



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Engenharia Urbana

DIOGO AONI BALAGUER

ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A
IMPLANTAÇÃO DE PROJETOS EM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Rio de Janeiro

2024



UFRJ

DIOGO AONI BALAGUER

ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A IMPLANTAÇÃO DE PROJETOS EM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador(a): Prof. Armando Carlos de Pina Filho, D.Sc.

Coorientador(a): Prof. Julio Cesar Boscher Torres, D.Sc.

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

B171a Balaguer, Diogo Aoni
ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A
IMPLANTAÇÃO DE PROJETOS EM ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA / Diogo Aoni Balaguer. -- Rio de
Janeiro, 2024.
81 f.

Orientador: Armando Carlos de Pina Filho.
Coorientador: Julio Cesar Boscher Torres.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Urbana, 2024.

1. Análise multicritério. 2. Seleção de Locais.
3. Energia solar fotovoltaica. I. Pina Filho,
Armando Carlos de , orient. II. Torres, Julio Cesar
Boscher , coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.



UFRJ

ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A IMPLANTAÇÃO DE PROJETOS EM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Diogo Aoni Balaguer

Orientador(a): Prof. Armando Carlos de Pina Filho, D.Sc.

Coorientador(a): Prof. Julio Cesar Boscher Torres, D.Sc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Aprovada no dia 15 de março de 2024 pela Banca:

Presidente, Prof. Julio Cesar Boscher Torres, D.Sc., PEU/UFRJ

Prof^(a). Ana Lucia Ferreira de Barros, D.Sc., CEFET-RJ

Prof. Thales Terrola e Lopes, D.Sc., UFF

RIO DE JANEIRO

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus Orientadores Armando e Julio por direcionar a elaboração deste trabalho e pelos conselhos valiosos ao longo desta trajetória. Agradeço a todo o Corpo Docente do PEU pelo esforço em ministrar as disciplinas, mesmo durante um período desafiador como foi o da pandemia, mantendo a qualidade excelente do ensino e da transmissão do conhecimento ainda que de forma remota. Agradeço aos demais colegas, alunos do PEU, especialmente das turmas de 2020 e 2021, pela cooperação no decorrer das disciplinas e dos trabalhos em grupo.

Sou grato pelo fundamental incentivo de toda minha família, em especial aos meus pais Sandra e Marcos e aos meus sogros Nyvia e Marcos, tanto para ingressar e prosseguir com o mestrado, quanto por sempre acreditar no meu potencial, me dando forças e aconselhando a sempre seguir adiante, percorrendo o melhor caminho possível.

Agradeço à Alyne pelo companheirismo e suporte, estando sempre ao meu lado nos bons e maus momentos, pela compreensão, paciência e amor ao longo dos mais de dez anos que estivemos juntos. Agradeço também à minha filha Beatriz por me motivar todos os dias a ser uma pessoa e um pai melhor.

Agradeço a todos os servidores da Decania do Centro de Tecnologia e a equipe do Escritório de Planejamento pela convivência e constante aprendizado pessoal e profissional.

RESUMO

BALAGUER, Diogo Aoni. Análise Multicritério na seleção de locais para a implantação de projetos em energia solar fotovoltaica. Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A crescente preocupação com a preservação do meio ambiente torna a busca pela utilização de fontes renováveis de energia cada vez mais necessária, sendo fundamental a adoção de projetos mais sustentáveis e progressivamente mais eficientes, principalmente no ambiente urbano. A utilização das diferentes ferramentas de análise multicritério, notadamente o método AHP (*Analytical Hierarchy Process*), pode auxiliar na tomada de decisão na seleção de locais mais adequados para a implantação de painéis fotovoltaicos (FV) em projetos de geração de energia solar. A administração pública tem papel importante na promoção de novas tecnologias e no fomento do desenvolvimento sustentável no país, e, na ocasião de intervenções necessárias para que se recupere o patrimônio público edificado, muitas vezes deteriorado e próximo ao final de sua vida útil. Assim, surge a oportunidade da incorporação de sistemas de geração FV em conjunto com o *retrofit* das coberturas dos edifícios. Para que seja tomada a melhor decisão em termos de eficiência e desempenho dos projetos, ferramentas como a análise multicritério podem ser utilizadas. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo a aplicação de uma metodologia, baseada no método AHP, de modo a auxiliar na seleção de locais ótimos para a implantação de projetos fotovoltaicos em grandes complexos edificados na cidade do Rio de Janeiro. Foram definidos os critérios de irradiação solar, área de cobertura e robustez estrutural para a avaliação de alternativas de projeto, e formas objetivas para a apreciação dos critérios. A fim de verificar a aplicabilidade do método, foi conduzido um estudo de caso visando selecionar a cobertura mais adequada dentro do Centro de Tecnologia (CT) da UFRJ para a implantação de um projeto de geração de energia solar fotovoltaica. A Cobertura do Bloco H foi selecionada e apresentou um resultado aproximadamente 15% superior a segunda alternativa mais bem classificada. Finalmente, foi realizada uma análise do perfil de consumo energético das edificações do CT e verificou-se que um sistema fotovoltaico instalado na cobertura selecionada poderia vir a trazer uma economia de energia anual de 13% para o CT e reduziria a emissão de CO₂ em 1.151,6 toneladas ao longo de 30 anos de vida útil.

Palavras-chave: Análise multicritério, Desenvolvimento sustentável, Geração solar fotovoltaica

ABSTRACT

BALAGUER, Diogo Aoni. Multicriteria decision making in the selection of sites for the implantation of photovoltaic solar energy projects. Rio de Janeiro, 2024. Dissertation (Master's Degree application) – Urban Engineering Program, Polytechnic School, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The increasing concern with the environment makes the search for the use of renewable energy sources more and more needed, making it essential to adopt more sustainable and efficient projects, especially in the urban environment. The use of different multicriteria analysis tools, notably the AHP (Analytical Hierarchy Process) method, can help in decision making to select the most appropriate sites for the implementation of photovoltaic (PV) panels in solar energy generation projects. The technology related to PV systems is developing through the years, increasing the efficiency of the panels and lowering the installation costs, making this a feasible solution environmentally as well as economically. The public administration has an important role in the sustainable development of the country, and, in the occasion of the intervention needed to recover the public buildings, sometimes very deteriorated and near its final life span, comes up an opportunity of incorporation of PV energy generation systems along with the retrofit of the buildings roofs. To make the best decision in terms of efficiency and performance of the projects, tools such as decision making multicriteria analysis can be used. In this context, this work aims to apply a methodology, based on the AHP method, helping in the selection of optimal locations in the execution of PV solar projects in large building complexes in the city of Rio de Janeiro. There were established criteria such as solar irradiation, roof area and structural robustness to evaluate the alternatives, along with objective scales to assess these criteria. To verify the applicability of the method, a case study was conducted in order to select the most appropriate roof area within the UFRJ Technology Center for the implementation of a photovoltaic solar energy generation project. The building of H Block was selected and yielded a result approximately 15% higher than the second-highest ranked alternative. Finally, an analysis of the energy consumption profile of CT buildings was conducted, indicating that a PV system installed on the selected roof could potentially achieve an annual energy savings of 13% for the CT and reduce CO₂ emissions by 1,151.6 tons over its 30-year lifespan.

Keywords: Multicriteria decision making, Sustainable development, Photovoltaic solar generation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	OBJETIVO PRINCIPAL	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4	METODOLOGIA	17
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	21
2.1.1	Evolução Tecnológica.....	22
2.1.2	Configuração dos Sistemas de Painéis Fotovoltaicos	25
2.1.2.1	<i>Sistemas Isolados ou Off-Grid</i>	26
2.1.2.2	<i>Sistemas Conectados à Rede ou On-Grid/Grid-Tie</i>.....	28
2.2	PANORAMA DA ENERGIA SOLAR NO MUNDO	29
2.3	PANORAMA DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL.....	30
2.3.1	Energia Solar nas Instituições de Ensino Superior	33
2.4	ASPECTOS LEGAIS SOBRE ENERGIA SOLAR NO BRASIL	33
2.5	PAPEL DA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA NO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO PAÍS.....	35
3	METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA A SELEÇÃO DOS LOCAIS	38
3.1	ANÁLISE MULTICRITÉRIO AHP – Processo Analítico de Hierarquia.....	38
3.2	ESTRUTURA DO MÉTODO.....	43
3.3	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS	45
3.3.1	Critério 1 – C1	46
3.3.2	Critério 2 – C2	48
3.3.3	Critério 3 – C3	49
3.4	AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS – CÁLCULO DA PRIORIDADE.....	54
3.5	RAZÃO DE CONSISTÊNCIA	55
3.6	SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS	56
3.7	APLICAÇÃO DAS PRIORIDADES E ESCALA DE CLASSIFICAÇÃO	57

4	ESTUDO DE CASO	58
4.1	CARACTERÍSTICAS DO CENTRO DE TECNOLOGIA DA UFRJ.....	58
4.2	ALTERNATIVAS DE PROJETO	60
4.2.1	Alternativa 1 – Auditório Horta Barbosa	60
4.2.2	Alternativa 2 – Terraço Ligação A-H	61
4.2.3	Alternativa 3 – Cobertura Bloco H	62
4.2.4	Alternativa 4 – Cobertura Bloco I	63
4.2.5	Alternativa 5 – Cobertura Bloco D	63
4.2.6	Alternativa 6 – Shed Bloco I	64
4.3	APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS	65
4.3.1	Critério 1	65
4.3.2	Critério 2	67
4.3.3	Critério 3	67
4.4	CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS.....	67
4.5	ANÁLISE DA ALTERNATIVA SELECIONADA	68
4.5.1	Perfil de Gasto Energético do Centro de Tecnologia	68
4.5.2	Sistema Fotovoltaico Proposto Através do Pvsyst	69
4.5.3	Potencial de Economia Energética	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
	ANEXO I	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação entre células e módulos monofaciais e bifaciais.	24
Figura 2: Custo de geração de energia solar comparado a outras fontes.	25
Figura 3: Sistema isolado – cargas em CA.	27
Figura 4: Sistema conectado à rede.	28
Figura 5: Capacidade instalada de energia solar FV 2000-2020.	29
Figura 6: Crescimento de capacidade instalada das fontes renováveis.	30
Figura 7: Estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2020.	31
Figura 8: Projeção capacidade instalada Energia solar FV 2021-2030 no Brasil.	32
Figura 9: Evolução da quantidade de pontos de geração distribuída 2012-2019.	35
Figura 10: Estrutura do método AHP.	40
Figura 11: Estrutura do método.	45
Figura 12: Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro.	47
Figura 13: Definição do nível de reabilitação.	50
Figura 14: Entrada do Centro de Tecnologia da UFRJ.	58
Figura 15: Vista aérea do Centro de Tecnologia da UFRJ.	59
Figura 16: Alternativas de projeto	60
Figura 17: Cobertura do Auditório Horta Barbosa.	61
Figura 18: Terraço de ligação corredor A-H.	62
Figura 19: Vista aérea da cobertura do Bloco H	62
Figura 20: Cobertura Bloco I - Nave central	63
Figura 21: Cobertura Bloco D	64
Figura 22: Cobertura Bloco I- <i>Shed</i>	65
Figura 23: Aplicação do Critério 1 – Irradiação solar.	66
Figura 24: Perfil de gasto de eletricidade entre jul/22 e jun/23 no CT	69

Figura 25: Disposição dos painéis na cobertura do Bloco H.....	70
Figura 26: Balanço de carbono do sistema FV	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistemas Fotovoltaicos e suas aplicações	26
Tabela 2: Escala Fundamental de Saaty	41
Tabela 3: Escala Fundamental de Saaty para CR	43
Tabela 4: Etapas de desenvolvimento do estudo.	45
Tabela 5: Escala de classificação para C1	47
Tabela 6: Escala de classificação para o C2	49
Tabela 7: Determinação da extensão da intervenção.....	51
Tabela 8: Determinação da Complexidade da intervenção	52
Tabela 9: Tipo de anomalias e fator de ponderação da gravidade.....	53
Tabela 10: Nível de Reabilitação.....	53
Tabela 11: Escala de classificação para o critério técnico.....	54
Tabela 12: Avaliação par a par dos critérios	54
Tabela 13: Tabela auxiliar	55
Tabela 14: Consolidação da avaliação das alternativas e cálculo das prioridades	57
Tabela 15: Aplicação do Critério 1.....	66
Tabela 16: Aplicação do Critério 2.....	67
Tabela 17: Aplicação do Critério 3.....	67
Tabela 18: Aplicação dos critérios às alternativas.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP – Analytical Hierarchy Process (sigla em inglês para Processo Analítico Hierárquico)

C_i – Complexidade da Intervenção

CR – Índice de Consistência Randômico

CT – Centro de Tecnologia

E_i – Extensão da Intervenção

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FV – Fotovoltaico

G – Gravidade da Anomalia

IC – Índice de Consistência

IFES – Instituições Federais de Ensino Superior

IR – Índice de Reabilitação

MCDM - *Multi-Criteria Decision-Making* (sigla em inglês para Tomada de decisão multicritério)

RC – Razão de Consistência

SIG – Sistema de Informações Geográficas

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A energia é fundamental para o crescimento econômico, desenvolvimento social e melhoria da qualidade de vida ao redor do mundo. No entanto, conforme a demanda e o consumo de eletricidade aumentam, devido aos crescentes avanços tecnológicos e ao progresso da humanidade como um todo, ocorre um maior impacto ambiental decorrente de ações antrópicas. Este cenário requer, portanto, uma atuação de governos e tomadores de decisão na elaboração de um planejamento energético eficiente, envolvendo, dentre outras medidas, avaliações das fontes de energia utilizadas, exploração de fontes alternativas, definição das localizações dessa geração e especificações técnicas adequadas. (RIGO *et al.*, 2020).

Nos dias atuais, a crescente preocupação global com o desenvolvimento sustentável demanda uma mudança substancial na estrutura da matriz energética primária. A transição energética, segundo EPE (2020), é composta por processos complexos, que ocorrem paulatinamente, de acordo com as características e especificidades de cada região, condicionados pela necessidade de se combater as mudanças climáticas e limitados aos avanços tecnológicos existentes. Essa mudança nas matrizes energéticas visa uma economia de baixo carbono e um menor impacto ambiental, estimulando a utilização mais eficiente dos recursos e priorizando a geração de energia advinda de fontes renováveis, como por exemplo, a eólica e a solar.

O Brasil, atualmente, se destaca no cenário internacional devido à elevada participação de fontes renováveis em sua matriz energética, com participação de quase 85%, principalmente devido à geração de energia hidroelétrica (EPE, 2021). Além disso, desde o acordo de Paris, em 2015, o Brasil se comprometeu a adotar medidas para mitigar as mudanças climáticas, propondo uma meta de pelo menos 23% da matriz energética nacional advinda de fontes renováveis, excetuando-se a hidroelétrica. (MAGALHÃES *et al.*, 2020).

De acordo com Magalhães *et al.* (2020), a proximidade do Brasil com a linha do Equador permite uma distribuição uniforme de incidência solar e de alta irradiação durante todo ano, tornando o país propício para a geração de energia fotovoltaica e com enorme

potencial para o desenvolvimento desta tecnologia. Além disso, a cada ano a eficiência dos painéis se eleva, acompanhado da redução do preço da energia solar fotovoltaica, com uma redução de custos em projetos novos de aproximadamente 85% entre 2010 e 2020, segundo IRENA (2021).

Ademais, a expansão da produção de energia através de tecnologias fotovoltaicas vem aumentando significativamente nos últimos anos. Em 2019, representava cerca de 2,6% da produção de energia no mundo, devendo chegar a 25% da geração de eletricidade mundial por volta do ano de 2050, atingindo uma capacidade instalada de 8500GW. Previsões apontam que 40% da capacidade de geração será proveniente de sistemas fotovoltaicos (FV) instalados em coberturas de edifícios. Portanto, as cidades terão papel importante nesta transição de matrizes energéticas (THEBAULT *et al.*, 2020).

Magalhães *et al.* (2020) afirmam que, do ponto de vista ambiental, a escolha de energia solar fotovoltaica é justificada por não poluir o ar ou cursos hídricos e não emitir CO₂. No entanto, os impactos associados à produção dos painéis FV e o eventual descarte ao final da vida útil do sistema devem ser considerados. Com o avanço da tecnologia, pesquisa e estudos relacionados à geração de energia FV, tais impactos serão mais bem compreendidos, surgindo maneiras de mitigá-los ou até mesmo eliminá-los. Outra vantagem da utilização da energia fotovoltaica é a área necessária para a geração (m²/GWh), sendo a menor dentre as fontes renováveis. A avaliação da adequabilidade dos locais de implantação do sistema FV deve considerar fatores ambientais, geomorfológicos, espaciais e climáticos.

Segundo Costanzo *et al.* (2018) e Rezende (2019), a tecnologia de geração de energia fotovoltaica está evoluindo rapidamente, quando comparada a outras fontes, devido à facilidade de integração com a arquitetura dos edifícios. Utilizando-se elementos como fachadas e coberturas, pode-se, inclusive, apresentar outras vantagens, como a redução de custos de materiais, de mão de obra e ganhos na parte estética. A produção de energia limpa no próprio local do consumo de eletricidade reduz os impactos ambientais e as perdas advindas do sistema de transmissão e distribuição. Outras vantagens, de acordo com Rezende (2019), são a não emissão de poluentes da energia FV e a baixa necessidade de manutenção desses sistemas.

Edificações aptas a receber instalações de painéis fotovoltaicos possuem características distintas. Por este motivo, os procedimentos para a classificação de acordo com

a sua adequabilidade devem ser desenvolvidos. Vários fatores devem ser levados em consideração, tais como a presença de superestruturas nos telhados, robustez estrutural, viabilidade econômica, patrimônios tombados e características estéticas das edificações (THEBAULT *et al.*, 2020). Já para Al Garni e Awasthi (2018), os principais critérios para a classificação dos locais são: ambiental, espacial, climático, orográfico e social, além dos riscos associados, sendo identificados 39 subcritérios, principalmente dentro dos aspectos climático e espacial. Dentre os aspectos estudados, a quantidade de irradiação solar foi considerada o critério mais importante (AL GARNI; AWASTHI, 2018).

Apesar de focar principalmente nos aspectos econômicos, de viabilidade técnica e legais, critérios relacionados aos interesses sociais da comunidade local devem ser considerados na análise. Para tal, Sward *et al.* (2021), propõem a inclusão de critérios socioeconômicos e demográficos aos métodos tradicionais de seleção de locais para a implantação de projetos em energia renovável. São realizadas coleta de dados e pesquisas para o melhor entendimento das preferências e características de determinada comunidade.

A administração pública tem papel importante na promoção de novas tecnologias e de fomentar o desenvolvimento sustentável do país. Em consonância com o princípio da eficiência, a implantação de projetos deve sempre buscar a melhor alternativa visando o atendimento do interesse coletivo e uma adequada utilização dos recursos públicos. Para tal, é fundamental que sejam aplicadas ferramentas que auxiliem os agentes públicos e equipes técnicas responsáveis pelos projetos a tomarem a melhor decisão possível com relação à eficiência, economia e sustentabilidade. Para este fim, metodologias de análise de decisão multicritério são largamente utilizadas.

O Processo Analítico Hierárquico (do inglês *Analytic Hierarchy Process* - AHP), de acordo com Al Garni e Awasthi (2018), é um dos métodos mais utilizados na classificação de alternativas. Combina critérios qualitativos e quantitativos, sendo reconhecido pela comunidade científica internacional como uma técnica flexível e robusta para facilitar a resolução de problemas complexos de tomada de decisão. Conforme Mokarram *et al.* (2020), a abordagem AHP é um método multicritério para a tomada de decisão que é capaz de desmembrar um problema complexo com diversos fatores em uma estrutura hierárquica, compondo níveis com seus respectivos atributos e que pode também ser utilizado em conjunto com outros métodos. Tipicamente, os critérios de decisão dependem do objeto de estudo, acesso aos dados georreferenciados e da literatura existente (AL GARNI; AWASTHI, 2018).

1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo deste trabalho é utilizar o método multicritério AHP para a classificação de alternativas de projeto visando à seleção de um local ótimo, dentro de um complexo edificado, para a implantação de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- Elaborar a revisão da literatura para definir o estado da arte do objeto de estudo;
- Propor critérios objetivos para a avaliação das alternativas de projeto;
- Definir diretrizes de modo a otimizar a seleção de locais para a implantação de projetos em energia solar fotovoltaica;
- Aplicar a metodologia proposta no complexo de edifícios do Centro de Tecnologia da UFRJ, classificando as alternativas selecionadas de acordo com o nível de adequabilidade para a implantação de painéis fotovoltaicos, considerando o modelo proposto;
- Verificar o potencial de economia de energia elétrica que a alternativa selecionada poderia vir a gerar.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia de seleção dos locais mais adequados para a implantação de projetos de geração de energia solar é baseada na aplicação da ferramenta AHP de análise multicritério. Através do estabelecimento dos critérios e das formas de avaliação para cada alternativa de projeto, a ferramenta proposta neste trabalho elimina as etapas iniciais necessárias para a aplicação integral do método AHP, fazendo com que a avaliação de alternativas de projeto seja feita de maneira mais rápida e eficiente. A ferramenta pode ser replicada e adaptada para outras localidades e situações apenas pela escolha das alternativas e aplicação do método.

Optou-se pela utilização do método AHP, uma ferramenta de análise multicritério consolidada no meio científico, através do qual são realizados procedimentos relativamente

simples para a hierarquização de alternativas. Tal metodologia é aplicável a uma gama variada de situações em que se deseja escolher uma dentre várias opções, a partir de um determinado objetivo. O resultado é a avaliação de alternativas de projetos de acordo com a sua adequação ao objetivo escolhido, formando uma classificação hierárquica.

Inicialmente, é definido o objetivo para a aplicação do método. São propostos parâmetros de irradiação solar, área e robustez estrutural, e definidas as escalas para a avaliação de cada critério. O grau de importância que cada critério tem em relação a outro é medido através da elaboração de um vetor de prioridades. Em seguida são selecionadas alternativas de coberturas que poderiam potencialmente receber as instalações de painéis fotovoltaicos dentro de um complexo de edificações. Por fim as alternativas de projetos são avaliadas e classificadas de acordo com a sua adequabilidade. A utilização da ferramenta proposta poderá fornecer subsídio para a tomada de decisão durante a elaboração deste tipo de projeto. A metodologia se aplica, principalmente, no âmbito da administração pública, notadamente em grandes complexos edificados localizados na cidade do Rio de Janeiro. Outras aplicações possíveis compreendem áreas de *shopping centers* e centros de distribuição logística.

O detalhamento desta metodologia para a classificação das alternativas quanto à sua adequabilidade para receber os projetos de geração de energia solar fotovoltaica, bem como a determinação dos critérios utilizados, são apresentados no capítulo 3 deste trabalho.

Finalmente, é realizado um estudo de caso, de modo a aplicar e verificar a adequabilidade dos critérios e da metodologia proposta. São apresentadas as características do complexo de edifícios do Centro de Tecnologia da UFRJ e suas coberturas. Foram selecionadas seis alternativas de projeto para que sejam classificadas, de acordo com os critérios estabelecidos, visando à escolha do melhor local para a implantação de um sistema de geração de energia fotovoltaica no CT.

A alternativa mais adequada, selecionada pelo método proposto, é analisada quanto ao seu potencial de ganhos ambientais e econômicos que a administração pública teria em uma eventual implantação do projeto. Para tal, é apresentado o perfil de consumo de energia elétrica do Centro de Tecnologia no período de um ano, compreendido entre julho de 2022 e junho de 2023. Através das características da edificação selecionada, estima-se o potencial de geração de energia do sistema por meio do *software* PVsyst 7.2. É apresentado também um

exemplo de configuração de um sistema de geração que poderia, eventualmente, ser implantado na alternativa melhor classificada pelo método.

A quantidade de energia produzida, quando comparada ao consumo da edificação, indica o potencial de economia de energia elétrica consumida da rede da Concessionária.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido em 5 capítulos.

O Capítulo 1 introduz o tema, contextualizando e apresentando os principais aspectos que serão abordados no decorrer do trabalho. Também são definidos os objetivos, a metodologia utilizada e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, que fornece o embasamento teórico para o trabalho. São definidos os principais conceitos relacionados ao tema e apresentado o Estado da Arte dos sistemas de geração de energia fotovoltaica, principais avanços e desenvolvimento desta tecnologia. A pesquisa traça também um panorama geral da evolução e adoção dessa fonte renovável, tanto mundialmente, quanto especificamente no Brasil, bem como o papel da administração pública no desenvolvimento do país e no fomento de novas tecnologias, principalmente no tocante à sustentabilidade ambiental e econômica. São abordados também os marcos legais e regulatórios mais relevantes relacionados à tecnologia de geração solar fotovoltaica no país.

No Capítulo 3 são demonstradas as características da metodologia AHP, que serve de base para a ferramenta concebida neste trabalho. Além disto, é detalhada a metodologia proposta para a avaliação e classificação dos locais mais adequados para a implantação de projetos de geração de energia solar fotovoltaica, os critérios utilizados e os procedimentos para sua aplicação e resultados.

O Capítulo 4 apresenta as características do local selecionado para o Estudo de Caso onde será aplicada a metodologia AHP. Trata-se do complexo edificado do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, sendo apresentadas as alternativas de projeto que finalmente serão classificadas de acordo com a sua adequabilidade. É exibido o perfil de consumo do complexo edificado em determinado período e o potencial de economia

de energia elétrica que o um sistema fotovoltaico instalado no local selecionado poderia apresentar.

O Capítulo 5 traz as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim são listadas as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Mais de 100 anos se passaram desde a descoberta do efeito fotovoltaico em 1839 pelo físico francês Alexandre Becquerel, até a primeira aplicação bem-sucedida de painéis fotovoltaicos, na geração de energia para o satélite Vanguard I, lançado em 1958. A partir de então, houve uma grande evolução desta tecnologia, principalmente nas primeiras décadas do século 21, quando comparada a outras tecnologias de geração energética (ALGORA e REY-STOLLE, 2016).

Atualmente, existe uma tendência de evolução da tecnologia de aproveitamento da energia solar fotovoltaica, tornando mais acessível a instalação destes sistemas, com eficiência crescente e custos mais competitivos no mercado. A melhora de eficiência dos painéis, segundo EPE (2020), pode reduzir a demanda da área necessária para a implantação das usinas solares, reduzindo impactos ambientais ou ainda aumentando a geração de energia em uma mesma área. Outros avanços tecnológicos, tais como a redução da quantidade de água necessária para a limpeza dos painéis, pode acelerar a adoção desses sistemas em locais onde há pouca oferta de água, como por exemplo, o semiárido nordestino.

O planeta terra recebe anualmente cerca de $1,5 \times 10^9$ TWh de energia solar, o que representa a maior fonte de energia disponível para o ser humano (ALGORA e REY-STOLLE, 2016). O aproveitamento adequado de apenas uma fração desta energia seria suficiente para abastecer toda a demanda de energia do mundo. No ano de 2013, o consumo de energia foi de aproximadamente de $1,6 \times 10^5$ TWh, ou seja, a disponibilidade de energia solar é cerca de 10.000 vezes maior do que a necessidade anual de energia elétrica da humanidade. Portanto, o desenvolvimento deste tipo de geração de energia será fundamental ao longo das próximas décadas, considerando os desafios na busca de uma matriz energética majoritariamente advinda de fontes renováveis e a busca pelo desenvolvimento sustentável.

A energia solar fotovoltaica é gerada a partir da conversão da luz solar em eletricidade, através do chamado efeito fotovoltaico, realizada por células fotovoltaicas compostas de material semicondutor (PINHO e GALDINO, 2014).

O efeito fotovoltaico é criado a partir da combinação de duas camadas de materiais semicondutores. Quando exposta à luz solar, uma das camadas absorve os fótons, excitando os elétrons existentes e fazendo com que estes migrem para outra camada, que deve estar com quantidade reduzida de elétrons, gerando assim, a carga elétrica (BOXWELL, 2021).

De acordo com Algora e Rey-Stolle (2016), o processo de transformação da radiação solar em energia elétrica acontece segundo as etapas:

(1) A radiação eletromagnética é absorvida;

(2) Esta absorção deve excitar um par de terminais, positivo e negativo, de um estado de repouso para um estado de alta energia, detendo energia liberada pelo fóton que foi absorvido;

(3) Enquanto ainda excitados, ocorre uma separação dos terminais positivo e negativo, impedindo que voltem ao repouso. Uma vez mantido estável o estado excitado, os terminais armazenam energia potencial que pode ser transformada em carga elétrica;

(4) Elétrons fluem para fora do contato negativo, circulando através da parte externa do circuito, gerando energia elétrica;

(5) Elétrons chegam ao contato positivo encontrando as cargas positivas e retornando ao estado original de repouso.

Quando um fóton entra em contato com uma célula solar, esse é capaz de ser absorvido, refletido ou ainda atravessar a célula. A corrente elétrica é gerada a partir da absorção destes fótons e, quanto maior esta quantidade, maiores a absorção e a energia gerada. Este incremento na absorção ocorre devido a uma maior irradiação solar, por exemplo. Contudo, as células solares são capazes de gerar eletricidade mesmo em dias nublados e alguns sistemas podem inclusive gerar pequena quantidade de energia a partir do brilho da lua (BOXWELL, 2021).

2.1.1 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

Células solares individualmente geram pouca energia. Por este motivo, devem ser combinadas em módulos, de modo a gerar energia para o abastecimento elétrico de um determinado sistema. Um módulo fotovoltaico representa a unidade fundamental

comercialmente disponível. Os módulos desempenham papel crucial na proteção mecânica e ambiental das células fotovoltaicas expostas às intempéries. As células, que constituem os módulos, são conectadas eletricamente em configurações de série e/ou paralelo, visando à geração de tensão e corrente para o sistema.

De acordo com Rathore *et al.* (2021), a tecnologia empregada na produção dos módulos fotovoltaicos possui três gerações atualmente. A primeira geração, composta por duas cadeias produtivas: silício monocristalino e silício policristalino. Estes painéis correspondem a mais de 85% do mercado global devido à sua confiabilidade e eficiência, entre 12 e 18%.

A segunda geração é composta por filmes finos, produzidos em silício amorfo, disseleneto de cobre e índio ou disseleneto de cobre, índio e gálio e telureto de cádmio. Por sua vez, possui menor eficiência, entre 4 e 15%, quando comparada à primeira geração. Conta com baixa fatia de mercado atualmente e encontra desafios para sua maior adoção, em razão da escassez dos materiais que a compõem, vida útil e rendimento das células, além da toxicidade de elementos como o cádmio. Apesar destes obstáculos, os filmes finos são cerca de 50% mais baratos que os módulos convencionais de primeira geração (RATHORE *et al.*, 2021).

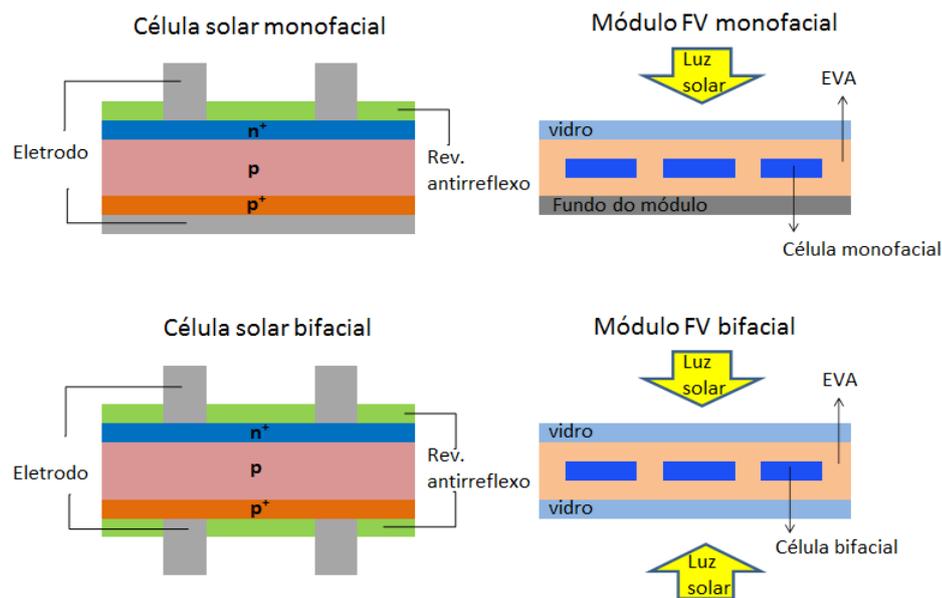
A terceira geração, composta por células fotovoltaicas multijunção, células sensibilizadas por corante e células orgânicas ou poliméricas, ainda está em fase de desenvolvimento e pesquisa. Porém, com o avanço da tecnologia e a redução dos custos, esta poderá vir a ter maior competitividade no mercado devido a sua alta eficiência, podendo chegar a 40% (RATHORE *et al.*, 2021).

A cada ano surgem novas variações das células de silício, em que são alteradas características do material, a estrutura dos contatos ou ainda a redução na espessura dessas células fotovoltaicas. Existe também a perspectiva da utilização de outros materiais que substituiriam os módulos de silício cristalino tradicionais.

O desenvolvimento tecnológico utilizado na fabricação dos módulos está em constante desenvolvimento e evolução. Tal avanço é motivado, dentre outros fatores, pela necessidade de se pesquisar por fontes alternativas e limpas de geração de energia. Então, a partir do aumento da eficiência e da redução dos custos de produção dos módulos, ocorre o crescimento da demanda e do interesse na utilização de painéis solares fotovoltaicos. Outra

inovação tecnológica diz respeito aos módulos bifaciais, nos quais são utilizadas células cortadas ao meio com uma segunda camada de vidro substituindo o polímero posterior. Semelhante disposição permite o aproveitamento de radiação nesta face, o que é capaz de aumentar potencialmente a geração em até 50%, quando comparado aos módulos tradicionais (EPE, 2020). A Figura 1 apresenta a comparação entre as células e módulos monofaciais com os bifaciais.

Figura 1: Comparação entre células e módulos monofaciais e bifaciais.

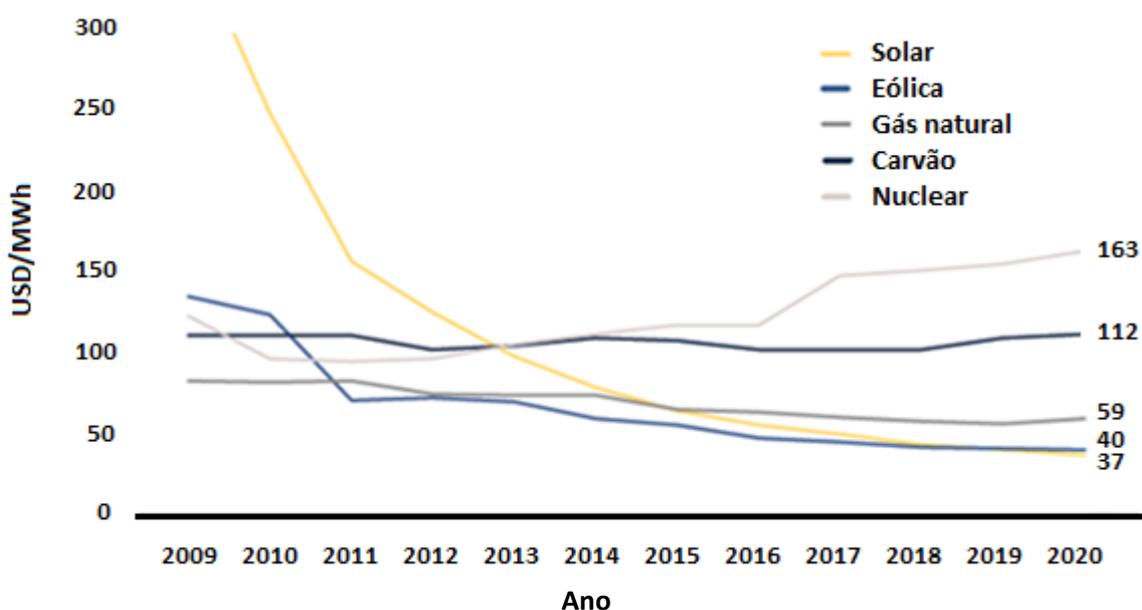


Fonte: FAJUKE e RAJI (2022). Adaptado pelo Autor

Atualmente, a vida útil dos painéis fotovoltaicos pode chegar de 25 a 30 anos, sem perdas significativas de eficiência na geração. Contudo, uma questão relevante que deve ser considerada é o adequado descarte destes módulos ao final de sua vida útil. De modo a manter a sustentabilidade, mesmo após o final de sua utilização, é necessário um correto gerenciamento deste descarte, seja através do tratamento, recuperação ou reciclagem dos painéis inservíveis e obsoletos. O gerenciamento inadequado destes resíduos pode acarretar inúmeros problemas ambientais e à saúde, devido a potencial emissão de poluentes no processo de tratamento e reciclagem de painéis. Outros produtos tóxicos, inflamáveis e corrosivos também podem ser gerados no beneficiamento ou descarte inadequado destes materiais (ZHANG *et al.*, 2023).

A Figura 2 apresenta um comparativo do custo da geração da energia solar com outras fontes, sendo possível observar a queda acentuada nos custos da energia solar fotovoltaica desde o ano de 2009. Apenas de 2019 para 2020, houve uma redução de 8%. A partir de 2013 os custos da energia solar fotovoltaica já eram menores que os de combustíveis fósseis e da energia nuclear. Considerando a tendência de aumento nos custos da geração convencional de energia utilizando carvão, gás ou nuclear nos próximos anos, a vantagem competitiva de energias renováveis tais como a eólica e a solar tendem a aumentar. O aumento na eficiência e a redução dos custos de implantação destes sistemas de geração de energia limpa produzirá um aumento na relevância e na participação na composição da matriz energética mundial nas próximas décadas (SOLARPOWER EUROPE, 2021).

Figura 2: Custo de geração de energia solar comparado a outras fontes.



Fonte: SOLARPOWER EUROPE (2021). Adaptado pelo autor

2.1.2 CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

De acordo com Pequeno (2019), existem majoritariamente dois sistemas fotovoltaicos utilizados no Brasil nos dias de hoje. O primeiro corresponde aos sistemas isolados da rede, também conhecidos como *off-grid*. O segundo tipo são os conectados a rede, chamados de *on-grid* ou *grid-tie*. Os sistemas *off-grid* podem ser domésticos e não domésticos. Já os e sistemas *on-grid* são classificados em distribuídos ou centralizados, conforme pode ser observado na Tabela 1. Existe também um terceiro sistema, conhecido como sistema híbrido,

que está conectado à rede de distribuição da concessionária além de possuir armazenamento de energia através da utilização de baterias (AYRÃO, 2018).

Tabela 1: Sistemas Fotovoltaicos e suas aplicações

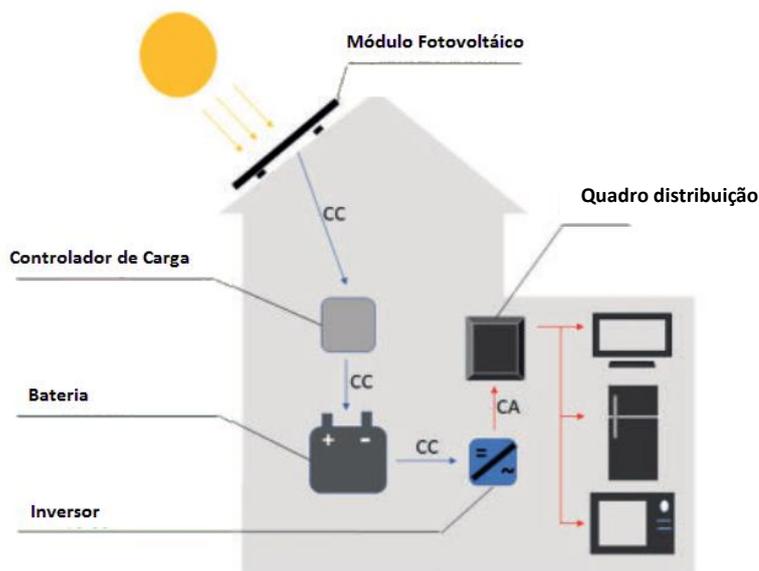
Tipo de Sistema Fotovoltaico		Principais Aplicações
<i>Off-Grid</i>	Doméstico	Casas isoladas, sem ligação à rede
	Não doméstico	Telecomunicações, bombeamento de água, sinais de trânsito, iluminação pública
<i>On-Grid</i>	Distribuído	Residências, condomínios, edifícios, etc.
	Centralizado	Usinas solares

Fonte: Adaptado de Pequeno (2019)

2.1.2.1 SISTEMAS ISOLADOS OU *OFF-GRID*

Um sistema de geração de energia solar fotovoltaica é isolado quando não há ligação com a rede de distribuição de energia elétrica. Tem por objetivo o fornecimento de eletricidade de forma local, alimentando cargas diretamente em corrente contínua ou alternada. O sistema, conforme observado na Figura 3, possui um conjunto de módulos conectados em série ou em paralelo que é responsável por gerar a eletricidade a partir da absorção da luz solar. Além dos módulos, um sistema isolado possui um banco de baterias, ligado em série ou paralelo, encarregado do armazenamento de energia. A utilização de baterias é responsável por armazenar a energia para a utilização durante a noite ou em períodos com irradiação reduzida, garantindo assim, fornecimento constante sem quedas de energia. Também fazem parte do sistema as unidades de controle de carga e inversores, responsáveis pela conversão de corrente contínua em alternada. A corrente gerada alimenta o quadro de distribuição no qual são ligados os aparelhos eletroeletrônicos (AYRÃO, 2018). O sistema *off-grid* pode ser individual ou em minirredes, quando utilizado por comunidades rurais afastadas da rede de distribuição (GALDINO, 2000).

Figura 3: Sistema isolado – cargas em CA.



Fonte: Ayrão, 2018. Adaptado pelo autor

Este tipo de sistema fornece eletricidade a uma determinada carga, fazendo-se valer apenas da energia solar fotovoltaica. De acordo com Pequeno (2019) e Galdino (2000), o sistema *off-grid* é importante em locais afastados da rede elétrica convencional ou em áreas rurais, onde não há disponibilidade de energia elétrica, sendo necessária uma fonte alternativa de geração.

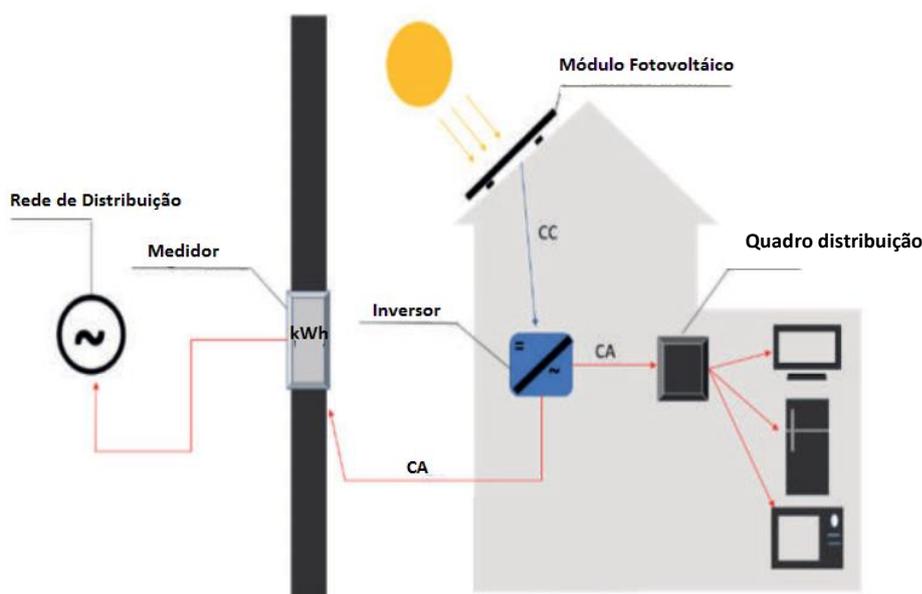
A principal aplicação da energia fotovoltaica nos sistemas isolados, além da geração de energia elétrica, é a sua utilização no bombeamento de água de poços ou outros cursos hídricos, seja para consumo humano, irrigação ou dessedentação animal. Porém, este tipo de sistema possui diversas outras aplicações, como por exemplo: Estações repetidoras de telecomunicações (UHF, VHF e TV), sinalização náutica (boias e faróis de navegação), sistemas de telemetria, monitoramento ambiental e vigilância (estações meteorológicas, etc), sistemas de proteção catódica de estruturas metálicas (oleodutos, torres de linhas de transmissão, etc), postes autônomos de iluminação pública, sinalização rodoviária (placas, sinais de perigo, etc), telefones de emergência rodoviários, embarcações a vela, camping e trailers, produtos eletrônicos portáteis (relógios, calculadoras, brinquedos, etc), aplicações em campanhas militares. (GALDINO, 2000)

2.1.2.2 SISTEMAS CONECTADOS À REDE OU *ON-GRID/GRID-TIE*

Os sistemas conectados à rede, segundo Rezende (2019), funcionam de forma paralela à rede elétrica da concessionária responsável pela distribuição de energia, gerando eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou eliminar o consumo da rede pública e injetando o excedente gerado nesta rede. Para realizar o balanço entre a energia gerada e a consumida pelo usuário, de acordo com Galdino (2000), são instalados medidores bidirecionais na entrada de energia elétrica da unidade consumidora, que registram o fluxo de energia em ambos os sentidos.

Pequeno (2019) afirma que, por estar conectado à rede de distribuição, o sistema *on-grid* deve seguir as regras da concessionária de energia. A unidade consumidora é abastecida pelos painéis fotovoltaicos e, nas ocasiões em que esta geração não é suficiente para atender à demanda de eletricidade, o fornecimento é feito pela concessionária através da maneira convencional de fornecimento, com pagamento da tarifa vigente. Em contrapartida, quando há uma geração maior do que a necessária, esta energia vai para a rede de abastecimento da concessionária. Assim, a rede tem o papel de absorver a energia já que, por não haver baterias, essa não é armazenada no sistema. Um exemplo da configuração básica de um sistema *grid-tie*, é apresentado na Figura 4.

Figura 4: Sistema conectado à rede.



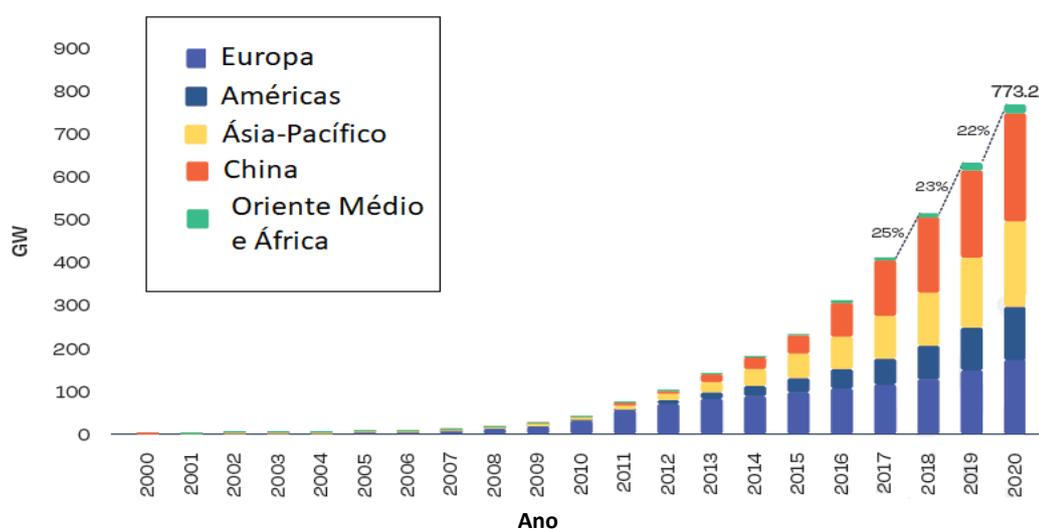
Fonte: Ayrão, 2018. Adaptado pelo autor

2.2 PANORAMA DA ENERGIA SOLAR NO MUNDO

A energia solar foi a fonte de energia renovável que apresentou o maior incremento de capacidade instalada no mundo em 2020. Trata-se de uma adição de 127 GW, que corresponde a 22% de crescimento, comparativamente ao ano anterior, seguida de perto pela energia eólica (IRENA, 2021). Segundo EPE (2020), este resultado se deu devido à robustez da tecnologia dos sistemas fotovoltaicos. Atualmente, existem projetos com mais de três décadas de funcionamento, o que corrobora com a durabilidade e confiabilidade deste tipo de sistema. O crescimento da capacidade instalada deste tipo de energia também pode ser explicado pelos custos cada vez menores dos painéis. O benefício ambiental, com a não emissão de gases estufa durante a operação dos sistemas é outra característica importante desta tecnologia. Os sistemas fotovoltaicos também podem ser considerados bastante flexíveis do ponto de vista técnico, permitindo diversas dimensões de projetos, tanto para geração centralizada quanto para distribuída.

Desde o ano de 2000, houve um crescimento exponencial da capacidade instalada de geração de energia solar FV ao redor do mundo, ultrapassando os 770 GW em 2020, conforme observado na Figura 5.

Figura 5: Capacidade instalada de energia solar FV 2000-2020.

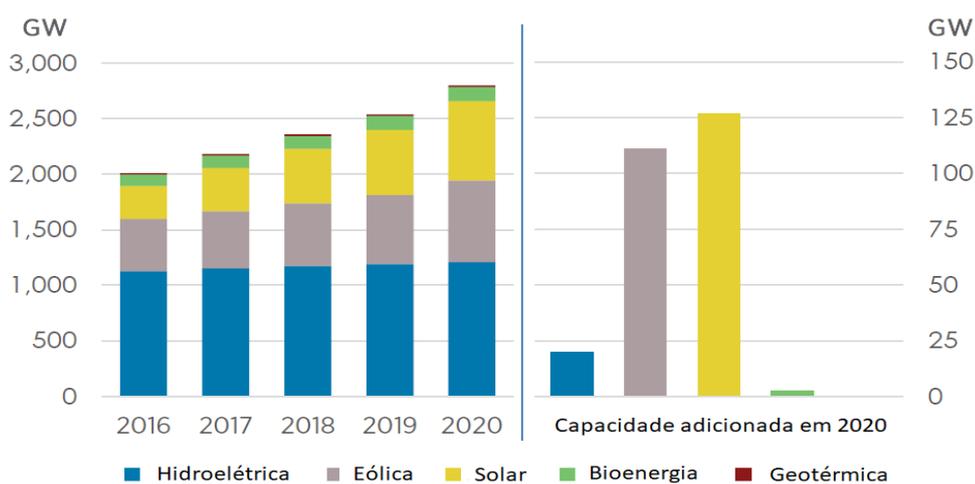


Fonte: Solarpower Europe, 2021. Adaptado pelo autor

A hidroeletricidade continua sendo a principal fonte renovável utilizada no mundo atualmente, com 43%, seguida da energia solar e a eólica empatadas em segundo lugar, ambas com 26%, além de outras fontes, que somadas perfazem 5% de capacidade instalada de

geração de energia. A Figura 6 apresenta o crescimento das fontes de energia renovável entre os anos de 2016 e 2020 no mundo. Em 2020 havia 2.799 GW de capacidade instalada advinda de fontes alternativas. A Figura 6 também apresenta o aumento da capacidade instalada apenas no ano de 2020, separada por tipo de fonte de geração. Nota-se um incremento considerável tanto na capacidade de geração de energia solar quanto da eólica adicionada naquele ano.

Figura 6: Crescimento de capacidade instalada das fontes renováveis.



Fonte: IRENA, 2021. Adaptado pelo Autor.

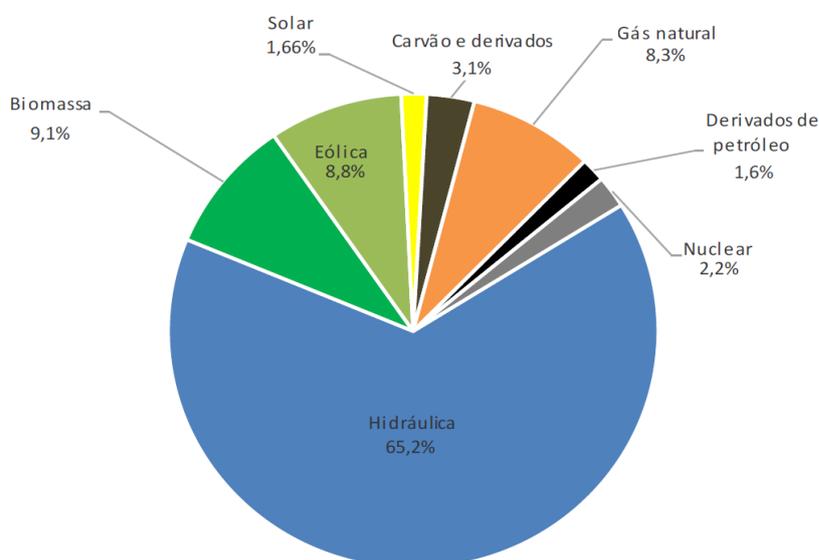
2.3 PANORAMA DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL

A tendência mundial em se aumentar a capacidade instalada de geração de energia solar FV também está presente no Brasil. Devido à sua posição geográfica no globo, o país recebe uma alta incidência de radiação solar, distribuída de maneira relativamente uniforme ao longo de sua extensão territorial. Tal característica permite a utilização de geração de energia solar FV em todas as regiões. O aumento da adoção desses sistemas de geração com o aumento da capacidade instalada ratifica os compromissos assumidos pelo Brasil na redução da emissão de gases estufa (EPE, 2020).

Apesar do potencial da energia solar no Brasil e do acelerado crescimento da implantação da capacidade instalada, este tipo de fonte renovável ainda corresponde a uma pequena fatia da estrutura da oferta de eletricidade no país, com menos de 2% do total, conforme observado na Figura 7. Devido ao baixo percentual atual da energia solar na matriz energética brasileira, existe uma excelente oportunidade de crescimento da participação da

energia solar no médio e longo prazo no país. Além disso, o Brasil detém uma das maiores reservas de silício no mundo, semicondutor que é matéria prima na produção de células fotovoltaicas para os painéis solares. A grande oferta de insumo disponível para a fabricação dos módulos fotovoltaicos garante uma boa vantagem competitiva no mercado.

Figura 7: Estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2020.



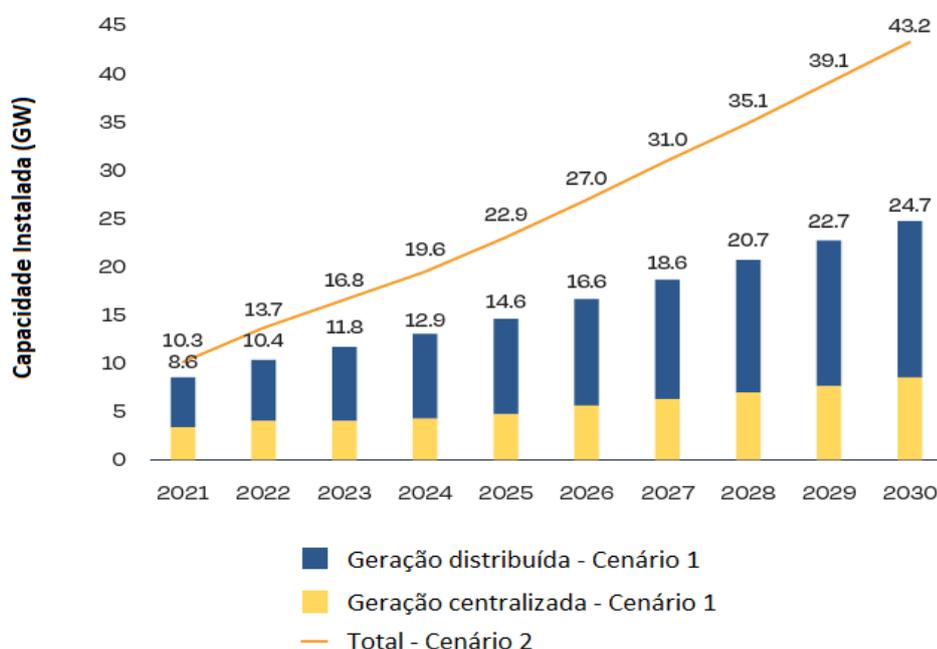
Fonte: EPE, 2021. Adaptado pelo autor

Em 2020, o Brasil atingiu uma capacidade instalada operacional de geração de energia solar fotovoltaica de 7.747,2 MW. A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) projetava, antes da pandemia de Covid-19, um incremento de mais de 4GW. Contudo, devido à crise sanitária e econômica global, o potencial de aumento da capacidade instalada ficou aquém do esperado, chegando a valores próximos a 3,2 GW. Mesmo assim, houve significativa evolução da tecnologia e implantação desses projetos no país, com um aumento de 49% em relação ao ano anterior. Desta forma, o Brasil entrou no *ranking* dos 10 países que mais contribuíram com o aumento da capacidade instalada no planeta no ano de 2020, sendo responsável por 2% das instalações no mundo (Solarpower Europe, 2021).

Ademais, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê que a capacidade instalada de geração de energia solar FV no Brasil no ano de 2030 pode chegar a valores entre 24,7 GW e 43,2 GW, de acordo com cenários pessimista (Cenário 1) e otimista (Cenário 2), respectivamente. A evolução da capacidade instalada projetada pela EPE está apresentada na Figura 8. A previsão anual da EPE de aumento na geração vai de 1,8 GW a 3,7 GW, em

média, entre os anos de 2021 e 2030, considerando tanto a geração distribuída quanto a centralizada (SOLARPOWER EUROPE, 2021).

Figura 8: Projeção capacidade instalada Energia solar FV 2021-2030 no Brasil.



Fonte: Solarpower Europe, 2021. Adaptado pelo autor

Considerando apenas a geração centralizada, a capacidade instalada projetada para 2050 no Brasil poderia chegar a valores da ordem de 90 GW. Isso corresponderia a uma parcela de 16% da capacidade instalada total da matriz elétrica brasileira, sendo responsável por até 12% da eletricidade gerada no país (EPE, 2020).

O crescimento do mercado no segmento de geração centralizada se deu devido à implantação de projetos vinculados ao edital Leilão de Energia Nova de 2017 do Governo Federal (SOLARPOWER EUROPE, 2021). Em 2021, um novo certame (Energia Nova A-5) foi realizado para buscar investimentos privados em projetos de energias renováveis, sendo captados cerca de 3 bilhões de reais distribuídos em 40 projetos, destes, 20 na área de energia solar FV, com um investimento de quase 1 bilhão de reais, nos Estados do Ceará, São Paulo e Piauí.

No ramo de geração distribuída, houve um aumento na capacidade instalada, em 2020, de 66% com relação ao ano anterior. Isso demonstra um forte crescimento neste setor, em virtude, principalmente de programas de compensação de energia elétrica para projetos até 5

MW, que aqueceram o segmento e favoreceram a busca por inovações tecnológicas e modelos de negócios na área de energia FV no Brasil (SOLARPOWER EUROPE, 2021).

2.3.1 ENERGIA SOLAR NAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR

Neste contexto de expansão da adoção da tecnologia FV no país, tanto as Universidades públicas quanto as privadas possuem um papel relevante. Seja no desenvolvimento da tecnologia, através da melhora na eficiência e redução nos custos dos sistemas, ou ainda difundindo e incentivando a utilização deste tipo de geração de energia elétrica.

A instalação de sistemas FV nos próprios terrenos ou edificações destes centros de ensino permite o monitoramento e controle da geração, além do estudo e análise da viabilidade dos painéis devido à proximidade de pesquisadores, servidores, docentes e discentes.

Pesquisas indicam viabilidade econômica na utilização de geração FV em instituições de ensino superior no Brasil, com investimentos que apresentam *payback* entre 4 e 10 anos e Taxa Interna de Retorno (TIR) entre 7 e 19% (OLIVEIRA, 2021; SILVEIRA *et al.*, 2019; COSTA; SANTOS, 2017; PERONDI, 2019; CASTRO *et al.*, 2020; FERREIRA, 2020).

Oliveira *et al.* (2021) afirmam que no ano de 2020, 35% das 69 Universidades federais no país possuíam sistemas de geração fotovoltaica instalados e 51% apresentavam algum tipo de iniciativa desta natureza. Não obstante, existe a tendência de incremento na capacidade instalada nas instituições de ensino, devido à necessidade da redução da utilização de recursos para pagamento de energia das concessionárias. Este tipo de despesa ainda é bastante relevante dentro do orçamento das Universidades brasileiras. Portanto, a economia de recursos advinda da redução das faturas de energia elétrica reduziria sobremaneira os custos operacionais dessas instituições. Além da redução dos custos, é fundamental que sejam fomentadas ações de sustentabilidade ambiental e eficiência energética nas IFES.

2.4 ASPECTOS LEGAIS SOBRE ENERGIA SOLAR NO BRASIL

O setor de eletricidade no Brasil é planejado de uma forma altamente centralizada e seu desenvolvimento é influenciado diretamente pelo governo federal. O governo é responsável por conduzir os leilões de energia e determinar o arcabouço regulatório vigente,

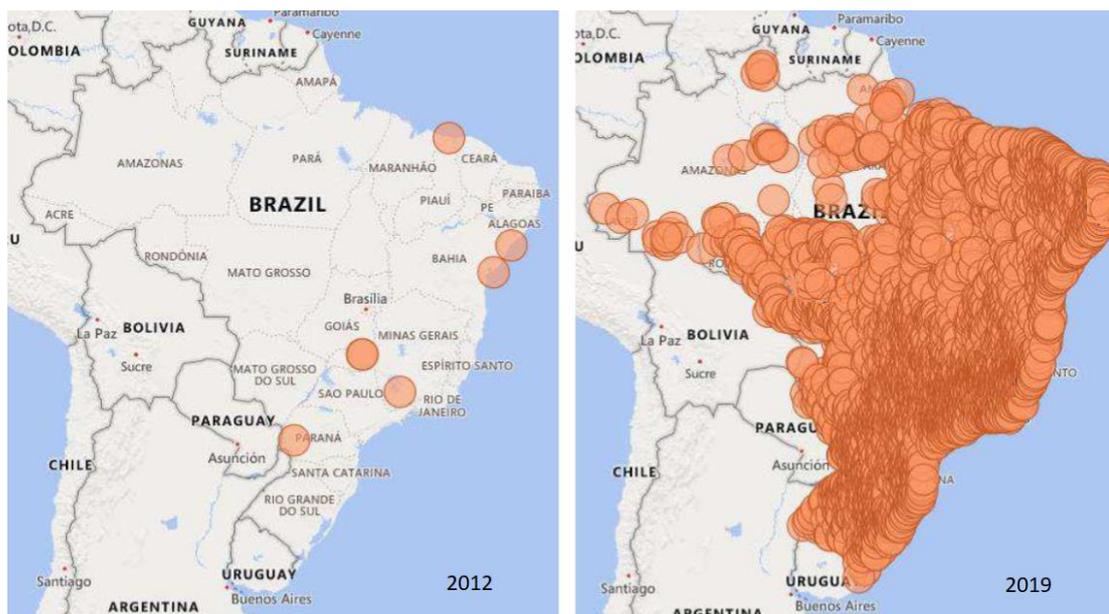
definindo desde a política tarifária empregada no país até a expansão e desenvolvimento deste mercado. De modo a garantir condições para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no país, indo ao encontro da tendência mundial no setor elétrico, o Brasil vem alterando sua base regulatória, comercial e operacional. Estas medidas fornecem condições para uma participação ativa dos consumidores no gerenciamento de seu consumo de energia (BOTELHO *et al.*, 2022).

A Lei 9.478/1997 instituiu a política energética nacional objetivando o aproveitamento racional das fontes de energia no Brasil, promover o desenvolvimento, ampliar o mercado de trabalho, atrair investimentos no setor energético e aumentar a competitividade do país no cenário internacional. Ademais, a lei também afirma a necessidade de conservação de energia e de incentivo a utilização fontes de energia alternativas (BRASIL, 1997).

A Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, atualizada posteriormente pela Resolução Normativa 687/2015, trouxe um avanço da regulamentação da geração distribuída no Brasil. Foram estabelecidas as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica fornecido pelas concessionárias no país. Foram definidos também os requisitos para o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012).

Conforme observado na Figura 9, a quantidade de pontos de geração distribuída ao redor de todo o território nacional aumentou substancialmente a partir do estabelecimento das normativas em 2012 até o ano de 2019. Vale ressaltar que a regulamentação em si pode não ser o único fator que explica este aumento (CORIOLANO *et al.*, 2020). Aspectos como o desenvolvimento tecnológico, capacidade técnica, e fatores econômico-sociais podem também justificar esta evolução. No entanto, um ambiente jurídico e de negócios propício e bem regulamentado tem papel importante no desenvolvimento tecnológico e no aumento da adoção deste tipo de sistema.

Figura 9: Evolução da quantidade de pontos de geração distribuída 2012-2019.



Fonte: Coriolano *et al.*, 2020

Em 2022 foi promulgada a Lei 14.300/2022, após ampla discussão no Congresso Nacional, desde o ano de 2019, quando foi instituído o marco legal da micro e minigeração distribuída. Foi criado o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), no qual a energia ativa gerada pela unidade consumidora com mini ou microgeração é injetada na rede da concessionária de energia local, trazendo benefícios para estas unidades. Outra medida criada foi o Programa de Energia Renovável Social (PERS), que busca investimentos para a instalação de sistemas fotovoltaicos e outras fontes de energia renováveis em comunidades de baixa renda. Este marco legal aumenta a segurança jurídica e propicia um ambiente de negócios mais favorável para a expansão destes sistemas, aumentando a participação da energia solar na matriz energética brasileira, aquecendo a economia e gerando oportunidades de emprego no país.

2.5 PAPEL DA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA NO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO PAÍS

O aumento da preocupação com o meio ambiente e com os efeitos das mudanças climáticas em todo o mundo ficou evidenciado na ocasião do Acordo de Paris em 2015. Nesta reunião, o Brasil firmou o compromisso de reduzir 43% de suas emissões de gases estufa até o ano de 2030, em comparação com as emissões de 2005 (MELIN, 2019). Ademais, segundo Holanda (2013), a Constituição da República de 1988 dispõe de princípios e normas que

devem balizar ações voltadas à ética ambiental, visando o desenvolvimento sustentável e a gestão racional dos recursos naturais no Brasil. Portanto, considerando os acordos internacionais assumidos e o próprio texto constitucional, o poder público no Brasil tem a obrigação de garantir aos cidadãos uma boa qualidade de vida em um meio ambiente ecologicamente equilibrado, através da adoção de políticas públicas voltadas à preservação ambiental e ao desenvolvimento sustentável do país.

A gestão energética de um país, em especial com relação ao setor elétrico, realizada pela administração pública pode ser feita através de três ferramentas: formulação de políticas públicas, planejamento energético e regulamentação do mercado, as quais devem ser implementadas e utilizadas de maneira complementar, visando uma maior eficiência energética (BAJAY, 2002). Os países líderes na geração de energia solar FV, notadamente China, Japão, Alemanha e Estados Unidos, possuem grandes programas de incentivos e subsídios para alavancar este mercado. No entanto, o Brasil ainda se encontra defasado nestas políticas. Então, é necessário melhorar e expandir os programas governamentais voltados à adoção desta tecnologia (MELIN, 2019).

As Instituições Federais de Ensino Superior (IFES) possuem grande importância no desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil. É prestado um serviço vital a toda a sociedade, através de ensino, pesquisa, extensão. Além disso, são fornecidos atendimentos essenciais à população, como por exemplo, a prestação de assistência à saúde realizada em Hospitais Universitários.

A gestão do patrimônio edificado, incluindo sua manutenção e conservação é responsabilidade da administração pública. Diante da complexidade e quantidade de imóveis pertencentes às IFES, é necessário que ocorram intervenções para a recuperação e manutenção de condições de desempenho das edificações, que muitas vezes encontram-se próximas ao seu final de ciclo de vida. Muitas edificações públicas não passaram, ao longo dos anos, por ações necessárias de manutenção predial, seja por dificuldades dos gestores públicos, ou ainda pela escassez de recursos destinados a este fim (OTTONI, 2021).

Haja vista as intervenções que se fazem necessárias para recuperar as edificações públicas, surge a oportunidade da adoção de soluções eficientes do ponto de vista energético, econômico e sustentáveis ambientalmente. Por exemplo, a implantação de sistemas de

captação de águas pluviais para reuso e a incorporação de painéis fotovoltaicos para a geração de energia são soluções que podem ser incluídas em um projeto de *retrofit* de uma edificação.

3 METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA A SELEÇÃO DOS LOCAIS

Inicialmente, será apresentado o Método AHP, suas principais características e forma de aplicação. Em seguida, será realizada a aplicação do método propriamente dita, e utilizada na elaboração deste estudo.

3.1 ANÁLISE MULTICRITÉRIO AHP – Processo Analítico de Hierarquia

A essência da tomada de decisão está na definição dos possíveis cenários e alternativas para um determinado problema, sendo necessário o agrupamento dos elementos envolvidos e sua classificação de maneira racional. Segundo Saaty (1994), o processo de tomada de decisão é realizado de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Estruturação do problema através de um modelo que apresente os elementos-chave deste problema e como eles se relacionam;
- 2) Promover o julgamento que reflita conhecimento, sentimentos ou emoções;
- 3) Representar estes julgamentos por meio de números;
- 4) Utilizar esses números para calcular as prioridades dos elementos dentro de uma hierarquia;
- 5) Sintetizar e determinar o resultado final;
- 6) Realizar uma análise de sensibilidade para verificar alterações no julgamento.

O método AHP foi proposto por Thomas Saaty na década de 1970. Trata-se de uma ferramenta de análise multicritério que auxilia os tomadores de decisão a lidarem com problemas complexos envolvendo diversos critérios conflitantes e subjetivos (ISHIZAKA *et al.*, 2012). O método possibilita classificar e definir a melhor alternativa dentre as selecionadas, segundo critérios e subcritérios avaliados de forma racional ou intuitiva (SAATY e VARGAS, 2012).

O Processo Analítico de Hierarquia, segundo Saaty e Vargas (2012) é uma teoria de medição, na qual são utilizadas escalas de proporção na comparação de critérios dentro de uma estrutura hierárquica multinível. Tais comparações podem ser feitas através da própria proporção dos valores medidos ou, de uma forma mais subjetiva, por meio de uma escala fundamental que reflete a força relativa de um critério comparado a outro, demonstrando a preferência e o sentimento do avaliador. Desta maneira, o método pode ser aplicado às mais diversas situações de decisão multicritério, desde o planejamento e alocação de recursos até mesmo na resolução de conflitos. Diante de tal flexibilidade de aplicações, a ferramenta

possui pelo menos três maneiras de se classificar as alternativas, segundo Saaty e Vargas (2012):

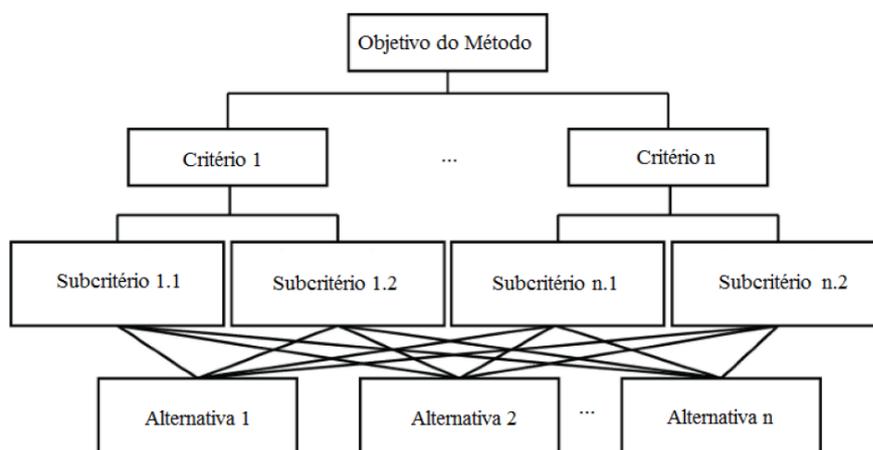
- 1) Relativa, classificando alternativas através de comparação par a par, utilizada em decisões exploratórias;
- 2) Absoluta, a qual classifica uma quantidade ilimitada de alternativas, uma a uma, analisadas mediante escalas de intensidade elaboradas para cada critério individualmente;
- 3) Referência (*Benchmarking*), que classifica as alternativas comparando-as a uma alternativa conhecida de referência.

De acordo com Khaira e Dwivedi (2018), a utilização do método AHP, em detrimento de outras técnicas multicritério, se deve principalmente aos seguintes motivos:

- Inclusão de critérios tanto objetivos quanto subjetivos para o julgamento da hierarquia;
- Possui um mecanismo efetivo para averiguar a consistência dos pesos definidos pelo avaliador;
- Possibilidade de sintetizar a pontuação de uma alternativa baseada em diversos critérios medidos de maneira heterogênea, através da normalização de seus valores;
- Comparação de dois elementos, sejam critérios ou alternativas, de cada vez, possibilitando um foco maior do avaliador e melhorando a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Segundo Saaty e Vargas (2012), a maneira mais simples de se estruturar um problema de tomada de decisão consiste na hierarquização em três níveis, conforme apresentado na Figura 10. No topo da estrutura está o objetivo da tomada de decisão, na camada intermediária estão os critérios e subcritérios propostos e, no último nível, as alternativas que serão avaliadas e classificadas de acordo com a prioridade dos critérios.

Figura 10: Estrutura do método AHP.



Fonte: Azevêdo, 2016

De maneira geral, o método AHP funciona através do desenvolvimento de prioridades para os critérios e alternativas selecionadas. A escolha dos critérios deve ser feita pelo avaliador, ou tomador de decisão, que deverá ponderá-los de acordo com escalas, que podem variar desde medidas objetivas como peso e comprimento até conceitos subjetivos que, para os quais deverão ser criadas escalas para sua comparação. Inicialmente, a prioridade é definida a partir da relevância dos critérios quanto ao atingimento do objetivo, comparados par a par. Em seguida o vetor prioridade deve ser aplicado às alternativas com relação a cada um dos critérios. Por fim, é realizada a classificação das alternativas de acordo com sua adequabilidade final com relação ao objetivo (SAATY e VARGAS, 2012).

A metodologia AHP possui sete pilares, conforme Saaty e Vargas (2012):

- 1) Escalas de razão, proporcionalidade e escalas normalizadas são fundamentais para a síntese das prioridades dos critérios de modo a uniformizar a avaliação;
- 2) Comparações recíprocas par a par, baseadas na escala fundamental de Saaty, apresentada na Tabela 2, que formará o vetor de prioridades, o qual indica a hierarquia de cada elemento com relação aos demais. Na avaliação dos critérios através da escala fundamental podem ser utilizados valores intermediários, de modo a melhorar a precisão no julgamento entre dois graus de importância adjacentes;
- 3) Sensibilidade do autovetor principal, determinando a importância de um critério na classificação das alternativas;
- 4) Homogeneização e agrupamento, podendo ser ampliada a escala de acordo com a necessidade;

- 5) Síntese das escalas de classificação, para a criação de uma escala unidimensional para representação do resultado final;
- 6) Preservação e inversão da classificação;
- 7) Integração criteriosa de julgamentos para o caso de um grupo de avaliadores.

Tabela 2: Escala Fundamental de Saaty

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Igual Importância	As duas atividades contribuem igualmente ao objetivo
3	Importância Moderada	Uma atividade tem leve vantagem com relação à outra
5	Importância Forte	Uma atividade tem forte vantagem com relação à outra
7	Importância Muito Forte ou demonstrada	Uma atividade tem vantagem muito forte ou demonstrada na prática com relação à outra
9	Importância Extrema	Uma atividade tem vantagem absoluta com relação à outra
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários	Caso a avaliação esteja entre dois graus de importância adjacentes

Fonte: adaptado de Saaty e Vargas (2012)

Após a definição do objetivo da tomada de decisão e dos critérios que serão utilizados para avaliar as alternativas, é feita a comparação dos critérios par a par através da Escala Fundamental de Saaty. Nesta etapa, é verificado o grau de importância que um critério apresenta com relação a outro, considerando a perspectiva do avaliador. O julgamento da importância gera a matriz de comparação dos critérios. A matriz é quadrada de ordem n , referente ao número de critérios selecionados:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Onde C_1 a C_n corresponde aos critérios e a_{ij} às avaliações de cada par. Cabe ressaltar que a diagonal principal da matriz sempre terá seus elementos equivalentes a 1, pois um

critério comparado com ele mesmo tem igual importância. Assim, para manter a coerência, uma avaliação a_{ij} deve ser igual a $1/a_{ji}$ dentro da matriz.

A etapa seguinte após a elaboração da matriz de comparação é a determinação da prioridade dos critérios, correspondente ao peso de cada critério que será aplicado posteriormente às alternativas. Para tal, pode ser utilizada uma matriz auxiliar B em que os elementos da matriz de comparação são normalizados. Cada elemento da matriz A é dividido pela soma (S_1 a S_n) dos julgamentos de cada coluna da matriz principal A:

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11}/S_1 & a_{12}/S_2 & \dots & a_{1n}/S_n \\ a_{21}/S_1 & a_{22}/S_2 & \dots & a_{2n}/S_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}/S_1 & a_{n2}/S_2 & \dots & a_{nn}/S_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

O vetor de prioridade w é formado calculando-se a média da soma das linhas da matriz auxiliar normalizada. A soma dos valores do vetor w deve ser sempre igual a 1. O vetor w é dado por:

$$w = \begin{bmatrix} w_{j1} \\ w_{j2} \\ \vdots \\ w_{jn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

O elemento w_{jn} é calculado através de:

$$w_{jn} = \left(a_{n1}/S_1 + a_{n2}/S_2 + \dots + a_{nn}/S_n \right) / n \quad (4)$$

De modo a verificar a coerência do avaliador no julgamento dos critérios par a par, deve ser procedida a análise de consistência da matriz. Esta verificação, segundo Saaty e Vargas (2012), se dá através do indicador Razão de Consistência, calculado por:

$$RC = IC/CR \quad (5)$$

Onde IC é o índice de consistência da matriz e CR é o índice de consistência randômico. CR é obtido através da Tabela 3 e seus valores dependem da ordem da matriz (n), mesmo valor do número de critérios adotado.

Tabela 3: Escala Fundamental de Saaty para CR

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Saaty e Vargas, 2012. Adaptado pelo autor

O Índice de Consistência da matriz de comparações é calculado de acordo com:

$$IC = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (6)$$

Onde λ_{max} é o maior autovetor da matriz, calculado por:

$$\lambda_{max} = \frac{\left[\frac{Z_1}{w_{j1}} + \frac{Z_2}{w_{j2}} + \dots + \frac{Z_n}{w_{jn}} \right]}{n} \quad (7)$$

Os valores de Z_n são calculados através de:

$$Z_n = a_{n1} \cdot w_{j1} + a_{n2} \cdot w_{j2} + \dots + a_{nn} \cdot w_{jn} \quad (8)$$

O resultado de RC deve ser menor que 0,1, indicando que o julgamento dos critérios foi feito de maneira satisfatória. Caso o valor seja maior que 0,1, a avaliação par a par dos critérios deverá ser refeita devido à falta de consistência no julgamento.

3.2 ESTRUTURA DO MÉTODO

O foco principal deste trabalho é a elaboração de um procedimento para a avaliação dos locais para a implantação de projetos de geração de energia elétrica distribuída através da instalação de painéis fotovoltaicos, conectados à rede elétrica, em edificações públicas na cidade do Rio de Janeiro. Cabe ressaltar que esta análise é limitada apenas a uma das etapas de um projeto desta natureza, podendo compor o Estudo Preliminar de uma contratação. Além dos locais mais adequados, devem ser elaborados os projetos técnicos com as especificações dos componentes do sistema: módulos fotovoltaicos, inversores, medidores, sistemas de

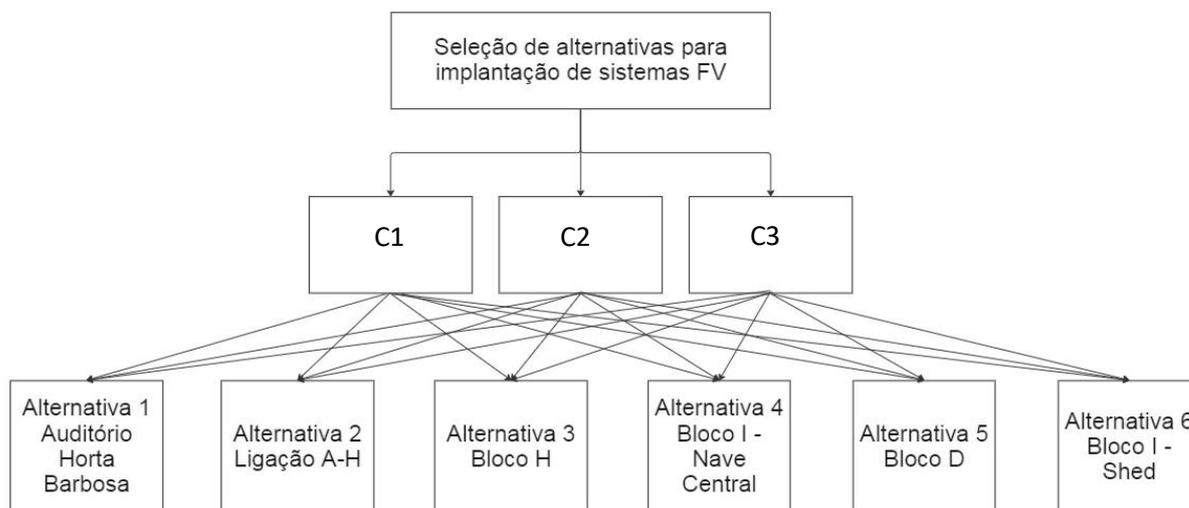
instalação, suporte e fixação à estrutura, dentre outros. De modo a garantir o sucesso do projeto, também deve ser conduzida uma análise de viabilidade econômica, baseado no histórico de consumo das edificações e tempo de retorno do investimento.

O processo seguirá a seguinte sequência metodológica. Inicialmente serão propostos os critérios para a avaliação dos locais de instalação dos painéis FV e a forma de apreciação destes. Em seguida, será realizada a avaliação destes critérios par a par, de modo a definir seus pesos e formar o vetor de prioridade, aplicando a metodologia AHP de análise multicritério.

Será apresentada uma escala de classificação para cada critério, a ser aplicada posteriormente às alternativas de localizações selecionadas, gerando uma classificação final quanto à adequabilidade para a implantação de um projeto de geração de energia FV. A aplicação dos critérios às alternativas é ponderada pelo vetor de prioridade dos critérios a fim de definir a hierarquia global. Todos os cálculos serão realizados por meio do *software* Microsoft Excel. Serão indicadas também diretrizes para auxiliar na escolha das alternativas que serão comparadas pelo método. O fluxograma da Figura 11 apresenta a estrutura hierárquica do método proposto, de acordo com a metodologia AHP.

Finalmente, será realizada uma análise da alternativa selecionada. O perfil de consumo de eletricidade anual do complexo edificado é apresentado. Será proposta uma configuração de um sistema fotovoltaico para um eventual projeto, utilizando as características do local selecionado. De acordo com o potencial de geração de eletricidade produzido pelo sistema, será estimada a capacidade de economia energética e de emissões de CO₂ ao longo de sua vida útil. O sistema proposto e o cálculo de emissões serão definidos com o auxílio do *software* *PVsystem*.

Figura 11: Estrutura do método.



Fonte: Autor

Resumidamente, as etapas de desenvolvimento deste estudo são apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4: Etapas de desenvolvimento do estudo.

Etapa	Descrição
1	Definição do objetivo alvo da análise multicritério
2	Definição dos critérios e escala de classificação para cada critério
3	Avaliação par a par dos critérios e definição das prioridades
4	Cálculo do índice de consistência
5	Definição das alternativas de projeto
6	Aplicação das prioridades e escala de classificação de cada critério às alternativas
7	Classificação e seleção da alternativa mais bem avaliada
8	Análise da alternativa selecionada

Fonte: Autor

3.3 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS

Muitos critérios encontrados na literatura não se aplicam diretamente ao objeto deste trabalho, pois são voltados a níveis macro, isto é, a seleção de locais considerando municípios, estados ou países para a implantação de grandes usinas solares, com extensas áreas e em locais distantes entre si. Este trabalho visa determinar as localizações ótimas

dentro de um mesmo complexo edificado, ou seja, alguns parâmetros como, por exemplo, temperatura, inclinação, distância até rodovias, dentre outros, são praticamente constantes ou tem pouca variação. O alvo da metodologia proposta é a obtenção de parâmetros que possam ser avaliados de maneira simples e objetiva.

Nesta conjuntura, são propostos três critérios. São abordados aspectos considerados relevantes para a determinação de um local ótimo para a implantação de painéis FV, como a irradiação solar, a área de cobertura disponível para a instalação dos módulos ou painéis e a robustez estrutural da cobertura.

3.3.1 CRITÉRIO 1 – C1

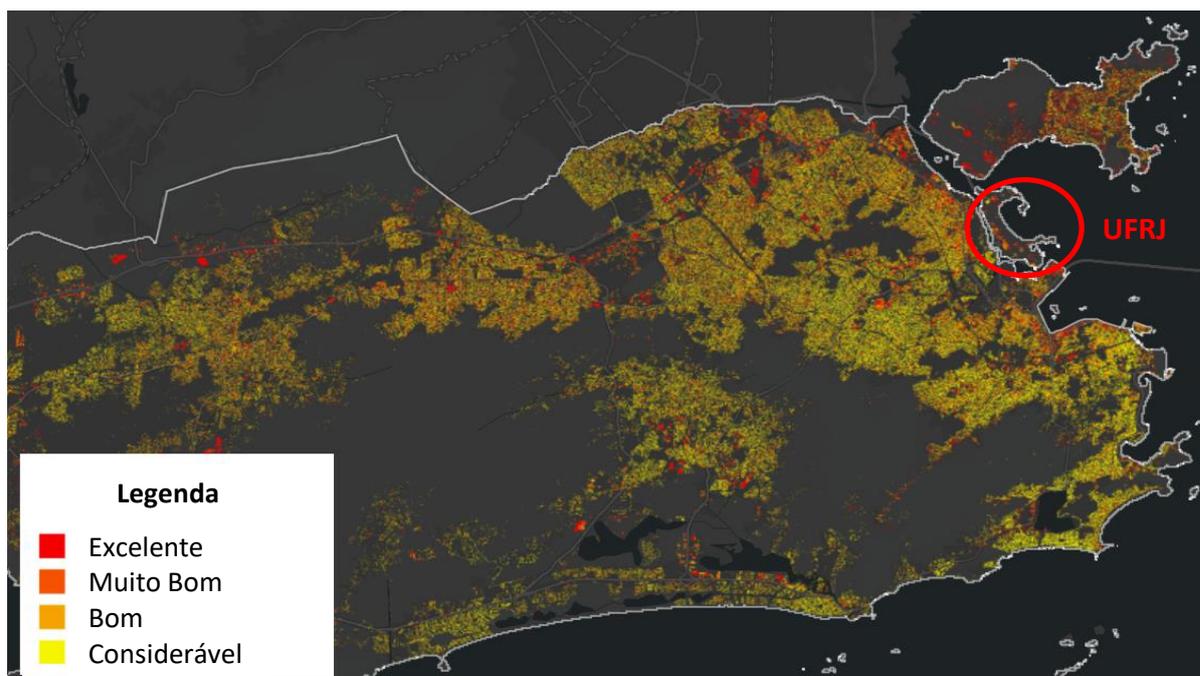
A irradiação solar é utilizada amplamente em trabalhos cujo objetivo seja a determinação de locais ótimos para a implantação de usinas fotovoltaicas, fornecendo informações relevantes quanto à capacidade de geração de eletricidade pelo sistema FV. A capacidade de geração de determinado sistema FV é diretamente proporcional à irradiação solar que incide na cobertura onde os painéis são instalados. Então, quanto maior for a irradiação, maior será a redução na emissão de CO₂ e maior retorno energético do investimento (THEBAULT *et al.*, 2020). Segundo Al Garni e Awasthi (2018), a irradiação solar é um critério essencial para projetos de geração de energia solar, pois possibilita uma maior produção de energia elétrica em uma mesma área.

A forma de obter este critério será por meio do Mapa Solar do Rio de Janeiro. Este aplicativo foi criado a partir de estudos de mapeamento do potencial de geração de energia fotovoltaica nos telhados das edificações. A ferramenta foi desenvolvida pela empresa TerraGIS Geoprocessamento e Consultoria Ltda, utilizando a tecnologia SIG e os estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Governo Federal. Também participaram do desenvolvimento a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável e a Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços do Governo do Estado do Rio de Janeiro (SEDEIS). Os dados espaciais da cidade foram fornecidos pelo Instituto Pereira Passos, da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.

O Mapa Solar do Rio de Janeiro faz parte do Programa Rio Capital da Energia, que visa fomentar o debate sobre as fontes renováveis de energia e eficiência energética na sociedade, tornando o Estado do Rio de Janeiro um centro de referência em inovação tecnológica, eficiência energética e sustentabilidade ambiental. A metodologia utilizada na

elaboração da ferramenta é apresentada no ANEXO I. Na Figura 12 é possível observar o mapeamento das edificações existentes na cidade do Rio de Janeiro. As áreas são classificadas de acordo com o potencial solar no inverno, por se tratar da situação mais desfavorável. No site do aplicativo, o mapa completo está disponível para consulta de acordo com o nível de detalhamento e escala necessários para cada projeto. Um potencial excelente corresponde a um valor maior que 95% de irradiação, muito bom, maior que 85%, bom, acima de 70% e considerável abaixo de 70%.

Figura 12: Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: Mapa Solar. Adaptado pelo autor

A Tabela 5 apresenta a escala de classificação para o Critério 1. Foram atribuídos os seguintes conceitos: 9 para um nível excelente de irradiação, 7 para muito bom, 5 para bom, 3 para um nível considerável e 1 para ruim.

Tabela 5: Escala de classificação para C1

Irradiação	Peso
Excelente	9
Muito bom	7
Bom	5
Considerável	3
Ruim	1

Fonte: Autor

3.3.2 CRITÉRIO 2 – C2

Outro fator bastante relevante na escolha de um local ótimo para a implantação de um sistema FV em uma edificação é a área total plana disponível em sua cobertura. O potencial de geração de energia elétrica, assim como o custo de instalação, é diretamente proporcional à quantidade de módulos fotovoltaicos instalados em cada sistema, ou seja, quanto maior a área de cobertura disponível, ainda que os custos de implantação do projeto e manutenção sejam maiores, maior será a produção de energia, gerando uma economia maior com a aquisição da eletricidade da concessionária. As vantagens econômicas em se instalar usinas fotovoltaicas maiores se devem também ao ganho de escala na aquisição de um número superior de módulos solares, reduzindo desta forma, proporcionalmente, o custo fixo relativo aos equipamentos que compõe o sistema.

Ainda que o sistema instalado na cobertura não ocupe toda a área disponível, devido à necessidade de espaços livres para o acesso visando à manutenção e para evitar o efeito de sombreamento entre os painéis, a área ocupada pelo sistema pode ser considerada um percentual da área total. Como esta redução seria aplicada de maneira semelhante e proporcional a todas as alternativas, não haveria diferença no resultado final. Portanto, foi adotada esta simplificação.

Os pesos foram atribuídos de acordo com faixas de valores das áreas de cobertura, ou seja, quanto maior for a área disponível para a instalação de painéis, maior será a geração de energia e, potencialmente, menores os custos associados à implantação do projeto devido a ganhos de escala. A graduação de pesos adotada para a aplicação do critério é apresentada na Tabela 6. Na hipótese de se aplicar este método a outro complexo edificado, as faixas de valores adotadas para avaliação deste critério podem ser ajustadas de acordo com as áreas disponíveis, considerando as alternativas selecionadas.

Tabela 6: Escala de classificação para o C2

Área	Peso
Acima de 5.000m ²	9
Entre 4.000 e 5.000m ²	7
Entre 3.000 e 4.000m ²	5
Entre 2.000 e 3.000m ²	3
Abaixo de 2.000 ²	1

Fonte: Autor

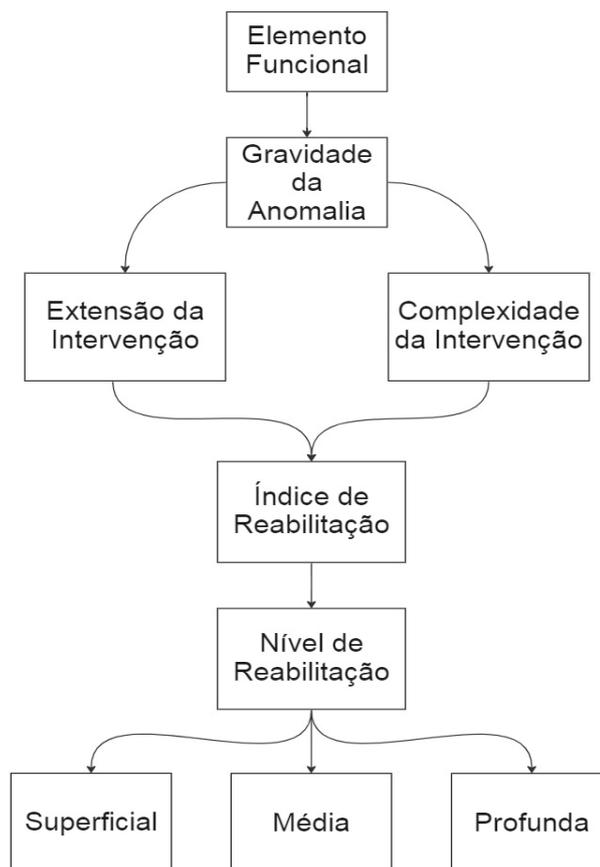
3.3.3 CRITÉRIO 3 – C3

Segundo Thebault *et al.* (2020), um fator que pode impactar de maneira significativa um projeto de geração fotovoltaica é a robustez estrutural da cobertura de uma edificação, em que, dependendo do tipo de cobertura e seu grau de deterioração, uma carga adicional advinda da instalação do sistema FV poderia inviabilizar todo o projeto, podendo ser necessária a adoção de estruturas de fixação e painéis mais leves ou, ainda, um reforço estrutural. Em contrapartida, quanto melhor for o estado de conservação de uma cobertura, mais apta esta estará para receber as instalações dos painéis, pois menores serão os níveis de complexidade e extensões das intervenções necessárias para sua recuperação.

A robustez estrutural de uma edificação está intimamente relacionada ao seu nível de reabilitação, ou seja, quanto menor for a necessidade de se recuperar ou reabilitar uma estrutura, maior será sua robustez.

De acordo com Oliveira (2013), o nível de reabilitação de um determinado elemento funcional depende da ocorrência das anomalias observadas através de inspeções visuais. Essas anomalias devem ser julgadas a partir de sua gravidade, considerando sua extensão e a complexidade de uma eventual intervenção para que se recupere o nível de desempenho deste elemento. A Figura 13 apresenta um fluxograma para a definição do nível de reabilitação de um edifício.

Figura 13: Definição do nível de reabilitação.



Fonte: Oliveira, 2013. Adaptado pelo Autor

Ainda segundo Oliveira (2013), as anomalias podem ser de conservação ou desempenho. São de conservação quando ocorre um desgaste natural de um elemento construtivo devido ao seu envelhecimento sem que tenha havido intervenções de manutenção para a conservação necessária. Já as de desempenho ocorrem quando um elemento passa a não ser considerado adequado para satisfazer as necessidades dos usuários, sendo requerida uma alteração na solução empregada.

Para a definição do terceiro critério proposto neste trabalho, serão consideradas as anomalias de conservação, isto é, patologias observadas nas estruturas relacionadas ao desgaste que necessitam de recuperação para o retorno ao seu desempenho original, não prevendo a alteração do tipo de estrutura ou solução empregada, pois, para tanto, outros fatores mais complexos deveriam ser considerados.

O cálculo do nível de reabilitação será feito utilizando como base o “Método de avaliação das necessidades e prioridades de reabilitação de edifícios de Instituições Federais de Ensino Superior – REAB-IFES”, proposto por Oliveira (2013). Este método avalia o

estado de conservação dos edifícios através de levantamentos realizados por meio de inspeções visuais, definindo prioridades para eventuais intervenções para que seja feita a recuperação do nível de desempenho adequado e satisfação do usuário.

O Nível de Reabilitação é calculado a partir do Índice de Reabilitação (IR). Para a obtenção do valor de IR é necessário que se avalie tanto a extensão das anomalias, quanto o grau de complexidade de uma intervenção, para que se recupere o desempenho de um elemento funcional. A extensão da intervenção considera a área impactada pelas anomalias com relação a área total da cobertura, sendo obtido um valor para E_i , de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7: Determinação da extensão da intervenção

	Localizada	Média	Extensa	Total
Extensão da intervenção	Anomalias que afetam pontualmente o elemento funcional, com extensão não superior a 25%	Anomalias que afetam áreas limitadas do elemento funcional, com extensão entre 26% e 50%	Anomalias que afetam grandes áreas do elemento funcional, com extensão entre 51% e 75%	Anomalias que afetam quase a totalidade do elemento funcional, com extensão superior a 75%
E_i	0,25	0,50	0,75	1,00

Fonte: Adaptado de Oliveira (2013)

Já a complexidade da intervenção diz respeito ao nível de dificuldade empregado em um eventual serviço ou obra realizados para a reabilitação da cobertura do edifício. Esta intervenção pode ser simples, média ou difícil. As características de cada nível de complexidade, bem como o valor correspondente de C_i são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Determinação da Complexidade da intervenção

	Simple	Média	Difícil
Complexidade da intervenção	Trabalhos realizados em uma única operação com intervenção de apenas uma especialidade	Trabalhos realizados em várias operações que necessitam de várias especialidades	Trabalhos de reabilitação ou reforço tecnicamente complexos, envolvendo a aplicação de procedimentos, materiais e/ou tecnologias não correntes
	Trabalhos de limpeza, pintura ou reabilitação superficial dos elementos construtivos	Trabalhos que requerem a demolição de revestimentos para proceder a intervenção e sua posterior reconstrução	Trabalhos de construção de um elemento funcional necessário à satisfação das exigências funcionais
	Trabalhos envolvendo a demolição ou remoção do elemento funcional sem sua posterior reconstrução	Trabalhos com custos inferiores aos da construção nova do elemento funcional	Trabalhos em que o estado do elemento justifica a demolição ou remoção e sua posterior reconstrução
	Trabalhos com custos muito inferiores aos da construção nova do elemento funcional		Trabalhos com custos semelhantes ou superiores aos da construção nova do elemento funcional
C_i	0,4	0,8	1,2

Fonte: Adaptado de Oliveira (2013)

Otoni (2021) propõe uma alteração do método REAB-IFES, incluindo no cálculo do índice de reabilitação um peso referente à gravidade das anomalias observadas. A Tabela 9 apresenta o tipo de anomalia, sua descrição e o fator multiplicador que inclui a ponderação da gravidade.

Tabela 9: Tipo de anomalias e fator de ponderação da gravidade

Gravidade da Anomalia	Superficial	Média	Grave
	Anomalias que prejudicam o aspecto visual do elemento funcional	Anomalias que prejudicam o uso e/ou desempenho	Anomalias que colocam em risco a saúde e/ou a segurança dos usuários
Fator (G)	0,33	0,66	1,00

Fonte: Adaptado de Oliveira (2013) e Ottoni (2021)

Desta forma, o Índice de Reabilitação é calculado através de (9).

$$IR = G \cdot E_i \cdot C_i \cdot 100 \quad (9)$$

Onde:

G – Gravidade da anomalia;

E_i – Extensão da intervenção;

C_i – Complexidade da intervenção;

O nível de reabilitação de um elemento funcional, no caso deste trabalho a cobertura da edificação, é determinado pelo IR, de acordo com a escala apresentada na Tabela 10. Também são apresentadas as características de cada tipo de reabilitação, a saber: superficial, média ou profunda.

Tabela 10: Nível de Reabilitação

Índice de Reabilitação	IR < 13,2	13,2 ≥ IR > 39,6	39,6 ≤ IR
Nível de Reabilitação	Reabilitação Superficial	Reabilitação Média	Reabilitação Profunda
Características	Necessidade de reparo nos revestimentos, pequenas recuperações em instalações e reparos localizados com reduzida complexidade	Necessidade de substituição de revestimentos, reparo e criação de novas instalações e recuperação, substituição ou reforço localizado de elementos construtivos	Necessidade de reparo, substituição ou reforço de elementos construtivos, envolvendo grandes extensões e soluções complexas

Fonte: Adaptado de Oliveira (2013) e Ottoni (2021)

A Tabela 11 apresenta a escala de classificação adotada para julgar o critério 3, de acordo com sua robustez estrutural. É avaliada a condição que se encontra a cobertura da

edificação conforme análise visual conduzida pelo avaliador, conforme os critérios de gravidade, extensão das anomalias e complexidade de uma eventual intervenção, componentes considerados no cálculo do Índice de reabilitação (IR). A identificação de anomalias e patologias nas coberturas dos prédios, bem como o grau de importância destas e o nível de complexidade que uma intervenção para a reabilitação da cobertura, são fatores que impactam diretamente no aspecto da robustez estrutural de um edifício.

Tabela 11: Escala de classificação para o critério técnico

Índice de Reabilitação	Peso
Excelente ($IR \leq 10$)	9
Bom ($10 < IR \leq 20$)	7
Regular ($20 < IR \leq 30$)	5
Ruim ($30 < IR \leq 40$)	3
Muito Ruim ($IR > 40$)	1

Fonte: Autor

3.4 AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS – CÁLCULO DA PRIORIDADE

A avaliação considerou o critério C3, referente à robustez estrutural, como o mais importante. Uma cobertura que necessite ser submetida a uma ampla recuperação pode inviabilizar qualquer projeto executado sobre a mesma. Este critério foi avaliado com um grau 4 de importância com relação ao critério C1 (irradiação) e com um grau 2 referente ao critério C2 (área). O critério C2 foi considerado como de importância moderada com relação a C1, ou seja, aquele critério possui leve vantagem quando comparado a este. As avaliações foram realizadas conforme o nível de importância apresentado na Escala Fundamental de Saaty (Tabela 2). A Tabela 12 reflete o julgamento par a par dos critérios, considerando a avaliação do autor deste trabalho, conforme método AHP apresentado no item 2.6 desta dissertação, considerando valores intermediários de julgamento, conforme Tabela 2.

Tabela 12: Avaliação par a par dos critérios

Crítérios	C1	C2	C3
C1	1	1/3	1/4
C2	3	1	1/2
C3	4	2	1
Soma	8,00	3,33	1,75

Fonte: Autor

A prioridade, isto é, a importância de cada critério na avaliação global, é calculada através da tabela auxiliar apresentada na Tabela 13. O critério C1 apresentou 12,3%, C2, 32% e C3, 55,7% de importância na avaliação.

Tabela 13: Tabela auxiliar

Critérios	C1	C2	C3	Prioridades
C1	$(1/8)=0,125$	$(0,333/1,333)=0,100$	$(0,25/1,750)=0,143$	$(0,125+0,100+0,143)/3=0,123$
C2	$(3/8)=0,375$	$(1/3,333)=0,300$	$(0,5/1,750)=0,286$	$(0,375+0,300+0,286)/3=0,320$
C3	$(4/8)=0,500$	$(2/3,333)=0,600$	$(1/1,750)=0,571$	$(0,500+0,600+0,571)/3=0,557$

Fonte: Autor

3.5 RAZÃO DE CONSISTÊNCIA

Para o cálculo da Razão de Consistência (RC) são necessários os valores de IC e CR. CR é um valor extraído da Tabela 3. Para uma matriz de ordem 3, CR é igual a 0,52.

O valor de IC é calculado através da Equação 3 e depende de λ_{max} :

$$\lambda_{max} = \frac{\left[\frac{(1 \times 0,123 + 0,333 \times 0,320 + 0,25 \times 0,557)}{0,123} + \frac{(3 \times 0,123 + 1 \times 0,320 + 0,5 \times 0,557)}{0,320} + \frac{(4 \times 0,123 + 2 \times 0,320 + 1 \times 0,557)}{0,557} \right]}{3} = 3,018$$

Então,

$$IC = \frac{(3,018 - 3)}{(3 - 1)} = 0,009$$

Logo,

$$RC = \frac{0,009}{0,52} = 0,017$$

A Razão de Consistência do julgamento dos critérios, calculada de acordo com as equações apresentadas no item 2.6 deste trabalho, forneceu um valor de 0,017. O valor de RC calculado é inferior ao limite de 0,1 preconizado por Saaty para uma matriz de ordem 3. Por atender ao limite, a avaliação realizada pode ser considerada coerente e satisfatória.

3.6 SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS

A escolha das coberturas de um complexo edificado que servirão de alternativas para a aplicação do método proposto deve seguir algumas diretrizes, de modo a otimizar a viabilidade de uma futura contratação de um projeto de geração FV, realizando uma pré-seleção e uma filtragem inicial dos locais candidatos a alternativas. Preliminarmente, deve ser realizado um levantamento de todas as coberturas das edificações, fazendo-se valer de ferramentas como Google Maps, Google Earth, *softwares* de SIG, além da consulta às plantas baixas das edificações e visitas técnicas aos locais.

Outras diretrizes que podem auxiliar o tomador de decisão na seleção das alternativas são apresentadas a seguir:

- Grandes áreas disponíveis nas coberturas, tanto em telhados quanto em lajes planas;
- Presença de pouca ou nenhuma interferência, como por exemplo, antenas, reservatórios d'água, etc;
- Superfícies regulares;
- Locais com pouco sombreamento;
- Locais com facilidade de acesso para futuras manutenções no sistema;
- Facilidade de acesso à rede elétrica de entrada para conexão do sistema.

Optou-se por não incluir a instalação de painéis FV em fachadas, pois, apesar de ser uma solução prevista na literatura, a solução convencional de instalação do sistema nas coberturas das edificações é a principal forma utilizada no mercado, sendo um método mais consolidado e com uma maior simplicidade de configuração e manutenção do sistema, que a alternativa em fachadas.

3.7 APLICAÇÃO DAS PRIORIDADES E ESCALA DE CLASSIFICAÇÃO

Uma vez selecionadas as alternativas de locais que passarão pela análise, elabora-se uma tabela para que cada uma das alternativas seja pontuada conforme a escala de classificação dos critérios. A pontuação de cada alternativa será ponderada pela prioridade do critério já calculada através da Equação 1. A coluna Totais representa a soma das avaliações ponderadas pela prioridade de cada critério para cada alternativa, conforme (10).

$$T_n = a_{n1} \cdot w_{j1} + a_{n2} \cdot w_{j2} + a_{nn} \cdot w_{jn} \quad (10)$$

Onde n é o número da alternativa, a é a pontuação da alternativa para cada critério e w é o vetor de prioridades.

A prioridade das alternativas, expressa em porcentagem, é calculada através da normalização dos dados, ou seja, o Total de cada alternativa é dividido pela soma dos valores Totais, de acordo com:

$$P_n = T_n / T \quad (11)$$

Onde:

$$T = T1 + T2 + \dots + T_n \quad (12)$$

A Tabela 14 apresenta os resultados do método. Após a realização de todos os cálculos, as alternativas são classificadas de acordo com sua prioridade, em ordem decrescente. Os valores numéricos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 14: Consolidação da avaliação das alternativas e cálculo das prioridades

Alternativas	C1	C2	CN	Totais	Prioridades
	w_{j1}	w_{j2}	w_{jn}		
A1	a_{11}	a_{12}	a_{1n}	T1	P1
A2	a_{21}	a_{22}	a_{2n}	T2	P2
AN	a_{n1}	a_{n2}	a_{nn}	T3	P3

Fonte: Autor

4 ESTUDO DE CASO

4.1 CARACTERÍSTICAS DO CENTRO DE TECNOLOGIA DA UFRJ

O Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro está localizado na Cidade Universitária e abriga, principalmente, os cursos de Engenharia da Universidade, nos níveis de graduação e pós-graduação. Além do ensino, o CT possui quase trezentos laboratórios de ponta, referências no desenvolvimento tecnológico no país nas áreas da indústria do petróleo, petroquímica, química, além de diversos ramos da engenharia.

As principais unidades que compõem o Centro são a Escola Politécnica, Escola de Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Núcleo Interdisciplinar de Desenvolvimento Social (NIDES), Instituto de Macromoléculas (IMA), além dos Institutos de Física, Química e Matemática. Em 2020 o Centro de Tecnologia completou 50 anos de existência, ao passo que, no mesmo ano, a UFRJ chegou aos 100 anos. A Figura 14 apresenta a entrada principal do CT.

Figura 14: Entrada do Centro de Tecnologia da UFRJ.

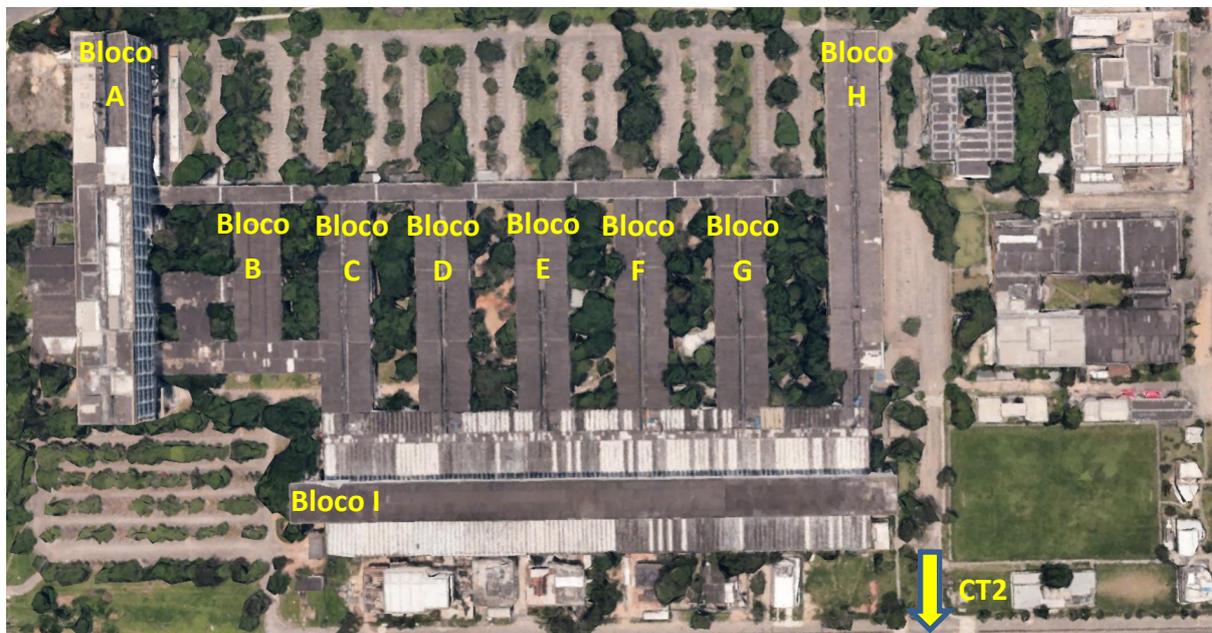


Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

O complexo edificado do Centro de Tecnologia da UFRJ é composto por 17 blocos denominados de A até Q, sem contar com o complexo do CT2, sendo alvo de diversas ampliações ao longo dos anos, desde sua inauguração na década de 1970. O CT1 possui uma

área construída de aproximadamente 176.000 m², enquanto o CT2 tem 12.000 m². A Figura 15 apresenta uma vista aérea de satélite que mostra todo o conjunto edificado do CT1.

Figura 15: Vista aérea do Centro de Tecnologia da UFRJ.



Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

Apesar de sua relevância no contexto do ensino e pesquisa no Brasil e no Mundo, as edificações que compõem o CT1, encontram-se, de maneira geral, em estágio avançado de deterioração. Principalmente os sistemas de cobertura e impermeabilização, em razão, majoritariamente, do fim de sua vida útil e falta de manutenção ao longo dos anos. Por este motivo, é necessário o planejamento de intervenções para recuperar o patrimônio edificado da UFRJ, em especial do Centro de Tecnologia, realizando o *retrofit* de suas estruturas e coberturas.

Existe, portanto, uma boa oportunidade de incorporação de soluções sustentáveis na ocasião dessas intervenções. A instalação de painéis FV para a geração de energia elétrica pode ser uma alternativa interessante, tanto do ponto de vista ambiental e econômico, quanto da criação de laboratórios “ao ar livre”, podendo ser acompanhado e estudado de perto o desempenho desses sistemas, auxiliando no desenvolvimento da tecnologia e facilitando a visita de alunos e pesquisadores por estarem inseridos em um ambiente acadêmico.

4.2 ALTERNATIVAS DE PROJETO

A seguir serão apresentadas as alternativas de coberturas do Centro de Tecnologia que potencialmente poderiam receber sistemas de geração FV. Tais opções foram selecionadas a partir de visitas de campo e inspeções nos locais, além de conhecimento prévio do autor acerca das condições e características do conjunto de edifícios que compõe o Centro devido à atuação como engenheiro civil no Escritório de Planejamento do CT. Considerando os aspectos relativos a cada alternativa, serão aplicados os critérios propostos, tendo como resultado a classificação dos locais quanto à adequabilidade, visando uma futura implantação de um projeto de geração de energia elétrica fotovoltaica. O Bloco A não foi considerado como uma alternativa viável para este estudo, pois apesar de sua área relevante e excelente nível de irradiação solar, sua cobertura apresenta diversas interferências como, por exemplo, antenas de telefonia, casa de máquina de elevadores e reservatórios de água. A Figura 16 apresenta a localização de cada alternativa dentro do complexo edificado.

Figura 16: Alternativas de projeto



Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

4.2.1 ALTERNATIVA 1 – AUDITÓRIO HORTA BARBOSA

O Auditório Horta Barbosa é um dos principais auditórios do Centro de Tecnologia. O prédio é anexo ao Bloco A e está localizado na entrada do CT. As placas de concreto pré-

moldado, responsáveis pela proteção mecânica da impermeabilização e que auxiliam no conforto térmico da edificação, encontram-se bastante deterioradas devido ao final da vida útil do sistema e falta de manutenção. A Figura 17 apresenta uma vista aérea da cobertura, cuja área total é de 2.424m², praticamente livre de interferências para a irradiação solar.

Figura 17: Cobertura do Auditório Horta Barbosa.



Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

4.2.2 ALTERNATIVA 2 – TERRAÇO LIGAÇÃO A-H

A laje da cobertura do corredor que faz a ligação entre os Blocos A e H do CT possui uma área total de 3.210 m². O local possui fácil acesso para manutenção e poucas interferências. Contudo, existe a necessidade de podas regulares das árvores existentes, de modo a evitar o sombreamento em um possível sistema de geração de energia FV. A Figura 18 apresenta uma foto do local, onde é possível observar ao fundo o Bloco A. Este Bloco gera uma área de sombreamento no Terraço de Ligação durante um determinado período da tarde.

Figura 18: Terraço de ligação corredor A-H.



Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

4.2.3 ALTERNATIVA 3 – COBERTURA BLOCO H

O Bloco H possui configuração semelhante aos demais Blocos (C ao G), porém existe uma área disponível maior, com 3.704m² somando-se os dois telhados externos. Algumas das anomalias observadas estão relacionadas às telhas que se encontram deterioradas e ao sistema de impermeabilização das calhas, responsável por vazamentos nas salas e laboratórios existentes, principalmente no terceiro andar do Bloco H. Uma vista aérea do Bloco H está apresentada na Figura 19.

Figura 19: Vista aérea da cobertura do Bloco H



Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

4.2.4 ALTERNATIVA 4 – COBERTURA BLOCO I

O Bloco I possui a cobertura com maior área dentro do complexo edificado do Centro de Tecnologia, com 5.680m². Trata-se de estrutura conhecida como “nave central”, que abriga grande parte dos laboratórios da COPPE, Poli e Escola de Química, apresentada na Figura 20. A cobertura apresenta muitas patologias relacionadas à falta de conservação e manutenção, fazendo com que existam pontos na superfície inferior da laje com queda de reboco e cobrimento, além de armaduras expostas com sinais de corrosão. O desprendimento de material da laje configura um risco à segurança dos usuários do edifício, sendo necessária uma intervenção para que se reabilite a cobertura e recuperação da estrutura.

Figura 20: Cobertura Bloco I - Nave central



Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

4.2.5 ALTERNATIVA 5 – COBERTURA BLOCO D

Os Blocos C, D, E, F e G são idênticos. Portanto quaisquer soluções ou projetos poderiam ser replicados para todos estes locais de maneira independente. Cada um destes Blocos possui uma cobertura composta por dois telhados externos com área total de 2.324m² e um telhado central mais baixo, conforme observado na Figura 21. Como este telhado do

centro está em um nível inferior, ocorre o sombreamento desta área ao longo de praticamente todo o dia, o que inviabiliza a instalação de painéis FV nestas áreas. Portanto são consideradas apenas as duas áreas externas das coberturas desses Blocos. Devido à presença de árvores nos jardins localizados entre os Blocos, existe a necessidade de poda periódica para evitar sombreamentos em um possível sistema FV.

Figura 21: Cobertura Bloco D



Fonte: Escritório de Planejamento da Decania do CT (EPLAN-CT)

4.2.6 ALTERNATIVA 6 – SHED BLOCO I

Assim como a nave central do Bloco I, a área conhecida como “*shed*” possui uma extensão significativa, com 5.415m², porém apresenta os mesmos problemas de infiltrações e quedas de revestimentos e reboco nos corredores e laboratórios subjacentes, sendo necessárias intervenções de reabilitação na cobertura e estruturas do edifício. Além disto, a estrutura inclinada dos *sheds* poderia ser um impeditivo para a instalação de painéis fotovoltaicos. Apesar disto, esta edificação foi incluída como alternativa deste trabalho para fins de comparação. Na Figura 22 é possível observar a área destacada correspondente a Alternativa 6.

Figura 22: Cobertura Bloco I- *Shed*

Fonte: Google Earth

4.3 APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS

A partir da aplicação dos critérios às alternativas propostas, serão apresentadas as tabelas contendo as alternativas e o peso atribuído a cada uma delas, ou seja, a pontuação obtida de acordo com as escalas de avaliação dos critérios, desenvolvidas no Capítulo 3.

4.3.1 CRITÉRIO 1

A avaliação do Critério 1 será feita a partir da escala de cores e seu respectivo conceito, conforme o Mapa Solar do Rio de Janeiro, focado no complexo edificado do Centro de Tecnologia apresentado na Figura 23.

Figura 23: Aplicação do Critério 1 – Irradiação solar.



Fonte: Mapa Solar. Adaptado pelo Autor

A Tabela 15 mostra a pontuação de cada alternativa conforme o seu potencial solar no inverno. Quanto maior for seu valor, maior será seu potencial de geração de energia fotovoltaica. De maneira geral, a maior parte dos edifícios que compõe o CT1 possuem um excelente potencial solar para a instalação de sistemas FV.

Tabela 15: Aplicação do Critério 1

	Alternativa	Critério 1
A1	Auditório	7
A2	Ligação A-H	7
A3	Bloco H	9
A4	Bloco I	7
A5	Bloco D	7
A6	Shed Bloco I	3

Fonte: Autor

4.3.2 CRITÉRIO 2

O Critério 2 considera as áreas totais planas de cada alternativa. A Tabela 16 apresenta a área das alternativas e seu respectivo conceito, de acordo com a escala de classificação discutida no item 3.1.2 deste trabalho.

Tabela 16: Aplicação do Critério 2

	Alternativa	Área (m ²)	Critério 2
A1	Auditório	2.424	3
A2	Ligação A-H	3.210	5
A3	Bloco H	3.704	5
A4	Bloco I	5.680	9
A5	Bloco D	2.324	3
A6	Shed Bloco I	5.415	9

Fonte: Autor

4.3.3 CRITÉRIO 3

A metodologia utilizada para a obtenção do Critério 3 é desenvolvida no item 3.1.3. A Tabela 17 mostra os valores para a Gravidade das anomalias, Extensão das intervenções, Complexidade das intervenções e Índice de Reabilitação. A partir destes parâmetros é avaliado o Critério 3 para cada alternativa.

Tabela 17: Aplicação do Critério 3

	Alternativa	G	Ei	Ci	IR	Critério 3
A1	Auditório	0,66	0,5	0,8	26,4	5
A2	Ligação A-H	0,66	0,5	0,8	26,4	5
A3	Bloco H	0,33	0,5	0,8	13,2	7
A4	Bloco I	1	0,75	1,2	90	1
A5	Bloco D	0,33	0,5	0,8	13,2	7
A6	Shed Bloco I	0,66	0,75	0,8	39,6	3

Fonte: Autor

4.4 CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

A Tabela 18 apresenta o resultado do trabalho, já considerando os cálculos conforme metodologia proposta, com a ponderação e peso dos critérios para cada Alternativa. As 6 alternativas de projeto são classificadas em razão da adequabilidade para a implantação de

projeto de geração de energia solar fotovoltaica. A Alternativa A3, correspondente à cobertura do Bloco H, mostrou-se a mais vantajosa, com valor aproximadamente 15% maior que a Alternativa A5, segunda mais bem classificada.

Observa-se que, apesar de não ser a alternativa com maior área, as boas pontuações nos quesitos de irradiação e robustez estrutural da alternativa A3 fizeram com que esta tivesse uma maior prioridade final. O critério C1 não apresentou grande influência no resultado final, pois, de maneira geral, todas as alternativas possuem excelentes ou muito boas irradiações. O critério C3 foi preponderante no resultado, devido à importância a ele atribuída na avaliação par a par entre os critérios, tanto que, as duas primeiras alternativas na classificação apresentaram um maior valor neste quesito.

Tabela 18: Aplicação dos critérios às alternativas

		C1	C2	C3	Totais	Prioridades
		0,123	0,320	0,557		
A3	Bloco H	9	5	7	6,605	21%
A5	Bloco D	7	3	7	5,719	18%
A2	Ligação A-H	7	5	5	5,245	17%
A6	Shed Bloco I	3	9	3	4,921	16%
A1	Auditório	7	3	5	4,605	15%
A4	Bloco I	7	9	1	4,298	14%

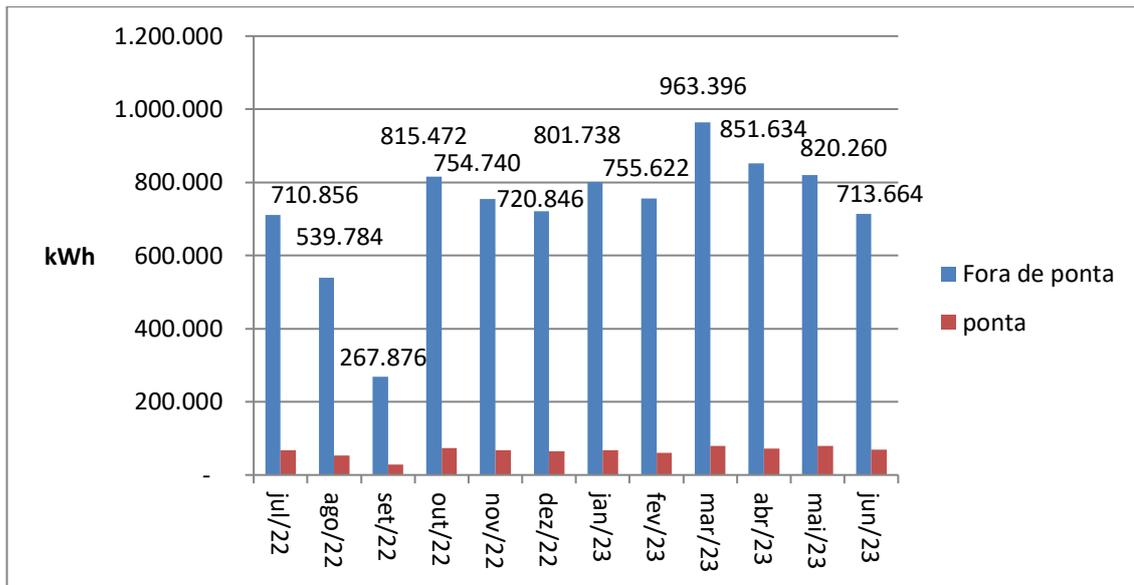
Fonte: Autor

4.5 ANÁLISE DA ALTERNATIVA SELECIONADA

4.5.1 PERFIL DE GASTO ENERGÉTICO DO CENTRO DE TECNOLOGIA

O perfil de consumo de energia elétrica foi obtido através de fatura da Concessionária, disponível no sistema eletrônico de informações da UFRJ. A Figura 24 apresenta o perfil de consumo para um período de um ano, compreendido entre os meses de julho de 2022 a junho de 2023. Cabe ressaltar que o consumo apresentado se refere à eletricidade utilizada por todo o complexo edificado do CT1, pois há uma fatura única para o conjunto de aproximadamente 176.000m², não havendo separação por Blocos. A média de consumo observada no período foi de 726.324 kWh por mês para o consumo fora de ponta e 65.214 kWh para o consumo de ponta.

Figura 24: Perfil de gasto de eletricidade entre jul/22 e jun/23 no CT



Fonte: Autor

Este consumo corresponde ao principal gasto energético por parte do Centro de Tecnologia, portanto será o parâmetro considerado neste estudo. Apesar do valor tarifário da eletricidade consumida no período de ponta ser maior por kWh, a quantidade consumida é bastante inferior ao consumo fora de ponta. Além disso, grande parte da geração de energia elétrica realizada pelo sistema fotovoltaico ocorre no período fora de ponta, isto é, durante o dia.

4.5.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO PROPOSTO ATRAVÉS DO PV_{system}

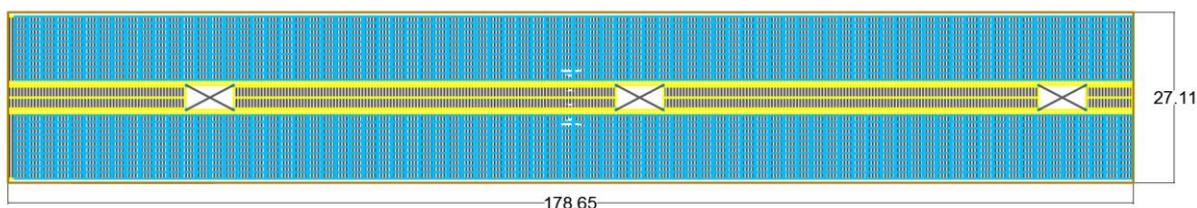
O *software* PV_{system} é a referência no mercado para estudos, dimensionamento e análise de sistemas fotovoltaicos. Segundo Paula *et al.*(2022), o *software* é capaz de realizar um projeto fotovoltaico através de procedimento simples com base nos dados de área disponível ou potência desejada. O *software* possui uma base de dados que possibilita a seleção dentre diversos modelos e fabricantes dos principais equipamentos que compõem um sistema fotovoltaico, tais como inversores e módulos FV, auxiliando no dimensionamento e configuração dos sistemas. Os resultados das simulações são mostrados em um relatório, contendo informações importantes de análise de perdas do sistema, análise financeira, desempenho e a potência total gerada. O PV_{system} é um *software* pago, porém, para a utilização neste estudo, foi utilizada a versão gratuita de demonstração.

A alternativa selecionada para a implantação através do método proposto foi a cobertura do Bloco H. A seguir são apresentadas características de um sistema solar fotovoltaico hipotético conectado à rede. O sistema foi dimensionado com o auxílio do *software* PVsyst 7.2:

- Área disponível: 3.704m²;
- Painéis: 440Wp 35V Si-mono 72 cells bifacial;
- N° painéis: 1650 unidades (25x66);
- Área ocupada pelos módulos: 3699m²;
- Inversor: 60kW 500-1450 V 50/60Hz;
- N° de inversores: 10 unidades;
- Potência nominal do sistema: 726kWp;
- Produção anual de energia elétrica: 1.140MWh.

A Figura 25 apresenta um exemplo de disposição que os painéis poderiam apresentar quando instalados na cobertura do Bloco H.

Figura 25: Disposição dos painéis na cobertura do Bloco H



Fonte: Autor

4.5.3 POTENCIAL DE ECONOMIA ENERGÉTICA

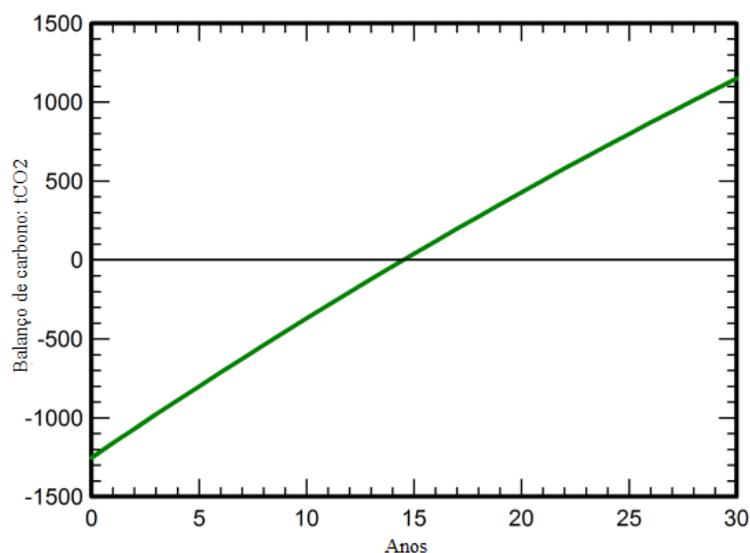
O total de energia elétrica consumida no período selecionado foi de 8.716MWh para todo o complexo edificado do CT1. Considerando a produção anual do sistema fotovoltaico instalado apenas na alternativa A3 de 1.140MWh, o sistema seria responsável por uma economia de 13% na eletricidade consumida da Concessionária anualmente.

O *software* PVsyst possui uma ferramenta que fornece uma estimativa da redução de emissões de dióxido de carbono que o sistema implantado poderia apresentar ao longo de sua vida útil. A premissa de cálculo utilizada pelo programa é de que a eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico substituiria a mesma quantidade de eletricidade na rede existente.

Caso a pegada de carbono da instalação seja menor que a produção de eletricidade da rede, haverá economia líquida de emissões de CO₂. Desta forma, o balanço de carbono total para o sistema proposto forneceu uma economia de emissões de 1.151,6 toneladas de CO₂, considerando uma vida útil do sistema de 30 anos.

A Figura 26 fornece a evolução das emissões preservadas pelo sistema proposto ao longo do tempo, calculada através do *software* PVsyst.

Figura 26: Balanço de carbono do sistema FV



Fonte: Autor

Além da economia no consumo de energia elétrica e a estimativa da redução de emissões de dióxido de carbono, seria interessante também avaliar o tempo de retorno do investimento no sistema (*payback*). Todavia, essa análise demandaria uma pesquisa de mercado e levantamento de preços atualizados dos equipamentos, bem como uma estimativa do custo total de projeto e instalação da estrutura, o que não fez parte do escopo deste trabalho. De qualquer forma, conforme citado na seção 2.3.1, espera-se um *payback* entre 4 e 10 anos e Taxa Interna de Retorno (TIR) entre 7 e 19%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou fornecer um embasamento teórico sobre os avanços da tecnologia de geração de energia solar fotovoltaica bem como as perspectivas da adoção destes sistemas tanto no Brasil como nos demais países do Mundo.

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação, buscou-se a elaboração de uma proposta para a aplicação da metodologia AHP na escolha de uma área dentre as alternativas selecionadas no complexo edificado do Centro de Tecnologia da UFRJ. Foram apresentados critérios objetivos para a avaliação das alternativas, considerando parâmetros de irradiação solar, área da cobertura e robustez estrutural.

Cabe ressaltar que a metodologia é passível de ser adaptada a fim de permitir a inclusão de quantos critérios e subcritérios forem necessários. A ferramenta pode ser alterada de modo a se adaptar à realidade do local avaliado, especificidades de cada projeto e características das edificações. A metodologia pode ainda ser aplicada por um grupo de especialistas visando minimizar o aspecto da subjetividade na avaliação.

Após a aplicação da metodologia, a alternativa A3, referente à cobertura do Bloco H foi a mais bem classificada, podendo ser considerada como a mais adequada para receber um projeto de geração de energia solar fotovoltaica no CT. A alternativa selecionada teve uma pontuação aproximadamente 15% maior que a segunda classificada, a alternativa A5. De acordo com a análise realizada, a instalação de um sistema FV no local indicado seria responsável por uma economia anual aproximada de 13% no consumo de energia elétrica proveniente da Concessionária. Ao longo da vida útil de 30 anos, a instalação seria responsável por evitar a emissão de 1.151,6 toneladas de CO₂.

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser estudadas aplicações do AHP em projetos considerando outras fontes de energia renováveis tais como eólica ou biomassa, seja em conjunto com sistemas FV ou não. A aplicação da metodologia apresentada neste trabalho pode ser replicada para outras cidades ou estados, os quais possuam um banco de dados de informações geográficas considerando a irradiação nas edificações. A implantação de painéis FV em fachadas também é uma área de estudo que pode ser explorada, principalmente em se comparando a viabilidade deste tipo de sistema com o método tradicional de instalação em coberturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL GARNI, H. Z.; AWASTHI, A. Solar PV Power Plants Site Selection: A Review. In: ADVANCES in Renewable Energies and Power Technologies Solar PV Power Plants Site Selection: A Review. Elsevier. v. 1: Solar and Wind Energies, cap. 2, p. 57-75, Montreal, QC, Canada, 2018.
- ALGORA, C; REY-STOLLE, I. Handbook of concentrator photovoltaic technology, first ed., Wiley. Madri, Espanha, 2016.
- AYRÃO, V. Energia solar fotovoltaica no Brasil: conceitos, aplicações e estudos de caso. International Copper Association Brazil, Rio de Janeiro, 2018.
- AZEVEDO, V. W. B. Estudo de localização de usina solar termoeétrica no Estado de Pernambuco. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- BAJAY, S. V.; Energia no Brasil: os próximos dez anos. Campinas-SP, 2002.
- BOTELHO, D.F.; DE OLIVEIRA, L.W.; DIAS, B.H.; SOARES, T.A.; MORAES, C.A. Prosumer integration into the Brazilian energy sector: An overview of innovative business models and regulatory challenges. Energy Policy, v. 161, 2022.
- BOXWELL, Michael. The Solar Electricity Handbook: A simple, practical guide to solar energy – designing and installing solar PV systems. Greenstream Publishing, 2021.
- CASTRO, M.S. *et al.* Análise do Impacto da Geração Fotovoltaica na Universidade Federal de Goiás. Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 5, p. 3023-3042, 2020.
- COSTA, J. W. N.; SANTOS, N. C. Avaliação econômica para instalação de um sistema fotovoltaico na Universidade do Oeste Paulista-UNOESTE, em Presidente Prudente -SP, Colloquium Socialis, v. 1, n. 2, p. 25-33, 2017.
- COSTANZO, V., YAO, R., ESSAH, E., SHAO, L., SHAHRESTANI, M., OLIVEIRA, A. C., ARAZ, M., HEPBASLI, A., & BIYIK, E. A method of strategic evaluation of energy performance of Building Integrated Photovoltaic in the urban context. Journal of Cleaner Production, 184, 82-91, 2018.
- CORIOLOANO, T. R.; PEREIRA, A. K. A.; PINTO, A. E. M. Análise do arcabouço legal da geração distribuída de energia elétrica no Brasil. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Essentia Editora. Campos dos Goitacazes, 2020

ELKADEEM, M. R.; YOUNES, A.; SHARSHIR, S. W.; CAMPANA, P. E.; WANG, S. Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis. *Applied Energy*, n. 295, p. 1-35, 2021.

EPE, 2020. PNE 2050 – Plano Nacional de Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro.

EPE, 2021. Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro.

FAJUKE, I.D.; RAJI, A.K. Firefly Algorithm-Based Optimization of the Additional Energy Yield of Bifacial PV Modules. *Energies*, 2022.

FERREIRA, E.J.S. Plano de viabilidade par a implantação da energia fotovoltaica a Faculdade de Ciências da Saúde do Trairi -FACISA/UFRN. 2020. 50p. Dissertação (Mestrado em Gestão de Processos Institucionais) -Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2020.

GALDINO, M. A.; LIMA, J. H.; RIBEIRO, C. M.; SERRA, E. T. O contexto das energias renováveis no Brasil. *Revista da DIRENG*, p. 17-25, 2000

HOLLANDA, M. C. A Administração Pública e o Desenvolvimento Sustentável. Série Aperfeiçoamento de Magistrados 17. Curso de Desenvolvimento Sustentável. Escola da Magistratura do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

IRENA, 2021. Renewable Capacity Statistics 2021. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

ISHIZAKA, A.; PEARMAN, C.; NEMERY, P. AHPSort: an AHP-based method for sorting problems. *International Journal of Production Research*. v.50, n. 17. Taylor & Francis, 2012.

KHAIRA, A.; DWIVEDI, R. K. A State of the Art Review of Analytical Hierarchy Process. *Materials Today: Proceedings* 5, Elsevier, 2018.

MAGALHÃES, I. B.; NOGUEIRA, G. C.; ALVES, I. S.; CALIJURI, M. L.; LORENTZ, J. F.; ALVES, S. C. Site suitability for photovoltaic energy expansion: A Brazilian's high demand states study case. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020.

MELIN, M.F.M.; CAMIOTO, F.C. A Importância de Incentivos Governamentais para Aumentar o Uso da Energia Solar. *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, v. 14, n. 5, p. 89 - 108, 2019.

MOKARRAM, M.; MOKARRAM, M. J.; GITIZADEH, M.; NIKNAM, T.; AGHAEI, J. A novel optimal placing of solar farms utilizing multi-criteria decision making (MCDA) and feature selection. *Journal of Cleaner Production*, 2020.

OLIVEIRA, Marco Antônio de; Método de avaliação de necessidades e prioridades de reabilitação de edifícios de instituições federais de ensino superior. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

OLIVEIRA, G.; RIBEIRO DA SILVA, V.; ALTOÉ, L. Análise do uso da energia fotovoltaica em universidades. *Exatas & Engenharias*, 2021.

OTTONI, Christiano Costa Benedicto. UMA AVALIAÇÃO DO ESTADO PATRIMONIAL DE EDIFICAÇÕES NA REABILITAÇÃO URBANA: estudo de caso no parque edificado da UFRJ. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

PAULA, J.; LIMA, G.; PRYM, G.; SILVA, J.; MELO, K.; BARROS, T.; VILLALVA, M. ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO SIMULADO COM AS FERRAMENTAS PVSYS E SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL). IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis, 2022.

PEQUENO, Luiz Eduardo Benevides. Geração de Energia Solar Fotovoltaica em Habitações de Interesse Social: Estudo de Caso do Condomínio Villagio do Campo, Rio de Janeiro/RJ. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PERONDI, M. Análise de viabilidade econômica da implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede em um prédio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019. 38 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos. Edição revisada e atualizada, Rio de Janeiro: Cepel, 2014.

RATHORE, N.; PANWAR, N. L.; YETTOU, F.; GAMMA, A. A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications, *International Journal of Ambient Energy*, 2021.

REZENDE, J. O. A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável. Atena Editora. Ponta Grossa (PR), 2019.

RIGO, P. D.; REDISKE, G.; ROSA, C. B.; GASTALDO, N. G.; MICHELS, L.; JÚNIOR, A. L. N.; SILUK, J. C. M. Renewable Energy Problems: Exploring the Methods. *Sustainability*, v. 12, 2020.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. The Institute of Management Sciences. Interfaces 24. Pittsburg, USA, 1994.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Models, Methods, Concepts and applications of the Analytic Hierarchy Process, second ed., Springer, New York, USA, 2012.

SILVEIRA, A.G.; SANTOS, D.F.L.; MONTORO, S.B. Potencial econômico da geração de energia elétrica por sistema fotovoltaico na universidade pública. Navus, v. 9, n. 4, p. 49-65, 2019.

SOLARPOWER EUROPE. Global Market Outlook For Solar Power 2021 – 2025, 2021. Disponível em <https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2021-2025/>. Acesso em 14/02/2022.

SWARD, J. A.; NILSON, R. S.; KATKAR, V. V.; STEDMAN, R. C.; KAY, D. L.; IFFT, J. E.; ZHANG, K. M. Integrating social considerations in multicriteria decision analysis for utility-scale solar photovoltaic siting. Applied Energy, 2021.

THEBAULT, M.; CLIVILLÉ, V.; BERRAH, L.; DESTHIEUX, G. Multicriteria roof sorting for the integration of photovoltaic systems in urban environments. Sustainable Cities and Society, v. 60, 2020.

ZHANG, H; YU, Z.; ZHU, C.; YANG, R.; YAN, B.; JIANG, G. Green or not? Environmental challenges from photovoltaic technology, Environmental Pollution, 2023.

LEGISLAÇÕES CONSULTADAS

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA No 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. 2012

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA No 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015. 2015

BRASIL. Lei nº 9.478/1997, 1997.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Lei 14.300/2022. 2022.

ANEXO I

O Modelo matemático utilizado para cálculo da irradiação no Mapa Solar do Rio de Janeiro

A geração distribuída já compõe o planejamento da geração de energia elétrica do Brasil, seja por meio da fonte solar, eólica ou biomassa. O Plano Decenal de Energia 2024 (PDE 2024) elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), prevê, para o ano de 2024, 1,6 TWh de energia elétrica produzidos por sistemas fotovoltaicos nas classes residenciais e comerciais, sob a forma da geração distribuída. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), na sua Resolução 482 de 2012, fomentou este tipo de geração de energia elétrica, quando regulamentou a possibilidade de pessoas físicas ou jurídicas produzirem sua própria energia, inserindo na rede de distribuição elétrica o excedente produzido, contabilizando crédito nas suas futuras contas de energia.

Neste contexto de produção de energia elétrica, a tecnologia fotovoltaica se apresenta com grande potencial de participação na matriz de geração distribuída, principalmente nas instalações residenciais e comerciais.

Na geração de energia elétrica por meio da tecnologia fotovoltaica, o principal requisito para avaliação do potencial de geração é a incidência solar do local onde o sistema será instalado, estando esta incidência sujeita a diversos fatores, que podem afetar a geração de energia tanto de forma positiva como negativa.

Um dos fatores que devem ser considerados nesta avaliação é o sombreamento que o local candidato a receber um sistema fotovoltaico está sujeito. Os atlas solarimétricos disponíveis fornecem-nos uma avaliação do potencial de irradiação de uma determinada região sem considerar possíveis interferências de construções e da própria natureza que podem provocar, por exemplo, um sombreamento, inviabilizando a instalação de um sistema fotovoltaico tanto no seu aspecto técnico como no aspecto econômico.

Neste contexto, a Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços do Rio de Janeiro (SEDEIS), o Instituto Pereira Passos (IPP), a EPE e a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por intermédio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit – GIZ, conceberam e produziram o Mapa Solar do Rio de

Janeiro, que tem como objetivo apresentar ao usuário informações relativas à irradiação solar em telhados da cidade do Rio de Janeiro.

O Modelo do Mapa Solar

O Mapa Solar do Rio de Janeiro foi produzido usando ferramentas de geoprocessamento que calculam a irradiação global incidente para os telhados das edificações da cidade do Rio de Janeiro considerando o sombreamento que edificações e demais obstáculos provocam em seu entorno. O cálculo foi feito para duas datas específicas, 22 de dezembro (solstício de verão) e 20 junho (solstício de inverno) de 2015, datas que, a princípio, registram a mais alta e mais baixa irradiação solar durante o ano, respectivamente.

Dados de entrada do Modelo

O principal dado de entrada do algoritmo é o modelo digital da superfície (MDS). Um MDS é uma matriz espacial também chamada de raster, onde cada célula (pixel) da matriz contém o valor de elevação do local geográfico do pixel. Diferente do modelo digital do terreno (MDT), que só inclui a altitude do terreno, um MDS também inclui a altura das edificações ou, dependendo da fonte de dados, até das árvores e demais obstáculos que não são parte do relevo.

Formas de produção de um MDS:

Um modelo digital de superfície pode ser elaborado, basicamente, utilizando dois métodos: por meio da junção de um MDT e dados vetoriais das edificações que incluem a informação da altura delas ou através de um perfilamento a laser.

→ Por meio de um MDT e dados vetoriais das edificações: neste método, é necessária, além do MDT, uma base de dados que contenha a geometria e a altura de cada edificação. Essa base de dados muitas vezes é produzida por meio de um perfilamento a laser ou por meio de outros processos de geração de dados espaciais como a digitalização da geometria das edificações baseadas em imagens de satélite ou ortofotos (representação fotográfica de uma região da superfície terrestre, no qual todos os elementos apresentam a mesma escala, visão ortogonal, livre de erros e deformações), bem como a avaliação da altura das edificações por meio de pesquisa de campo ou por meio de outras fontes de dados, p.ex. de cadastros de IPTU, bases de dados urbanísticos etc. As duas bases de dados geográficas (MDT e dados

vetoriais das edificações) são reunidas no sentido de criar o MDS. Esse foi o método aplicado para a geração do MDS utilizado no Mapa Solar Rio.

– Perfilamento a laser: neste método, por meio da tecnologia Light Detection And Ranging (LIDAR), um equipamento laser é acoplado a um avião que realiza voos sobre toda a área onde se realizará a avaliação das alturas das edificações e de outros obstáculos significativos, considerando um intervalo espacial previamente definido. O resultado é uma camada de pontos com a altura da superfície de cada um deles. Esses dados podem ser convertidos para servir de insumo para o algoritmo da simulação de irradiação solar.

O perfilamento por meio da tecnologia LIDAR é o que produz resultados mais acurados, sendo esta tecnologia indicada para a realização de simulações de irradiação solar. Bases de dados produzidas com esta tecnologia possibilitam calcular o sombreamento em mais detalhe incorporando também a inclinação de telhados, entretanto necessita um maior aporte de recursos financeiros para sua produção, visto a utilização de aeronave e equipamentos de aerofotogrametria específicos.

Na avaliação dos telhados da cidade do Rio de Janeiro, foram utilizadas as bases de dados disponíveis no Instituto Pereira Passos (IPP). As camadas usadas foram extraídas de um MDT que foi calculado à base de diferentes fontes de dados como isolinhas de altura e dados vetoriais das edificações que foram atualizadas usando ortofotos.

O Cálculo da Irradiação

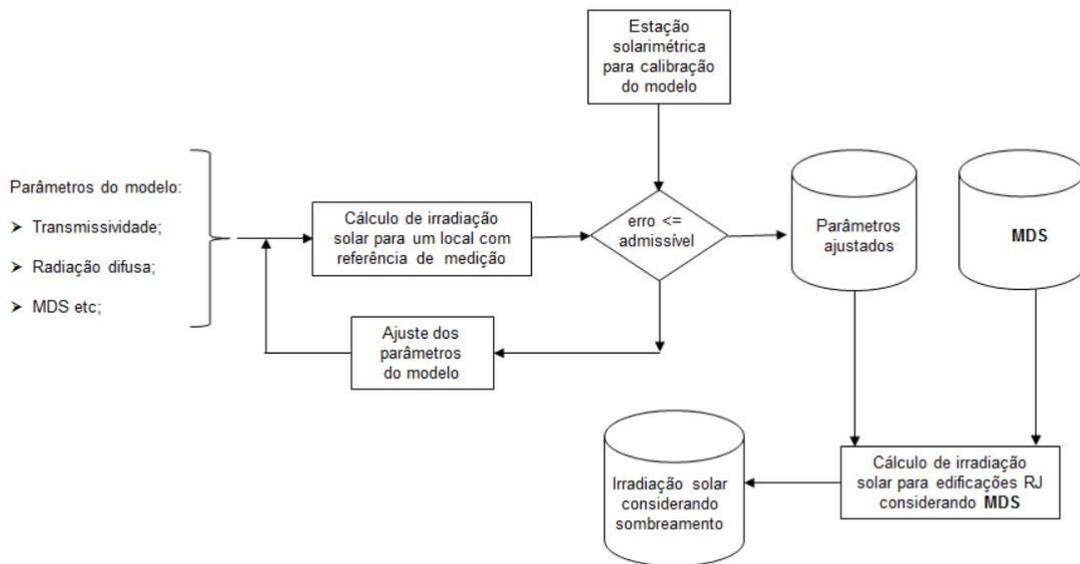
As ferramentas de geoprocessamento que simulam a irradiação solar calculam a insolação sobre uma paisagem ou para locais específicos, com base em métodos do algoritmo do campo de visão (viewshed) hemisférico. A quantidade total de radiação calculada para um local ou área particular é dada como radiação global, que é a soma das componentes direta e difusa. A irradiação direta é a que atinge a superfície terrestre, em uma linha direta do sol, livre de qualquer obstáculo na sua trajetória. A irradiação difusa é a que chega até a superfície depois de dispersada por nuvens, partículas em suspensão e até mesmo refletida pela própria superfície, que não pode ser simulada nesta ferramenta. O cálculo da irradiação direta, difusa, e global é repetido para cada localização na superfície topográfica (pixel ou célula do raster MDS), produzindo mapas de irradiação para toda área geográfica. Além da definição dos parâmetros de tempo (dia, intervalo da simulação, ângulos de zenith e de azimuth, latitude, etc.), os parâmetros mais importantes como insumo do algoritmo são:

- A taxa da irradiação difusa: que varia entre 0,2 (céu muito claro) e 0,7 (céu coberto) e define proporção da irradiação difusa na irradiação global; e
- A transmissividade: taxa da irradiação solar que realmente chega à superfície e não é filtrada pela atmosfera. Por exemplo, o valor de 0,5 corresponde a um dia normal claro sem nuvens.

A transmissividade tende a diminuir em função do aumento da taxa da irradiação difusa.

Com os parâmetros de irradiação difusa e de transmissividade, além de outros parâmetros a serem definidos dependendo do modelo utilizado, o modelo calcula a irradiação considerando um MDS.

Difícilmente valores de irradiação difusa e de transmissividade medidos em campo estão disponíveis, desta forma, deve-se usar hipóteses das condições da atmosfera no tempo da simulação ou calibrar esses parâmetros do modelo por meio de dados de irradiação solar medidos em campo. No caso do Mapa Solar do Rio de Janeiro, para a calibração desses dois parâmetros do modelo foi usada a estação climatológica do Aeroporto Santos Dumont, que registra dados solarimétricos, anemométricos e climatológicos de 1973 a 2002. Para definir a melhor combinação destes dois parâmetros usados no modelo, calculou-se a irradiação para o Aeroporto Santos Dumont usando uma variedade de combinações desses parâmetros e comparou-se cada resultado de irradiação calculada com o valor de referência da estação do aeroporto. Desta forma foi possível identificar qual combinação de parâmetros possibilitou ao modelo apresentar um resultado de irradiação mais próximo do valor medido pela estação de referência. Esta combinação foi então utilizada para calcular a irradiação em todo o município do Rio de Janeiro, já considerando o MDS.



Outros mapas de irradiação solar, semelhantes a este, poderão ser produzidos para demais municípios, desde que estejam disponíveis as seguintes informações e recursos:

- Informações sobre a localização das edificações, suas alturas, geometrias etc. Estas informações poderão ser obtidas a partir de mapas digitais de superfície, mapas digitais de terreno, perfilhamento laser, base de dados de cadastros de imóveis ou a combinação destas;
- Modelo para cálculo de irradiação solar que considere as características das edificações de forma ser possível calcular possíveis sombreamentos. Ressalta-se que quanto maior o detalhamento e acurácia das características das edificações, maior o custo da obtenção destas informações, entretanto, melhor o resultado do cálculo do potencial de irradiação; e
- Profissional qualificado para uso de ferramentas de geoprocessamento.

Nota: os dados obtidos por meio da ferramenta “Mapa Solar do Rio de Janeiro” devem ser considerados como indicativos, visto que não é possível aferir o erro nos cálculos do modelo. Para obtenção de valores mais acurados, deve ser consultado um profissional, devidamente capacitado, que possa calcular o potencial de irradiação e de geração de energia elétrica do local candidato à instalação.