

**UFRRJ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E ESTRATÉGIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E ESTRATÉGIA - MPGE**

**DISSERTAÇÃO**

**ENERGIA FOTOVOLTAICA EM PEQUENOS AEROPORTOS: UM  
ESTUDO DE CASO PARA O AEROPORTO DE MARICÁ**

**GABRIELA DE MATOS CASTELO DE SOUZA**

**2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E ESTRATÉGIA**

**ENERGIA FOTOVOLTAICA EM PEQUENOS AEROPORTOS: UM  
ESTUDO DE CASO PARA O AEROPORTO DE MARICÁ**

**GABRIELA DE MATOS CASTELO DE SOUZA**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Joilson de Assis Cabral**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Curso de Pós-Graduação em Gestão e Estratégia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ.

Seropédica, RJ  
2022

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S719e

Souza, Gabriela de Matos Castelo de, 24/07/1988-  
Energia fotovoltaica em pequenos aeroportos: um  
estudo de caso para o aeroporto de Maricá. / Gabriela  
de Matos Castelo de Souza. - Seropédica, 2022.  
88 f.: il.

Orientador: Joilson de Assis Cabral .  
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural  
do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Gestão  
e Estratégia , 2022.

1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. Aeroporto de  
Maricá. 3. Geração de Energia. 4. Retorno de  
Investimento. I. Cabral , Joilson de Assis, 14/11/84-,  
orient. II Universidade Federal Rural do Rio de  
Janeiro. Programa de Pós-graduação em Gestão e  
Estratégia III. Título.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Companhia de Desenvolvimento de Maricá (CODEMAR), através de celebração de convênio com a UFRRJ.

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – ICSA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E ESTRATÉGIA - MPGE**

**GABRIELA DE MATOS CASTELO DE SOUZA**

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Gestão e Estratégia, na área de concentração em Gestão e Estratégia.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: **30/09/2022**.

---

Joilson de Assis Cabral  
Presidente da Banca  
Membro Interno  
MPGE/UFRRJ

---

Daniel Ribeiro de Oliveira  
Membro Interno  
MPGE/UFRRJ

---

Adriana Fiorotti Campos  
Membro Externo  
UFES



*Emitido em 2023*

**TERMO Nº 165/2023 - MPGE (12.28.01.00.00.00.05)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 28/02/2023 17:47 )*

DANIEL RIBEIRO DE OLIVEIRA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
ICSA (12.28.01.45)  
Matrícula: ###522#8

*(Assinado digitalmente em 07/03/2023 18:15 )*

JOILSON DE ASSIS CABRAL  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptCEcon (12.28.01.00.00.00.09)  
Matrícula: ###474#0

*(Assinado digitalmente em 01/03/2023 15:16 )*

ADRIANA FIOROTTI CAMPOS  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.787-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/documentos/> informando seu número: **165**, ano: **2023**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **28/02/2023** e o código de verificação: **0933070603**

Ao meu grande amor, meu pai, que me deixou  
ao longo dessa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que me manteve forte e me ajudou a superar todos os obstáculos e tornar essa conquista possível.

A minha mãe, maior incentivadora dos meus estudos.

A toda minha família pelo apoio e paciência.

Ao professor Joilson por confiar e me auxiliar no meu trabalho.

Ao amigo Lucas Bragança por toda a ajuda na área de engenharia.

Às amigas Ana Paula e Alexandra que me acompanharam em todo o mestrado.

Às professoras Roberta Dalvo e Marcia Cova por terem me apoiado e ajudado no momento de dificuldade.

E a toda coordenação do PPGE que sempre foi muito solícita.

## RESUMO

SOUZA, Gabriela de Matos Castelo de. **Energia Fotovoltaica em pequenos aeroportos: Um estudo de caso para o aeroporto de Maricá.** 2022. 88 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Estratégia). Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Aeroportos são edificações com alto consumo de energia elétrica e que necessitam de um fornecimento energético firme devido aos riscos intrínsecos de uma falha do sistema operacional aeroportuário. Por possuírem uma área de livre sombreamento e ensolaradas, estas edificações apresentam grande potencial para aplicação de sistemas FV. A maior parte do consumo de eletricidade do aeroporto municipal de Maricá ocorre no período diurno e fora do horário de ponta, coincidindo com o momento de maior produção de energia solar. Atualmente, o aeroporto maricaense tem um oneroso gasto com energia elétrica por não utilizar  $\frac{1}{4}$  da demanda contratada e usar de forma frequente geradores. Além disso a prefeitura de Maricá está buscando políticas públicas para tornar a cidade sustentável, formulando o Programa Maricá Solar. Dessa forma, com o intuito de aderir ao Programa municipal, reduzir a dependência energética do aeroporto às concessionárias locais e diminuir o custo de energia, e conseqüentemente, gerar uma redução nos gastos públicos municipais, visto que o aeroporto é gerido por uma empresa estatal, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade potencial energético e econômico da implantação de energia solar no aeroporto de Maricá. Para tal propósito, foram utilizados indicadores financeiros como VPL, TIR e Payback e a avaliação da viabilidade energética foi feita por meio do programa PVsyst. Desta forma os resultados mostraram que o sistema é viável, pois terá um VPL de R\$ 4.186.157,87 para o período de 25 anos, produzirá uma energia total de 445 MWh/ano, gerando uma economia anual de R\$ 352.299,72 e uma redução de 1.748 toneladas de CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica; Aeroporto de Maricá; Geração de Energia; Retorno de Investimento.



## ABSTRACT

SOUZA, Gabriela de Matos Castelo de. **Photovoltaic energy in small airports: A case study for Maricá airport.** 2022. 88 f. Dissertation (Master in Management and Strategy). Institute of Applied Social Sciences. Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Airports are buildings with high consumption of electricity and that need a firm energy supply due to the intrinsic risks of a failure in the airport operating system. Because they have an area of free shading and sunny, these buildings have great potential for the application of PV systems. Most of the electricity consumption at the municipal airport of Maricá occurs during the day and outside peak hours, coinciding with the moment of greater production of solar energy. Currently, the airport in Marica has a costly expenditure on electricity because it does not use  $\frac{1}{4}$  of the contracted demand and frequently uses generators. In addition, the Maricá City Hall is seeking public policies to make the city sustainable, formulating the Maricá Solar Program. Thus, in order to adhere to the Municipal Program, reduce the airport's energy dependence on local concessionaires and reduce the cost of energy, and consequently, generate a reduction in municipal public expenses, since the airport is managed by a state-owned company, the present study aims to evaluate the potential energy and economic viability of deploying solar energy at Maricá airport. For this purpose, financial indicators such as NPV, IRR and Payback were used and the energy viability assessment was carried out using the PVSyst program. In this way, the results showed that the system is viable, as it will have a NPV of R\$ 4,186,157.87 for the period of 25 years, will produce a total energy of 445 MWh/year, generating annual savings of R\$ 352,299.72 and a reduction of 1,748 tons of CO<sub>2</sub>.

**Keywords:** Photovoltaic Solar Energy; Marica Airport; Power generation; ROI.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferença entre o $G_{cc}$ - valor de irradiância medido pela limpeza célula solar de referência ( $W/m^2$ ) e $G_{dc}$ – valor de irradiância medido pela célula solar de referência suja ( $W/m^2$ ). .....	35
Figura 2 – Capacidade fotovoltaica instalada acumulada mundial de 1990 até 2025. ....	45
Figura 3 – Geração fotovoltaica acumulada mundial de 1990 até 2025. ....	46
Figura 4 – Custos totais médios instalados, fatores de capacidade e custos para energia fotovoltaica 2010-2018. ....	47
Figura 5 – Total de Irradiação Solar no Brasil – média anual. ....	48
Figura 6 – Capacidade fotovoltaica instalada acumulada Brasileira de 1990 até 2025. ....	50
Figura 7 – Geração fotovoltaica acumulada Brasileira de 1990 até 2025. ....	50
Figura 8 – Painéis Fotovoltaicos no prédio do Pão de Açúcar. ....	55
Figura 9 – Energia Fotovoltaica no Aeroporto Santos Dumont. ....	62
Figura 10 – Energia Fotovoltaica no Aeroporto Santos Dumont. ....	62
Figura 11 – Imagem do Terminal de Passageiros do aeroporto de Maricá. ....	63
Figura 12 – Imagem do Hangar 1 do aeroporto de Maricá. ....	63
Figura 13 – Imagem dos novos hangares – Hangar 2 e 3 do aeroporto de Maricá. ....	63
Figura 14 – Imagem superior do aeroporto de Maricá. ....	64
Figura 15 – Planta do Aeroporto Municipal de Maricá. ....	66
Figura 16 – Histórico de consumo da empresa Codemar. ....	68
Figura 17 – Oferta de irradiação solar em Maricá. ....	72
Figura 18 – Área do Hangar 3. ....	73
Figura 19 – Resumo do Resultado do Software PVsyst. ....	74
Figura 20 – Principais Resultados do Software PVsyst. ....	74
Figura 21 – Balanços e Resultados Principais PVsyst. ....	75
Gráfico 1 – Geração mensal do sistema proposto. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores de Continuidade .....	14
Tabela 2 – Energia consumida e demandada no Aeroporto de Maricá no período de janeiro de 2019 a dezembro de 2020.....	67
Tabela 3 – Energia consumida e demandada no Aeroporto de Maricá no período de janeiro de 2020 a dezembro de 2020.....	71
Tabela 4 – Fluxo de Caixa.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
Alerj	Assembleia Legislativa do Rio
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado
BAPV	<i>Building Applied Photovoltaics</i>
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaics</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIAL	<i>Cochin International Airport Limited</i>
CODEMAR	Companhia de Desenvolvimento de Maricá
CPI	Comissão Parlamentar de Inquérito
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FV	Fotovoltaico
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gdn	Geração Diária Necessária
Gmn	Geração Mensal Necessária
GW	Gigawatt
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
KLIA	<i>Kuala Lumpur International Airport</i>
KSEB	<i>Kerala State Electricity Board</i>
KW	Quilowatt
LCOE	Custo Nivelado de Eletricidade
MW	Megawatt
PB	<i>Payback</i> Simples
PBD	<i>Payback</i> Descontado
PV	Painel Solar Fotovoltaico
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
TE	Tarifa de energia
TEP	Tarifa de energia na Ponta
TEFP	Tarifa de energia Fora de Ponta
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TUSD	Tarifa de uso do sistema de distribuição
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMA DA PESQUISA .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Principal .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Intermediários .....</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>RELEVÂNCIA .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>Relevância Teórica .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>Relevância Prática .....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>18</b>
<b>5.2</b>	<b>Projeto de Investimento .....</b>	<b>23</b>
5.2.1	Métodos de avaliação de retorno de investimentos .....	23
5.2.2	Valor Presente Líquido – VPL .....	23
5.2.3	Taxa Interna de Retorno – TIR.....	26
5.2.4	Taxa mínima de atratividade – TMA .....	28
5.2.5	<i>Payback</i> .....	28
<b>5.3</b>	<b>Energia Solar .....</b>	<b>29</b>
<b>5.4</b>	<b>Sistema Fotovoltaico.....</b>	<b>31</b>
5.4.1	Fatores que interferem no desempenho do Sistema Fotovoltaico .....	33
5.4.1.1	Temperatura.....	33
5.4.1.2	Irradiação Solar .....	33
5.4.1.3	Umidade .....	34
5.4.1.4	Acúmulo de Sujeira .....	35
5.4.1.5	Espectro Solar.....	36
5.4.1.6	Degradação do Módulo .....	36
<b>5.5</b>	<b>Vantagens e desvantagens do Sistema Fotovoltaico .....</b>	<b>38</b>
<b>5.6</b>	<b>Sistema Fotovoltaico Isolado .....</b>	<b>41</b>
<b>5.7</b>	<b>Sistema Fotovoltaico conectado à rede elétrica .....</b>	<b>42</b>
<b>5.8</b>	<b>A Energia Fotovoltaica no Brasil e no Mundo.....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO ÀS EDIFICAÇÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b>Sistema Fotovoltaico integrado a arquitetura aeroportuária .....</b>	<b>56</b>
<b>6.2</b>	<b>Aeroportos com energia Fotovoltaica.....</b>	<b>58</b>

<b>7</b>	<b>AEROPORTO MUNICIPAL DE MARICÁ .....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
<b>9.1</b>	<b>Análise do Potencial Gerado pelo Sistema Fotovoltaico.....</b>	<b>70</b>
<b>10</b>	<b>ANÁLISE ECONÔMICA .....</b>	<b>76</b>
<b>10.1</b>	<b>Condições e variantes das análises.....</b>	<b>76</b>
10.1.1	Financiamento .....	76
10.1.2	Tempo da análise do investimento .....	76
10.1.3	Taxa Mínima de Atratividade (TMA).....	77
<b>11</b>	<b>VIABILIDADE ECONÔMICA .....</b>	<b>77</b>
<b>12</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo nos últimos anos, exigindo, assim, um aumento expressivo da oferta energética. Contudo, no encontro com analistas de investimentos em setembro de 2021, André Pepitone, diretor-geral da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), destacou que o Brasil atravessa a mais rigorosa escassez hídrica dos últimos 91 anos e, possivelmente, o pior período úmido da história. E que em virtude da seca, só há 21% de armazenamento hidrelétrico na Região Sudeste, que detém 70% dos reservatórios do País (ANEEL,2021).

Nesse contexto, a energia solar se revela uma fonte promissora, pois pode suprir essa crescente demanda de energia, diversificando a matriz e gerando segurança energética, além de ser sustentável e inesgotável.

A energia solar pode ser instalada em grandes centros urbanos ou na área rural, essa diversificação facilita e viabiliza o uso, que vem crescendo devido à redução dos custos de painéis fotovoltaicos (FV) e pela baixa despesa de manutenção.

O sistema FV pode ser instalado para funcionar em paralelo com a rede de distribuição do sistema de alimentação tradicional. Ou seja, os clientes irão consumir energia elétrica de duas fontes ao mesmo tempo. Se o seu consumo de energia for inferior à energia produzida pelo sistema FV, o excedente de energia gerado pode ser injetado na rede de distribuição, observando as normas regulatórias.

Especialmente em climas quentes, como é o caso do Brasil, uma parte considerável da demanda de eletricidade em edifícios comerciais se deve ao uso intensivo de sistemas de ar-condicionado, como é o caso dos aeroportos. Contudo, aeródromos construídos em regiões ensolaradas e quentes apresentam uma ótima combinação entre demanda e potencialidade para o uso de energia solar.

Como aeroportos são, em sua grande maioria, edificações isoladas, com extensas áreas abertas, livres de sombreamento e com grande demanda de energia elétrica, oferecem grande potencial de aproveitamento para sistemas FV integrados.

## 2 PROBLEMA DA PESQUISA

Aeroportos consomem um nível alto de energia devido à complexidade da infraestrutura necessária para sua operação. Eles necessitam de um sistema de alimentação confiável e de qualidade, composto de um componente principal e uma energia de emergência ininterrupta, pois uma falha nos sistemas poderia causar acidentes de repercussão catastrófica, inoperância do aeroporto, atrasos e outras consequências indesejáveis (MOREIRA, 2005).

Lau *et al.* (2010) afirmam que até mesmo um aeroporto regional com 24 horas de operação entra em uma categoria de uso intensivo de energia. Portanto, o custo de energia do aeroporto é alto (LAU *et al.*, 2010). O modelo energético utilizado nos aeroportos caracteriza-se pelo uso quase que exclusivo de energia elétrica oriunda da concessionária local e de grupos geradores, como energia de backup (MOREIRA, 2005).

O município de Maricá, até 2020, sofria com a baixa qualidade do serviço de distribuição prestado pela concessionária local. O problema era tão sério que em 2019 passou a ser investigado pela Comissão Parlamentar de Inquérito (CPI) da Assembleia Legislativa do Rio (Alerj), instaurada para investigar as irregularidades no setor de energia elétrica, sendo concluída em 2020 (MARICÁ, 2020).

De acordo com os dados de Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor (DEC), disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em seu site, observa-se que nos últimos cinco anos a região de Maricá registrou números acima do limite, conforme tabela 1. Dessa forma, o intervalo de tempo em que cada consumidor, em média, ficou sem energia elétrica, considerando interrupções iguais ou superiores a três minutos, foi elevado. Já a Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor (FEC), apesar de estar abaixo do limite, ainda possui valores altos, contudo já podemos ver um efeito positivo da CPI.

**Tabela 1 – Indicadores de Continuidade**  
**INDICADORES DE CONTINUIDADE – MARICÁ**

ENEL – RJ					
ANO	Nº DE CONSUMIDORES	DEC APURADO	DEC LIMITE	FEC APURADO	FEC LIMITE
2015	45.658	35,81	16	14,8	15
2016	46.457	29,1	15	12,41	14
2017	48.205	20,84	14	12,36	12
2018	49.288	13,8	14	7,76	11
2018	50.704	13,94	13	7,43	9
2020	52.695	13,04	12	6,88	9

Fonte: ANEEL, 2021.



Na época, o aeroporto municipal de Maricá foi afetado por essa baixa qualidade do serviço. Dessa forma, para solucionar o problema, a Companhia de Desenvolvimento de Maricá (CODEMAR) contratou através de licitações um grupo gerador estacionário com carga total de 525Kva. O gerador, que deveria ser utilizado em momentos críticos somente como energia de segurança, pois tem um alto custo devido à utilização de diesel, acabou sendo usado de forma recorrente.

O aeroporto de Maricá ainda possui um contrato de demanda contratada com a concessionária fornecedora de energia de 400 KW. Como o aeroporto ainda não se encontra em plena operação, o total de carga contratado não é utilizado, sendo assim o valor pago por essa energia é elevado para o atual consumo.

Frente a esse cenário de insegurança energética e excessivo custo com energia elétrica devido ao uso dos geradores e demanda contratada sem utilização, faz-se necessária a busca por uma fonte de energia alternativa.

Nesse contexto surge o projeto de implantação de painéis FV para geração de energia elétrica como forma de auxiliar em situações de queda energética por parte da empresa distribuidora, ajudando ainda a mitigar a sobrecarga na rede e visando reduzir a dependência das concessionárias.

Outro ponto de grande relevância para implantação de energia solar no aeroporto é a redução nos custos de energia elétrica, gerando, assim, uma economicidade para o município, reduzindo desta forma os gastos públicos.

Como um diferencial de grande importância, o aeroporto de Maricá estaria indo ao encontro dos grandes aeroportos brasileiros e mundiais que já utilizam energia renovável, focados em projetos sustentáveis que reduzem as emissões de gases poluentes e colaboram com o meio ambiente, ganhando selo de aeroportos verdes.

O município de Maricá pretende usar a cidade como modelo de desenvolvimento sustentável. Seguindo essa ideia, o atual prefeito sancionou a Lei nº 2.764/2020 que cria o Programa Maricá Solar, instituindo a política municipal de aproveitamento da energia solar, trazendo a previsão de instalações alternativas nos projetos de construção e incentivos para a geração de energia fotovoltaica e o racionamento de energia elétrica.

O município está investindo em vários projetos para que a cidade se torne sustentável, diante da importância do tema, tais aplicações denominadas “investimentos socialmente responsáveis” geram valor para o aeroporto e para a cidade, o que constitui uma vantagem competitiva sustentável.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Principal**

A pesquisa tem por finalidade avaliar o potencial e a viabilidade econômica da implantação da planta de geração de energia solar fotovoltaica no aeroporto municipal de Maricá.

#### **3.2 Intermediários**

Verificar através das plantas do sítio aeroportuário, fotografias e das plantas das coberturas das edificações a área disponível para utilização do sistema FV.

Analisar a oferta de irradiação solar nas diferentes épocas do ano e as curvas de irradiação solar.

Coletar dados de consumo energético do aeroporto e analisá-los, identificando as épocas do ano com maiores picos de energia.

Avaliar as tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis e qual delas tem o melhor custo-benefício.

Gerar e analisar os dados sobre o potencial energético produzido pelo modelo proposto.

Analisar a viabilidade econômica do projeto.

## **4 RELEVÂNCIA**

### **4.1 Relevância Teórica**

O presente estudo contribui para futuros projetos de implantação de energia fotovoltaica em aeroportos de pequeno a médio porte, como o municipal de Maricá. O estudo pode servir como modelo para análise e comparação dos resultados.

### **4.2 Relevância Prática**

A proposta da pesquisa é relevante na esfera econômica, social, ambiental e tecnológica. A implantação dos módulos FV no aeroporto de Maricá tem como propósito reduzir os custos com a energia, gerando eficiência econômica, ambiental e seguridade de operação a longo prazo.

O projeto também garante segurança energética não só para o aeroporto como para o município de Maricá, pois a energia gerada e não consumida pode ser conectada à rede elétrica, reduzindo as oscilações na rede local e aumentando a disponibilidade de energia local, dessa forma evitando interrupções ou quedas no fornecimento, pois a distribuição próxima ao centro de consumo elimina perdas de transmissão.

O município de Maricá possui projetos, como Maricá Inteligente e Maricá Sustentável. A proposta de energia solar no aeroporto seria um avanço tecnológico e estaria de acordo com os projetos que a prefeitura pretende alcançar no longo prazo. A ideia é ter eficiência e segurança energética de forma sustentável. A ideia ainda traz visibilidade para a cidade, pois o uso de fontes renováveis é tendência mundial, já que essa inovação oferece um serviço de qualidade e eficiência, reduzindo a poluição e a emissão de gases de efeito estufa (GEE).

## 5 REFERENCIAL TEÓRICO

### 5.1 Revisão Bibliográfica

Revisão de alguns trabalhos que reportam análises de desempenho e viabilidade econômica de sistemas solares em condições aeroportuárias.

No artigo “Design analysis of photovoltaic systems as renewable energy resource in airport”, de Hermawan, foi analisado o Retorno do Investimento (ROI) de um sistema FV no aeroporto de Kallmarau na Indonésia e a mitigação do dióxido de carbono. O método usado foi a análise do local do estudo, da irradiação solar, do melhor local para a instalação dos painéis solares e o cálculo da produção de energia solar. A análise do retorno do investimento foi calculada através do valor presente de uma constante de renda/economia fixa por ano (A), e pelo valor presente de série geométrica gradiente com a variável (A). Foram determinadas a taxa de juros, a taxa de aumento anual da energia, o preço da eletricidade e preço dos módulos. Os resultados encontrados foram que o retorno do investimento será em 17 anos para o caso 1, em que o preço da eletricidade foi dado em 1400 IDR/kWh, não sendo atrativo a menos que haja interesse na criação de um aeroporto verde. Contudo no caso 2, em que o preço da energia foi dado em 25 cent USD/kWh, o tempo de retorno do investimento foi de 7 anos, sendo muito interessante e impulsionando o desenvolvimento de energia renovável na Indonésia. Quanto à mitigação de CO<sub>2</sub>, encontrou-se o resultado de 219.949 kg CO<sub>2</sub>.

O “Fully solar powered airport: A case study of Cochin International Airport” de Sukumaran e Sudhakar é um estudo de caso do aeroporto de Cochin na Índia que é totalmente movido a energia solar. Os autores apresentaram a planta solar fotovoltaica do aeroporto e todos os seus detalhes, como metodologia visitaram o local, coletaram dados, estabeleceram os indicadores de desempenho que utilizaram, os softwares utilizados para a simulação foram o PVSyst e o SolarGIS. Também determinaram indicadores para o cálculo dos benefícios econômicos e ambientais. Os resultados mostraram que o sistema FV no aeroporto teve um índice de desempenho médio anual de 86,58%, chegando a 97,36% no mês de junho. Já na simulação do PVSyst, a taxa de desempenho média foi de 79,33% e na simulação do SolarGIS a média foi de 76%. O projeto apresentou um *payback* de 5,6 anos, um Valor Presente Líquido (VPL) positivo para uma taxa de desconto de 10% e uma taxa interna de retorno de 17,5%, mostrando que o projeto é economicamente viável. Em termos de benefício ambiental a quantidade de emissão de carbono evitada é de 12.134,36 toneladas.

No artigo “Viabilidade econômica de geração fotovoltaica no aeroporto de Belém-PA”, Vinagre *et al.* abordaram um projeto de geração de energia fotovoltaica integrado à rede e analisa os indicadores econômico-financeiros para o Complexo Aeroportuário de Belém. A metodologia utilizada no trabalho foi definida a partir do estabelecimento da área do estacionamento como a utilizada para a instalação da energia solar, do uso do software Radasol para fazer a manipulação de dados de radiação solar, da quantidade de passageiros, da irradiação solar e inclinação dos módulos, do dimensionamento do sistema, da escolha dos painéis, inversores, da perda do sistema e do consumo de energia. Na análise foram utilizados os seguintes indicadores econômicos: Período de retorno, VPL e Taxa Interna de Retorno (TIR). Para analisar a viabilidade do projeto, foram considerados três diferentes cenários: o primeiro atendendo 100% do consumo, o segundo 85% e o terceiro 50%. O estudo revelou que a variação da relação geração/consumo não influencia os indicadores econômico-financeiros, os quais resultaram, em período de retorno de 5 anos e 2 meses, uma TIR de 24,69% e uma rentabilidade em média de 133%.

Em “Airport-based photovoltaic applications”, de Sreenath *et al.*, os autores buscaram estudar a aplicação fotovoltaica no ambiente aeroportuário, os aspectos técnico-econômicos e ambientais do sistema, compreender os fatores de riscos e as perspectivas futuras. O texto ainda traz informações importantes de aspectos econômicos de diversos aeroportos que possuem sistemas FV. O Adelaide airport na Austrália tem um *payback* de 8 anos e um VPL positivo com 13,1% de TIR. Já o Brookhaven airport nos EUA obteve uma redução de quase 20% no custo de energia elétrica. O aeroporto de Kuala Lumpur na Malásia arrecada receita em termos de aluguel e royalties, além de ter uma economia de custos de RM 21 milhões com o uso de eletricidade solar mais barata do que a tarifa local. O aeroporto de Trichy na Índia teve um retorno esperado em um período de 3 anos e 8 meses e o sistema FV atende 25% da necessidade energética do aeroporto. O sistema FV no aeroporto de Tucson nos EUA ajudou na redução de 50% dos custos de energia. Ainda nos EUA, o aeroporto de Sacramento teve uma redução anual no custo de energia de US\$ 850 mil. Os autores concluíram que os sistemas FV são versáteis e compatíveis com as várias restrições do ambiente aeroportuário, que a inclinação e posição dos módulos são importantes para evitar o ofuscamento, que embora o investimento inicial seja grande os projetos são considerados economicamente viáveis em aeroportos, por fim, que o potencial de mitigação de carbono é enorme.

No texto “Fully solar powered Raja Bhoj International Airport: A feasibility study”, os autores Sreenath e Sudhakar analisaram a viabilidade do projeto FV no aeroporto Internacional

de Raja Bhoj na Índia. Para a determinação da viabilidade, como metodologia, foi escolhida a localização geográfica e o projeto de usina solar fotovoltaica em escala de utilidade, para a simulação foi utilizado o software PV SISIFO e foram utilizados alguns parâmetros e índices para definir o desempenho geral do sistema. O resultado encontrado foi que o rendimento anual será de 1367 kWh/KWp e a relação de desempenho de 85,54%. A usina irá gerar energia elétrica máxima de 326.029 kWh em julho e mínima de 95.729 kWh em dezembro. A análise econômica foi realizada considerando o índice de patrimônio, a taxa de juros de 11,50%, o tempo de 15 anos para o empréstimo e 25 anos para o projeto, com um investimento inicial de 10.1 Crores (Cr). Assim, o *payback* do projeto será de 4,56 anos e após os 25 anos o projeto terá um retorno positivo de 38,81 Cr. Com relação ao benefício ambiental, cerca de 56.029 toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> serão mitigadas, equivalendo também ao plantio de 89.646,41 árvores.

Em “Using solar photovoltaic at Egyptian airports: opportunities and challenges,”, os autores Mostafa *et al* discutiram a possibilidade de utilização de sistemas solares fotovoltaicos em aeroportos egípcios, levando em consideração os requisitos de segurança como condições obrigatórias para os ambientes aeroportuários. Além disso, fizeram um estudo de pré- viabilidade para o uso de um sistema FV no Aeroporto Internacional de Hurghada, no Egito. Ao longo do texto eles apontaram os riscos e os cuidados necessários em instalar energia solar em aeroportos e apresentaram alguns aeroportos que já possuem esse sistema. Para o estudo de caso foi utilizado o software PVGIS e determinados os valores de vida útil, taxa de alteração do preço da energia, os custos de manutenção e investimento, as taxas de juros e financiamento. O resultado encontrado foi que para uma potência do sistema de 1.770 kWh/kWp, a produção anual do sistema FV proposto será igual a 55.401.000 kWh, valor acima do consumido, dessa forma tem seu excedente exportado para a rede. As despesas acumuladas totais serão de cerca de 120,6 milhões de dólares, enquanto a receita acumulada total será de cerca de 116 milhões de dólares, como resultado a economia acumulada será de 4,6 milhões de dólares negativos ao longo da vida útil do projeto. Assim, o resultado não incentivará o financiamento de tal projeto nessas circunstâncias, pois o preço de um módulo FV no Egito é muito alto em comparação com seus preços internacionais, além da instabilidade da taxa de variação da libra egípcia (LE) para o dólar americano (US\$) e o fato da tarifa regulada de eletricidade egípcia ser uma das mais baixas do mundo. Em termos ambientais o impacto é positivo, a quantidade de redução anual de CO<sub>2</sub> após o uso dos sistemas solares fotovoltaicos será de cerca de 27.700.500 kg. Os autores concluíram que para implantação de energia solar no Egito é preciso que barreiras sejam

enfrentadas, como as já citadas e as altas taxas de juros dos empréstimos para financiamento dos projetos.

Choudhary *et al* propuseram no artigo “Making Indian airports sustainable by using solar photovoltaic system: analysis of three airports” um projeto detalhado e uma análise de viabilidade do uso de usinas de energia solar fotovoltaica (FV) conectadas à rede de três aeroportos domésticos da Índia. O objetivo foi projetar e estimar a geração de energia solar e a redução das emissões de dióxido de carbono proporcionados pelos sistemas FV. Ao longo do artigo, são explicados em detalhes os dados dos três aeroportos considerados para o estudo, o Aeroporto Maharana Pratap em Udaipur (Rajasthan), o Aeroporto Swami Vivekananda em Raipur (Chhattisgarh) e o Aeroporto Aurangabad em Aurangabad (Maharashtra), como população total do distrito, a localização, o dimensionamento, o consumo de eletricidade, a área de cobertura do terminal e do hangar e o movimento de aeronaves e passageiros. A metodologia usada foi a coleta de dados relativos aos aeroportos, em seguida, as usinas de energia solar fotovoltaica foram projetadas considerando a análise de sombreamento e as perdas do sistema, após isso, os desempenhos das usinas solares projetadas foram avaliados, estimando-se a geração de energia mensal e anual. Por fim, foi analisado o custo de instalação e as estimativas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Os autores determinaram a potência necessária para cada aeroporto e a partir disso fizeram a projeção dos sistemas através do software Helioscope. Os resultados mostraram que todos os projetos tiveram uma taxa de desempenho acima de 77% e a redução da emissão de dióxido de carbono devido à energia anual gerada por usinas solares fotovoltaicas nos aeroportos ficaram acima de 3 mil toneladas de CO<sub>2</sub> cada.

No artigo “Solar PV energy system in Malaysian airport: Glare analysis, general design and performance assessment” de Sreenath *et al.*, os autores tiveram como objetivo analisar o desempenho de uma planta solar fotovoltaica proposta nas instalações do Aeroporto de Kuantan, Malásia, levando em consideração a ocorrência de ofuscamento. A metodologia utilizada foi desenvolvida a partir da descrição e coleta de dados de diferentes áreas no aeroporto, sendo analisado o impacto do brilho de cada local através do software ForgeSolar e o desempenho do sistema solar usando os dados simulados do software SolarGis. Os resultados mostraram que o espaço ao redor da pista pode ser efetivamente alocado para a usina solar, pois apenas uma zona teve o impacto de brilho e que a planta de energia solar fotovoltaica proposta deve gerar 26.304 MWh anualmente, superando a necessidade de energia do edifício do terminal do aeroporto em 168 vezes. Os valores médios mensais do índice de desempenho e do fator de utilização da capacidade instalada são 76,88% e 15,22%, respectivamente.

No artigo “Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates”, Rüther e Braun avaliaram o potencial impacto na redu  o da demanda de energia no Aeroporto Internacional de Florianópolis com o uso de sistemas FV integrados   construi  o. A metodologia usada foi o cálculo do potencial energético, a busca por dados de demanda energética, a irradia  o solar local e a determina  o dos módulos. Após os cálculos, foi possível notar que durante os períodos de alta demanda de energia o potencial de gera  o fotovoltaica   maior, e a demanda pode ser totalmente atendida pelos sistemas FV na maioria dos casos. Outros pontos apresentados foram que o aeroporto consome apenas 11% de carga da concessionária local, que poderia ser suprida por uma instala  o de 1670 kWp, que o envelopes de edifícios como aeroportos podem acomodar o gerador FV e a instala  o do edifício pode fornecer a interface entre o gerador solar e a rede de distribui  o da concessionária, resultando em uma usina de energia limpa.

Braun *et al.* tiveram como objetivo no artigo “A integra  o dos sistemas solares fotovoltaicos em seis aeroportos brasileiros utilizando diferentes tecnologias de células solares” analisar a contribui  o energética da integra  o de sistemas FV   arquitetura dos complexos aeroportuários. Como método para o cálculo foram utilizados dados de consumo mensal energético por um período de um ano, a base da radia  o solar, determinada por cidade, e a compara  o entre diferentes tecnologias fotovoltaicas. Após análise de diversas tecnologias, foram encontrados os seguintes resultados: para o Aeroporto Internacional de Florianópolis a contribui  o solar fotovoltaica chegaria em média a 60%; j   para o Aeroporto Santos-Dumont, no Rio de Janeiro, a contribui  o seria de mais de 100% para todos os meses, possibilitando que o excedente seja vendido   concessionária local; para o Aeroporto de São Paulo – Congonhas – foi encontrada uma contribui  o em média de 50%; para o Aeroporto Internacional de Brasília a contribui  o ultrapassaria 100% em todos os meses do período analisado; a melhor tecnologia contribuiu com 50,26% em média para o Aeroporto Internacional de Guarulhos, também em São Paulo; para o Aeroporto Internacional do Galeão, também no Rio de Janeiro, a melhor tecnologia encontrou uma contribui  o de 50,71% em média. Dessa forma, o artigo concluiu que aeroportos com menores demandas de consumo tiveram grandes percentuais de contribui  o de energia gerada pelos módulos FV. E aeroportos com picos de demanda diurnos são mais propícios a utilizar maior parte da energia gerada pelos módulos, já que a gera  o e consumo são coincidentes.



## 5.2 Projeto de Investimento

### 5.2.1 Métodos de avaliação de retorno de investimentos

A avaliação de retorno de investimentos se resume em uma técnica de aspecto financeiro que busca determinar as possibilidades de sucesso econômico e financeiro de um determinado projeto, seja ele de investimento, de lançamento de um novo produto, de entrada em um novo mercado ou um projeto de reestruturação organizacional (VIEIRA *et al.*, 2016).

A decisão de investir o capital faz parte de um processo que envolve a geração e avaliação de diversas alternativas que atendam às especificações técnicas dos investimentos. Após listar as alternativas tecnicamente viáveis, são analisadas quais são financeiramente atrativas. É nesta última parte que os indicadores gerados irão auxiliar no processo de tomada de decisão (SOUZA & CLEMENTE, 2009).

Para Damodaran (2004) a regra para a tomada de decisão sobre o investimento permite o reconhecimento dos investimentos bons e ruins. Uma boa regra mantém o equilíbrio entre a flexibilidade e a coerência, leva à maximização do valor da empresa e funciona para todos os tipos de projeto (DAMODARAN, 2004).

### 5.2.2 Valor Presente Líquido – VPL

O VPL foi formalizado e popularizado por Irving Fisher, em seu texto *The Rate of Interest* de 1907, que propôs um consumo baseado na teoria da taxa de juros, a qual refletiria o equilíbrio entre a renda de hoje e a renda marginal do período seguinte. Em vista disso, Brennan e Schwartz (2001) esclarecem que o padrão da técnica do VPL permanece inalterada desde o surgimento do modelo desenvolvido por Fischer, com adaptações de Dean, Bierman e Smidt. (BRENNAN & SCHWARTZ, 2001)

Para Gitman (2001), o VPL é uma sofisticada técnica de orçamento em que seu valor é determinado pela subtração do valor inicial de um projeto, do valor presente dos fluxos de entrada de caixa, descontados a uma taxa igual ao custo do capital da empresa. Para Yeo e Qiu (2002) ele é a diferença entre o valor presente da estimativa líquida das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa. De acordo com Assaf Neto (2005), o VPL é obtido pela diferença entre o valor presente dos benefícios líquidos de caixa, previstos para cada período no horizonte de duração do projeto, e o valor presente do investimento. Já segundo Marquezan (2006), o ele é o valor das somas algébricas de fluxos de caixa futuros, descontados a uma taxa

de juros compostos, em uma determinada data (GITMAN, 2001; YEO & QIU, 2002; ASSAF NETO, 2005; MARQUEZAN, 2006).

Souza e Clemente (2019) afirmam que o VPL é a técnica de análise de investimento mais conhecida e mais utilizada. Mondher (2002) enfatiza que a literatura padrão sobre técnicas de orçamento de capital usa o VPL como referência para decisões de investimento. A análise se baseia principalmente na utilização do custo de capital, que consiste no desconto dos fluxos de caixa futuros (SOUZA & CLEMENTE, 2009; MONDHER, 2002).

Evangelista (2006) considera que as principais características do método do VPL são considerar como certos os fluxos de caixa futuros do empreendimento, utilizar períodos determinados e usar taxas de desconto fixas para atualizar o fluxo de caixa (EVANGELISTA, 2006).

Lapponi (2000) revela que o VPL também é uma técnica adotada como parâmetro para analisar a sensibilidade de projetos, possibilitando sua aceitação ou rejeição. A análise consiste em trazer para o momento presente o fluxo de caixa da quantidade de períodos de um projeto, a uma taxa de juros conhecida, e descontar o valor do investimento inicial. O resultado do cálculo é o VPL, que pode ter um valor positivo ou negativo. De acordo com Finnerty (1999), a viabilidade econômica de um projeto é encontrada quando o VPL dos fluxos de caixa esperado é superior ao valor presente dos custos do investimento (LAPPONI, 2000; FINNERTY, 1999).

Em alguns casos, como em novos negócios, a análise do VPL é crucial para a tomada de decisão, mesmo que apresente um VPL negativo. Nesse caso, outras variáveis que podem interagir com o projeto devem ser consideradas, tais como as perspectivas de crescimento do mercado, o bloqueio à entrada de concorrente futuro ou a saída de um concorrente atual em determinada área, a projeção de valorização imobiliária e a valorização futura de bens ou serviços (EVANGELISTA, 2006).

Essa técnica desconta o fluxo de caixa da empresa a uma taxa especificada. Esse índice se refere ao retorno mínimo que o projeto deve obter para manter inalterado o valor de mercado da empresa. A taxa usada pode ser chamada de taxa de desconto, custo de oportunidade ou custo de capital. De acordo com Damodaran (2004), o fundamental é manter a coerência ao combinar taxas de desconto com fluxos de caixa (GUIMARÃES, 2012; DAMODARAN, 2004).

O conceito de custo de oportunidade parte do princípio da existência de duas ou mais alternativas de investimento viáveis e mutuamente excludentes. Considerando a disponibilidade de recursos existentes, sempre que tivermos que decidir por uma alternativa de investimento,

deve-se considerar que os recursos alocados para essa decisão não poderão ser utilizados para outros investimentos. Torna-se necessário, então, saber o valor potencial dos ganhos que poderiam ser obtidos na aplicação sacrificada e considerar esse valor como um custo de oportunidade da alternativa escolhida. Portanto, custo de oportunidade significa o quanto alguém deixou de ganhar por ter adotado uma alternativa ao invés de outra com risco semelhante (CÂNDIDO, 2014).

Gitman (1992) apontou que os benefícios de um projeto podem ser expressos tanto em entradas de caixa quanto em economias com a implementação, portanto vale a pena avaliar a relação custo-benefício dos projetos de investimento. O autor ainda ressalta que a apuração do VPL é simples, obter informações é a parte mais trabalhosa e que para calcular o VPL de um projeto devem ser obtidos seu custo, o retorno esperado ao longo de um período e o custo de capital (GITMAN, 1992).

Portanto, o VPL se constitui no somatório de diferenças entre entradas e saídas líquidas de caixa, descontadas a uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA), para um instante de tempo determinado, representando o valor atualizado de um projeto (EVANGELISTA, 2006).

A equação geral para o método VPL é:

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0$$

Onde:

FC<sub>j</sub>: valores de entrada ou saída do caixa em cada período de tempo;

FC<sub>0</sub>: valor do investimento inicial;

j: períodos de tempo;

i: taxa de desconto do projeto.

Condição para tomada de decisão:

Se o VPL > 0: representa que o investimento é economicamente atrativo, pois o valor presente das entradas de caixa é maior que o valor presente das saídas de caixa;

Se o VPL = 0: indica que o investimento é indiferente, pois o valor presente das entradas de caixa é igual ao valor presente das saídas de caixa;

Se o VPL < 0: significa que o investimento não é economicamente viável, já que o valor presente das entradas de caixa é menor que o valor presente das saídas de caixa (GUIMARÃES, 2012).

Para Evangelista (2006), as principais vantagens encontradas no método do VPL são: a utilização de fluxos de caixa (lucro líquido + depreciação) em lugar de lucro líquido; a análise do valor do dinheiro no tempo; identificação do aumento de riqueza do empreendimento; sua utilização para tomar decisões entre investimentos; considerar o risco embutido na TMA (EVANGELISTA, 2006).

Para Paula, Capelo Junior e Costa (2007) a técnica do VPL possui, contudo, uma limitação, pois não considera as variações que certamente ocorrem no mercado, como as taxas de mercado, a concorrência, as vendas, a inflação e outras variáveis que são passíveis de variações. Dessa forma, os projetistas determinam taxas e valores para as variáveis e confiam que eles não sofrerão alterações, o que é muito improvável, principalmente se o horizonte de planejamento for de longo prazo. Como o VPL é uma variável dependente das citadas anteriormente ele também será um valor único, invariável, logo o risco relacionado a ele não pode ser mensurado estocasticamente (PAULA; CAPELO JUNIOR; COSTA, 2007).

### 5.2.3 Taxa Interna de Retorno – TIR

Ross *et al* (1998) afirmam que a TIR é a taxa de desconto que tem por finalidade igualar os fluxos de entradas com os de saídas de um investimento, procurando determinar uma única taxa de retorno que depende exclusivamente dos fluxos de caixa do investimento, que resume os interesses de um projeto (ROSS *et al*, 1998). Em outras palavras, é a taxa de juros que produz um VPL igual a zero (ASSAF NETO, 1992).

De acordo com Buarque (1991), a taxa interna de retorno é obtida por intermédio dos dados do próprio fluxo do projeto, não sendo necessário arbitrar um valor de taxa de desconto. Para Mannarino (1991), a TIR representa a rentabilidade média do capital aplicado em um projeto, dependendo de suas características econômicas intrínsecas (BUARQUE, 1991; MANNARINO, 1991).

Brito (2003), afirma que a TIR é o melhor indicador para comparar investimentos dentro do mesmo ramo de negócio. O indicador obtido com seu cálculo serve para analisar a alternativa risco e retorno. Segundo Souza e Clemente (2009), na dimensão retorno ela pode ser interpretada como um limite superior para a rentabilidade de um projeto de investimento (BRITO, 2003; SOUZA & CLEMENTE, 2009).

Assaf Neto (1992) informa que, para o cálculo da TIR, é necessário o conhecimento do dispêndio de capital, ou dispêndios, caso o investimento esteja prevendo mais de uma aplicação de capital e dos fluxos líquidos de caixa gerados exclusivamente pela decisão. Ela reflete a

rentabilidade relativa, percentual, de um projeto de investimento expressa em termos de uma taxa de juros periódica equivalente (ASSAF NETO, 1992).

A TIR é caracterizada pela remuneração de um empreendimento durante um período e fluxo de caixa pré-determinado. Representa a rentabilidade interna do projeto e é obtida descontando-se o fluxo de caixa observado durante o período de análise e que anule o valor do investimento inicial. A TIR obtida pelo projeto é comparada a uma TMA desejada e arbitrada como retorno pelo investidor. Nesse sentido, a taxa interna de retorno é utilizada para comparar alternativas de investimentos em projetos, desde que os períodos sejam equivalentes e os valores não sejam muito discrepantes, para que os resultados da análise não se mostrem distorcidos (EVANGELISTA, 2006).

De forma ampla, a taxa interna é representada, supondo a atualização de todos os valores de caixa para o momento zero, da forma seguinte:

$$TIR = \sum SCT = \frac{ECT}{(1+i)^t}$$

SCT: soma do custo total do investimento;

ECT: entradas do custo total;

i: taxa de retorno;

t: período das entradas.

A TIR é, posteriormente, comparada com a TMA, que representa o custo de oportunidade do capital investido da empresa, para verificar o desempenho do projeto. O método prediz que:

Se a TIR for maior que a TMA: o projeto deve ser aceito, pois é economicamente atrativo;

Se a TIR for igual à TMA: significa que o projeto é indiferente;

Se a TIR for menor que a TMA: o projeto deve ser rejeitado, pois não é economicamente atrativo, já que seu retorno é superado pelo retorno de um investimento sem risco.

Em geral, as empresas utilizam como TMA os custos dos financiamentos ou os índices econômicos, levando em conta também o risco dos projetos. Embora sirva como um indicador econômico de análise de projetos, a TIR não deve ser a única opção (EVANGELISTA, 2006).

#### 5.2.4 Taxa mínima de atratividade – TMA

A TMA representa o custo de oportunidade do capital investido ou uma taxa definida pela empresa como sendo a taxa ajustada ao risco do empreendimento. Significa a menor taxa de rentabilidade definida pela política de investimentos da empresa para investir em determinado negócio num dado nível de risco assumido. Essa taxa representa o retorno esperado pelos financiadores do projeto. Normalmente se utiliza como parâmetro de taxa mínima as taxas: SELIC, Taxa de renda fixa CDI e CDB (CÂNDIDO, 2014; BRASIL, 2002; VIEIRA *et al.*, 2016).

#### 5.2.5 Payback

Indica o número de períodos necessário para que a empresa recupere o seu investimento. Sendo o principal método não exato que mede o tempo necessário para que a somatória das parcelas anuais seja igual ao investimento inicial (GUIMARÃES, 2012).

Estudos sobre a análise de investimentos conduzem aos dois tipos mais utilizados de *payback*, o *Payback* Simples (PB) e o *Payback* Descontado (PBD). O *payback* simples é o período de tempo necessário para que as entradas líquidas de caixa de um projeto sejam equivalentes ao valor nele investido. É o período em que retorna o investimento, diminuindo o capital inicial, pelo somatório dos resultados obtidos nos períodos de fluxo de caixa até a liquidação de seu valor. Em regra geral, se o *payback* for igual ou menor que o período máximo aceitável de recuperação, o projeto será aceito. Mas se o *payback* for maior, o projeto será rejeitado (CÂNDIDO, 2014; EVANGELISTA, 2006).

Representado por:

$$PBS = \sum \frac{SCT}{\frac{ECT}{(1+i)^t}} - SCT$$

SCT: soma do custo total do investimento;

ECT: entradas do custo total;

i: taxa de retorno;

t: período das entradas.

Já o *payback* descontado serve para calcular o período de tempo necessário para a recuperação do capital investido, com a aplicação de uma TMA desejada como desconto para atualizar o fluxo de caixa obtido pelo projeto. É o período necessário para recuperar o valor

investido em um projeto, com base nas entradas líquidas de caixa descontadas pelo custo de capital da empresa ajustado ao risco do empreendimento. Se o período for igual ou menor que o período máximo aceitável de recuperação, o projeto será aceito. Mas se o *payback* descontado for maior, o projeto será rejeitado. Na verdade, o PB funciona como um ponto de equilíbrio contábil, enquanto o PBD atua como ponto de equilíbrio financeiro (CÂNDIDO, 2014; EVANGELISTA, 2006; VIEIRA *et al.*, 2016).

O PB não utiliza uma taxa de desconto para verificar o número de períodos necessários para recuperar o capital investido. Esse método é muito utilizado pela sua simplicidade e aplicabilidade. Já o PBD utiliza essa taxa para verificar o número exato de períodos em que o empreendimento recupera o valor inicial investido. Geralmente, essa taxa de desconto usada é a TMA, sendo determinada pelo próprio investidor como parâmetro para remuneração de seu capital (EVANGELISTA, 2006).

Para Lapponi (2000) o método é fácil, é de avaliação direta e que especifica o tempo necessário para recuperação do investimento. Segundo Schubert (1989), o *payback* deve ser utilizado como parâmetro, pois ele irá medir, com base na geração de caixa, em quanto tempo o dinheiro investido retornará na forma de rendimento. Além de destacar que uma das vantagens desse método é que ele reflete a liquidez do projeto e, dessa forma, o risco de não recuperar o investimento. O autor acrescenta ainda que quanto mais líquido o investimento, supõe-se que menos será arriscado (LAPPONI, 2000; SCHUBERT, 1989).

### **5.3 Energia Solar**

Distante cerca de 150 milhões de quilômetros da Terra, o sol emite radiação que atinge a camada externa da atmosfera terrestre com uma intensidade de  $1.367 \text{ W/m}^2$ , conhecida como constante solar (DUFFIE & BECKMAN, 2013).

Entretanto, com a propagação da radiação solar na atmosfera, ocorre o espalhamento, a absorção e a dispersão de parte dessa radiação, por isso somente uma parcela da quantidade total de radiação solar atinge a superfície terrestre. Dessa forma, o nível de irradiância na Terra atinge aproximadamente  $1.000 \text{ W/m}^2$  ao meio-dia, em dias sem nuvens e com boas condições climáticas, sendo esse valor considerado no dimensionamento de sistemas solares para a geração de eletricidade (URBANETZ, 2010). Quando somada a radiação total que incide na superfície terrestre durante um ano, alcança-se a irradiação anual global, que é medida em  $\text{kWh/m}^2$ . Esse parâmetro varia de acordo com as regiões (DGS, 2008).

A energia solar se revela uma fonte promissora, por ser limpa, infinita, gratuita e totalmente renovável, pois independentemente da quantidade de energia solar que seja convertida em calor ou eletricidade em um local e tempo especificados, mais energia solar pode estar disponível para ser convertida e utilizada no dia seguinte, portanto é inesgotável (DEHKORDI *et al.*, 2019).

Essa fonte de energia pode ser utilizada tanto para as áreas distantes e ainda não eletrificadas como também para os grandes centros urbanos, onde demandas de ar-condicionado elevam as curvas de carga, apresentando excelente sincronicidade com a geração solar (MONTENEGRO, 2013).

A energia solar pode ser aproveitada de três formas: energia solar passiva, feita por meio da arquitetura bioclimática, que projeta a edificação para receber a incidência solar para aquecer, iluminar e direcionar o ar nos ambientes internos; a energia solar térmica, que utiliza a irradiação solar para aquecimento de fluidos que poderão ser utilizados diretamente (aquecimento de água para consumo em banheiros, cozinhas e lavanderias) ou indiretamente (aquecimento de fluídos para movimentar turbinas a vapor); ou a energia solar fotovoltaica, que converte diretamente a irradiação solar em energia elétrica (SANTOS, 2013).

Diversas tecnologias estão sendo estudadas buscando o melhor aproveitamento direto da energia solar, um dos destaques é a conversão fotovoltaica. O uso direto da energia solar tem três atrativos relevantes. O primeiro é a capacidade de renovação quase infinita, considerando a escala de tempo humana. O segundo é o fato de não gerar impactos ambientais na sua operação, é silenciosa e não poluente. O terceiro é a viabilidade de aplicação junto às fontes consumidoras, eliminando a necessidade de transporte mediante grandes distâncias, diminuindo as perdas por transmissão e distribuição, uma das principais falhas do sistema convencional (ZOMER, 2010).

O sistema FV funciona por meio de painéis solares que através do efeito fotovoltaico convertem a energia do sol em energia elétrica. Esse método de conversão de energia se torna muito atraente por sua extrema simplicidade, a inexistência de peças mecânicas móveis, sua característica modular (desde mW até MW), os curtos prazos de instalação, o elevado grau de confiabilidade dos sistemas e sua baixa manutenção (RÜTHER, 2004).

De acordo com a localidade, a intensidade da irradiação solar pode variar e diversos fatores interferem nessa variação, como a latitude, hora do dia, nuvens, poluição atmosférica e umidade. Ter conhecimento antecipado da quantidade de energia que atinge uma área específica



em determinada localidade é de grande importância para estabelecer a capacidade de gerar energia de um sistema FV (LACCHINI, 2017).

Visto que o efeito fotovoltaico só ocorre na presença de luz, só há geração de energia durante o dia, sendo, desse modo, uma fonte que não possibilita geração à noite e apresenta reduções significativas em dias chuvosos ou nublados. Por isso, quanto maiores os níveis de irradiação, maior também a quantidade de energia gerada. Embora a densidade energética desse tipo de energia seja baixa em relação aos combustíveis fósseis, a disponibilidade é muito maior, já que a radiação que atinge o globo terrestre em 12 minutos seria suficiente para abastecer todo o planeta por um ano (RÜTHER, 2004).

Tratando-se de eficiência energética, esse tipo de sistema tem grande importância, citando, como exemplo, o fato de que a demanda de energia elétrica para o uso de sistemas de ar-condicionado é máxima quando a insolação é máxima. Nessas circunstâncias, a curva de geração fotovoltaica é bastante coincidente com a curva de consumo do ar-condicionado (RÜTHER, 2004).

As instalações fotovoltaicas podem ser integradas junto ao ponto de consumo, isso significa, como parte da arquitetura do edifício. Há, inclusive, a possibilidade de serem instaladas de forma centralizada, como uma grande usina, fornecendo energia para pontos mais distantes (RÜTHER, 2004).

Em determinadas áreas, os geradores solares podem ser competitivos, quando comparados com os sistemas convencionais de geração de energia, e propiciar uma maior confiabilidade no abastecimento de energia. Em outras situações, podem aumentar a capacidade da rede, através da complementaridade de energia, promovendo nela um maior desempenho e eficiência (MONTENEGRO, 2013).

#### **5.4 Sistema Fotovoltaico**

Em 1839, Edmond Becquerel demonstrou pela primeira vez o efeito fotovoltaico quando observou que duas placas de platina, imersas em solução ácida e iluminadas pela luz solar, geravam eletricidade. Estudos posteriores e sucessivos demonstraram que a luz pode ser considerada um conjunto de fótons ou quanta de luz, com comportamento corpuscular que, ao atingir materiais semicondutores, tem o efeito de liberar elétrons, produzindo uma corrente elétrica (LACCHINI, 2017).

Os sistemas FV são conjuntos de equipamentos através dos quais se converte a energia solar em energia elétrica utilizável (MONTENEGRO, 2013). O Painel Solar Fotovoltaico (PV)

é um sistema de produção de eletricidade no qual as células solares são constituídas por semicondutores que convertem a energia radiante em Corrente Contínua (CC). No momento em que a luz atinge as células de silício, haverá diferença de potencial entre os eletrodos positivo e negativo, de modo que a corrente elétrica será produzida. Ao converter a corrente obtida, que não tem frequência, em Corrente Alternada (CA), a conexão a toda a rede estará disponível. Desse modo, levando à produção sustentável e ao uso da capacidade da rede quando a produção do sistema FV é interrompida ou reduzida (DEHKORDI *et al.*, 2019).

Os principais componentes de um sistema FV são: os módulos FV; os suportes mecânicos de fixação dos módulos; banco de baterias com controlador de carga-descarga; os inversores; cabos, conexões elétricas, disjuntores e chaves elétricas; e outros componentes que são eventuais, como subsistemas de seguimento solar, sistemas de armazenamento, sistemas de monitoração remota (MONTENEGRO, 2013).

Os Sistemas Solares podem ser montados e integrados em diversas áreas. Módulos FV montados em estruturas fixas no solo tem maior flexibilidade de localização e projeto, são usualmente utilizados para instalações solares de grande escala, além de serem comparativamente mais baratos para desenvolver. Podem ter um sistema de inclinação fixa, que são mais leves, utilizam menos material e pouca manutenção, adotado na maioria dos sistemas FV terrestres em aeroportos; ou um sistema de rastreamento, que são mais caros, porém maximizam a quantidade de luz solar que incide sobre o painel FV e, portanto, a geração de eletricidade. Há também os módulos montados em telhados, que são conectados aos edifícios e, por isso, possuem uma capacidade instalada reduzida, devido ao limite do espaço. Ademais, temos os módulos integrados nas áreas de estacionamento, que utilizam o suporte de dossel. Esses consistem em uma estrutura de cobertura que está alinhada com o design do estacionamento de forma que os veículos possam ser estacionados sob ela, gerando sombra e energia (SREENATH *et al.*, 2020).

A questão principal no desenvolvimento de sistemas FV em grande escala é que ele requer um terreno grande, plano e protegido contra vandalismo, ladrões e linhas de energia existentes (SREENATH & SUDHAKAR, 2017).

## 5.4.1 Fatores que interferem no desempenho do Sistema Fotovoltaico

### 5.4.1.1 Temperatura

Um dos fatores que determina a eficiência da geração do módulo é a temperatura, pois quanto maior, menor o desempenho do módulo FV (BURGER & RÜTHER, 2006).

A temperatura de módulos FV pode chegar a valores super altos, afetando suas características elétricas, pois a tensão dos módulos diminui proporcionalmente com o aumento da temperatura (RÜTHER *et al.*, 2010).

Os módulos devem, dessa forma, ser instalados de modo a serem naturalmente ventilados. A ventilação correta ocorre quando se afasta os módulos de superfícies como paredes e coberturas, formando, assim, uma corrente de ar. Em contato com os módulos, o ar mais quente tende a subir, criando uma corrente que dissipa o calor. Portanto, é importante considerar a integração dos módulos na edificação no decurso do seu projeto arquitetônico, para posicionar corretamente os módulos e evitar perdas de geração por temperatura elevada (SANTOS, 2013).

As altas temperaturas também podem degradar as células fotovoltaicas e comprometer outros materiais utilizados na composição do módulo, reduzindo sua vida útil (NASCIMENTO, 2013).

### 5.4.1.2 Irradiação Solar

O funcionamento correto de um módulo FV necessita de uma iluminação uniforme em toda sua superfície, visto que um sombreamento parcial do módulo afetará sua geração de energia. Uma vez que a célula com menor iluminação irá determinar a corrente de operação de todas as células conectadas na mesma série que ela. Por isso, é fundamental que a integração arquitetônica projete a localização dos módulos em local livre de qualquer tipo de sombreamento, especialmente nas horas em que há maior irradiação solar disponível (SANTOS, 2013).

A disposição dos módulos FV em relação ao azimute e à inclinação vertical são fundamentais para permitir a captação da maior irradiação solar possível. Cada parte da Terra recebe um valor de irradiação diferente, portanto a dificuldade das instalações fotovoltaicas está em conseguir a melhor insolação possível para o local determinado (SANTOS, 2013).

Dentre os modelos básicos de seguidores solares o mais simples é o que possui um eixo de liberdade e segue o sol conforme o ângulo de azimute, preservando a inclinação, ajustada para ser igual à latitude da instalação. Há também o modelo mais completo, que tem dois eixos de rotação seguindo azimute e elevação. Para os dois modelos, sensores de irradiação fornecem a indicação de quanto e em qual direção reorientar o conjunto solar, esses são ligados fisicamente aos módulos solares. Ademais, tabelas ligadas ao relógio interno indicam as posições pré-programadas ao longo do dia, úteis no caso de pouca ou nenhuma luminosidade (LACCHINI, 2017).

No tocante às mudanças no ângulo de radiação ao longo do dia, as células fotovoltaicas precisam ser colocadas de acordo com a orientação que corresponda ao movimento do Sol, em vista disso, é necessário o uso do rastreador solar com o concentrador (DEHKORDI *et al.*, 2019).

A geração anual total máxima para sistemas FV ocorre, normalmente, quando os módulos solares são orientados para a inclinação do equador, igual à latitude local (ZOMER *et al.*, 2013). Sreenath *et al.* (2020) afirmam que a orientação dos módulos FV se dá quando os colocados no Hemisfério Norte são mantidos em direção ao Sul, enquanto os dispostos no Hemisfério Sul estão orientados para o Norte. Se a direção Norte for tomada como referência (zero grau), o sistema FV localizado no Hemisfério Norte será orientado em um ângulo de 180 graus a partir da referência (SREENATH *et al.*, 2020).

Burger e Rütther (2006) demonstram que baixas latitudes são menos sensíveis a desvios de azimutes, melhor dizendo, é possível projetar integrações com desvio azimutal do Norte sem grandes perdas de geração. Já em relação à inclinação dos módulos, eles demonstraram que em altas latitudes nas instalações verticais, com ângulo de 90° em relação ao solo, as perdas não são grandes, sendo mais favorecidas do que nos locais de baixa latitude. Dessa forma, as fachadas fotovoltaicas apresentam melhor desempenho relativo nos locais de alta latitude em comparação às regiões tropicais do globo (BURGER & RÜTHER, 2006).

#### 5.4.1.3 Umidade

A umidade pode afetar o desempenho do sistema FV na medida que reduz a absorção da irradiação solar devido à reflexão, refração ou difração dos raios quando estes atingem as gotículas de água (NASCIMENTO, 2013).

O ingresso de umidade no interior do módulo pode causar fragilização do material encapsulante, fuga de corrente devido à redução da resistência elétrica entre materiais e

aumento da resistência série das células FV, diminuindo o desempenho do dispositivo (MEKHILEF *et al*, 2012; SEFID *et al.*, 2012).

Ademais, a umidade pode levar à formação de orvalho sobre os painéis, o que facilita o acúmulo de sujeira sobre eles e provoca corrosão e degradação dos condutores e componentes metálicos, reduz a adesão entre pontos de ligação e conseqüentemente leva à queda do desempenho (MEKHILE *et al*, 2012; SHARMA & CHANDEL, 2013).

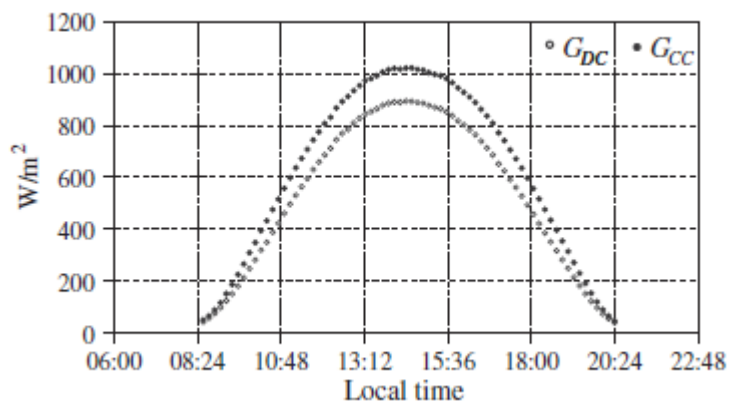
#### 5.4.1.4 Acúmulo de Sujeira

Dependendo da localidade em que o sistema FV estiver instalado, como locais pouco chuvosos e com muito material particulado na atmosfera, pode ocorrer acúmulo de sujeira e poeira que levam à redução da irradiação incidente nas células e, portanto, diminuem a potência elétrica gerada nessas condições (ZORRILLA-CASANOVA *et al.*, 2013).

As propriedades químicas, biológicas, eletrostáticas e as dimensões, forma e massa das partículas acumuladas, assim como as condições ambientais associadas interferem na potência gerada pelo módulo. Desse modo, a origem das partículas, a configuração de instalação, como ângulo e altura, a vegetação local e o método de limpeza são condições que têm forte impacto no desempenho dos módulos (MANI & PILLAI, 2010; ZORRILLA-CASANOVA *et al.*, 2013).

Observando a figura 1 é possível verificar que quando a radiação solar atinge um módulo FV com acúmulo de sujeira, a energia recebida pelo dispositivo é reduzida e ocorre queda do desempenho (ZORRILLA-CASANOVA *et al.*, 2013).

**Figura 1 – Diferença entre o  $G_{cc}$  - valor de irradiância medido pela limpeza célula solar de referência ( $Wm^{-2}$ ) e  $G_{dc}$  – valor de irradiância medido pela célula solar de referência suja ( $Wm^{-2}$ ).**



Fonte: ZORRILLA-CASANOVA *et al.*, 2013.

Como a poeira é depositada na célula suja, o comportamento das perdas não é constante ao decorrer do dia, pois depende do ângulo de incidência. As perdas diárias de irradiação produzidas por sujeira na radiação de entrada para os módulos FV, na superfície da célula, podem chegar a 14,8%. As perdas mínimas de irradiação ocorrem ao meio-dia (12,4%), quando o ângulo de incidência também é mínimo. Porém, para ângulos de incidência maiores, as perdas crescem mais rapidamente, atingindo seu valor máximo em torno de 21%, e diminuem posteriormente (ZORRILLA-CASANOVA *et al.*, 2013).

Tanto a chuva quanto o vento podem, contudo, remover as partículas acumuladas e, por essa razão, a orientação e inclinação dos módulos são fatores críticos a serem considerados nas instalações de sistemas FV, pois podem limitar a limpeza e elevar a taxa de acúmulo. Dependendo da tecnologia usada, há diferença no impacto causado pelo acúmulo de sujeira. Desta forma, a disponibilidade de água e recursos podem gerar custos adicionais para limpeza, operação e manutenção desses sistemas (MANI & PILLAI, 2010; ZORRILLA-CASANOVA *et al.*, 2013).

#### 5.4.1.5 Espectro Solar

Os módulos FV apresentam melhor desempenho elétrico quando expostos a um determinado tipo de luz solar e a resposta dos módulos para os diferentes comprimentos de onda da radiação denomina-se “resposta espectral” (NASCIMENTO, 2013). O fator espectral é a relação entre a irradiação disponível e aquela em condições padrões (1,5 AM). O espectro solar pode ser avaliado segundo seu fator espectral (SIMIONI, 2017).

Há diversas tecnologias fotovoltaicas e cada uma contém uma faixa específica do espectro para a qual apresenta a máxima absorção de fótons. Dessa forma, as variações no espectro solar incidente podem reduzir a absorção de fótons e, por conseguinte, a eficiência de conversão (SIMIONI, 2017).

As perdas provocadas pela baixa absorção do espectro solar podem chegar a 20% em condições intensas de baixa latitude e a 10% em latitudes maiores, mas com forte influência da sazonalidade e da nebulosidade (ISHII *et al.*, 2013).

#### 5.4.1.6 Degradação do Módulo

A performance dos módulos pode ser atenuada gradativamente ao decorrer do tempo devido a vários fatores de degradação, ressaltando a corrosão, o descolamento ou delaminação,

a descoloração, a fratura de células ou materiais de revestimento e desgaste dos componentes e semicondutores (NDIAYE *et al.*, 2013; SHARMA & CHANDEL, 2013).

A corrosão é provocada pela umidade no interior dos módulos concomitante à presença de oxigênio. Essa corrosão pode levar à perda de corrente, rompimento dos condutores e à degradação da adesão entre as células e os condutores metálicos (NDIAYE *et al.*, 2013).

A perda de adesão ou contato com o encapsulante é conhecida como descolamento ou delaminação, e pode interferir na durabilidade e no desempenho dos módulos, conforme permite o acúmulo de sujeira e umidade. Já que a função dos materiais encapsulantes são de promover proteção diante de condições adversas do ambiente operacional, no entanto também une as camadas frontais e traseiras com as células (SHARMA & CHANDEL, 2013).

A descoloração corresponde à mudança de cor dos materiais, que deixam de ser transparentes para assumir colorações amareladas, alterando a transmissividade das camadas e dificultando a passagem da irradiação. Essa descoloração também é causada pela perda de adesão entre o encapsulante, as células e camadas, combinada à presença de umidade e radiação ultravioleta (NDIAYE *et al.*, 2013).

A fratura das células geralmente ocorre durante a instalação, transporte ou manutenção dos módulos. Uma célula fraturada faz com que o desempenho do módulo caia significativamente, além de causar riscos de choque, curto-circuito e infiltração de umidade (NDIAYE *et al.*, 2013).

O desgaste dos componentes de conexão é provocado principalmente pela degradação das soldas e metais utilizados nas interligações das células, o que é causado pela fadiga e dilatação térmica dos componentes. Já a degradação dos semicondutores está relacionada à operação em altas temperaturas e corrente elétrica, o que degrada a estrutura da célula afetando diretamente o seu desempenho e consequentemente o aumento de resistividade elétrica no módulo (SHARMA & CHANDEL, 2013).

As razões que levam à degradação estão frequentemente associadas às condições operacionais adversas que afetam a eficiência de conversão durante a operação real. As taxas de degradação são determinadas pelas propriedades dos módulos e das células e pelas condições ambientais em que operam (SIMIONI, 2017).

Os módulos FV possuem garantias, em geral, de 5 a 10 anos contra defeitos de fabricação. Uma garantia de energia em duas etapas, sendo de 90% até 10 anos e de 80% até 20 anos, foi estabelecida como o padrão histórico pela indústria solar para os módulos FV. Esse tipo de garantia é dada da seguinte forma: a eficiência em euros do inversor é considerada como

98%; a perda de corrente contínua é considerada de 5,5% e inclui auto sombreamento de módulos FV, sombreamento externo, perda de sujeira, perda devido à incompatibilidade de módulos FV, cabo de corrente contínua e perda de interconexão; as perdas no transformador e nos cabos de corrente alternada são consideradas 1,5%; a disponibilidade da rede é considerada como 99% e a estrutura de montagem é escolhida como autônoma, fácil de instalar e com menor chance de manutenção e reflexo (SREENATH *et al.*, 2020).

Um nível mais alto de degradação pode ocorrer inicialmente, mas normalmente um declínio de 20% é considerado um fracasso. Contudo, não há consenso sobre definição de falha, porque um módulo degradado em 50% ainda pode ter maior eficiência. Portanto, o controle e previsão dos efeitos da degradação dos módulos é vital para maximização da durabilidade e desempenho de um sistema FV ao longo da sua vida útil (JORDAN & KURTZ, 2013).

### **5.5 Vantagens e desvantagens do Sistema Fotovoltaico**

O sistema FV possui diversos benefícios que abrangem diferentes áreas, como o setor ambiental, socioeconômico, energético e arquitetônico. Contudo, algumas desvantagens ainda são observadas.

Alguns países estão testemunhando efeitos nocivos do aquecimento global, como inundações, incêndios florestais, redução da cobertura de neve e alteração do habitat. Isso pode ser relacionado ao aumento das emissões do dióxido de carbono e outros GEE ocasionados particularmente pela queima de combustíveis fósseis e pelo desmatamento (SREENATH *et al.*, 2020).

O sistema FV não emite gases poluentes de qualquer tipo durante sua operação. Dessa forma, a utilização de painéis solares reduz as emissões de GEE e melhora a poluição do ar local e sonora (HAZELTON *et al.*, 2014). Por isso, o setor com maior reconhecimento em termos de benefícios é o ambiental.

O setor elétrico também se beneficia com o uso de energia solar, Rüter (2004) e Hazelton *et al.* (2014) elencaram alguns. Dentre eles, estão: redução geral na demanda de eletricidade da rede elétrica a diminuição de perdas por transmissão e distribuição de energia; a redução de superaquecimento em transformadores, aumentando, dessa maneira, a vida útil do mesmo; queda nos investimentos em linhas de transmissão e distribuição de energia; curto prazo para de instalação; oferece serviços elétricos aprimorados ao cliente em comparação com os sistemas tradicionais de fonte única e com custos operacionais mais baixos; possui um



elevado fator efetivo de capacidade de carga e os painéis solares apresentam vida útil superior a 30 anos (RÜTHER 2004; HAZELTON *et al*, 2014).

A energia fotovoltaica combinada às edificações trazem vantagens adicionais. Rüter (2004) também citou alguma delas: a substituição de materiais convencionais de acabamento, como o vidro, o telhado, o granito; utilização como elemento de controle de iluminação ambiental e o fato de não precisarem de uma área física para implantação, já que são integrados ao edifício (RÜTHER, 2004).

A sociedade e os governos buscam o desenvolvimento sustentável, qualidade de serviço e redução de custos. Dessa forma, a energia solar também traz diversos benefícios sociais e econômicos. O primeiro deles é a economia nas despesas mensais com eletricidade. Leaman (2015) afirma que a princípio a instalação de sistemas de energia solar pode parecer uma despesa cara, contudo no longo prazo o custo é razoável, pois em média se leva nove anos para ver um retorno (LEAMAN, 2015).

Em relação à sustentabilidade do processo de geração de energia elétrica através da energia solar, existe um problema ligado à produção dos painéis solares, que utilizam muita energia na sua fabricação, geralmente oriunda de fontes fósseis, emitindo gases do efeito estufa na atmosfera, além de que o silício, matéria prima principal da célula voltaica, pode ser muito perigosa se entrar em contato com outros elementos químicos. Isso traz uma preocupação no descarte da placa solar e é um assunto pouco pensado e planejado atualmente, podendo gerar um problema enorme no futuro (ECYCLE, 2019).

De acordo com a pesquisa da Environmental Progress (EP), países em desenvolvimento como Índia e China frequentemente queimam o lixo eletrônico para recuperar os fios de cobre que são lucrativos para revenda. Uma vez que esse procedimento ocorre, queimando o plástico, a fumaça resultante contém vapor venenoso que pode causar câncer e teratogênico (deformidade congênita) quando inalado. Estima-se que por quadrilhão de joules de energia produzida, entre 11 e 21 mortes foram identificadas em conjunto com as ameaças à saúde ocasionadas pela energia solar (GUANGUL & CHALA, 2019; KELLY, 2017).

Muitas empresas e proprietários de residências estão buscando a energia solar como forma de independência financeira de empresas de serviços públicos, que cobram tarifas cada vez maiores, e segurança energética. A energia gerada excedente ainda pode ser vendida de volta às empresas de eletricidade para obter crédito ou lucro (LEAMAN, 2015). Outra vantagem é o incentivo à economia local, não só pela disponibilidade de energia, mas também pelo ganho em qualidade de vida, produtividade e pela criação de empregos (IEA, 2008).

De acordo com Leaman (2015), em 2014 a indústria solar nos EUA empregava mais do que Apple, Google, Facebook e Twitter juntos, foram mais de 31 mil empregos. Para ele, a energia solar não está apenas ganhando espaço como um recurso acessível e com eficiência energética, mas também está criando uma economia melhor (LEAMAN, 2015).

O acesso à eletricidade contribui com uma série de benefícios sociais, como melhoria da saúde, comunicação e padrão de vida (HAZELTON *et al*, 2014). Além da potencialidade para fomentar a cooperação internacional por meio dos programas e assistência aos países em desenvolvimento (IEA, 2008).

O Brasil possui diversas regiões isoladas que não estão conectadas ao sistema interligado de energia elétrica. A região norte é uma delas, por possuir inúmeras comunidades isoladas desprovidas de acesso aos serviços de energia elétrica ou com acesso precário, contudo a região é a que dispõe de um dos maiores índices de incidência solar do país, tornando-se uma excelente opção a receber investimentos para instalação de usinas solares fotovoltaica (SOUZA, 2016).

Leaman afirma que a energia solar é um dos métodos de energia mais baratos e econômicos disponíveis, e que desde 2009 seu custo reduziu consideravelmente, tornando-a um dos recursos mais eficientes em energia do mundo. Atualmente, muitos edifícios e instituições instalaram sistemas de energia solar. A Cidade do Vaticano gastou US\$ 660 milhões instalando painéis solares para abastecer 40 mil casas e edifícios. O Burj Khalifa em Dubai instalou perto de 378 coletores solares que ajudam a economizar mais de 3.200 kW por dia (LEAMAN, 2015).

Porém, apesar da redução dos custos, os painéis solares ainda possuem altos valores, principalmente para consumidores de média e baixa renda. O desembolso inicial para a compra e instalação das placas é muito alto e inacessível à maior parte da população. Isso causa um desinteresse nessa tecnologia e um atraso no avanço da mesma na matriz energética do país. Outro fator que causa esse desinteresse, é o fato da política pública ser fragmentada e incompleta, faltando mecanismos de financiamento e juros baixos de longo prazo.

Apesar do Brasil ter uma das maiores reservas de quartzo, principal material para a produção das células FV, essa vantagem não é aproveitada para a construção de uma base industrial. Assim, perde-se a oportunidade de o país desempenhar um papel mais relevante no comércio internacional, limitando-se ao papel de exportador de commodities.

Uma vantagem econômica importante na implantação de energia solar é a redução das importações de combustíveis e proteção do mercado quanto à volatilidade de preços (IEA, 2008). A inclusão de geradores de energia renovável reduz os custos operacionais e a

dependência de uma cadeia de abastecimento muitas vezes incerta e preços de commodities voláteis e, portanto, pode beneficiar confiabilidade do serviço, bem como reduzir o risco de preço (HAZELTON *et al*, 2014).

Em regiões aeroportuárias existem desvantagens na implantação do sistema FV, como o ofuscamento, o reflexo do sol nas superfícies de vidro do painel FV pode atrapalhar a visibilidade dos controladores da torre ou dos pilotos, a interferência eletromagnética nos sistemas de auxílio à navegação e os diferentes eventos potenciais que podem ocorrer, como acidentes ou perigos para animais e pássaros. No entanto, há alguns anos, pesquisadores e engenheiros têm trabalhado em colaboração com organizações de aviação civil e aeroportos a fim de desenvolver soluções para esses problemas.

## **5.6 Sistema Fotovoltaico Isolado**

Os sistemas isolados ou autônomos são caracterizados por não serem conectados a uma rede elétrica pública de distribuição ou mesmo a uma mini rede e pela necessidade de um acumulador de energia, no qual a energia gerada pelos módulos é distribuída para os pontos de consumo (RÜTHER, 2004). Ele utiliza a energia fotovoltaica gerada para abastecer um sistema de armazenamento, normalmente baterias químicas, que posteriormente irão abastecer as cargas, quando o sistema não estiver gerando energia (SANTOS, 2013).

Dependendo da forma que será utilizada, o armazenamento pode ser feito através de baterias quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou em energia gravitacional para bombeamento de água para tanques em sistemas de abastecimento (TAKENAKA, 2010).

Nos sistemas que utilizam os bancos de baterias, usa-se um dispositivo de gerenciamento, que tem como função controlar a carga e a descarga na bateria, evitando possíveis danos à mesma (CRESESB, 2004).

O sistema isolado também é atualmente competitivo com formas mais convencionais de geração. São normalmente utilizados quando o custo para a extensão da rede elétrica pública for proibitivo (MELO, 2010).

Esse modelo de tecnologia é utilizado no Brasil em algumas comunidades em que a rede elétrica é de difícil acesso (RÜTHER, 2004). É usualmente utilizado para refrigeração, iluminação, utilização de eletrodomésticos, telecomunicações, bombeamento de água, entre outras cargas de baixa potência (ZAHEDI, 2006).

O sistema FV isolado pode ser de dois tipos: puro, quando a única fonte é o sol, e híbrido, quando há uma fonte complementar de geração de energia, que pode ser um motor a diesel, gerador eólico ou qualquer outra fonte auxiliar (ANTONIOLLI, 2015).

Apesar de ser utilizado para levar energia em regiões remotas, esse sistema apresenta desvantagens devido ao uso das baterias, que diminuem a sua eficiência, têm alto custo de aquisição e possuem elementos tóxicos em sua composição. Por isso, o sistema mais usual no mercado é o conectado à rede (SANTOS, 2013).

### **5.7 Sistema Fotovoltaico conectado à rede elétrica**

O Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR), diferente do isolado, não utiliza armazenamento e dispensa os bancos de energia. Na configuração mais comum, esses sistemas são instalados de modo que quando o gerador solar fornece mais energia do que a necessária para o atendimento da consumidora, o excedente é injetado na rede elétrica pública e a instalação consumidora acumula um crédito energético. Dessa forma, funcionam como miniusinas fornecendo energia à rede pública (ZOMER 2010; SANTOS, 2013).

Caso não haja excedente e a energia gerada for menor que a demanda, o déficit é suprido pela rede elétrica. Sendo assim, geração e consumo de energia elétrica têm coincidência espacial e as perdas por transmissão e distribuição são minimizadas (ZOMER, 2010).

Esse modo de instalação possibilita que a geração e seu uso sejam mais eficientes, usualmente sem sistemas de armazenamento e com troca de geração e demanda em horários diferentes (SANTOS, 2013).

Uma vantagem do SFVCR é o fato de se ter uma usina geradora descentralizada e que não ocupa área física, pois podem ser integradas à edificação, se sobrepondo ou substituindo materiais de cobertura e/ou revestimento, portanto próximo ao ponto de consumo (RÜTHER, 2004).

A adição de pontos descentralizados de geração posterga a necessidade de ampliação da rede, em geração e transmissão. Quase todos os sistemas FV existentes integrados em edificações urbanas estão interligados à rede elétrica pública, sobretudo em países que há uma legislação que beneficia a geração de energia solar. (CHIVELET & SOLLA, 2010).

Outras vantagens do sistema conectado à rede são a elevada produtividade, pois toda a energia disponibilizada é utilizada, a ausência do conjunto de baterias, que reduz a vida útil dos módulos e inversores e a não ocorrência do fenômeno chamado ilhamento, já que na ausência de energia da rede o inversor desliga o sistema automaticamente. As chances de um gerador FV

causar um ilhamento na rede elétrica é praticamente nula (CULLEN; THORNYCROFT; COLLINSON, 2002; DHERE, 2005; RÜTHER, 2004; SANTOS; URBANETZ; RÜTHER, 2008; ZEINELDIN *et al.*, 2007).

O SFVCR é constituído basicamente por painel FV e inversor, que converte a corrente contínua (gerada pelos módulos) em corrente alternada na tensão e frequência da rede, ligados a medidores que contabilizam a energia exportada à rede (SANTOS, 2013).

O SFVCR pode ser feito de duas formas, centralizado ou descentralizado (RÜTHER, 2004). A forma centralizada é caracterizada pela instalação de um alto número de módulos em um único local, que irá gerar energia para ser transmitida e distribuída até os locais de utilização, tal como uma central hidrelétrica ou termelétrica. Já a forma descentralizada são instalações menores, que geram menos energia, porém podem ser instaladas sobre edificações e junto aos pontos de consumo (IEA, 1995).

O crescimento mundial do SFCVR é de notória expressão, pois representa uma forma de geração de energia elétrica renovável. Muitos países se destacam por adotarem programas de incentivo subsidiando e/ou remunerando de forma atrativa a energia fotogerada (SANTOS, 2013).

A Alemanha está entre os países líderes no desenvolvimento e integração de energias renováveis, em particular o sistema FV. Desde a reforma da Lei das Fontes de Energia Renovável em 2004, a capacidade fotovoltaica instalada cresceu de 1 gigawatts GW para 40 gigawatts GW até 2016. Contudo, uma reforma posterior reduziu a tarifa *feed-in*, o que levou a um declínio na expansão da energia fotovoltaica (BAYER *et al.*, 2018). Dessa forma, observa-se que há necessidade de incentivo e políticas públicas para expansão da energia renovável.

Os sistemas de tarifações mais conhecidos são: o *feed in tariff*, que prevê que a unidade consumidora permaneça como compradora de toda energia que necessita e também a considera como minigerador, fazendo a compra de toda a energia gerada e o *net metering*, em que a unidade consumidora acumula créditos (em kWh) quando injeta energia na rede da concessionária e esses créditos são usados pelo consumidor nos momentos de pouca ou nenhuma radiação solar (SANTOS, 2013).

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou em 2012 a micro e minigeração distribuída através da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, a qual possibilita o consumidor gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e, inclusive, fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2018).

A micro e a minigeração distribuída compreende a produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que usam fontes renováveis de energia ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição através de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2016).

Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída diz respeito a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto a minigeração distribuída se refere às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica ou 5 MW para as demais fontes, como solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada (ANEEL, 2016).

O Brasil utiliza o sistema de tarifação de crédito de energia, se a energia injetada na rede for maior que a consumida, cria-se um crédito de energia, que não pode ser revertido em dinheiro, porém pode ser utilizado para abater o consumo da unidade consumidora nos meses subsequentes ou em outras unidades de mesma titularidade, desde que todas estejam na área de atendimento da mesma distribuidora (ANEEL, 2018).

Uma das principais inovações da regulamentação, que passaram a valer em março de 2016, foi o prazo de validade dos créditos de energia, que passou de 36 meses para 60 meses (ANEEL, 2018).

Outra inovação foi a possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios, assim a energia gerada pode ser dividida entre os condôminos em porcentagens pré-determinadas. Também foi criada a figura da geração compartilhada, a qual possibilita que interessados se unam em um consorcio ou cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados (ANEEL, 2018).

No Brasil, a falta de incentivo e financiamento faz com o que o país, apesar da forte incidência solar, ainda tenha poucos SFVCR. Diferente de países desenvolvidos que promoveram políticas públicas permitindo a instalação em larga escala (URBANETZ, 2010).

## **5.8 A Energia Fotovoltaica no Brasil e no Mundo**

Após a primeira crise do petróleo na década de 70, a energia fotovoltaica despertou um grande interesse mundial. Contudo, foi a partir dos acordos mundiais de redução de emissão de carbono que essa tecnologia despontou.

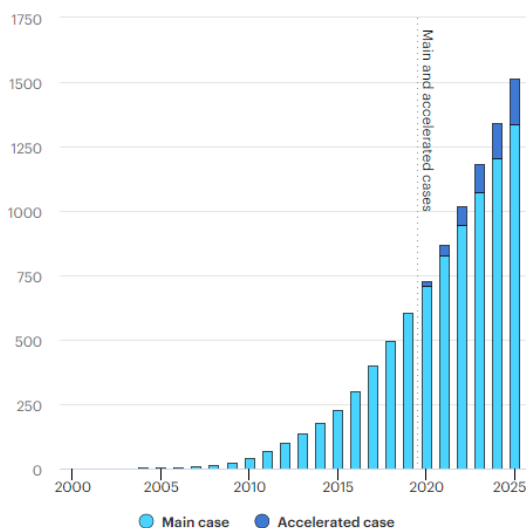
Esses acordos, como o Protocolo de Kyoto, enfatizam a imprescindibilidade da geração de energia através de fontes renováveis, incentivando as pesquisas e o desenvolvimento dessas tecnologias (ANDRADE PINTO, 2018).

O investimento no setor de energia global vem aumentando a cada ano e deve crescer cerca de 5% em 2021 para mais de US\$ 820 bilhões, seu nível mais alto, depois de permanecer estável em 2020. As energias renováveis estão dominando o investimento em nova capacidade de geração de energia e devem representar 70% do total este ano (IEA, 2021).

A utilização da energia fotovoltaica tem crescido significativamente nos últimos anos. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) (2021), até 2020 a capacidade mundial instalada de sistemas FV acumulada foi de 710 GW. Em termos de geração fotovoltaica mundial acumulada, ao final de 2020 foi alcançado 837,9TWh. As projeções são que o crescimento continue de forma acelerada, com expectativa de que até 2025 o mundo tenha uma capacidade instalada acumulada de 1337 GW e uma geração acumulada de 1635,1 TWh, observadas na figura 2 e 3 (IEA, 2021).

**Figura 2 – Capacidade fotovoltaica instalada acumulada mundial de 1990 até 2025.**

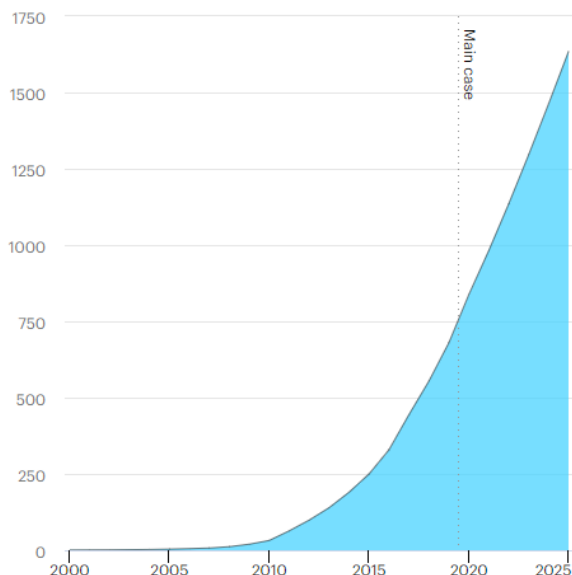
PV capacity, main and accelerated case, World, 1990-2025  
GW



Fonte: IEA, 2020.

**Figura 3 – Geração fotovoltaica acumulada mundial de 1990 até 2025.**

PV generation, main case, World, 1990-2025  
TWh



Fonte: IEA, 2020.

As expectativas vão além, de acordo com a IEA (2019), a energia solar fotovoltaica se tornará a maior fonte de capacidade de geração instalada em todo o mundo até 2040 no cenário de políticas declaradas, ultrapassando a capacidade de carvão no início de 2030. Isso reflete as contínuas reduções de custos, bem como o suporte de políticas em alguns mercados importantes (IEA, 2019).

Em 2019, 108 GW de nova capacidade solar fotovoltaica foram adicionados, representando 57,5% do total de novas adições de capacidade de geração de energia renovável. Considerando a capacidade cumulativa de energia renovável, a China permaneceu como líder global com 789 GW no final do ano, seguida pelos Estados Unidos com 282 GW, Brasil com 144 GW, Índia com 137 GW e Alemanha com 124 GW (REN, 2021).

Para a Agência Internacional de Energia (2019), adicionar 100 GW de energia solar fotovoltaica a cada ano significa atividade industrial operando em grande escala. Mesmo com as impressionantes quedas de custos recentes, a energia solar absorveu US\$ 135 bilhões em investimentos em 2018 (IEA, 2019).

A redução no custo do módulo FV, indo de US\$ 2,60 para US\$ 0,80 por watt, e no preço dos componentes do sistema FV, como estruturas de montagem, inversores, cabos e fios, é um

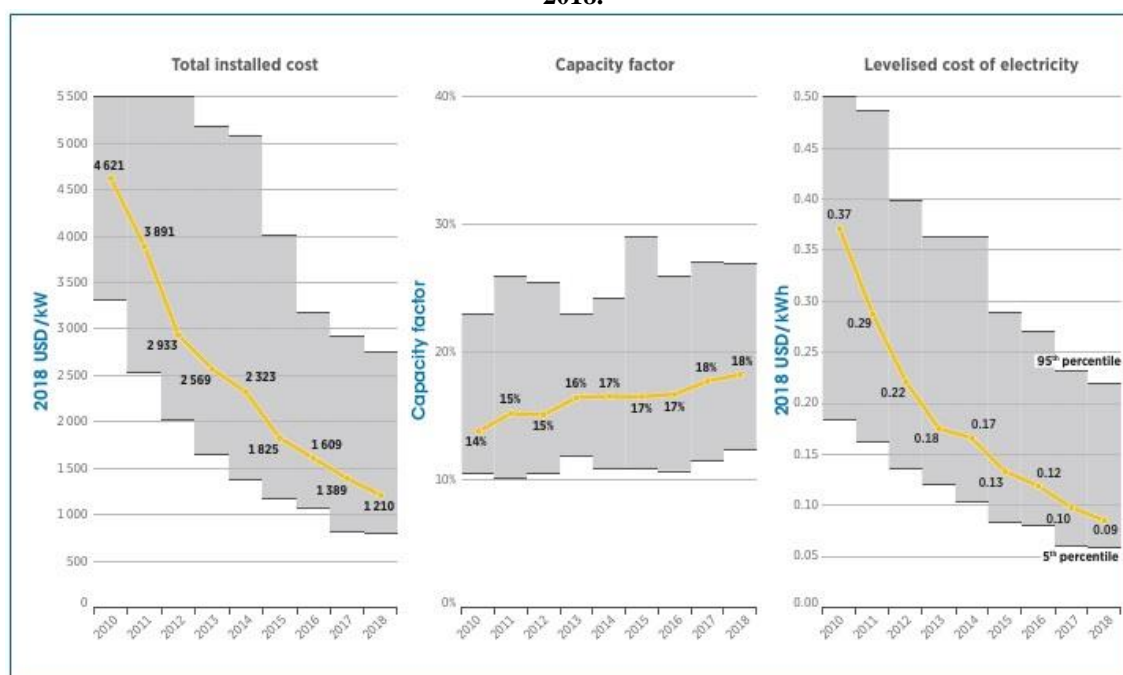


fator favorável. Dessa forma, os sistemas solares se tornaram mais suscetíveis ao investimento (SREENATH *et al*, 2019).

Para que a tecnologia solar fotovoltaica forneça uma parte significativa da energia injetada na rede elétrica, é necessário que o custo da eletricidade seja economicamente competitivo com outras formas mais usuais de geração de energia (ANDRADE PINTO, 2018).

O forte e sustentado declínio no custo da eletricidade da energia solar fotovoltaica em escala de utilidade continuou em 2018, com uma queda no Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) médio ponderado global da energia solar fotovoltaica para US\$ 0,085/kWh, sendo 13% menor do que para projetos comissionados em 2017. Isso leva a um declínio entre 2010 e 2018 de 77% no custo de eletricidade médio ponderado global de energia solar fotovoltaica, que pode ser observado na figura 4 (IRENA, 2019).

**Figura 4 – Custos totais médios instalados, fatores de capacidade e custos para energia fotovoltaica 2010-2018.**



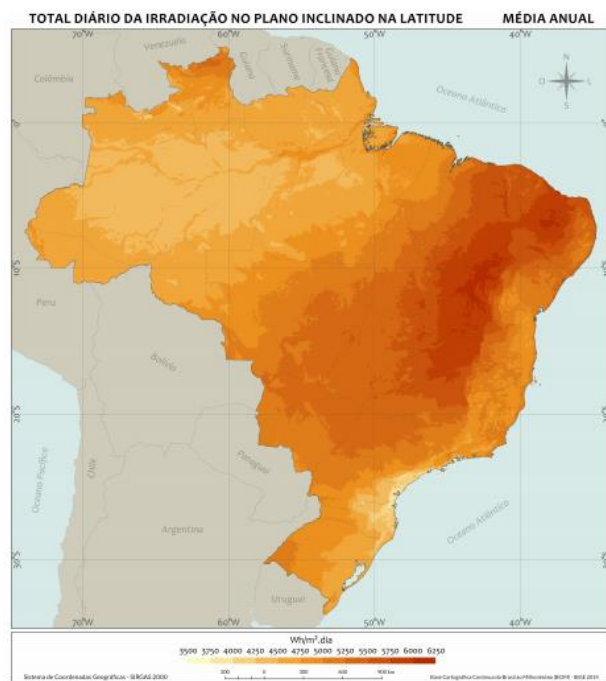
**Note:** Solar PV, unlike all other technologies in this report have their costs expressed per kilowatt direct current (DC) and their capacity factors are expressed as an AC-to-DC value.

Fonte: IRENA, 2019.

O Brasil é um dos países que possui um grande nível de irradiação solar, reservas de quartzo com qualidade para a distribuição de energia solar e tem um tamanho continental que lhe dá a oportunidade de se tornar uma nação líder nesse segmento. Esses níveis de irradiação superam os de países em que projetos de aproveitamento de energia solar são explorados em larga escala, como Alemanha, França e Espanha (INPE, 2017).

As áreas com valores máximos de irradiação solar são a região central da Bahia (6,5 kWh/m<sup>2</sup> ao dia), cobrindo também o noroeste de Minas Gerais. Dessa forma, suas temperaturas correspondem a um regime de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação em regiões semiáridas durante todo o ano. Todavia, é possível observar grande potencial de aproveitamento energético mesmo havendo regiões com menores índices de insolação, conforme figura 5 (INPE, 2017).

**Figura 5 – Total de Irradiação Solar no Brasil – média anual**



Fonte: INPE, 2017.

As grandes usinas de geração de energia solar centralizada já representam a sétima maior fonte de geração de eletricidade no Brasil, com investimentos acumulados que ultrapassam R\$ 15 bilhões e até 2019 somavam 3 GW de capacidade, o equivalente a 1,6% da matriz elétrica nacional (PORTAL SOLAR, 2020).

Já a geração distribuída, mini e microgeração, apresenta um crescimento ainda maior do que a centralizada, são mais de 334 mil sistemas FV conectados à rede, gerando eletricidade solar para mais de 416 mil unidades consumidoras, que descontam os créditos em suas contas de luz. Os sistemas solares de pequeno e médio porte de geração distribuída foram os que mais cresceram no ano de 2019, adicionando 1,4 GW (ANEEL, 2020).

Se somar as capacidades instaladas dos segmentos de geração distribuída e centralizada, a fonte solar fotovoltaica passa a ocupar o sexto lugar na matriz elétrica brasileira. Esse tipo de fonte de energia já representa mais do que a somatória de toda a capacidade instalada de termelétricas a carvão e usinas nucleares, que totaliza 5,6 GW (PORTAL SOLAR, 2020).

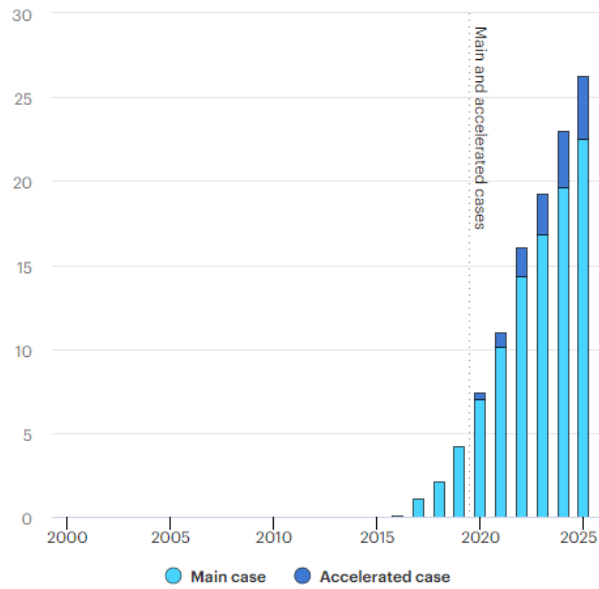
Em 2019, de acordo com a Aneel e a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil alcançou a marca de 4 GW de potência instalada. Contudo, em 2020, ultrapassou mais uma marca histórica no setor renovável, chegando aos 7 GW de potência operacional instalada no país, um crescimento de 75% de um ano para o outro. Essa capacidade engloba todos os modelos de geração de energia solar, seja centralizada ou a distribuída. A energia fotovoltaica, desde 2012, já gerou mais de 210 mil empregos e obteve investimentos de mais de R\$ 35 bilhões (ANEEL, 2020; ABSOLAR, 2021).

Ainda segundo a ABSOLAR, em 2019, os Leilões de Energia Nova, realizados pelo governo federal, tiveram a energia solar fotovoltaica como a fonte mais competitiva, registrando preços médios de US\$ 17,62 e US\$ 20,33 por MWh nos leilões A-4 e A-6, respectivamente (ABSOLAR, 2020).

As adições fotovoltaicas devem aumentar ainda mais em 2021 e 2022, à medida que os projetos em escala de serviço público começam a crescer e as aplicações fotovoltaicas distribuídas continuam fortes. Quase 30% da capacidade fotovoltaica total estava operando no mercado não regulamentado em 2020, e é esperado que quase metade do crescimento em escala da concessionária nos próximos dois anos estará fora do esquema de leilões, considerando os preços relativamente altos. Além disso, o governo brasileiro reduziu recentemente as taxas de importação de equipamentos FV para zero, melhorando a competitividade dos projetos solares e proporcionando novas opções de financiamento atraentes (IEA, 2020).

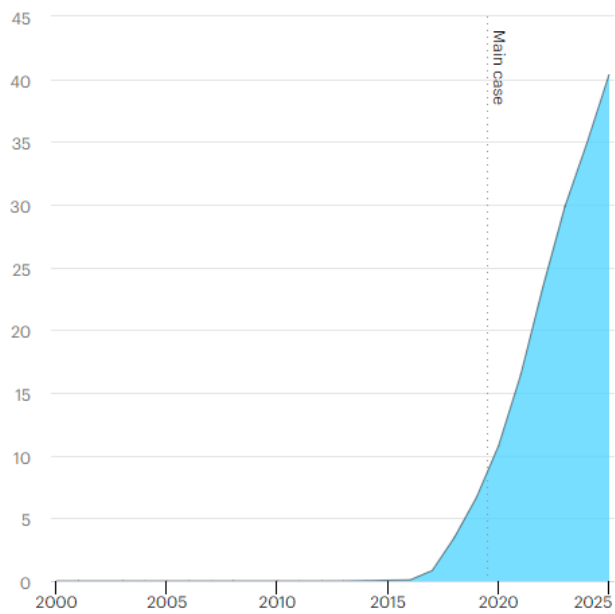
De acordo com a IEA e demonstrado nas figuras 6 e 7, há uma expectativa de que até 2025 o Brasil alcance o número de 22,5 GW de capacidade fotovoltaica instalada acumulada e 40,4 TWh em geração fotovoltaica acumulada (IEA, 2021).

**Figura 6 – Capacidade fotovoltaica instalada acumulada brasileira de 1990 até 2025.**  
 PV capacity, main and accelerated case, Brazil, 1990-2025  
 GW



Fonte: IEA, 2020.

**Figura 7 – Geração fotovoltaica acumulada brasileira de 1990 até 2025.**  
 PV generation, main case, Brazil, 1990-2025  
 TWh



Fonte: IEA, 2020.

## 6 SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO ÀS EDIFICAÇÕES

A tecnologia fotovoltaica integrada à edificação se apresenta como uma opção interessante para geração energética próxima ao ponto de consumo, pois não ocupa área extra e não interfere negativamente no entorno (ZOMER, 2010). Os geradores convencionais de energia são geralmente instalados em áreas distantes dos centros urbanos, pois tendem a causar problemas, como poluição do ar, sonora e visual, assim a energia gerada é transmitida através de longos cabos, resultando em perdas na transmissão e na distribuição. Por isso, utilizar fonte de geração próxima ao ponto de consumo permite que as perdas por transmissão e distribuição sejam mínimas, tornando o sistema mais eficiente (SANTOS, 2013).

Algumas estratégias de projeto e inclusão de tecnologias possibilitam a redução do consumo energético, causando menos impacto ao meio ambiente. Desse modo, surgem a *Building Integrated Photovoltaics* (integração fotovoltaica na arquitetura) (BIPV) e a *Building Applied Photovoltaics* (energia fotovoltaica aplicada na arquitetura) (BAPV) (SANTOS, 2013).

As BAPVs são consideradas um complemento do edifício, não diretamente relacionado aos aspectos funcionais da estrutura. Elas contam com uma superestrutura que suporta módulos convencionais. As matrizes de afastamento são montadas acima da superfície do telhado e paralelas à inclinação de um telhado inclinado. As matrizes montadas em rack são normalmente instaladas em telhados planos e são moldadas para que os módulos fiquem em uma orientação e inclinação ideais para a aplicação. A superestrutura é normalmente fixada ao telhado por meio de uma série de suportes fixados a um segmento da estrutura do sistema de telhado. Os arranjos da BAPV também podem “flutuar” sobre o telhado original sem qualquer conexão mecânica com o mesmo. O objetivo da BAPV é simplesmente gerar eletricidade (CHANGHAI *et al*, 2011).

As BIPVs se referem às células fotovoltaicas que podem ser integradas na envolvente do edifício como parte da sua estrutura. Portanto, podem substituir os materiais de construção convencionais em vez de serem instaladas posteriormente, dessa forma podendo ser combinadas naturalmente com o design do edifício, criando uma arquitetura harmoniosa (HENEMANN, 2008).

Essa categoria inclui projetos que substituem os materiais de revestimento convencionais, como telhas, ladrilhos, ardósia e revestimento de metal pelos módulos FV, para desempenhar as mesmas funções e fornecer energia elétrica. Assim, BIPVs são produtos solares multifuncionais que geram eletricidade enquanto também servem como materiais de construção. Os módulos de BIPVs também podem ser elementos arquitetônicos que aprimoram

a aparência do edifício e criam efeitos visuais muito desejáveis (CHANGHAI; YING; ZHISHEN, 2011). Portanto, as BIPVs têm um impacto na funcionalidade do edifício e podem ser consideradas parte integrante do seu sistema de energia (BIYIK *et al.*, 2017).

A BIPV procura criar o máximo de função possível a partir do espaço do edifício. Um bom exemplo do seu uso é na fachada solar fotovoltaica, pois podem, em muitos casos, ser mais baratas de construir do que fachadas de edifícios normais e a aparência pode ser atraente e moderna (HENEMANN, 2008).

A integração dos painéis solares aos edifícios possui inúmeras vantagens. A primeira delas é transformar o edifício de consumidor de energia para produtor de energia, diminuindo a demanda por geradores de energia tradicionais, reduzindo as emissões de gases causadores das mudanças climáticas e diminuindo a pressão sobre as reservas de combustível (HENEMANN, 2008; SHUKLA *et al.*, 2017).

Outra vantagem importante em ter o sistema de BIPV é a estética. Os módulos podem ser coloridos e visualmente bonitos, criando uma aparência futurista e diferenciada para os edifícios. Os módulos instalados em fachadas, sobre estruturas já existentes, podem ainda aumentar o apelo do edifício e seu valor de revenda (HENEMANN, 2008).

A economia financeira também é significativa e ocorre por meio da redução nas contas de luz. Principalmente em prédios comerciais e industriais, em que o pico do consumo de energia coincide com o pico de produção (HENEMANN, 2008).

Os módulos FV podem ser integrados envolvendo o edifício na chamada “fachada não ventilada”, que atuam como isolamento térmico por meio da construção em sanduíche dos próprios módulos, da camada de ar dentro dos módulos e da absorção de raios. Isso significa que menos energia é desperdiçada com a perda de calor do interior, reduzindo os custos de aquecimento ou refrigeração e mantendo o edifício em uma temperatura interna ambiente durante todo o ano (HENEMANN, 2008).

Há também as “fachadas ventiladas”, que podem ser instaladas em edifícios existentes, dando aos antigos uma aparência totalmente nova. Nessa abordagem, a lacuna está na faixa de 10-30 cm para maximizar as propriedades passivas do envelope térmico por meio da priorização de configurações baseadas em vidro opaco (BIYIK *et al.*, 2017).

Os módulos também protegem contra as intempéries, proporcionam proteção contra vento, chuva e raios, sendo um resistor elétrico. Além disso, servem como toldos, fazendo sombra na entrada solar (HENEMANN, 2008; BIYIK *et al.*, 2017).

Já os módulos de vidro-vidro podem ser utilizados como balaustradas em varandas ou como claraboias em saguões de entrada ou pátios, permitindo uma iluminação diurna ou visualização, dessa forma reduzindo o consumo de energia, já que utiliza a luminosidade natural, além de ser um recurso de design interessante (HENEMANN, 2008; BIYIK *et al.*, 2017; SHUKLA *et al.*, 2017).

Há, inclusive, benefícios acústicos devido ao comportamento da fachada multifuncional, pois as células repelem a poluição sonora indesejada e criam uma tela contra interferência eletromagnética potencial, incluindo a chamada poluição eletromagnética. Isso torna esses tipos de módulos particularmente úteis em situações com grande quantidade de atividade elétrica sensível, como hospitais e aeroportos (HENEMANN, 2008; BIYIK *et al.*, 2017).

A energia solar usada para aquecimento de água, principalmente em residências, hotéis e hospitais, também é uma importante medida de eficiência energética, pois dispensa, por exemplo, o uso de chuveiros elétricos (CRESESB, 2006).

O módulo de BIPV é montado como qualquer telha e o trabalho pode ser feito por um trabalhador normal. O peso adicional da BIPV no telhado deve ser considerado devido à potência do vento, que pode sobrecarregar os módulos. Já módulos de vidro semitransparente garantem a penetração da luz do dia nas superfícies e interiores do edifício. A luz necessária que passa pelas estruturas pode ser alterada por medições e equilibrada pelo número e lacuna celular, por conta da inovação do silício cristalino. Para filme fino, a simplicidade pode ser controlada alterando o procedimento de montagem. Contudo, quanto mais transparente o módulo FV, menor será a eficiência energética (SHUKLA *et al.*, 2017).

A escolha da melhor tecnologia a ser utilizada na implantação das BIPVs depende do local em que será aplicada, da irradiação solar e da localização. Por exemplo, para aplicação em coberturas podem ser utilizados os módulos rígidos convencionais com simples instalação sobre a cobertura existente. Contudo, se houver maior integração, existem módulos flexíveis que podem ser colados sobre coberturas metálicas, de concreto ou de outros materiais. Existem também algumas tecnologias de módulos de vidro cuja instalação é feita como as de panos de vidros comuns, mas pelo espaçamento entre as camadas de material FV é controlado o nível de luz natural que passará ao interior da edificação (RÜTHER, 2004).

Shukla *et al.* (2017), em seu estudo, verificaram que os módulos de BIPV m-Si atuais têm o tempo de retorno de energia mais alto, enquanto os módulos BIPV de filme fino flexível têm o tempo de retorno de energia mais baixo. Com relação à taxa de emissão de GEE, os

produtos m-Si BIPV têm mais emissões de GEE durante seu ciclo de vida do que outros sistemas FV. Espera-se que as novas tecnologias em desenvolvimento possam produzir BIPVs com maior eficiência e menor custo de geração, resultando em menor retorno de energia e valores de GEE (SHUKLA *et al*, 2017).

Para que os sistemas de BIPV atinjam funções multifuncionais e o melhor rendimento do gerador, vários fatores devem ser levados em consideração, como efeito de sombra, temperatura ambiente, a direção do edifício e o ângulo de inclinação e orientação do PV, para obter maior potência de saída e alta eficiência. Dentre esses fatores, a irradiância e a temperatura do módulo FV devem ser consideradas como fatores mais importantes, pois afetam tanto a eficiência elétrica do sistema de BIPV quanto o desempenho energético dos edifícios onde eles estão instalados (CHANGHAI *et al*, 2011).

O mercado de BIPV está crescendo e novas soluções, pesquisas e tecnologias surgindo. Esse desenvolvimento progressivo e trabalho inovador resultam em soluções eficientes, ou seja, redução do custo de geração, melhoria na integração da edificação e aumento da eficiência do módulo de BIPV (SHUKLA *et al*, 2017; BIYIK *et al.*, 2017).

O estacionamento FV é um exemplo do avanço tecnológico, consiste em uma estrutura de estacionamento na qual a instalação fotovoltaica garante a geração de energia no local para alimentar as baterias de carros elétricos. O sentido estético dessa solução busca a máxima produção de energia possível e a máxima proteção contra as intempéries, por meio de uma estrutura de travamento integrada no módulo formada por um painel móvel de madeira sobre a face externa dos PVs. As novas tendências estão focadas na diversificação das aplicações, como a mobilidade urbana fotovoltaica, em bancos e mesas, com objetivo de fazer dos tradicionais móveis de exterior pontos de carregamento de dispositivos eletrônicos, oferecendo pontos de acesso gratuitos à população (BIYIK *et al.*, 2017).

Segundo *Biyik et al.* (2017), houve um crescente interesse em sistemas de BIPV paralelamente aos desenvolvimentos gerais na tecnologia de células fotovoltaicas, o que fez com que seus custos reduzissem, tornando tais investimentos em BIPV viáveis (BIYIK *et al.*, 2017).

Existe um imenso potencial de mercado dos produtos de BIPV em todo o mundo. Na Europa, órgãos governamentais estão promovendo a tecnologia executando sistemas de tarifas *feed in*. Dessa maneira, de acordo com Shukla, Sudhakar, Baredar (2017), o mercado está aumentando e até 2017 já tinha atingido aproximadamente 2.000MW de instalação. Outro dado



interessante apresentado é a forma de aplicação, cerca de 80% das instalações da BIPV são feitas em telhados e os 20% restantes em fachadas. (SHUKLA *et al*, 2017).

Um grande exemplo de local que já utiliza a energia fotovoltaica integrada é o Bondinho do Pão de Açúcar, que funciona com a utilização da energia fotovoltaica produzida por 42 placas solares. Essas placas estão divididas da seguinte forma: 32 painéis na estação número 3, localizada no Morro da Urca, e os outros estão dispostos verticalmente, como uma parede, e podem ser vistos pelos turistas, como mostrado na figura 8 (ENGEGRID, 2019).

**Figura 8 – Painéis Fotovoltaicos no prédio do Pão de Açúcar.**



Fonte: VEJA RIO, 2016.

A maioria das edificações desperdiça relevantes oportunidades de poupar energia pela não consideração efetiva de novas tecnologias, desde o projeto arquitetônico, passando pela construção até a utilização final. Importantes desenvolvimentos nas áreas da arquitetura, materiais, equipamentos e tecnologias construtivas, vinculados à eficiência energética, acabam não sendo aplicados pelo entendimento equivocado de que seus custos são mais elevados, o que nem sempre é verdadeiro. Quando se concebe um projeto integrado da edificação, ganhos significativos em sustentabilidade podem ser atingidos, tornando extremamente favorável a relação custo-benefício. Da mesma forma, técnicas de restauração de edificações (*retrofits*) permitem aumentar substancialmente a eficiência energética de prédios existentes (BRASIL, 2002).

## 6.1 Sistema Fotovoltaico integrado à arquitetura aeroportuária

Aeroportos, em geral, possuem uma ampla área não obstruída, com edificações tipicamente grandes, estruturas baixas isoladas e com pouco ou nenhum sombreamento, portanto apresentam enorme potencial para o desenvolvimento de energia fotovoltaica integrada, pois há muito espaço para acomodar módulos FV em telhados, fachadas e estacionamentos (HERMAWAN, 2017; SREENATH *et al*, 2020).

Ademais, aeroportos são considerados grandes consumidores de energia elétrica devido às cargas de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC), cargas de iluminação ao longo do dia e das instalações eletromecânicas. As necessidades elétricas de um aeroporto podem ser classificadas como demanda de energia do lado ar, que consiste nos sistemas de radionavegação, na iluminação do aeródromo e de quaisquer edifícios auxiliares, e demanda de energia do lado terrestre, que constitui o edifício do terminal de passageiros e outras edificações (SREENATH; SUDHAKAR, 2017).

As extensões de terra cobertas por superfícies pavimentadas escuras, como pistas, estradas, estacionamentos, passarelas, entre outras, geralmente levam ao efeito de ilha de calor urbano, aumentando, assim, a carga de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, especialmente durante o verão. Visto que a produção fotovoltaica será maior durante o verão, o aumento na carga pode ser compensado. As cargas de AVAC em edifícios de aeroportos e os perfis de produção de energia solar são frequentemente sincronizados (SREENATH; SUDHAKAR, 2017).

De acordo com a IEA, cerca de 50% da energia necessária no ambiente construído é consumida por cargas de aquecimento e resfriamento. A operação de 24 horas por dia torna até mesmo os aeroportos pequenos e rurais intensivos em energia. Os custos de energia representam cerca de 10% a 15% do orçamento operacional de um aeroporto em geral. Além disso, o aumento do número de viajantes amplia o uso de energia elétrica do aeroporto (SREENATH *et al*, 2020).

As regiões com altas cargas de consumo diurno geralmente possuem curvas de demanda em concomitância com a da irradiação solar, justificando a utilização da fonte de energia solar, pois a maior produção ocorre no momento da maior demanda (KNOB *et al.*, 2006). Em climas quentes e ensolarados, enquanto os edifícios do aeroporto exigem alta energia, por causa do uso extensivo de unidades de ar-condicionado em grandes áreas abertas, a produção de energia solar também será maior devido à melhor insolação ao longo do dia (SREENATH *et al*, 2020).

A iniciativa solar no aeroporto é benéfica também para o meio ambiente. Aeroportos são muito poluentes devido às operações das aeronaves, além disso o impacto ecológico negativo da indústria da aviação, em geral, e aeroportos inclui a modificação da paisagem, poluição sonora, mudança climática local, uso excessivo de água e efeitos nas estruturas sociais das comunidades locais. Alguns impactos negativos são diretos, como a perturbação do ruído das aeronaves na comunidade vizinha e as emissões poluentes da aviação, que afetam a qualidade do ar local e o clima, porém há impacto indireto que corresponde ao uso de energia elétrica nos aeroportos, proveniente principalmente de fontes poluentes de energia (SREENATH *et al*, 2020).

A energia solar pode ajudar a compensar algumas dessas emissões, reduzindo a pegada carbono. Há vários estudos que mostram a quantidade de mitigação de carbono causada pela utilização do sistema FV. Ademais, os aeroportos são visitados por milhões de pessoas a cada ano, as usinas solares fotovoltaicas criam nelas a consciência sobre essa tecnologia e seu potencial de mitigação de carbono (SREENATH *et al*, 2020).

Outros benefícios podem ser observados com a implantação de energia fotovoltaica nos aeroportos. Os painéis solares de inclinação fixa podem ser usados em alguns casos como barreiras contra os ruídos produzidos pelas aeronaves, desviando-os dos terminais de passageiros (BRAUN *et al.*, 2010).

Diante da importância do desenvolvimento sustentável, virou tendência mundial os investidores procurarem empresas socialmente responsáveis e sustentáveis. Tais aplicações, denominadas “investimentos socialmente responsáveis”, consideram que empresas sustentáveis geram valor, o que constitui uma vantagem competitiva sustentável (SILVA; ASSIS, 2012).

Por efeito da redução nos preços dos módulos e dos componentes do sistema FV, a energia solar se tornou mais viável economicamente em todo o mundo. Com o aumento nos custos de energia, o período de recuperação do investimento fotovoltaico pode se tornar relativamente mais rápido e posteriormente até chegar a ser uma fonte significativa de receita não aérea (SREENATH *et al*, 2020).

Em alguns casos, o aeroporto não precisa arcar com nenhum custo inicial, ou seja, se a usina solar fotovoltaica pertencer e for operada por um terceiro, existe a possibilidade de compra de energia por meio de um contrato com o locador das terras (SREENATH; *et al*, 2019).

O aumento do uso de energia renovável no setor de transporte aéreo também é importante para reduzir a dependência de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis

e das concessionárias locais, gerando independência energética para os aeroportos (CHOUDHARY *et al.*, 2020).

Contudo, a instalação fotovoltaica nos aeroportos precisa de algumas considerações, como a verificação de que os painéis estão localizados fora das áreas proibidas do projeto do aeroporto ou em áreas de possíveis ataques de ofuscamento, de que as instalações solares não bloquearão as comunicações de radar e a avaliação da refletividade (HERMAWAN, 2017). Cada um desses bloqueios tem suas próprias consequências para a segurança da aviação se não for devidamente tratado (SREENATH *et al.*, 2020).

Um módulo FV solar reflete a luz do sol que incide sobre sua superfície e seu impacto potencial pode ser ofuscamento ou brilho. A luz refletida pode entrar nos olhos do piloto ou da equipe do aeroporto e afetar sua visibilidade. De acordo com diretrizes, o desenvolvedor do projeto deve provar que os arranjos FV não causam brilho na torre de controle de tráfego do aeroporto existente e brilho ou baixo potencial para imagem residual ao longo do caminho de aproximação de voo (SREENATH *et al.*, 2020). Embora seja garantido que a refletividade dos módulos FV é muito menor do que a maioria dos objetos presentes dentro e ao redor do aeroporto, como espelhos de carros estacionados e paredes de edifícios (SREENATH *et al.*, 2020).

Já a interferência nos sistemas de comunicação pode causar impacto negativo no radar. Se os objetos estiverem localizados muito perto da antena do radar ocorrerá interferência, que refletirá ou bloqueará o seu sinal para o receptor. A escolha do local de colocação do módulo FV deve levar em consideração essa condição para evitar interferências. Porém, se o módulo for colocado no solo ou em um local longe do radar, ele não interferirá no sistema de comunicação (HERMAWAN, 2017).

Após uma extensa pesquisa bibliográfica, Sreenath e Sudhakar (2017) concluíram que a fonte de energia renovável mais adequada para atender às necessidades de energia de um aeroporto é a solar (SREENATH; SUDHAKAR, 2017).

## **6.2 Aeroportos com energia Fotovoltaica**

O primeiro projeto solar fotovoltaico significativo em um aeroporto começou a operar no início dos anos 2000. Todavia, o primeiro aeroporto a operar totalmente com energia solar foi o Cochin International Airport Limited (CIAL), na Índia, e está operacional desde 2016. O aeroporto regional em George, África do Sul, recentemente instalou uma usina solar de 750

kW, que supera a energia de 400 kW necessária para operar o aeroporto. Embora seja uma aplicação solar em pequena escala, tornou-se o segundo aeroporto totalmente movido a energia solar do mundo (SREENATH *et al*, 2020).

A iniciativa de energia solar fotovoltaica no CIAL começou com uma planta solar fotovoltaica de 100 kW no telhado. Mais tarde, uma usina de energia solar fotovoltaica de 12MW foi instalada em uma área de cerca de 45 acres com um investimento inicial de 60 milhões de rúpias indianas. Essa planta solar de 12MW é capaz de gerar 50-60MWh de energia elétrica diariamente, o que ajudou o CIAL a relaxar a tarifa de eletricidade. Posteriormente foram instalados novos módulos de 2,4 MW no solo, de 6 MW no topo do canal e de 2.7MW no parque de estacionamento (SREENATH *et al*, 2019). A partir dos registros de medição de rede, verificou-se que as unidades de eletricidade adquiridas do Conselho de Eletricidade do Estado da Kerala (KSEB) são iguais ou superiores à exportada para a rede, tornando o aeroporto sustentável e autossuficiente em termos de consumo de energia elétrica. Durante os dias de *overcast*, a energia pode ser fornecida da rede elétrica do estado local, aumentando, assim, a confiabilidade da energia solar. A planta de 12 MW nos dados operacionais do período de análise, primeiro ano, teve o índice de valor de desempenho de 86,56% e fator de utilização da capacidade de 20,12%. A quantidade de emissão de carbono que pode ser evitada foi 12.134,26 toneladas e o período de recuperação do carbono dessa planta é de apenas 8 meses (SREENATH; SUDHAKAR, 2017).

O uso de eletricidade solar está aumentando gradualmente nos aeroportos, muito pelas diversas possibilidades de instalações, com módulos montados no solo, no telhado, cobertura de estacionamento e integrados ao edifício. Desses, os sistemas solares fotovoltaicos montados no solo são o tipo mais comum em projetos baseados em aeroportos. Usar eletricidade solar para operações aeroportuárias pode reduzir as contas de energia e até se tornar uma receita. (SREENATH *et al*, 2020).

O sistema de dossel solar de 2,5 MW no aeroporto de Tucson, EUA, compensa mais de 50% das necessidades de energia e é financiado principalmente por doações da *Federal Aviation Administration* (FAA). Com um investimento inicial de US\$ 14,3 milhões, esse projeto provavelmente economizará US\$ 35 mil por mês em contas de energia. O sistema de cobertura solar do estacionamento cria um microclima mais fresco na área do estacionamento e a planta solar reduz 25 mil galões de consumo de gás, além de prevenir a emissão mensal de 245 toneladas de CO<sup>2</sup>. Já o parque solar terrestre de 7,9 MW no aeroporto Internacional de

Sacramento, EUA, terá uma redução anual nos custos de energia do aeroporto de US\$ 850 mil (SREENATH *et al*, 2020).

A ReNew Power, uma empresa de energia renovável, assinou um acordo de 25 anos com o aeroporto Internacional de Chandigarh, na Índia, para a geração de energia de uma usina solar de 5 MW localizada no aeroporto. Essa planta ajuda o aeroporto a reduzir em 20% o custo de energia. O aeroporto Internacional de Kuala Lumpur (KLIA), na Malásia, compra eletricidade a uma taxa mais barata da usina solar fotovoltaica local, o que por sua vez ajuda o aeroporto a economizar RM 2,1 milhões anualmente (SREENATH *et al*, 2020).

O projeto do sistema FV no aeroporto de Adelaide, Austrália, teve um custo total de US\$ 2,45 milhões, porém terá um período de retorno de 8 anos e um VPL positivo com uma taxa interna de retorno de 13,1%, sendo lucrativo no longo prazo. O sistema ainda mitiga a emissão de 915 toneladas de CO<sup>2</sup> anualmente. Já o aeroporto de Trichy, na Índia, teve um investimento inicial de 4,64 milhões de rúpias indianas com um período de retorno esperado de 3 anos e 8 meses e os sistemas solares fotovoltaicos podem atender 25% da sua necessidade de energia (SREENATH *et al*, 2020).

Os aeroportos de Moi, no Quênia, e o de Belfast, na Irlanda do Norte, possuem sistema solares que impedem a emissão, respectivamente, de 1300 e 2100 toneladas de CO<sup>2</sup> anualmente (SREENATH *et al*, 2020).

A usina solar de 2,5 MW distribuída em 10 acres no aeroporto Southend de Londres, na Inglaterra, é uma das maiores instalações solares locais em um aeroporto europeu. Essa planta pode atender 20% do consumo anual de energia do aeroporto e tem um impacto positivo significativo em sua pegada de carbono (SREENATH *et al*, 2020).

Choudhary *et al* (2020) avaliaram a geração, o desempenho e a redução da emissão de dióxido de carbono dos sistemas FV de três aeroportos na Índia. o de Udaipur com capacidade de 2,43 MWp, o de Raipur com capacidade de 3,20 MWp e o de Aurangabad com capacidade de 2,08 MWp, chegando as seguintes conclusões: a usina de energia solar no aeroporto de Udaipur irá gerar cerca de 4.238,3 MWh de eletricidade e a taxa de desempenho é de 77,2%; já a usina solar no aeroporto de Raipur irá gerar cerca de 5.012 MWh de eletricidade e a taxa de desempenho é de 78,8%; o aeroporto de Aurangabad irá gerar 3.425,5 MWh de eletricidade e a taxa de desempenho é de 79,4%. A redução da emissão de dióxido de carbono devido à energia anual gerada por usinas solares fotovoltaicas nos aeroportos de Udaipur, Raipur e Aurangabad são 3.919,156, 4.634,596 e 3167,559 tCO<sup>2</sup> respectivamente (CHOUDHARY *et al*, 2020).

Os grandes aeroportos brasileiros também já possuem fornecimento de energia solar e estão aumentando sua capacidade, essa energia é usada principalmente no terminal de passageiros.

De acordo com estudos de Braun *et al.* sobre a contribuição energética da BIPV dos complexos aeroportuários do Galeão e Santos-Dumont, no Rio de Janeiro, de Guarulhos e Congonhas, em São Paulo, dos aeroportos internacionais de Brasília e Florianópolis e análise detalhada da curva de demanda de cada aeroporto sobreposta à curva de geração, a situação de injeção de energia na rede elétrica foi encontrada em quase todos os aeroportos, já que a curva de geração fotovoltaica tem formato de um sino, com grandes picos de geração próximos ao meio dia solar. Nesses horários, então, deverá haver níveis de energia gerada superiores à demanda, mesmo nos casos em que a contribuição é próxima a 35%. Isso demonstra que a instalação de geradores FV em edificações aeroportuárias apresenta potenciais de contribuição na própria demanda da edificação, e é um meio de auxiliar a rede urbana na alimentação das edificações próximas aos aeroportos (BRAUN *et al.*, 2010).

Rüther e Braun (2010) em seu estudo de caso mostraram que o consumo de energia no aeroporto internacional de Florianópolis representa uma participação de cerca de 45% da demanda de energia de pico e 11% da carga alimentadora da concessionária local, que poderia ser suprida por uma instalação de BIPV de 1670 kWp, tornando-o um exportador líquido de energia e um Edifício de Energia Zero (ZEB) (RÜTHER; BRAUN, 2010).

Zomer *et al* (2013) analisaram os melhores sistemas para o aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, e o aeroporto internacional de Florianópolis, em Florianópolis. Para ambos os aeroportos, a abordagem da BIPV, com módulos colocados sobre o telhado e respeitando a orientação e inclinação originais, apresentou melhores resultados que a solução de BAPV, com valores de densidade de pico de potência 100% maior e densidade de energia 87% maior. Por outro lado, os sistemas de BAPV idealmente inclinados e orientados apresentaram melhores valores de rendimento anual, 7% maior em média que a BIPV, pois podem receber mais irradiação solar. A taxa de desempenho não mudou significativamente (ZOMER *et al.*, 2013).

O aeroporto Santos Dumont desde 2015 utiliza energia fotovoltaica e tem parte do seu consumo de energia elétrica suprido a partir de 150 painéis solares de filme fino, flexíveis e leves, montados em seu telhado. Em dezembro de 2020, a Aviação do Brasil informou que houve expansão do sistema solar e que a Infraero instalou mais 590 placas no aeroporto, como mostra as figuras 9 e 10, chegando a um total de 740 painéis montados no telhado, elevando a

potência de 50kW para 250kW. O sistema, que já traz uma economia relevante ao aeroporto, além de ser sustentável, espera ser mais eficiente (AVIAÇÃO DO BRASIL, 2020).

**Figura 9 – Energia Fotovoltaica no Aeroporto Santos Dumont.**



Fonte: AVIAÇÃO DO BRASIL, 2020

**Figura 10 – Energia Fotovoltaica no Aeroporto Santos Dumont.**



Fonte: AVIAÇÃO DO BRASIL, 2020

Os sistemas solares fotovoltaicos são versáteis e compatíveis com as várias restrições do ambiente aeroportuário e, por isso, as centrais podem ser instaladas em qualquer aeroporto do mundo.

## **7 AEROPORTO MUNICIPAL DE MARICÁ**



O aeroporto municipal de Maricá está localizado em Araçatiba, no município de Maricá, situado na região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro a 60 km do centro da capital (latitude 22,921111° S e longitude 42,826667° O), e apresenta as seguintes características, próprias desse tipo de edificação: prédios baixos e ensolarados livre de sombreamento e baixa inclinação dos telhados; conta com uma pista útil de 1.200 metros e tem capacidade para receber 2 mil passageiros por dia.

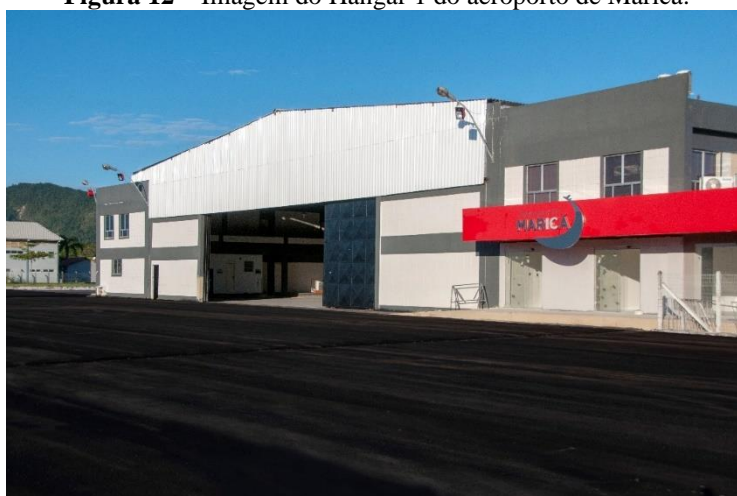
A Companhia de Desenvolvimento de Maricá (CODEMAR) recentemente construiu dois novos hangares que atendem a todas as necessidades de sustentabilidade e normas internacionais de aviação civil, observados nas figuras 11, 12, 13 e 14. Ambos podem receber células FV nas coberturas, possuem ventilação natural e estão equipados com sistema de reservatório de reuso destinado à lavagem de aeronaves (MARICÁ, 2020).

**Figura 11** – Imagem do Terminal de Passageiros do aeroporto de Maricá.



Fonte: CODEMAR, 2020.

**Figura 12** – Imagem do Hangar 1 do aeroporto de Maricá.



Fonte: MARICÁ, 2018.

**Figura 13** – Imagem dos novos hangares – Hangar 2 e 3 do aeroporto de Maricá.



Fonte: CODEMAR, 2020.

**Figura 14 – Imagem superior do aeroporto de Maricá.**



Fonte: CODEMAR, 2020.

O aeroporto possui uma localização privilegiada: está a 60km (sessenta quilômetros) da capital do Rio de Janeiro, a 40km (quarenta quilômetros) do Comperj e a apenas 200km (duzentos quilômetros), em linha reta, dos campos do pré-sal da Bacia de Santos. Trata-se da menor distância entre o continente e as plataformas de extração de petróleo dos Campos de Lula e Libra, o que torna o terminal estratégico para as operações de logística para a atividade *offshore* e o qualifica como porta de entrada para o desenvolvimento regional (CODEMAR, 2020).

O aeroporto está regulamentado e pronto para atender ao setor *offshore*, com suporte logístico no mercado de Óleo & Gás, transporte de profissionais para plataformas, serviços de táxis aéreos, serviço de hangaragem e abastecimento (MARICÁ, 2018).

O aeroporto, atualmente, opera voos de pequeno e médio porte na aviação geral, contudo foi reformado com o intuito de funcionar voltado para operações *offshore* e aviação executiva. Esse fator é um diferencial significativo para a implementação da energia solar, pois a maior

demanda de energia do aeroporto coincide com o horário de maior geração de energia de um painel FV.

Braun *et al.* (2010) afirmam que aeroportos com pico de demanda diurno têm mais chances de utilizar a energia gerada pelos módulos FV, pois os valores de contribuição obtidos pela geração do potencial instalado são sempre referentes ao total de geração fotovoltaica ocorrida durante as horas de sol em relação à energia utilizada na edificação durante as 24 horas do dia. Isso representa que a real penetração dos potenciais de geração irá ocorrer de acordo com a curva de demanda de cada aeroporto. Nos casos em que a geração fotovoltaica supera a demanda imediata, o excesso de energia pode ser injetado na rede elétrica pública, auxiliando na alimentação das edificações próximas aos aeroportos e, ainda, essa energia excedente poderia ser vendida à concessionária, aliando benefícios da integração de sistemas FV em edificações à rede elétrica pública (BRAUN *et al.*, 2010).

A geração de energia no aeroporto ainda irá contribuir para a redução da dependência energética da concessionária local, que fornece um péssimo serviço, necessitando sempre da utilização do gerador para funcionamento aeroportuário. Desse modo, indo ao encontro a política de desenvolvimento sustentável defendida pelo governo municipal.

Grandes empresas da área de *offshore*, como a Petrobras, apesar de serem voltadas para a área de petróleo, estão cada vez mais engajadas em projetos sustentáveis e exigem das suas parceiras a mesma responsabilidade. Portanto, os projetos que promovem o desenvolvimento sustentável são bem-vistos e exigidos pelas empresas, sociedade e funcionários.

## 8 METODOLOGIA

Esta pesquisa é objetiva, aplicada, qualitativa e quantitativa, visando estimar o desempenho, a contribuição energética e a economicidade de um SFVCR e integrado arquitetonicamente à estrutura do aeroporto municipal de Maricá.

Na parte qualitativa, foi feita uma pesquisa exploratória, com levantamento bibliográfico e análises de aeroportos que já utilizam o sistema FV. A coleta de dados foi feita através de pesquisa em artigos acadêmicos, periódicos indexados, nacionais e internacionais, e literatura comercial. O intuito foi ter como referência os modelos de sucesso já praticados no mercado.

As faturas de energia elétrica foram disponibilizadas pela empresa que administra o aeroporto e utilizadas para fornecer dados de consumo e demanda mensal em kWh em dois períodos previamente definidos: horário de ponta (entre 18h e 21h) e horário fora de ponta (horas restantes do dia).

As plantas arquitetônicas em formato digital também foram fornecidas pela empresa que administra o aeroporto e auxiliaram na precisão das medidas de cobertura dos hangares, nos detalhes dos espaços destinados à iluminação artificial e natural e no layout do arranjo dos painéis FV, podendo ser observado na figura 15. O software utilizado para análise das plantas foi o AutoCAD, programa de desenho auxiliado pelo computador do fabricante Autodesk.

**Figura 15 – Planta do Aeroporto Municipal de Maricá**



Fonte: CODEMAR, 2021.

Devido às características da arquitetura dos telhados das edificações do aeroporto, o estudo irá considerar apenas as áreas dos telhados do hangar 3 para implantação dos módulos FV, que é de 4207,61 m<sup>2</sup> e 270,29 de perímetro, pois o mesmo foi construído de forma apropriada para receber painéis FV.

A oferta de irradiação solar na localidade foi verificada através do programa SunData, do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito (CRESESB), que é gratuito e disponível na internet e oferece dados como a quantidade de irradiação solar na região e as inclinações dos módulos FV para melhor captação da energia solar.

Para a escolha das marcas dos módulos e inversores, foram utilizados dados do relatório da empresa Greener<sup>1</sup>, que mostra as principais marcas e o modelos de módulos FV utilizados no Brasil. A escolha se deu por módulos e inversores modernos com um bom custo-benefício.

Para calcular a potência de energia que será gerada com os painéis FV foi calculado o FV para clientes do grupo A. Dessa forma, foram consideradas as contas de energia do aeroporto de Maricá dos meses de janeiro de 2020 a dezembro de 2020. A ideia inicial era estudar o período em que o aeroporto operou em teste para o mercado *offshore* no ano de 2019, contudo observamos que mesmo com a pandemia houve aumento no consumo de energia de um ano para o outro e que não há dados para o início do ano de 2019, conforme tabela 2 e figura 16, desta forma optamos pela escolha do ano de 2020. Ressaltamos que a empresa Codemar funciona junto ao aeroporto municipal, desse modo parte considerável do consumo de energia é destinado a mesma.

**Tabela 2 – Energia consumida e demandada no Aeroporto de Maricá no período de janeiro de 2019 a dezembro de 2020.**

(continua)

Mês/Ano	Demanda (kW)		Consumo (kWh)		Consumo Total
	Horário de Ponta (HP)	de Horário Fora de Ponta (HFP)	Horário de Ponta (HP)	de Horário Fora de Ponta (HFP)	HP + HFP
jan/19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fev/19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
mar/19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abr/19	20,00	94,00	724,00	17.346,00	18.070,00

<sup>1</sup> Empresa que estuda e analisa o mercado fotovoltaico mundial e brasileiro.  
<https://www.greener.com.br/>

**Tabela 2 – Energia consumida e demandada no Aeroporto de Maricá no período de janeiro de 2019 a dezembro de 2020.**

(conclusão)

Mês/Ano	Demanda (kW)		Consumo (kWh)		Consumo Total HP + HFP
	Horário de Ponta (HP)	Horário Fora de Ponta (HFP)	Horário de Ponta (HP)	Horário Fora de Ponta (HFP)	
mai/19	21,00	84,00	898,00	19.845,00	20.743,00
jun/19	24,00	83,00	1.069,00	18.795,00	19.864,00
jul/19	25,00	97,00	1.045,00	20.433,00	21.478,00
ago/19	29,00	76,00	1.244,00	19.782,00	21.026,00
set/19	28,00	97,00	1.247,00	19.215,00	20.462,00
out/19	26,00	101,00	1.200,00	22.407,00	23.607,00
nov/19	30,00	108,00	1.394,00	24.423,00	25.817,00
dez/19	76,00	131,00	2.429,00	34.125,00	36.554,00
jan/20	71,00	118,00	2.835,00	38.367,00	41.202,00
fev/20	41,00	129,00	1.575,00	27.720,00	29.295,00
mar/20	71,00	173,00	1.919,00	32.004,00	33.923,00
abr/20	68,00	110,00	2.614,00	26.880,00	29.494,00
mai/20	64,00	68,00	3.484,00	28.140,00	31.624,00
jun/20	58,00	65,00	3.594,00	24.969,00	28.563,00
jul/20	107,00	142,00	4.549,00	33.579,00	38.128,00
ago/20	89,00	112,00	4.380,00	32.193,00	36.573,00
set/20	86,00	99,00	4.851,00	33.474,00	38.325,00
out/20	88,00	122,00	4.884,00	40.278,00	45.162,00
nov/20	73,00	108,00	3.827,00	31.962,00	35.789,00
dez/20	76,00	120,00	4.225,00	38.514,00	42.739,00

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

**Figura 16 – Histórico de consumo da empresa Codemar**

HISTÓRICO DE CONSUMO (ÚLTIMOS 12 MESES)					
PERÍODO (MÊS/ANO)	DEMANDA (kW)		CONSUMO (kWh)		RESERVADO
	HORA PONTA	FORA PONTA	HORA PONTA	FORA PONTA	
11/19	30	108	1.394	24.423	0
10/19	26	101	1.200	22.407	0
09/19	28	97	1.247	19.215	0
08/19	29	76	1.244	19.782	0
07/19	25	97	1.045	20.433	0
06/19	24	83	1.069	18.795	0
05/19	21	84	898	19.845	0
04/19	20	94	724	17.346	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

Fonte: Enel, 2021.

Os valores da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e da Tarifa de Energia (TE) na ponta e fora de ponta foram retiradas do site da ANEEL, na tabela Tarifas de Aplicação e Base Econômica para o grupo A de 2020.

O dimensionamento do sistema FV foi realizado através de cálculos no programa Excel. Após a obtenção, os resultados foram inseridos no software PVsyst energia solar, no programa Planejador Fotovoltaico, para que fossem gerados os valores de produção energética do sistema FV proposto. O PVSyst é um software utilizado para auxiliar no dimensionamento e desenvolvimento de projetos de geração solar fotovoltaica. É um dos softwares mais completos e precisos do mercado, oferecendo uma série de recursos, desde simulações e cálculos até emissão de relatórios e documentações técnicas.

Para encontrarmos o número de árvores cultivadas, o cálculo é feito através da energia elétrica gerada (kWh) x  $5,04 \times 10^{-4}$ . Já para identificarmos a eliminação de CO<sub>2</sub> calculamos a potência total vezes 5,3622972. Foram utilizados parâmetros pré-estabelecidos pelo mercado.

Após a coleta e geração dos dados por meio dos programas e softwares mencionados, foi feita a análise econômica do projeto. Para isso, foram determinadas as taxas necessárias para os cálculos, todas baseadas em valores de mercado, utilizando o programa Excel. Foram realizados cálculos de economia financeira, avaliando o cenário atual e o projetado com a implementação do modelo FV, o VPL, o *Payback* e TIR com o objetivo de verificar se o projeto é economicamente interessante a longo prazo.

Uma das limitações da pesquisa é o consumo de energia elétrica baseada no ano de maior consumo de energia, pois pode haver alterações significativas de demandas energéticas.

Os resultados serão apresentados através de gráficos, números e tabelas, objetivando provar a viabilidade estrutural e econômica do projeto FV, focando no desenvolvimento sustentável e na economicidade do aeroporto de Maricá.

## **9 RESULTADOS**

### **9.1 Análise do Potencial Gerado pelo Sistema Fotovoltaico**

Para calcular a potência de energia que será gerada com os painéis FV no aeroporto de Maricá, primeiro foi necessário fazer o cálculo FV para clientes do grupo A, pois o aeroporto possui demanda contratada com a concessionária fornecedora de energia local de 400 kW.

Clientes do grupo A têm sua conta dividida em duas partes, pois pagam pela energia consumida (variável) e pagam também pela demanda contratada (fixa). As tarifas de energia e demanda contratada podem variar de acordo com o período do dia em que houve o consumo ou a demanda, os chamados postos tarifários (horário de ponta e horário de fora ponta).

A demanda contratada é a potência, medida em kW, e ela está relacionada com a carga instalada do consumidor, ou seja, com a quantidade e a potência dos equipamentos que o consumidor possui. Por outro lado, a energia consumida é medida em kWh e está associada ao consumo mensal do consumidor.

Os consumidores do grupo A pagam pelo direito de ter uma demanda contratada, que garante que todos os seus equipamentos e máquinas poderão ser ligados e pagam pela energia consumida mensalmente, que é um valor variável.

As Resoluções 482 e 687 da ANEEL determinam alguns pontos importantes para consumidores do grupo A que querem instalar um sistema FV. São elas:

O limite de potência do sistema FV que pode ser instalados pelo cliente é igual ao valor da demanda contratada em kW;

O consumidor sempre pagará a demanda contratada, independentemente de quanta energia consumir no mês;

A compensação da energia injetada deve ocorrer primeiramente no posto tarifário em que ocorreu a geração. Ou seja, a compensação dos créditos de energia deve ser prioritariamente feita com o valor da energia no horário em que ela foi produzida.

A compensação da energia consumida no horário de ponta se dará somente após a compensação total da energia consumida no horário fora de ponta. Essa compensação será feita de acordo com o fator de correção dado pelas tarifas de energia no horário de ponta e fora de ponta (TE Ponta / TE Fora Ponta);

Será, portanto, calculado primeiro o dimensionamento para a compensação total de energia sem aumento da demanda contratada. Assim, os valores da TUSD e TE na ponta e fora



de ponta foram retiradas do site da ANEEL, na tabela Tarifas de Aplicação e Base Econômica para o grupo A de 2020 da distribuidora Enel RJ. Os valores observados foram:

TUSD na ponta: 1.615,07;

TUSD fora de ponta: 106,94;

TE na ponta: 376,79 R\$/MWh;

TE fora de ponta: 231,97 R\$/MWh.

A Geração Mensal Necessária (Gmn) foi adquirida através do consumo médio fora de ponta mais o consumo médio na ponta corrigido. Essa correção é feita através do fator de compensação, que se dá através da razão da Tarifa de Energia na Ponta (TEP) / Tarifa de Energia Fora de Ponta (TEFP).

$$\text{Gmn} = \text{Consumo médio FP} + \text{Consumo Médio P} * (\text{TEP} / \text{TEFP})$$

Para adquirir os dados para o cálculo do consumo médio foram utilizadas as contas de energia elétrica de janeiro de 2020 a dezembro de 2020, período de maior consumo de energia pela empresa Codemar.

**Tabela 3 – Energia consumida e demandada no Aeroporto de Maricá no período de janeiro de 2020 a dezembro de 2020.**

Mês/Ano	Demanda (kW)		Consumo (kWh)		Consumo Total
	Horário Ponta (HP)	de Horário Fora de Ponta (HFP)	Horário Ponta (HP)	de Horário Fora de Ponta (HFP)	HP + HFP
jan/20	71,00	118,00	2.835,00	38.367,00	41.202,00
fev/20	41,00	129,00	1.575,00	27.720,00	29.295,00
mar/20	71,00	173,00	1.919,00	32.004,00	33.923,00
abr/20	68,00	110,00	2.614,00	26.880,00	29.494,00
mai/20	64,00	68,00	3.484,00	28.140,00	31.624,00
jun/20	58,00	65,00	3.594,00	24.969,00	28.563,00
jul/20	107,00	142,00	4.549,00	33.579,00	38.128,00
ago/20	89,00	112,00	4.380,00	32.193,00	36.573,00
set/20	86,00	99,00	4.851,00	33.474,00	38.325,00
out/20	88,00	122,00	4.884,00	40.278,00	45.162,00
nov/20	73,00	108,00	3.827,00	31.962,00	35.789,00
dez/20	76,00	120,00	4.225,00	38.514,00	42.739,00
<b>Total</b>			<b>42.737,00</b>	<b>388.080,00</b>	<b>430.817,00</b>
<b>Média</b>	<b>74,33</b>	<b>113,83</b>	<b>3.561,42</b>	<b>32.340,00</b>	<b>35.901,42</b>

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

O resultado da geração média mensal foi, portanto, de:

$$\text{Gmn} = 32.340,00 + 3.561,42 * (376,79 / 231,97) = 38.124,83 \text{ Kwh}$$

Já a Geração Diária Necessária (Gdn) foi encontrada através de:  $Gdn = Gmn/30$ . Resultando no valor igual a 1.270,83 kwh/dia.

Para descobrir a geração por hora, foi utilizado o nível de irradiação solar (IRR) encontrado através do programa SunData do CRESB. De acordo com os dados do programa, conforme figura 17, a média anual de incidência solar em Maricá é de 4,78 kw/h, valor favorável para geração de energia (CRESESB, 2020).

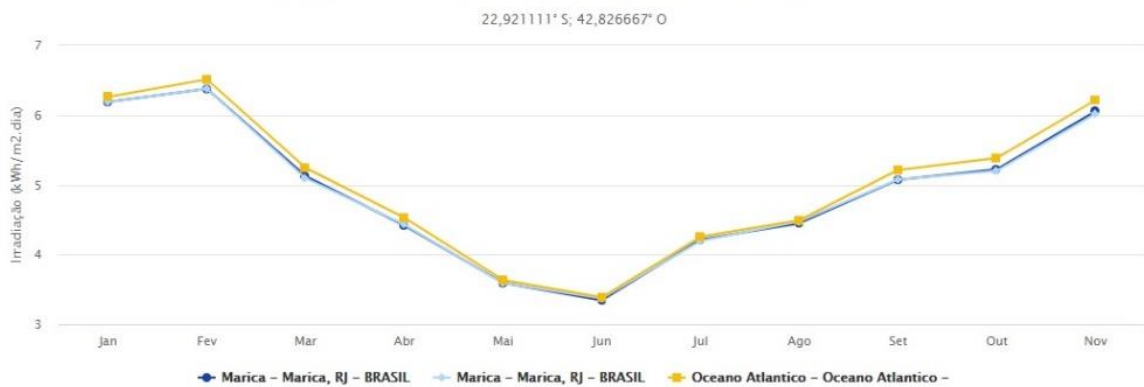
**Figura 17 – Oferta de irradiação solar em Maricá**

**Localidades próximas**

Latitude: 22.921111° S  
Longitude: 42.826667° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta			
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set			Out	Nov	Dez
<input checked="" type="checkbox"/>	Marica	Marica	RJ	BRASIL	22,901° S	42,849° O	3,2	6,19	6,37	5,12	4,42	3,59	3,34	3,37	4,21	4,45	5,07	5,22	6,05	4,78	3,03
<input checked="" type="checkbox"/>	Marica	Marica	RJ	BRASIL	22,901° S	42,749° O	8,3	6,19	6,38	5,09	4,43	3,59	3,37	3,37	4,20	4,47	5,08	5,20	6,02	4,78	3,00
<input checked="" type="checkbox"/>	Oceano Atlantico	Oceano Atlantico			23° S	42,849° O	9,1	6,26	6,51	5,24	4,53	3,64	3,39	3,40	4,26	4,49	5,21	5,38	6,22	4,88	3,13

**Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades próximas**



Fonte: CRESESB, 2020.

Para o cálculo da geração por hora, foi estabelecido um valor de rendimento (n) de 81,2% e um nível de perdas de 18,8%. Dessa forma, a geração por hora é dada pela geração diária dividida pelo fator de irradiação vezes o valor de rendimento.

$$G = Gdn / (IRR * n)$$

$$G = 1.270,83 / (4,78 * 81,5\%) = 326,21 \text{ KWp}$$

Após análise de mercado e de custo-benefício, a opção selecionada para o painel FV foi o RISEN SOLAR de 500W – RSM150-8-500M. De acordo com o relatório da empresa Greener, em 2020 a marca Risen ficou em terceiro lugar no Brasil em número de módulos FV importados.

A quantidade de painéis FV foi calculada a partir de:

$$\text{Quantidade} = (G * 1000) / \text{Potência do painel solar}$$

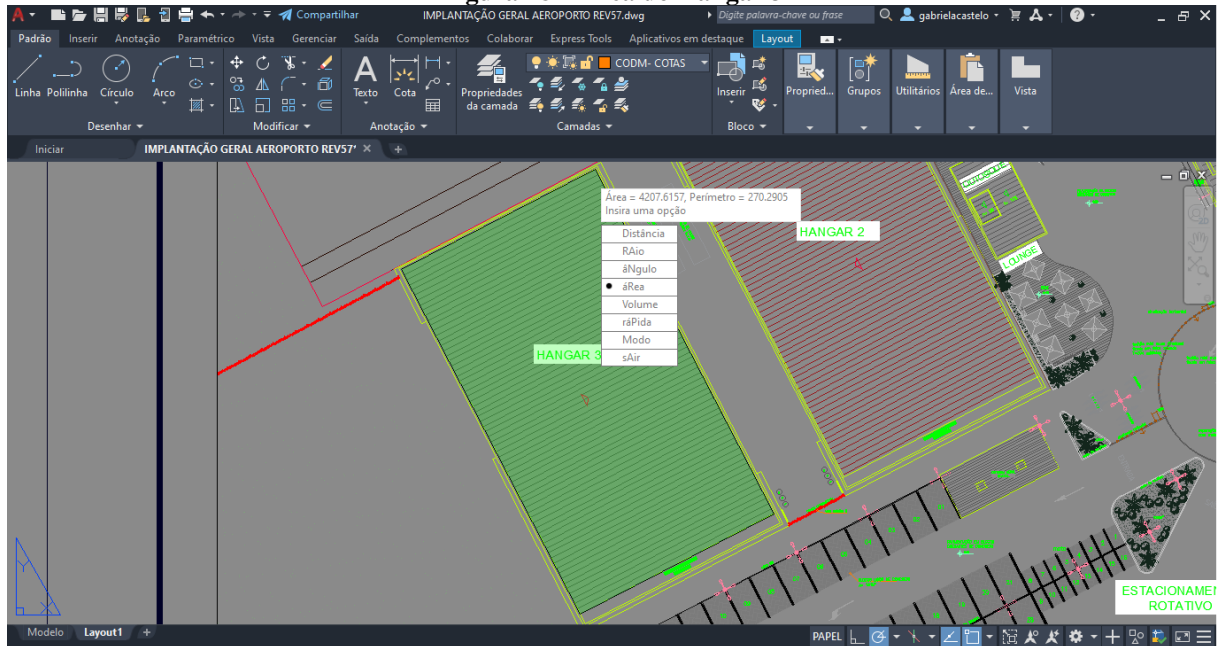
$$= (326,21 * 1000) / 500$$

$$= 652 \text{ painéis}$$

A potência total em corrente contínua foi encontrada através da multiplicação da quantidade de painéis pela potência do modelo dividido por mil, resultando no valor de 326 KWp.

O telhado do hangar 3, local selecionado para implantação do projeto, possui o sistema *roll-on*, de cobertura metálicas indicado para grandes construções. A área do telhado foi medida através do programa AutoCAD, conforme imagem abaixo, e possui um valor de 4207,61 m<sup>2</sup>.

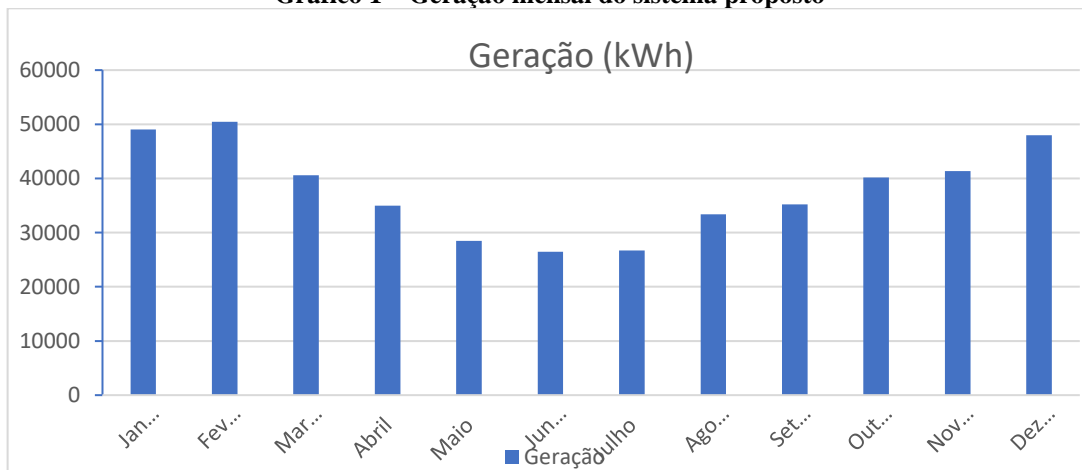
**Figura 18 – Área do Hangar 3**



Fonte: AutoCAD, 2021.

Com base no sistema proposto, composto por 652 painéis FV de 500Wp/cada e considerando temperatura, inclinação e radiação local, é possível que o sistema forneça mês a mês, em média, a energia apresentada no gráfico 1.

**Gráfico 1 – Geração mensal do sistema proposto**



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

Os dados encontrados foram inseridos no software PVsyst energia solar, para ajuste do programa a potência inserida foi de 328 kWp, tendo uma pequena variação no número de módulos. Os resultados podem ser observados nas figuras 19, 20 e 21.

**Figura 19 – Resumo do Resultado do Software PVsyst**

Resumo do sistema			
<b>Sistema acoplado à rede</b>		<b>Sem cenário 3D de sombras, sem sombras</b>	
<b>Orientação do plano dos módulos</b>		<b>Sombras próximas</b>	<b>Exigências do consumidor</b>
Plano fixo		Sem sombras	Carga ilimitada (rede)
Inclinação/Azimute 7 / 90 °			
<b>Informação do sistema</b>			
<b>Grupo FV</b>		<b>Inversores</b>	
Número de módulos	656 unidades	Número de unidades	6 unidades
Pnom total	328 kWp	Pnom total	300 kWca
		Rácio Pnom	1.093

Fonte: PVsyst, 2022.

**Figura 20 – Principais Resultados do Software PVsyst**  
**Resultados principais**

**Produção do sistema**

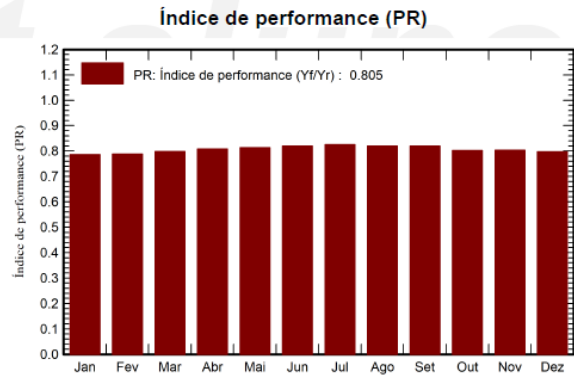
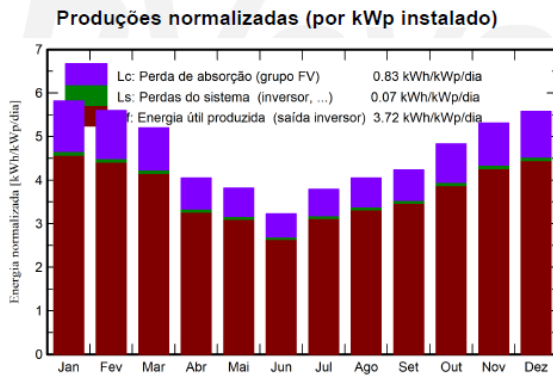
Energia produzida 445.4 MWh/ano

Produção específica

1358 kWh/kWp/ano

Índice de performance (PR)

80.50 %



Fonte: PVsyst, 2022.

**Figura 21 – Balanços e Resultados Principais PVsyst****Balanços e resultados principais**

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR rácio
Janeiro	182.2	79.6	27.00	180.4	170.8	47.42	46.53	0.786
Fevereiro	157.0	72.7	27.04	156.7	148.4	41.32	40.54	0.789
Março	162.6	76.5	26.14	161.3	152.6	43.08	42.27	0.799
Abril	121.6	53.9	24.44	121.5	114.4	32.83	32.18	0.808
Maio	118.7	45.6	22.20	118.3	110.3	32.18	31.55	0.813
Junho	96.6	40.9	20.71	96.7	89.8	26.54	26.00	0.820
Julho	117.6	45.3	19.91	117.4	109.5	32.41	31.79	0.825
Agosto	125.8	56.1	21.32	125.5	118.1	34.43	33.77	0.820
Setembro	127.2	70.1	21.97	127.1	120.0	34.84	34.15	0.820
Outubro	151.2	72.9	24.32	149.8	141.8	40.20	39.42	0.802
Novembro	158.9	92.0	25.18	159.3	150.4	42.78	41.96	0.803
Dezembro	174.4	105.0	26.62	172.9	163.5	46.10	45.23	0.798
Ano	1693.9	810.6	23.89	1686.8	1589.5	454.12	445.40	0.805

**Legendas**

GlobHor Irradiação horizontal total

DiffHor Irradiação difusa horizontal

T\_Amb Temperatura ambiente

GlobInc Incidência global no plano dos sensores

GlobEff Global efetivo, corrigido para IAM e sombras

EArray Energia efetiva à saída do grupo

E\_Grid Energia injetada na rede

PR Índice de performance

Fonte: PVsyst, 2022.

Dados os resultados gerados, podemos observar que a energia total produzida será de 445 MWh/ano, para o período em estudo a produção de energia solar seria suficiente para atender toda a necessidade do aeroporto, pois o consumo em um ano foi de 442 MWh. No entanto, há que se destacar que, de acordo com o Manual de Sistemas Elétricos em Aeródromos da ANAC, a implantação dos sistemas de geração independentes não exige o aeroporto de dispor das instalações necessárias para o consumo de energia da rede.

Ainda pode ser observado que a geração de energia elétrica é maior nos meses mais quentes do ano, tendo em vista a maior incidência solar. Esses são justamente os períodos de maior consumo pela instituição, devido ao uso de ar-condicionado.

Visto que a potência do sistema FV não atingiu o limite da demanda contratada, e a simulação foi feita utilizando somente um dos hangares, se o consumo de energia no aeroporto crescer o projeto ainda pode ser expandido.

## 10 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise será feita a partir de uma média de consumo e geração, considerando o custo de aquisição do sistema FV e o potencial de exportação da energia gerada para a rede pública.

Com base nos dados adquiridos anteriormente, foram feitas três simulações de preço para o projeto a partir dos sites Portal Solar<sup>2</sup>, Cordeiro Soluções e Energia<sup>3</sup> e IntelBras<sup>4</sup>. Os valores adquiridos foram respectivamente: R\$ 1.697.009,79, R\$ 1.868.269,46 e R\$ 1.706.443,20. Neste trabalho, foi feita uma simulação simplificada, sabendo que estimar o verdadeiro retorno demandaria um trabalho criterioso, detalhando todos os custos com impostos e obrigações trabalhistas previstos nas leis brasileiras.

O valor do investimento inicial do projeto foi dado pela média entre os valores acima mencionados, resultando em um total de R\$ 1.757.240,82

### 10.1 Condições e variantes das análises

#### 10.1.1 Financiamento

O Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) é a maior referência em financiamentos a longo prazo voltados para aquisição e comercialização de sistemas de geração de energia solar. O BNDES possui uma linha de financiamento, baixo carbono, específica para o setor de energia elétrica renovável com uma taxa de juros de 12% ao ano para operações indiretas, sendo essa taxa a utilizada para o estudo.

#### 10.1.2 Tempo da análise do investimento

Em média, os fabricantes de módulos FV dão 25 anos de garantia para eficiências acima de 80% do valor nominal, esse dado normalmente está associado ao tempo de vida útil dos sistemas FV. Dessa forma, o prazo para análise do investimento também será de 25 anos.

---

<sup>2</sup> <https://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>

<sup>3</sup> <https://www.cordeiro.com.br/ferramentas/calculadora-solar/>

<sup>4</sup> <https://intelbras.com/pt-br/energia-solar/simulador/>

### 10.1.3 Taxa Mínima de Atratividade

Para análise do retorno do investimento foi necessário definir também a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). O custo de oportunidade é introduzido para verificar quanto o valor do investimento inicial pode render em outra aplicação. A definição do valor da TMA a ser utilizado se baseou nos valores do Tesouro Direto – IPCA + 2045, em que é possível atingir 10% de rendimento anual, descontando os impostos e taxas administrativas. Portanto, adotou-se uma taxa mínima de atratividade de 10% nesse trabalho.

## 11 VIABILIDADE ECONÔMICA

Com os valores de energia gerados pelo sistema FV é possível estimar o tempo de retorno do investimento e o VPL do projeto. Foram considerados os valores dos impostos locais especificados na fatura, que são ICMS de 32%, PIS de 0,8% e Cofins de 3,8%, e os dados já apresentados, como a taxa de financiamento em 12% ao ano, taxa de mínima de atratividade em 10% ao ano, investimento inicial de R\$ 1.757.240,82, uma taxa de reajuste anual 6,5% referente às mudanças de bandeira e de reajuste da tarifa energética e um tempo de projeto de 25 anos.

A partir das definições, foi obtido o fluxo de caixa projetado, conforme tabela 4, que apresenta a viabilidade econômica do projeto.

**Tabela 4 – Fluxo de Caixa**

(continua)

<b>Ano</b>	<b>Fluxo de Caixa</b>	<b>Caixa Descontado</b>	<b>Saldo</b>
0	-R\$ 1.757.240,82	-R\$ 1.757.240,82	-R\$ 1.757.240,82
1	R\$ 375.199,21	R\$ 341.090,19	-R\$ 1.416.150,63
2	R\$ 399.587,16	R\$ 330.237,32	-R\$ 1.085.913,31
3	R\$ 425.560,32	R\$ 319.729,77	-R\$ 766.183,55
4	R\$ 453.221,74	R\$ 309.556,55	-R\$ 456.627,00
5	R\$ 482.681,15	R\$ 299.707,02	-R\$ 156.919,98
6	R\$ 514.055,43	R\$ 290.170,89	R\$ 133.250,91
7	R\$ 547.469,03	R\$ 280.938,18	R\$ 414.189,09
8	R\$ 583.054,52	R\$ 271.999,24	R\$ 686.188,32
9	R\$ 620.953,06	R\$ 263.344,72	R\$ 949.533,04
10	R\$ 661.315,01	R\$ 254.965,57	R\$ 1.204.498,60
11	R\$ 704.300,49	R\$ 246.853,02	R\$ 1.451.351,63

Tabela 4 – Fluxo de Caixa

(conclusão)

Ano	Fluxo de Caixa	Caixa Descontado	Saldo
12	R\$ 750.080,02	R\$ 238.998,61	R\$ 1.690.350,24
13	R\$ 798.835,22	R\$ 231.394,11	R\$ 1.921.744,35
14	R\$ 850.759,51	R\$ 224.031,57	R\$ 2.145.775,92
15	R\$ 906.058,88	R\$ 216.903,29	R\$ 2.362.679,21
16	R\$ 964.952,71	R\$ 210.001,82	R\$ 2.572.681,03
17	R\$ 1.027.674,63	R\$ 203.319,95	R\$ 2.776.000,98
18	R\$ 1.094.473,48	R\$ 196.850,68	R\$ 2.972.851,65
19	R\$ 1.165.614,26	R\$ 190.587,25	R\$ 3.163.438,90
20	R\$ 1.241.379,19	R\$ 184.523,11	R\$ 3.347.962,01
21	R\$ 1.322.068,83	R\$ 178.651,92	R\$ 3.526.613,92
22	R\$ 1.408.003,31	R\$ 172.967,54	R\$ 3.699.581,46
23	R\$ 1.499.523,52	R\$ 167.464,02	R\$ 3.867.045,48
24	R\$ 1.596.992,55	R\$ 162.135,62	R\$ 4.029.181,11
25	R\$ 1.700.797,07	R\$ 156.976,76	R\$ 4.186.157,87

Fonte:

O cálculo do *payback* descontado mostrou que são necessários 5,54 anos para recuperar o investimento inicial proposto de R\$ 1.757.240,82. Já o VPL calculado será de R\$ 4.186.157,87 para o período de 25 anos, o que representa um investimento economicamente atrativo, pois o valor presente das entradas de caixa é maior que o valor presente das saídas de caixa. A TIR encontrada foi de 22,89%. Além disso, o projeto ainda proporcionará uma economia anual de R\$ 352.299,72.

Uma análise da parte ambiental pôde ser feita a partir dos dados gerados e ela demonstrou que a implementação do projeto pouparia o desmatamento de 5.731 árvores e evitaria a emissão de aproximadamente 1.748 toneladas de CO<sub>2</sub>.

O sistema já estará totalmente pago, portanto, a partir de aproximadamente 6 anos, gerando uma economia anual de R\$352.299,72 e uma mensal de R\$ 29.358,00 isso representa uma economia de quase 62% na conta de luz. Dessa forma, é possível concluir que para uma TMA de 10% ao ano, o projeto de energia fotovoltaica como alternativa para redução de custos e diversificação energética é viável para o período analisado, considerando os dados projetados.



## 12 CONCLUSÃO

O Aeroporto municipal de Maricá apresenta boa incidência de irradiação solar, os novos hangares possuem estruturas para receber painéis FV e o período de maior consumo de energia coincide com o de produção de energia solar. Desse modo, este estudo de caso mostrou a viabilidade da implantação de um sistema FV no aeroporto.

A metodologia utilizada para determinar o número de módulos e a viabilidade econômica tomou como ponto de partida as contas de luz da empresa administradora do aeroporto e a área disponível para a instalação dos módulos. Após, foram utilizados softwares e feitos cálculos que resultaram num projeto de 326Kwp, utilizando 652 painéis e uma energia total produzida de 445 MWh/ano.

A partir dos resultados do projeto, foi possível calcular a viabilidade econômica, adotando um valor de investimento inicial encontrado no mercado, uma taxa de juros de financiamento a 12%, uma taxa mínima de atratividade de 10% para um tempo de 25 anos, a partir disso, foi possível concluir que o VPL do projeto é positivo, sendo economicamente atrativo. O tempo de retorno encontrado foi de 5,54 anos, um VPL de R\$ 4.186.157,87 e uma TIR de 22,89%.

O projeto apresentado irá gerar uma economia anual financeira de R\$ 352.299,72. Com relação ao impacto ambiental, também proporcionará uma redução de 1.748 toneladas de CO<sub>2</sub> e evitaria o desmatamento de 5.731 árvores.

O sistema de geração de energia sustentável é de interesse dos gestores públicos não só pela questão ambiental, mas também pela financeira. O projeto gerará, a longo prazo, uma significativa economia mensal para o aeroporto municipal de Maricá, que atualmente é gerido por uma empresa estatal dependente, ou seja, que recebe do ente controlador recursos financeiros para pagamento de suas despesas. Dessa forma, o projeto causaria uma redução expressiva nas despesas públicas, criando a possibilidade dos valores percebidos serem destinados a diferentes áreas do orçamento público, como saúde, educação e segurança pública.

A implantação de projetos fotovoltaicos oferece também retornos positivos para a sociedade, já que a descentralização dos pontos de geração, colabora com a rede elétrica, diminuindo a necessidade de expansão de grandes linhas de transmissão, assim como de novos investimentos, não gerando aumento tributário.

Além disso, grandes empresas da área de offshore, principal público do aeroporto de Maricá, apesar de serem voltadas para a área de petróleo, estão cada vez mais engajadas em projetos sustentáveis e exigem das suas parceiras a mesma responsabilidade. Logo, os projetos

que promovem o desenvolvimento sustentável são bem-vistos e exigidos pelas empresas, sociedade e funcionários.

Apesar do projeto ser economicamente viável, algumas barreiras precisam ser observadas, como fatores políticos, econômicos e ambientais. A dependência de políticas públicas que incentivam o uso de energia solar e mudanças no sistema tarifário do país podem provocar um desestímulo ao setor de energia solar.

A forma incorreta de descarte dos painéis solares é um fator de grande preocupação, pois representam riscos à saúde e ao meio ambiente. Os módulos solares levam anos para se decompor e a queima dessas placas gera um vapor que pode causar doenças.

Cada vez mais os aeroportos brasileiros e mundiais estão adotando a energia solar como forma de redução nos custos de energia e de consciência ambiental. Adotar energia limpa e renovável no aeroporto municipal de Maricá dissemina a ideia de desenvolvimento sustentável, sendo a vitrine do município que busca a ideia de cidade inteligente e renovável, demonstrando que aeroportos de pequeno e médio porte estão aptos a adotar a produção de energia fotovoltaica. Portanto, os valores encontrados justificam a implantação do projeto, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental e social.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia solar cresce 22,5% no mundo**. São Paulo, 22 jun. 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-cresce-225-no-mundo/>. Acesso em: 06 jun. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Estatísticas e análises exclusivas do mercado solar fotovoltaico**. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/>. Acesso em: 05 jun. 2021.
- ANDRADE PINTO, G. X. **Impactos da geração solar fotovoltaica e da modalidade de contratação da energia elétrica sobre as despesas com energia elétrica em campus universitário**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL trata da escassez hídrica em encontro com analistas de investimento**. 2021. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-trata-da-escassez-hidrica-em-encontro-com-analistas-de-investimento/656877?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de-imprensa-exibicao-2%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_zXQREz8EVIZ6%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D2%26p\\_p\\_col\\_count%3D3%26\\_101\\_INSTANCE\\_zXQREz8EVIZ6\\_advancedSearch%3Dfalse%26\\_101\\_INSTANCE\\_zXQREz8EVIZ6\\_keywords%3D%26\\_101\\_INSTANCE\\_zXQREz8EVIZ6\\_delta%3D15%26p\\_r\\_p\\_564233524\\_resetCur%3Dfalse%26\\_101\\_INSTANCE\\_zXQREz8EVIZ6\\_cur%3D3%26\\_101\\_INSTANCE\\_zXQREz8EVIZ6\\_andOperator%3Dtrue](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-trata-da-escassez-hidrica-em-encontro-com-analistas-de-investimento/656877?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de-imprensa-exibicao-2%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D2%26p_p_col_count%3D3%26_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_advancedSearch%3Dfalse%26_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_keywords%3D%26_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_delta%3D15%26p_r_p_564233524_resetCur%3Dfalse%26_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_cur%3D3%26_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_andOperator%3Dtrue). Acesso em: 17 set. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída por: SRD**. 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída - Estados**. 2020a. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Estadual.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp). Acesso em: 05 jun. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída - Tipos**. 2020b. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp). Acesso em: 05 jun. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016.
- ANTONIOLLI, A. F. G. **Avaliação do desempenho de geradores solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- ASSAF NETO, A. **Os Métodos Quantitativos de Análise de Investimentos**. Caderno de Estudos nº 06. São Paulo: FINECAFI, 1992.
- AVIAÇÃO DO BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **O Aeroporto Santos Dumont finalizou expansão de sistema de energia solar! A @infraero instalou 590 placas fotovoltaicas, além das 150 existentes no terminal. Ao todo, os 740 painéis, vão permitir que o #SDU aumente sua potência de 50kW para 250kW**. 04 dez. 2020. @viacaodobrasil. Disponível em: [https://twitter.com/aviacaodobrasil/status/1334916405653872646?ref\\_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etwteembed%7Ctwterm%5E1334916405653872646%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1\\_&ref\\_url=https%3A%2F%2Fwww.aeroin.net%2Fsantos-dumont-590-paineis-solares%2F](https://twitter.com/aviacaodobrasil/status/1334916405653872646?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etwteembed%7Ctwterm%5E1334916405653872646%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1_&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.aeroin.net%2Fsantos-dumont-590-paineis-solares%2F). Acesso em: 10 jun. 2021.
- BAYER, B. *et al.* The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 119, n. 1, p. 129- 141, 2018.
- BIYIK, E. *et al.* A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. **Engineering Science and Technology**, Amsterdã, v. 20, n. 3, p. 833-858, 2017.

BRASIL, H. G. **Avaliação Moderna de Investimentos**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Implementação da Lei de Eficiência Energética: relatório de atividades**. Brasília, 2002.

BRAUN, P.; RUTHER, R. The role of grid-connected, building-integrated photovoltaic generation in commercial Building energy and power loads in a warm and sunny climate. **Energy Conversion and Management**, Amsterdã, v. 51, n. 12, p. 2457- 2466, 2010.

BRAUN, P. *et al.* A Integração dos sistemas solares fotovoltaicos em seis aeroportos brasileiros utilizando diferentes tecnologias de células solares. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 1, n. 1, p. 12-22, 2010.

BRENNAN, M. J.; SCHWARTZ, E. S. Evaluating Natural Resource Investments. *In*: SCHWARTZ, E. S.; TRIGEORGIS, L. **Real Options and Investment Under Uncertainty**: classical reading and recent contributions. Massachusetts: MIT Press, 2001. XX-XX

BRUM, L.G.; BALIAN, J.E. **Análise de investimentos e capital de giro: conceitos e aplicações**. São Paulo: Saraiva, 2007.

BUARQUE, C. **Avaliação Econômica de Projetos**. Rio de Janeiro: Campus, 1991.

BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. **Solar Energy** [S.I.], v. 80, n. 1, p. 32-45, 2006.

CÂNDIDO, Jorge. **Análise de Projetos**. Centro de Estudos Alexandre Vasconcellos. 2014.

CHANGHAI, P. *et al.* Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 43, n. 12, p. 3592–3598, 2011.

CHIVELET, N. M.; SOLLA, I. F. **Técnicas de vedação fotovoltaica na arquitetura**. Tradução de SALVATERRA, A. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CHOUDHARY, A. *et al.* Making Indian airports sustainable by using solar photovoltaic system: analysis of three airports. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 40, n. 2, p.149-174, 2020.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE MARICÁ. **Aeroporto de Maricá comemora dois anos de reinauguração, veja o que mudou**. 2020a. Disponível em: <https://codemar-sa.com.br/aeroporto-de-marica-comemora-dois-anos-de-reinauguracao-veja-o-que-mudou/>. Acesso em: 16 jun. 2021.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE MARICÁ. **Codemar abre processos seletivos com 31 vagas**. 2020b. Disponível em: <https://codemar-sa.com.br/codemar-abre-processos-seletivos-com-31-vagas/>. Acesso em: 16 jun. 2021.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE MARICÁ. **Aeroporto Inteligente**. 2020c. Disponível em: <https://codemar-sa.com.br/projetos-e-servicos/projetos/aeroporto-inteligente/>. Acesso em: 24 mai. 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Visita Virtual à Casa Solar**. 2021. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&catid=91](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=91). Acesso em: 16 mai. 2021.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Programa SunData**. 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 20 mai. 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Especial PRC-PRODEEM. Rio de Janeiro: CEPTEL, 2004.

CULLEN, N.; THORNYCROFT, J.; COLLINSON, A. **Risk Analysis of Islanding of Photovoltaic Power Systems Within Low Voltage Distribution Networks**. Paris: IEA, 2002. (Relatório, IEA PVPS T5-08: 2002)

- DAMODARAN, A. **Finanças corporativas: teoria e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- DEHKORDI E. R. *et al.* Sustainable design for airport terminals, by integrated photovoltaic (PV) system (adopting bench-marking approach). **International Journal of Green Energy**, v. 16, n. 15, p. 1611–6, 2019.
- HERE, N. G. Reliability of PV modules and balance-of-system components. *In: IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 31., 2005.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- ECORI. **Módulos Fotovoltaicos – Monocristalino ou Policristalino – Qual a melhor dessas duas tecnologias para o Brasil?** 2018. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos---monocristalino-ou-policristalino---qual-a-melhor-dessas-duas-tecnologias-para-o-brasil> Acesso em: 02 jun. 2021.
- ENGEGRID. **8 Lugares famosos que funcionam com energia solar**. 2019. Disponível em: <https://engegrid.com.br/blog/8-lugares-famosos-que-funcionam-com-energia-solar/> Acesso em: 05 jun. 2021.
- EVANGELISTA, M. L. S. **Estudo comparativo de análise de investimentos em projetos entre o método vpl e o de opções reais: o caso cooperativa de crédito - Sicredi Noroeste**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- FINNERTY, J. D. **Project Finance: Engenharia financeira baseada em ativos**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999.
- FRAUNHOFER ISE. **Photovoltaics Report**. Freiburg: ISE, 2020.
- GALESNE, A. *et al.* **Decisões de Investimentos da Empresa**. São Paulo: Atlas, 1999.
- GENERAL CABLE. **Cabos para instalações de energia solar fotovoltaica**. São Paulo: General Cable, 2016.
- GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira – essencial**. Tradução de Jorge Ritter. 2º ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- GITMAN, L. J. **Princípios da administração financeira**. São Paulo: Qualitymark, 1992.
- GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída Mercado Fotovoltaico**. 2º semestre- 2020. Brasil.
- GUANGUL, F. M.; CHALA, G. T. Solar Energy as Renewable Energy Source: SWOT Analysis. *In: MEC international conference on big data and smart city (ICBDSC)*, 4., 2019.
- GUIMARÃES, A. M. P. Estudo da Viabilidade de Investimentos em uma Franquia de Ensino Profissionalizante. *In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, 9., 2012.
- HAZELTON, J. *et al.* A review of the potential benefits and risks of photovoltaic hybrid mini-grid systems. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 67, n.1, p. 222/229, 2014.
- HENEMANN, A. BIPV: Built-in solar energy. **Renewable Energy Focus**, Amsterdã, v. 9, n. 6, p. 16-19, 2008.
- HERMAWAN; K. Design Analysis of Photovoltaic Systems as Renewable Energy Resource in Airport. *In: Int. Conf. on Information Tech., Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 4., 2017.
- HOJI, M. **Administração financeira: uma abordagem prática – matemática financeira aplicada, estratégias financeiras, análise, planejamento e controle financeiro**. São Paulo: Atlas, 2003.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global energy investments set to recover in 2021 but remain far from a net zero pathway**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/news/global-energy-investments-set-to-recover-in-2021-but-remain-far-from-a-net-zero-pathway>. Acesso em: 04 jun. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2020 Data Explorer**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/renewables-2020-data-explorer?mode=market&region=World&product=PV> Acesso em: 04 jun. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. Paris: IEA, 2019. (Relatório)

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Implementing agreement on photovoltaic power systems**. Paris: IEA, 2008. (Report IEA – PVPS)

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Photovoltaic in buildings: A design handbook for architects and engineers**. Paris: IEA, 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Power Generation Costs in 2018**. Abu Dhabi: IRENA, 2019.

ISHII, T. *et al.* Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Hoboken, v. 21, n. 4, p. 481-489, 2013.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic degradation rates - an analytical review. **Progress in photovoltaics: Research and Applications**, Hoboken, v. 21, n. 1, p. 12-29, 2013.

KASSAI, J. R. *et al.* **Retorno de Investimento: abordagem matemática e contábil do lucro empresarial**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

KELLY, J. A Clean Energy's Dirty Little Secret. **National Review**, Nova Iorque, 2017. Disponível em: <https://www.nationalreview.com/2017/06/solar-panel-wasteenvironmental-threat-clean-energy/>. Acesso em: 04 jun. 2021.

KNOB, P., RÜTHER, R. Optimum Siting of Building-Integrated Photovoltaics in Urban Environments in Brazil: The Potential of PV in Assisting Day Time Peaking Feeders. *In: European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 21., 2006.

LACCHINI, C. **Análise econômica de sistemas fotovoltaicos residenciais no contexto brasileiro, com foco nos indicadores financeiros e nas tarifas locais de energia elétrica**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

LAPPONI, J. C. **Projetos de Investimento: Construção e Avaliação do Fluxo de Caixa**. São Paulo: Laponi, 2000.

LAU, C. R. *et al.* **Airport energy efficiency and cost reduction**. Washington D.C.: Transportation Research Board. 2010.

LEAMAN, C. The benefits of solar energy. **Renewable Energy Focus**, Amsterdã, v. 16, n. 5–6, p. 113-115, dez. 2015.

LEVA, F. F. *et al.* Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico. *In: Encontro de Energia No Meio Rural*, 5., 2004.

MANI, M.; PILLAI, R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 14, n. 9, p. 3124-3131, 2010.

MANNARINO, R. **Introdução à Engenharia Econômica**. Rio de Janeiro: Campus, 1991.

MARICÁ. Prefeitura Municipal. **Serviço de hangaragem no aeroporto de Maricá tem menor preço do mercado**. 2018. Disponível em: <https://www.marica.rj.gov.br/2018/07/11/servico-de-hangaragem-no-aeroporto-de-marica-tem-menor-preco-do-mercado/>. Acesso em: 24 mai. 2020.

MARICÁ. Câmara Municipal. **Encerrada a CPI da Enel com bons resultados**. 2020. Disponível em: <https://marica.rj.leg.br/noticia/encerrada-a-cpi-da-enel-com-bons-resultados>. Acesso em: 10 mai. 2020.

MARICÁ. Prefeitura Municipal. **Modernizado, Aeroporto de Maricá comemora dois anos com abertura de operação noturna**. 2020. Disponível em: <https://www.marica.rj.gov.br/2020/05/27/modernizado-aeroporto-de-marica-comemora-dois-anos-com-abertura-de-operacao-noturna/>. Acesso em 20 mai. 2021.

MARQUEZAN, L. H. F. Análise de Investimentos. **Revista Eletrônica de Contabilidade Curso de Ciências Contábeis**, Santa Maria, v.3, n.1, jun. 2006.

MAXIMIANO, A.C.A. **Administração de projetos: como transformar ideias em resultados**. São Paulo: Atlas, 2009.

MEKHILEF, S. *et al.* Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 16, n. 5, p. 2920-2925, 2012.

MELO, D. F. **Estudo de um sistema fotovoltaico integrado à construção e ligado à rede elétrica em uma edificação comercial**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MINTS, P. **SPV Market Research Solar PV Supply and Demand 2018: Is this a crossroads for the PV Industry?** São Francisco: PV Market Research, 2018. (Relatório SPV 1408-221-1564)

MONDHER, B. Extended DCF analysis and real options analysis within Information uncertainty: applications for project valuation and R&D. *In: International Annual Conference on Real Options*, 6., jun. 2002, Paphos, Cyprus. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <http://www.realloptions.org/papers2002>. Acesso em: 31 out. 2021.

MONTENEGRO, A. A. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MOREIRA, E. M. **Modelamento Energético para o Desenvolvimento limpo de Aeroporto Metropolitano Baseado na Filosofia do PIR – O Caso da Metrôpole de São Paulo**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MOSTAFA, M. F. A. *et al.* Using solar photovoltaic at Egyptian airports: opportunities and challenges. *In: International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 18., 2016.

MUÑOZ, E.; OLIVEIRA, L. Análise da viabilidade de projetos de investimento: transcendendo o viés economicista. **Revista Espacios**, Caracas, v. 38, n. 4, p. 14, 2017.

NASCIMENTO, L. R. **A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

NDIAYE, A. *et al.* Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. **Solar Energy**, [S.l.]. v. 96, n1., p. 140–151, ago. 2013.

PAULA, R. A.; CAPELO JUNIOR, E.; COSTA, C. C. O cálculo do Valor Presente Líquido com tratamento do risco através do método de Simulação de Monte Carlo. *In: Encontro da ANPAD*, 31., 2007.

PAMPLONA, N. Pior seca da história encarecerá conta de luz o ano todo. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 11 mai. 2021. Disponível em: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Rt3CJThlv->

8J:<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2021/05/pior-seca-da-historia-encarecera-conta-de-luz-o-ano-todo.shtml+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 24 mai. 2021.

PORTAL SOLAR. Energia solar fotovoltaica ultrapassa 7 gigawatts no Brasil, informa ABSOLAR. **Portal Solar**, 24 nov. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-ultrapassa-7-gigawatts-no-brasil-informa-absolar.html>. Acesso em: 05 jun. 2021.

REN21 – RENEWABLES NOW. Global Overview. *In*: REN21 – RENEWABLES NOW. **Renewables 2020 Global status report**. 2020. Disponível em: [https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/#sidebar\\_2](https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter_01/chapter_01/#sidebar_2). Acesso: 05 jun. 2021.

ROLDÃO, V. S. **Gestão de projetos: uma perspectiva integrada**. São Carlos: EdUFSCAR, 2007.

ROSS, S. A. *et al.* **Princípios de administração financeira: Essentials of Corporate Finance**. São Paulo: Atlas, 1998.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.

RUTHER, R. *et al.* Performance assessment of a microcrystalline Si PV installation in a warm climate. *In*: **IEEE Conference**, 35., 2010.

SANDRONI, P. **Novo dicionário de economia**. São Paulo: Best Seller, 1994.

SANTOS, I. P.; URBANETZ, J.; RÜTHER, R. Energia Solar Fotovoltaica Como Fonte Complementar de Energia Elétrica para Residências na Busca da Sustentabilidade. *In*: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 12., 2008.

SANTOS, I. P. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SATIS SOLAR. **2W 6V Amorphous Silicon Thin Film Flexible Solar Panel**. 2021. Disponível em: <https://www.satissolar.com/shop/product/1936571-2w-6v-amorphous-silicon-thin-film-flexible-solar-panel-6221>. Acesso em: 02 jun. 2021.

SCHUBERT, P. **Análise de investimentos e taxa de retorno**. São Paulo: Ática, 1989.

SEFID, S. S. S. G. *et al.* Investigation of solar cells lifetime in Iran. *In*: IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012. **Anais [...]**, Bengaluru, v.1, p. 1-5. dez. 2012

SHARMA, V., CHANDEL, S. S. Rerformance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 27, n. 1, p. 753–767, ago. 2013.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P. Recent advancement in BIPV product technologies: A review. **Energy and Buildings**, Amstedã, v. 140, n. 1, p. 188-195, 2017.

SILVA, J. P.; ASSIS, F. Desenvolvimento sustentável como fonte de vantagem competitiva: dimensão para gestão de empresas. **Revistas das Faculdades Integradas Vianna Júnior**, Juiz de Fora, v. 3, n. 2, jul./dez. 2012.

SIMIONI, T. O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil. *In*: **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE**, 24., 2017.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões Financeiras e Análise de Investimento**. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

SOUZA, L.G.M. Sistema de aquecimento solar de água para aplicações residenciais utilizando materiais alternativos. *In*: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM**, 5., 2006.



SREENATH, S.; SUDHAKAR, K. Fully solar powered airport: A case study of Cochin International airport. **Journal of Air Transport Management**, Amsterdã, v. 62, n.1, p. 176-188, 2017.

SREENATH, S. *et al.* Solar PV energy system in Malaysian airport: Glare analysis, general design and performance assessment. **Energy Reports**, Amsterdã, v. 6, n.1, p. 698-712, 2020.

SREENATH, S. *et al.* Airport-based photovoltaic applications. **Progress in Photovoltaics**, Hoboken, v. 28, n. 8, p.833-853, 2020.

SREENATH, S. *et al.* Carbon mitigation potential of the airport-based solar PV plants in the Indian context. **International Journal of Ambient Energy**, Oxfordshire v. 43, n. 1, p. 1311-1319, 2019.

TAKENAKA, F. O. **Avaliação do potencial de geração de energia solar fotovoltaica na cobertura das edificações do Campus I - CEFET- MG, interligado à rede elétrica.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VEJA RIO. Bondinho do Pão de Açúcar ganha placas solares. **Veja Rio**, 05 dez. 2016. Disponível em: <https://vejario.abril.com.br/cidade/bondinho-do-pao-de-acucar-ganha-placas-solares/> Acesso em: 05 jun. 2021.

VIEIRA, M. G. C. S. *et al.* Avaliação de retorno de investimentos de uma empresa de materiais de construção por meio da análise de sensibilidade. *In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 36., 2016.

VINAGRE, M. V. A. *et al.* Viabilidade econômica de geração fotovoltaica no aeroporto de Belém-PA. **O Meio Ambiente Sustentável 2** (pp.251-266), 2020.

WOILER, S.; MATHIAS, W.F. **Projetos: planejamento, elaboração, análise.** São Paulo: Atlas, 2008.

YEO, K.T.; QIU, F. The value of management flexibility – a real option approach to investment evaluation. **International Journal of Project Management**, Amsterdã, v. 21, n. 4, p. 243-250, 2002.

ZAHEDI, A. Solar Photovoltaic (PV) Energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 31, n. 5, p.711-718, 2006.

ZEINELDIN, H. H. *et al.* Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT. **Electric Power Systems Research**, Hoboken, v.77, n. 2, p.155-162, 2007.

ZOMER, C. D. **Megawatt solar: geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em meio urbano e conectada à rede elétrica. estudo de caso: edifício sede da Eletrosul, Florianópolis - Santa Catarina.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ZOMER, C. D. *et al.* Performance compromises of building-integrated and building-applied photovoltaics (BIPV and BAPV) in Brazilian airports. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 66, n. 1, p. 607–615, 2013.

ZORRILLA-CASANOVA, J. *et al.* Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. **Progress in Photovoltaics**, Hoboken, v.21, n. 4, p.790-796, 2013.