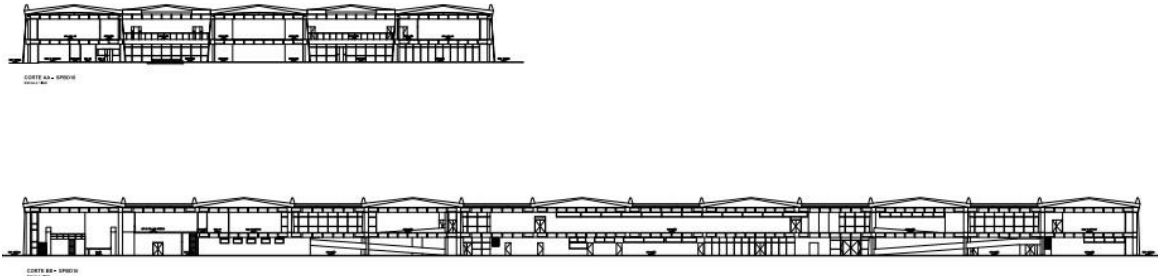
N	Nome do prédio	Área disponível aproximada (m²)
101	Rua do matão 5	700
102	Odontologia 3	700
103	Odontologia 5	700
104	Instituto de Física (IF) - Morro da Coruja 3	700
105	Rua do matão 7	700
106	Escola de Comunicação e Artes (ECA) - Prédio em L	690
107	Faculdade de Educação - Prédio Laranja	650
108	Escola de Comunicação e Artes (ECA) 4	650
109	Escola Politécnica - Engenharia Química - Bloco 18	650
110	Escola de Comunicação e Artes (ECA) - Prédio em H	640
111	Rua do matão 3	600
112	COPESP 6	600
113	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - 1 cima (IPEN)	600
114	Rua do matão 8	600
115	Biblioteca Química Prédio 1	600
116	Bloco da Farmácia 11	550
117	Rua do matão 9	500
118	COPESP 1	500
119	COPESP 3	500
120	COPESP 5	500
121	Odontologia 4	500
122	CEPA	500
123	Instituto de Física (IF) - Morro da Coruja 2	500
124	Instituto de Matemática e estatística 3 (IME)	500
125	Biociências Prédio 1	500
126	Escola de Comunicação e Artes (ECA) 2	450
127	CEPAM Prédio 1	450
128	Odontologia 6	400
129	Instituto de Física (IF) - Morro da Coruja 5	400
130	Rua do matão 10	400
131	Biociências prédio 4	400
132	Escola de Comunicação e Artes 1 (ECA)	340
133	Conjunto das Químicas prédio 2	340
134	Escola de Comunicação e Artes 3 (ECA)	240

Tabela 24: Continuação da lista de áreas estimadas utilizando o software Google Earth.

Adaptado de CAMBAUVA; KAWAKAMI; MEIRA, 2018, p. 47 – 2.

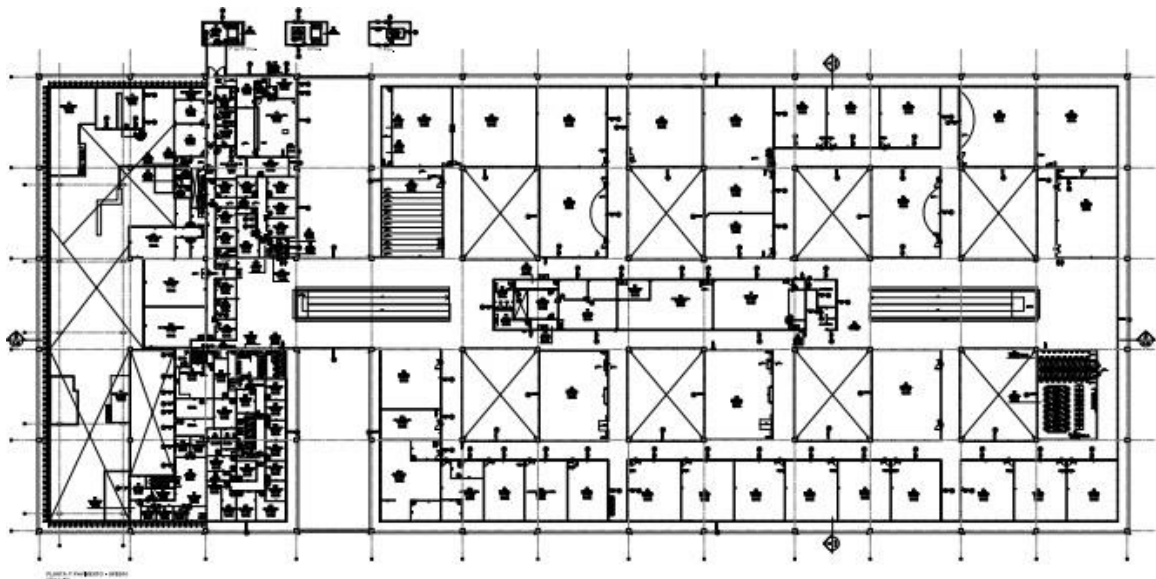
ANEXO B – REPRESENTAÇÃO E MAPAS DO EDIFÍCIO PAULA SOUZA

Figura 34 - Representação dos cortes do edifício



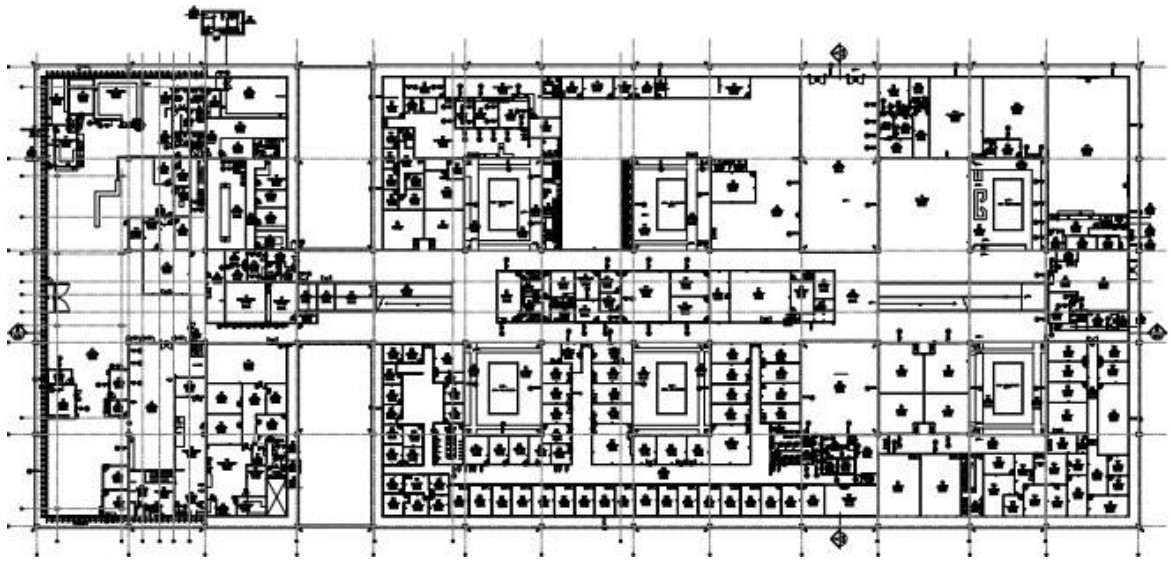
Fonte: CAEC

Figura 35 - Mapa do andar superior do edifício



. Fonte: CAEC

Figura 36 - Mapa do andar térreo do edifício



Fonte: CAEC