

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO - COPPE/UFRJ
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE ENERGIA
EUROPEAN ENERGY MANAGER - EUREM

ENGENHARIA FOTOVOLTAICA – GESTÃO PÚBLICA DE ENERGIA
APLICADA AO TRANSPORTE ATIVO E MOBILIDADE URBANA

RAONE DA SILVA E SILVA

RIO DE JANEIRO

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO - COPPE/UFRJ

RAONE DA SILVA E SILVA

Monografia apresentada ao curso de Gestão em Energias Renováveis do Programa de Planejamento Energético - COPPE/UFRJ (em parceria com a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha RJ), como requisito parcial para obtenção do certificado.

Orientador(a): Márcio de Almeida D'Agosto

**ENGENHARIA FOTOVOLTAICA – GESTÃO PÚBLICA DE ENERGIA
APLICADA AO TRANSPORTE ATIVO E MOBILIDADE URBANA**

RIO DE JANEIRO

2021



Deutsch-Brasilianische
Industrie- und Handelskammer
Câmara de Comércio e Indústria
Brasil-Alemanha

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO - COPPE/UFRJ
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE ENERGIA

RAONE DA SILVA E SILVA

**ENGENHARIA FOTOVOLTAICA – GESTÃO PÚBLICA DE ENERGIA
APLICADA AO TRANSPORTE ATIVO E MOBILIDADE URBANA**

Monografia apresentada como
requisito parcial à conclusão do curso de
Pós-Graduação em Gestão de Energia.

APROVADA EM:

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DSc MÁRCIO DE ALMEIDA D'AGOSTO
ORIENTADOR

PROF. DSc AMARO OLÍMPIO PEREIRA JÚNIOR

PROF. DSc JOSÉ EDUARDO NUNES

Coordenação do Curso EUREM

Rio de Janeiro

Dedico este trabalho aos meus avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeira a Deus por ter me sustentado até aqui, e por nunca ter permitido que eu desistisse dos meus sonhos, por me fortalecer quando nem mesmo eu acreditava que poderia realizar.

Em segundo lugar, agradeço em memória ao meu avô Hermínio Cândido da Silva, que partiu quando eu tinha apenas 15 anos, mas que me ensinou os valores da vida, que me ensinou que eu precisaria ser o homem da casa, e que foi mais que avô, foi pai, foi ídolo. Gostaria que estivesse aqui para me ver alcançar mais uma vitória, para me ver cuidar da nossa família. Obrigado por me dar tudo que eu precisava ter até poder caminhar com as próprias pernas, sem tudo o que me deixou, nada teria sido possível. Agradeço a minha vó que da mesma maneira sempre fez tudo por mim, mais do que deveria ou podia. Agradeço a minha mãe que sempre me incentivou a estudar, e toda minha família e amigos que nunca deixaram de estar ao meu lado. Vocês fazem parte de tudo isso.

Por final, mas não menos importante, agradeço a toda estrutura e corpo docente da AHK em parceria com a Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) representada pelo Programa de Planejamento Energético (PPE/COPPE) que não mediram esforços para transmitir conhecimento e experiência a todos nós alunos.

“Acima de tudo tenha um objetivo único; tenha um propósito legítimo e útil e dedique-se incondicionalmente a ele”

James Alfred Van Allen

RESUMO

A aplicação da tecnologia fotovoltaica em ciclovias urbanas constituídas de painéis solares, como forma de estudo para possíveis implantações, destinada a geração de energia elétrica descentralizada e com fluxos multidirecionais, tem por finalidade comprovar por meio de análises e execução de projetos, o potencial solar brasileiro com a finalidade de diversificar a matriz energética do país de forma agregada ao transporte ativo urbano.

A gestão pública do transporte ativo, vinculada a soluções tecnológicas e sustentáveis de geração de energia elétrica, através da fonte solar fotovoltaica, mostra a grande variedade de aplicações disponíveis e viáveis, de cooperação energética responsável e comprometida com o meio ambiente.

Este trabalho tem por objetivo comprovar o potencial energético do Brasil para implementações de projetos solares fotovoltaicos, utilizando uma infraestrutura já existente, com a finalidade de mitigar investimentos otimizando custos, com isso, obter energia elétrica limpa, visando a redução da emissão de GEE na atmosfera, evitando o consumo de energia elétrica de fontes não renováveis. De igual maneira, incentivar a utilização do transporte ativo nos grandes centros urbanos, demonstrando responsabilidade ambiental e social.

A metodologia consiste em pesquisa de campo, estudo de viabilidade técnica e financeira, análise de ciclos históricos de consumo público de energia elétrica, implementação de pré-projeto, medições de grandezas elétricas e resultados estimados, e avaliação da geração fotovoltaica.

Como resultado e conclusão, espera-se ter uma geração de energia elétrica através da fonte solar, suficiente para compensar o consumo de energia local das cargas existentes na proximidade da ciclovia e utilizar os créditos excedentes para reduzir os gastos energéticos dos prédios públicos.

Palavras-Chave: Ciclovia, solar, fotovoltaica, energia, transporte ativo.

ABSTRACT

The application of photovoltaic technology in urban bike lanes consisting of solar panels, as a way of studying possible deployments, aimed at the generation of decentralized electricity and with multidirectional flows, aims to prove, through analysis and project execution, the Brazilian solar potential with the purpose of diversifying the country's energy matrix in an aggregate way to active urban transport.

The public management of active transport, linked to technological and sustainable solutions for the generation of electric energy, through the photovoltaic solar source, shows the wide variety of available and viable applications, responsible energy cooperation and committed to the environment.

This work aims to prove the energy potential of Brazil for the implementation of solar photovoltaic projects, using an existing infrastructure, with the mitigation of investments by optimizing costs, thereby obtaining electricity, reducing the reduction of GHG emissions in the atmosphere, avoiding the consumption of electricity from non-renewable sources. Likewise, encourage the use of active transport in large urban centers, demonstrating environmental and social responsibility.

The methodology consists of field research, study of technical and financial feasibility, analysis of historical cycles of public consumption of electricity, pre-project implementation, measurements of electrical quantities and estimated results, and evaluation of photovoltaic generation.

As a result and conclusion, it is expected to have a generation of electric energy through the solar source, sufficient to offset the local energy consumption of the charges existing in the vicinity of the cycle path and to use the surplus credits to reduce the energy expenditure of public buildings.

Keywords: Bicycle path, solar, photovoltaic, energy, active transport.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Infográfico da malha cicloviária nas capitais brasileiras	16
Figura 2: Mapa geográfico do Brasil	18
Figura 3: Mapa brasileiro de irradiação solar em média anual.....	20
Figura 4: Imagem de um pireliômetro	22
Figura 5: Exemplo de radiação solar diária com valores em HSP	23
Figura 6: Taxa de desempenho em SFV na Europa	25
Figura 7: Infográfico da malha cicloviária nas capitais brasileiras (habitantes por ciclovia) ..	30
Figura 8: Trecho de 1km da ciclovia	32
Figura 9: Medição das coordenadas -23.025734, -43.458332.....	33
Figura 10: Normais climatológicas – temperaturas máximas de janeiro.....	38
Figura 11: Lista de equipamentos.....	41
Figura 12: Módulo JA Solar 550W	42
Figura 13: Inversor Solis 30kW-5G	42
Figura 14: Inversor Solis 75kW-5G	43
Figura 15: Clamper Solar SB1000 1-2E/2S	43
Figura 16: Cabo solar Nexans 6mm ²	44
Figura 17: Conectores MC4 Staubli	44
Figura 18 - Bloco pré-moldado para módulos FV, Frankrijk.....	48
Figura 19 - Tabela de orçamento.....	49
Figura 20 - Dashboard de resumo financeiro	51
Figura 21 (a) economia gerada, (b) payback descontado e (c) comparação do investimento ..	53
Figura 22 - Comparação de Investimento	54
Figura 23 - Fator de Emissão de tCO ₂	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes energéticos.....	36
Tabela 2 - Valores corrigidos de temperatura	39
Tabela 3 - Coeficientes de rendimento por fator de temperatura	39
Tabela 4 - Desempenho mensal.....	40
Tabela 5 - Geração média real	40
Tabela 6 - Resumo de layout da instalação	45
Tabela 7 - Validação das grandezas elétricas	46
Tabela 8 - Premissas operacionais.....	50
Tabela 9 - Premissas da conta de energia	50
Tabela 10 - Premissas de projeto.....	51
Tabela 11 - Projeção da redução de GEE	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CRESESB – Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DC – Direct Current
DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos
FV – Fotovoltaico
GEE – Gases do Efeito Estufa
HSP – Horas de Sol Pico
MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MPPT – Maximum Power Point Tracking
PE – Proteção Elétrica
PERC – Passivated Emitter Rear Cell
PR – Performance Ratio
SFV – Sistema Fotovoltaico
SPMP – Seguidor do Ponto de Máxima Potência
STC – Standard Test Conditions
TD – Taxa de Desempenho
TIR – Taxa Interna de Retorno
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
UVB – Ultravioleta B
VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	METODOLOGIA.....	14
3	MOBILIDADE URBANA.....	15
3.1	HISTÓRIA DAS CICLOVIAS	15
3.2	MODIFICAÇÃO DE INFRAESTRUTURA	16
3.3	INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE ATIVO E POTENCIAL SOLAR.....	17
3.3.1	Potencial Geográfico.....	17
3.3.2	Potencial Fotovoltaico e Irradiância Local	19
4	RENDIMENTO ENERGÉTICO POR VARIAÇÃO REGIONAL.....	23
4.1	TAXA DE DESEMPENHO E POTENCIAIS PERDAS.....	24
4.1.1	Perdas antes dos módulos fotovoltaicos	26
4.1.2	Perdas nos módulos fotovoltaicos	26
4.1.3	Perdas após os módulos fotovoltaicos.....	27
5	GERAÇÃO DESCENTRALIZADA E GESTÃO DE FLUXOS	28
6	EXPLANAÇÃO DE PROJETO PILOTO	32
6.1	MEMORIAL DESCRITIVO DO LOCAL	32
6.2	ANÁLISE DO RECURSO SOLAR LOCAL	32
6.3	GERAÇÃO DE ENERGIA ESTIMADA IDEAL	34
6.4	GERAÇÃO DE ENERGIA ESTIMADA REAL	35
6.4.1	Perdas energéticas consideradas	35
6.4.2	Potência-pico instalada da ciclovia	36
6.4.3	Coefficientes de perda por fator de temperatura.....	37
6.5	DIMENSIONAMENTO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	41
6.6	VIABILIDADE TÉCNICA.....	45
6.6.1	Resumo técnico e premissas da instalação elétrica.....	46
6.6.2	Resumo técnico e premissas da instalação civil	48
6.7	VIABILIDADE FINANCEIRA.....	49
6.7.1	Detalhamento financeiro resumido	49
7	REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GEE	56
8	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana associada ao assunto de investimentos em infraestrutura de transporte ativo, abre um leque de possibilidades e oportunidades públicas de projetos e aplicações. Com o foco em capitais e grandes centros urbanos, torna-se possível o desenvolvimento de soluções conjuntas e agregadas à tecnologias de otimização dos espaços, da geração de energia elétrica e redução da poluição atmosférica.

Falar de ciclovias cobertas por módulos solares fotovoltaicos, além de inovador e desafiador, por questões técnicas e políticas, é um tanto quanto responsável do ponto de vista da otimização do espaço físico. Ciclovias por si só remetem a responsabilidade ambiental, visto diminuir a circulação e o tráfego de veículos altamente poluentes nos grandes centros urbanos, colaborando para redução da emissão de GEE. Associadas à geração de eletricidade por meio de energia solar fotovoltaica, tem potencial para tornar-se uma das maiores aplicações de sistemas solares já vistos na história, tanto em extensão territorial, quanto em eficiência na geração de eletricidade e sua capacidade produtiva.

Diversas formas de aplicação são consideradas quando se trata de sistemas de energia solar fotovoltaica. Novos desafios e possibilidades surgem constantemente, visto ser uma tecnologia em ascensão. Junto a isto, engenheiros, técnicos, pesquisadores e projetistas da área, trabalham para tornar ideias e conceitos em algo prático e implementável.

O objetivo deste trabalho é mostrar o potencial energético que pode ser aproveitado através de um espaço com infraestrutura já construída, que além de cooperar gerando energia elétrica, ainda vincula responsabilidade social e ambiental por meio da redução de GEE e da otimização e incentivo da utilização do transporte ativo.

A partir desta introdução, este trabalho divide-se em cinco capítulos, e serão abordados assuntos desde a história das ciclovias e mobilidade urbana no capítulo 3, entrando nos detalhes de rendimento energético por variação regional no capítulo 4, onde é abordado assuntos relacionados a rendimentos e perdas em sistemas solares fotovoltaicos, continuando no capítulo 5 com a consolidação do entendimento sobre geração descentralizada e gestão de fluxos, para entrar de fato no desenvolvimento do projeto no capítulo 6, onde é falado sobre estudos técnicos e financeiros referentes a implementação de um projeto solar fotovoltaico aplicado a uma ciclovia, análises de recursos solares locais, e dimensionamentos relacionados ao projeto. Ao final, no capítulo 7, é tratado sobre as taxas de redução de emissão de GEE na atmosfera.

2 METODOLOGIA

A metodologia a ser utilizada para realizar este trabalho, baseia-se na pesquisa de campo, levantamento e aquisição de dados junto a prefeitura local escolhida para aplicação do projeto. Estudos de viabilidade técnica e financeira, análises de ciclos históricos de consumo público de energia elétrica, tais como iluminação, sinalização de trânsito, e consumo em prédios e repartições. Pretende-se implementar pré-projeto em menor escala, destinado a analisar comportamento físico da planta, efetuando medições afim de refinar a aplicabilidade geral, conhecendo prioritariamente a quantidade de energia em watt-hora possível de ser gerada por watt-pico instalado e outros indicadores.

3 MOBILIDADE URBANA

O investimento em infraestrutura de mobilidade urbana é assunto de interesse público, e de extrema importância para o gerenciamento do crescimento dos grandes centros e capitais. Vinculado a isto, faz-se necessário tratar do transporte ativo como um dos fatores a ser desenvolvido e modificado, de forma a colaborar com a expansão estruturada das cidades, e de igual maneira contribuir com a independência energética desse crescimento.

Mobilidade urbana consiste em promover facilidade de movimentação de pessoas nas cidades, com o objetivo de permitir e desenvolver relações econômicas e sociais. Segundo o dicionário Houaiss da língua portuguesa, mobilidade significa facilidade para se mover, e através de medidas e ações relacionadas a isto, a associação da infraestrutura de transporte ativo junto à aplicações de solução energética, tem poder para contribuir de forma direta com a otimização do espaço físico das cidades e consumo elétrico local.

3.1 HISTÓRIA DAS CICLOVIAS

As ciclovias são espaços destinados especificamente à circulação de indivíduos que estejam utilizando bicicletas como meio de locomoção. As primeiras ciclovias tiveram origem em Paris no século XIX, quando se notou a necessidade de separar os fluxos de velocípedes do fluxo de charretes e carroças, e intensificou-se por volta dos anos 30 na Alemanha com o objetivo de segregar a circulação de bicicletas e automóveis que começavam a ser produzidos (CITY OF COPENHAGEN, 2014).

A partir dos anos 2000, as ciclovias passaram a se tornar mais populares e a ganhar maiores investimentos e atenção. Atualmente no Brasil, existem cerca de 3.400 quilômetros de ciclovias somente nas capitais do país, concentrando-se principalmente nas cidades de São Paulo, Brasília e Rio de Janeiro, como observado no infográfico da Figura 1:

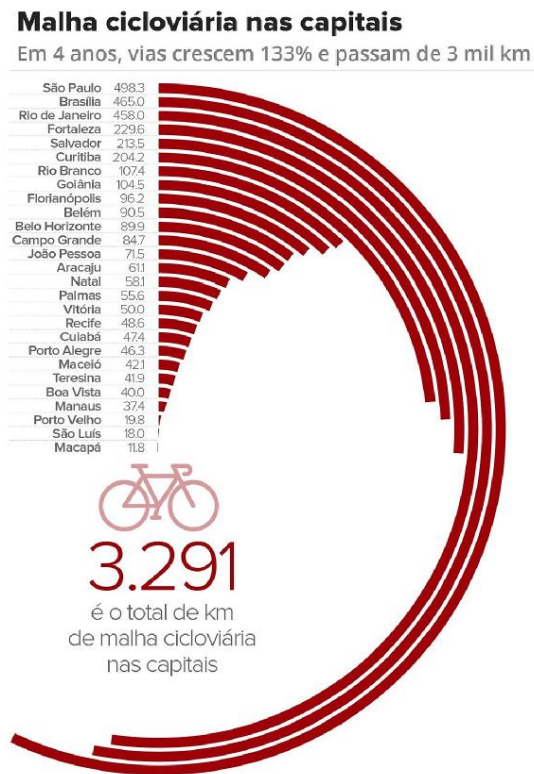


Figura 1: Infográfico da malha cicloviária nas capitais brasileiras

Fonte: Prefeituras das capitais e governo do DF

Somando as três cidades, a quantidade de ciclovias existente chega a 1.421 quilômetros, o que corresponde a aproximadamente 43% da malha cicloviária das capitais do país. Além de contribuir como a segregação do fluxo de veículos, as ciclovias cooperam diretamente com a redução da emissão de GEE, pois incentivam a diminuição da utilização de veículos a combustão, e possuem por ser territorialmente extensivas, potencial para receber tecnologias associativas em sua superfície, destinada a geração de energia elétrica, como é o caso da fonte solar fotovoltaica através de módulos solares concebidos especialmente para este fim (EMBARQ BRASIL, 2014).

3.2 MODIFICAÇÃO DE INFRAESTRUTURA

Implementar projeto destinado a gerar energia elétrica para compensar consumo, promover e incentivar a mobilidade urbana, e reduzir a emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa, requer uma série de estudos técnicos para tomadas de decisões a respeito do aproveitamento da estrutura local existente. No projeto ideal, toda a área já construída de ciclovias deve ser utilizada, reduzindo investimentos de construção civil para ampliações. Pretende-se que a superfície da ciclovias receba blocos concretados pré-moldados, com células

fotovoltaicas dispostas e arrançadas em seu núcleo.

3.3 INFRAESTRUTURA DE TRANORTE ATIVO E POTENCIAL SOLAR

O transporte ativo consiste nos meios de transporte em que dependem diretamente da propulsão humana. Neste capítulo será abordado questões técnicas relacionadas a projetos de ciclovia e ciclofaixas, contemplando de forma agregada, soluções de geração de energia elétrica.

Os critérios gerais para implementação, utilização ou otimização de infraestrutura adequada para tal fim, baseia-se prioritariamente na segurança e acessibilidade para todas as pessoas, visto que um dos fins desde projeto é tornar a utilização dos meios de transporte ativo algo mais atraente, promovendo consciência em massa a respeito de temas gerais como consumo e conservação do meio ambiente.

O projeto leva em consideração a adequação à toda norma e lei vigente, e toda boa prática relacionada a qualificação da infraestrutura cicloviária, como por exemplo a pavimentação, inclinação para drenagem, iluminação dedicada e sistema de informação nas vias.

Quanto ao agregamento de solução energética, vale ressaltar que possui diversos fins ao qual se destina. A possibilidade de gerar energia elétrica através da fonte solar fotovoltaica, contribui para a redução do consumo de eletricidade das regiões periféricas às ciclovias, e ainda de unidades de consumo remotas. A energia gerada pelas ciclovias solares, serão destinadas neste projeto, à iluminação pública das vias, sistema de sinalização de trânsito tanto da ciclovia quanto das faixas de veículo, pontos de recarga para bicicletas elétricas, e contempla de igual forma, a criação do que pode ser chamado de infraestrutura de multi serviços.

3.3.1 Potencial Geográfico

Predominantemente tropical o Brasil é um país que, apesar das variações de temperatura, pode-se dizer que se tem Sol o ano inteiro, mesmo em estações chuvosas e meses onde a baixa temperatura sobreleva, o Sol faz-se presente. Além disso, é um dos maiores países do mundo em área contínua, ficando atrás apenas de Rússia, China e Canadá. Ocupa grande parte do território da América do Sul e está localizado nos dois hemisférios do planeta (CERQUEIRA, 2018).

É considerado um país com dimensões continentais, sua extensão territorial é de pouco mais de oito milhões de quilômetros quadrados e corresponde a aproximadamente 1,6% da

superfície do planeta, ocupando 5,6% das terras globais, 20,8% da área de toda América e 48% da América do Sul.

A Figura 2 apresenta o mapa geográfico do Brasil subdividido em seus estados e regiões.



Figura 2: Mapa geográfico do Brasil

Fonte: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas.

O território brasileiro está localizado a oeste do meridiano de Greenwich, no hemisfério ocidental. A linha do equador passa no extremo norte do Brasil, fazendo com que 7% do seu território pertença ao hemisfério setentrional e 93% localizado no hemisfério meridional. A área que corresponde ao Brasil apresenta mais de quatro mil quilômetros de distância no sentido Leste-Oeste, os extremos são a Serra da Contamana, a oeste, com longitude de $73^{\circ}59'32''$ e Ponta dos Seixas, a leste, com longitude $34^{\circ}47'30''$. Os extremos no sentido Norte-Sul apresentam de igual modo mais de quatro mil quilômetros de distância e são compostos pelo

Monte Caburai, ao norte do território, com latitude $5^{\circ}16'20''$, e Arroio Chuí, ao sul, com latitude $33^{\circ}45'03''$ (CERQUEIRA, 2018).

3.3.2 Potencial Fotovoltaico e Irradiância Local

Geralmente também chamada de irradiação, a irradiância é uma grandeza utilizada para quantificar a radiação solar, expressada na unidade de W/m^2 (watt por metro quadrado). Trata-se de uma unidade de potência por área, sabe-se que a potência é uma grandeza física que expressa a energia transportada durante um determinado intervalo de tempo, ou a taxa de variação da energia com o tempo. Quanto maior a potência da radiação solar, maior a quantidade de energia transportada em um determinado intervalo de tempo.

O Brasil recebe índices de irradiação solar bastante elevados em relação a países da Europa, que é aonde a tecnologia fotovoltaica já vem sendo difundida em maior escala para produção de eletricidade. Verifica-se, contudo, que o Brasil tem demonstrado avanço e crescimento tecnológico fotovoltaico. A radiação solar depende das condições climáticas e atmosféricas, somente parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície da terra seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial.

Sendo um dos países que mais recebe irradiação solar em todo mundo, por estar localizado próximo a linha do Equador, o país recebe altas incidências de sol durante todo o dia, com pouca variação ao longo das estações do ano, em função das características de translação do planeta. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o país recebe durante todo o ano, mais de 3 mil horas de brilho do Sol, correspondendo a uma incidência solar diária que pode ir de 4.500 a 6.300 Wh/m^2 .

A Figura 3 demonstra o mapa brasileiro de irradiação considerando suas médias anuais.

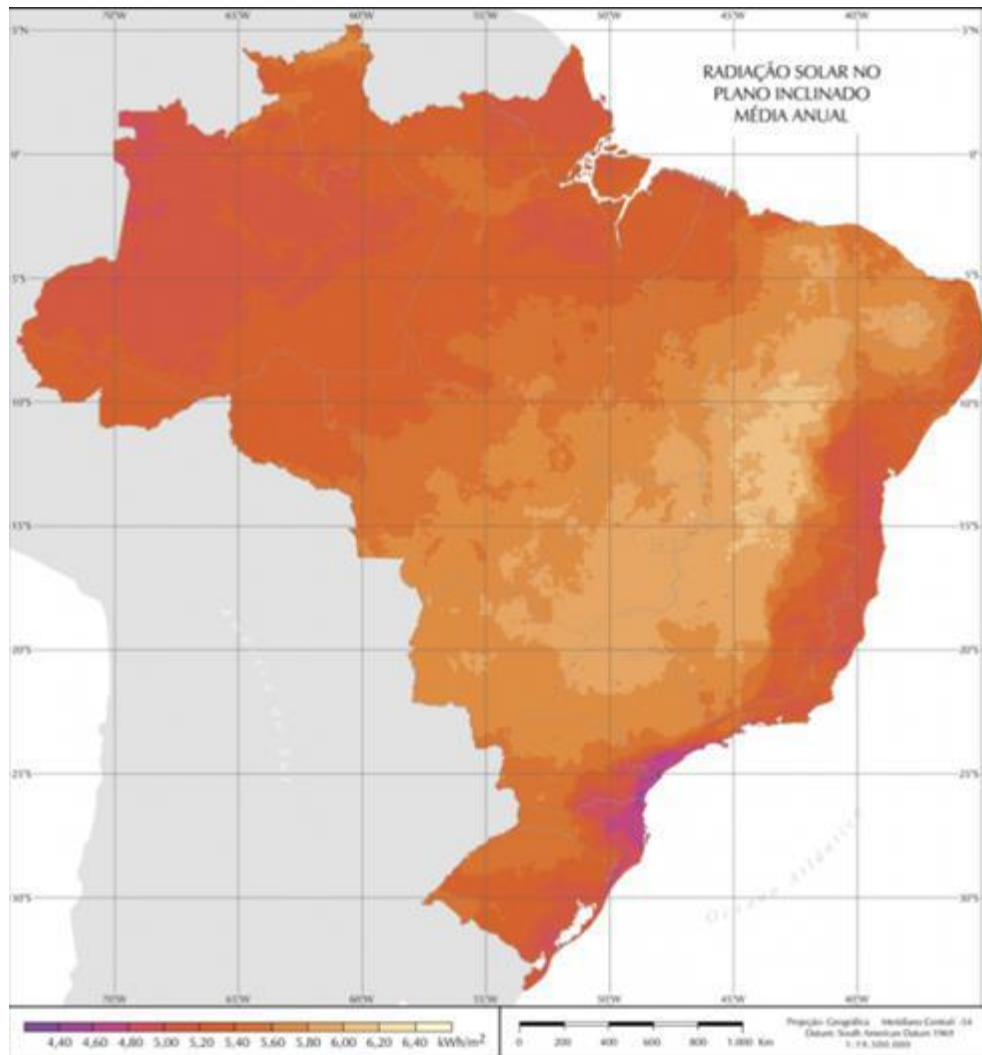


Figura 3: Mapa brasileiro de irradiação solar em média anual

Fonte: Atlas brasileiro de energia solar

A Alemanha é o país mais desenvolvido do mundo em relação a investimentos, pesquisas, exploração e implementação de energia solar fotovoltaica, ainda assim, o local que mais recebe luz solar em seu território é potencialmente inferior à capacidade de geração da maior parte do território brasileiro. Contudo, a energia solar na matriz energética do Brasil ainda se mostra pouco utilizada, não correspondendo sequer a 1% da energia total produzida.

O nome “radiação solar” é usado de forma genérica e pode se referir a fluxo de potência, quando é especificamente denominado de irradiância solar, ou pode se referir a energia por unidade de área, denominado, então, de irradiação solar. A densidade média anual do fluxo energético proveniente da radiação solar, quando medida num plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares na atmosfera terrestre recebe o nome de constante solar e corresponde ao valor de 1.377 W/m^2 . Considerando o raio médio da terra e o valor da irradiância

citado, conclui-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera, é de aproximadamente 174 mil terawatts.

De acordo com Galdino e Pinho (2014, p. 81) “o valor da irradiação solar incidente em um plano orientado na direção do Equador e com uma inclinação igual à latitude local permite calcular a energia elétrica que pode ser convertida por um sistema fotovoltaico fixo instalado nessas condições.”

A energia solar fotovoltaica apresenta mais regularidade no fornecimento de eletricidade do que a energia eólica e pode ser empregada em todo o território brasileiro, pois o País é privilegiado com elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões, a quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da insolação do local onde é instalado. A melhor insolação da Alemanha é cerca de 3500 Wh/m² (watt-hora por metro quadrado) por dia. Para comparação, o Brasil apresenta valores de insolação diária entre 4500 Wh/m² e 6000 Wh/m². Espera-se para o Brasil, devido às dimensões territoriais, um potencial de geração fotovoltaica pelo menos dez vezes superior à capacidade instalada na Alemanha, isso representaria cerca de 200 GW de eletricidade, o dobro de toda a energia elétrica produzida pelo Brasil.

Para que sejam viabilizados projetos de sistemas fotovoltaicos, fazem-se necessários estudos e análises prévias a respeito do potencial solar da região ou local. Esses estudos visam à medição da radiação extraterrestre realizada por satélites meteorológicos, junto com a adoção de cálculos matemáticos e medição de radiação ao nível do solo. Existem dispositivos normatizados que calculam a radiação solar ao nível do solo, como por exemplo, os piranômetros e os pireliômetros. Esses estudos retornam dados concretos após alguns anos, pois consideram fatores variáveis como as mudanças climáticas ao longo do ano. A Figura 4 ilustra um pireliômetro, dispositivo para calcular radiação solar.



Figura 4: Imagem de um pireliômetro
Fonte: NREL – National Renewable Energy laboratory

No Brasil temos dois principais estudos sobre a radiação solar em território brasileiro: o “Atlas Solarimétrico do Brasil” produzido pelo CRESESB (Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito); e o “Atlas Brasileiro de Energia Solar” produzido pela Universidade Federal de Santa Catarina em conjunto com o Projeto SWERA. Os Dois estudos são complementares e mostram as variações na radiação captada na superfície do território brasileiro ao longo de um ano. O Atlas Solarimétrico apresenta os valores da radiação no plano horizontal (H) em mega joules por metro quadrado (MJ/m^2). O Atlas Brasileiro de Energia Solar apresenta os resultados em quilowatts hora por metro quadrado. O valor dado em kWh/m^2 é chamado de Horas de Sol Pico (HSP) ou Horas de Sol Pleno (CRESESB, 2014).

4 RENDIMENTO ENERGÉTICO POR VARIAÇÃO REGIONAL

Entender que para cada região distinta há um potencial energético também distinto é o ponto de partida para uma detalhada análise do rendimento energético que pode ser obtido em sistemas solares fotovoltaicos. A combinação de fatores técnicos, características construtivas dos equipamentos, dados climatológicos, interferências na implantação, potenciais perdas, e índice de radiação local incidente, determinam diretamente a eficiência e rendimento do sistema instalado (BALFOUR, 2016).

Ciclovias urbanas têm por característica longas extensões territoriais, o que leva a concluir que para cada determinada área ao longo do percurso de uma ciclovia composta por placas solares fotovoltaicas, exista rendimentos energéticos variados. É bem sabido que para gerar energia, uma placa solar precisa somente que sobre ela incida determinada quantidade de luz, o que torna possível tomar como regra que logo nas primeiras horas do dia, já exista produtividade (BALFOUR, 2016).

Para cada região, existe uma média de HSP (horas de sol pico, ou sol pleno), que nada mais é que a expressão do valor acumulado de energia solar ao longo de um dia. O HSP reflete a quantidade de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante, resultando em uma equivalência entre a energia disponibilizada pelo Sol na região em questão e a energia aproveitada (CRESESB, 2014).

A Figura 5 mostra um exemplo para que se compreenda o conceito de HSP

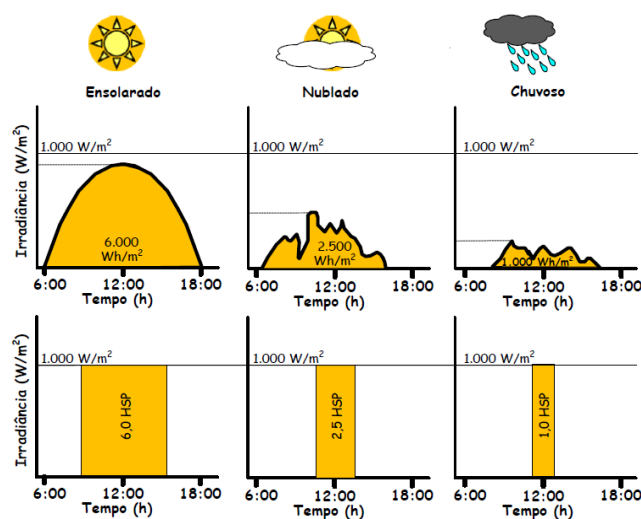


Figura 5: Exemplo de radiação solar diária com valores em HSP

Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos

Dentro de uma mesma região com recursos solares aparentemente uniformes, podem existir diferenças gritantes de rendimento do sistema solar. A escolha do local em que serão fixados os painéis solares é determinante para seu desempenho. A integração com elementos arquitetônicos, fachadas, ou blocos de concreto para utilização em ciclovias, por exemplo, juntamente com a presença de elementos que possam gerar sombreamento parcial, ou superfícies reflexivas próximas a instalação, pode afetar o rendimento do sistema solar fotovoltaico, sem contar ainda, a capacidade de troca de calor com o meio, que tem relação direta com eficiência do sistema. Em regiões remotas é possível que se encontre facilmente superfícies livres de sombreamento e com fácil circulação de ar. Porém, em instalações urbanas essa facilidade se esgota, devido a fatores principalmente ligados a construção civil, como prédios, viadutos e pontes (CRESESB, 2014).

A partir de uma orientação geográfica baseada na latitude e longitude da região e obtida em forma de coordenada, é possível conhecer valores de insolação de uma determinada localidade, levando em consideração a princípio o seu plano horizontal, desprezando inclinações ou desvios azimutais. Bases de dado como a do programa SunData, mostra cálculos da irradiação solar diária em média mensal em qualquer ponto dentro do território nacional, ajudando desta maneira a dimensionar sistemas solares fotovoltaicos para a aplicação que se destine (CRESESB, 2014).

4.1 TAXA DE DESEMPENHO E POTENCIAIS PERDAS

O bom funcionamento de um sistema solar fotovoltaico é forte e diretamente influenciado pelas perdas sofridas através dos fatores relacionados ao mesmo. Seu desempenho é medido pela TD (taxa de desempenho), mais conhecida como PR (Performance Ratio), que se define pela relação entre o desempenho real sobre o desempenho teórico do sistema. Desta forma avaliamos a verdadeira geração de energia de um SFV, levando em consideração todas as perdas envolvidas em cada uma das etapas e processos de funcionamento deste (ZILLES et al., 2012).

A Figura 6 mostra o resultado de uma avaliação feita em um intervalo de quinze anos, onde se pode observar uma média entre 70% e 75% da taxa de desempenho em 527 SFV instalados na Europa.

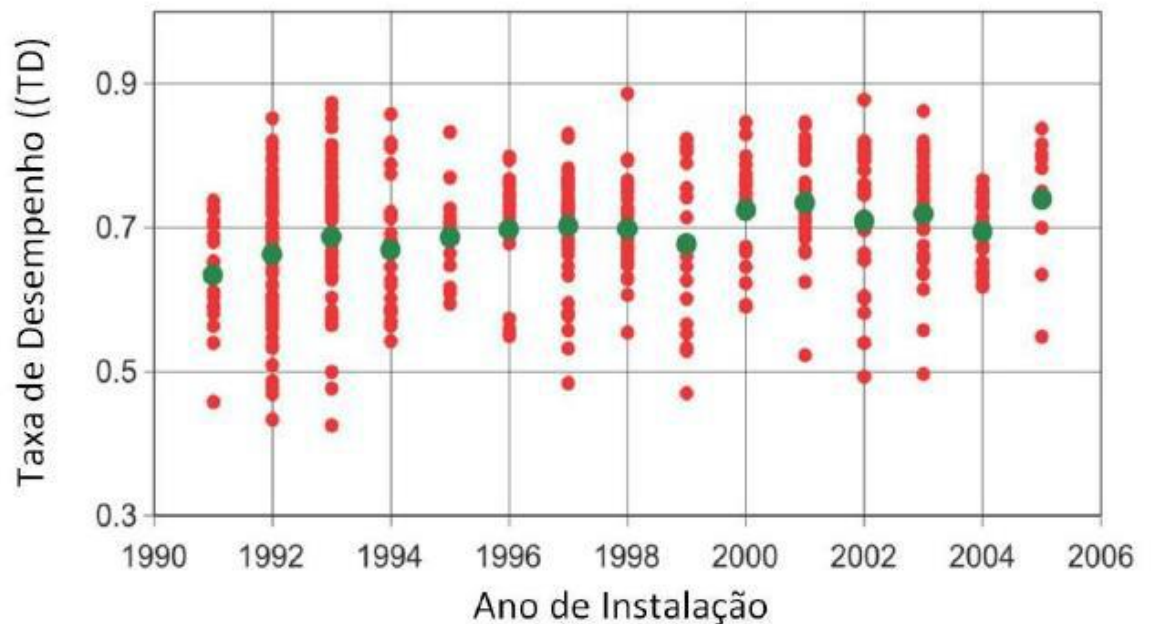


Figura 6: Taxa de desempenho em SFV na Europa
 Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos

Ainda em relação ao desempenho, para que se obtenha uma boa estimativa de produção de energia, faz-se necessário conhecer e considerar alguns parâmetros como a exata compreensão dos dados locais, seu clima e ambiente, minucioso conhecimento a respeito do funcionamento dos inversores e painéis para o ambiente que estará sendo projetado o sistema, conhecimento sobre possíveis perdas decorrentes de problemas mecânicos e elétricos, qualidade da instalação e do material selecionado, e ainda conhecimento sobre cada um dos recursos relacionados diretamente a engenharia solar, como a eficiência dos painéis baseada em suas características construtivas e de operação, recursos solares como inclinação e orientação, resposta espectral, coeficientes de temperatura para potência, corrente e tensão, e reflexos de superfícies próximas que possam vir a impactar o ganho energético do sistema em questão.

Existem inúmeras perdas que são consideradas por projetistas nas etapas de desenvolvimento de um projeto e implementação do mesmo, de igual maneira existem momentos distintos de considera-las, que podem ser separadas em perdas antes dos módulos fotovoltaicos, perdas nos módulos fotovoltaicos, e perdas após os módulos fotovoltaicos. Dentre as mais relevantes é possível citar as perdas por ângulo de incidência da radiação solar, perdas por sombreamento parcial, acúmulo de sujeiras nos módulos fotovoltaicos, eficiência e tolerância de potência dos módulos, incompatibilidade elétrica, perdas por fator de temperatura, perdas no cabeamento de corrente contínua, perdas no inversor, perdas no rastreamento do

ponto de máxima potência, perdas na conversão de corrente contínua para alternada e perdas no cabeamento de corrente alternada.

4.1.1 Perdas antes dos módulos fotovoltaicos

Refere-se às perdas de energia solar incidente antes da entrada de luz nos módulos fotovoltaicos, como perdas por ângulo de incidência da radiação solar, sombreamento parcial e acúmulo de sujeira. Este primeiro fator só é levado em consideração em grandes aplicações, por ser de alta complexidade analisar e também pelo fato de que os valores para radiação solar para determinada localidade já consideram ganhos e perdas. Já para o sombreamento parcial a análise é de suma importância, pois considera sombras não permanentes sobre os módulos fotovoltaicos, causadas por agentes transitórios como folhas, pássaros, trânsito urbano, ou sombras sazonais que são causadas por corpos próximos ao SFV, que em determinado período de tempo tem sua sombra projetada sobre os módulos. Este é considerado um dos índices de rendimento mais difíceis de calcular, pois a forma como se dá a projeção da sombra determina o grau de perda em maior ou menor influência.

Em relação à sujeira acumulada nos módulos, elas afetam diretamente a produtividade e a quantidade de energia gerada, pois parte do módulo estará coberto evitando assim a entrada de luz. Quanto maior a quantidade de poeira no ar, como existe, por exemplo, em centros urbanos por conta de indústrias e carros, maior deve ser a atenção com a manutenção preventiva de limpeza dos módulos.

4.1.2 Perdas nos módulos fotovoltaicos

As perdas nos módulos fotovoltaicos levam em consideração perdas de energia durante a conversão da luz e da radiação solar em energia elétrica, e está relacionada a eficiência e tolerância de potência dos módulos fotovoltaicos, incompatibilidade elétrica e perdas por fator de temperatura. Em relação ao primeiro fator, este é o principal coeficiente de perda de um módulo, o seu índice de eficiência. Um módulo que tenha 14% de rendimento apresenta 86% de perda. Porém este rendimento é fornecido pelo fabricante levando em consideração as condições padrões de teste (STC). Os fabricantes também informam as tolerâncias de potência em seus datasheets, para o caso de tolerância de potência negativa (ex.: -5%/+5%), este valor também é considerado como possível perda.

Quando se associam módulos fotovoltaicos com diferentes níveis de tensão e corrente, ocorre um nivelamento por baixo, acompanhando assim os menores valores de potência da

associação. A esta situação se dá a incompatibilidade elétrica, conhecida pelo termo mismatching. Quanto às perdas por fator de temperatura, este é considerado o mais impactante coeficiente de perda de um SFV. Mediante sua característica sazonal, devem-se calcular perdas por temperatura a cada mês, de forma a diferenciar os períodos de maior e menor rendimento devido à temperatura.

4.1.3 Perdas após os módulos fotovoltaicos

Considera as perdas de energia elétrica desde os módulos fotovoltaicos até a rede onde é feita a conexão. Após a conversão da radiação em energia elétrica, em seu caminho até as cargas e a rede, existem vários componentes do sistema de geração, e em cada um deles existem perdas a serem consideradas.

O trecho de ligação entre os módulos e o inversor apresenta resistência à passagem da corrente elétrica, por este motivo é considerada a perda no cabeamento de corrente contínua. As perdas no inversor dividem-se em perdas no SPMP (seguidor do ponto de máxima potência) e em perdas na conversão de corrente contínua para alternada, embora não sejam muito severas, elas são consideradas. Além destas, existem ainda perdas no cabeamento de corrente alternada, que são consideradas as perdas no trecho de circuito entre o inversor e a rede.

5 GERAÇÃO DESCENTRALIZADA E GESTÃO DE FLUXOS

No Brasil, onde a matriz de geração de energia já contempla uma larga porcentagem de geração hidrelétrica, a pressão pelo aumento da geração com fontes renováveis é menor. Ainda assim, as dificuldades trazidas pela localização cada vez mais distante dos aproveitamentos hidrelétricos, as restrições ambientais e as dificuldades econômicas associadas à viabilização de megaempreendimentos de geração tornam a utilização de geração distribuída uma opção realista a ser considerada na expansão do sistema elétrico brasileiro (FALCÃO, 2013).

Inserir a energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira e produzi-la em larga escala para que assim seja gerada diversificações e substituições das fontes de energia consideradas finitas, ainda é um grande desafio. Existem barreiras e empecilhos políticos e técnicos que precisam ser levados em consideração pra que dessa forma medidas cabíveis sejam tomadas neste sentido e direção. Fato é que se mostra cada vez mais necessário dar atenção à fonte de energia solar fotovoltaica como possível e potencial forma de geração de eletricidade para compor matriz energética (CRESESB, 2014).

A minigeração e a microgeração distribuídas estão chegando ao país trazendo grandes vantagens, como a redução de perdas, menor necessidade de grandes projetos de geração, oportunidades maiores de participação dos consumidores no atendimento à demanda, etc. Porém, trazem consigo problemas e desafios que precisam ser bem equacionados e resolvidos para permitir um crescimento adequado desse tipo de geração. Felizmente, ao mesmo tempo e de forma complementar, as tecnologias de redes elétricas inteligentes (smart grid) estão sendo introduzidas no país, as quais fornecem os recursos tecnológicos indispensáveis para um desempenho adequado da minigeração e microgeração conectadas às redes de distribuição de energia elétrica (FALCÃO, 2013).

A energia solar fotovoltaica possui diversas aplicações, em locais e formas distintas. Usualmente, está inserida em instalações solares compondo estruturas arquitetônicas, lajes, telhados residenciais e comerciais, fixadas ao solo, postes solares, e até mesmo em aplicações móveis e flutuantes. Baseando-se nas inúmeras possibilidades e buscando soluções alternativas sem impactos ambientais, a Holanda tornou-se pioneira em um experimento denominado como SolaRoad que se traduz por “Estrada Solar” porém não deve ser confundido com uma estrada de fato, o conceito e aplicação destina-se a uma ciclovia solar. O SolaRoad é a primeira ciclovia do mundo feita a partir de painéis solares e é um projeto de protótipo que testa a viabilidade de várias propostas para estradas inteligentes. O trajeto de 72 metros (236 pés) foi aberto na semana de 21 de outubro de 2014, e foi projetado por um consórcio de organizações que

construíram o caminho em Krommenie, Holanda. A tecnologia foi desenvolvida por um consórcio formado pela Organização Holandesa de Pesquisa Científica Aplicada (TNO), Imtech (Dylniq) e Ooms Civiel. A superfície da estrada consiste em painéis pré-fabricados com uma superfície de vidro endurecida de 1 centímetro (0,30 pol) de espessura (TNO, 2014).

O TNO afirma que esta energia pode ser usada para iluminação da estrada, semáforos e sinais de trânsito. A energia também é entregue nas habitações locais, no primeiro mês, o caminho entregou energia suficiente para sustentar uma família. Seis meses depois do teste, os engenheiros dizem que o sistema está funcionando ainda melhor do que o esperado, com a ciclovia de teste de 70 metros gerando 3.000 kWh, ou eletricidade suficiente para abastecer uma pequena residência por um ano. Se traduzirmos isso para um rendimento anual, esperamos mais do que os 70kwh por metro quadrado por ano (TNO, 2014).

Tomando como base de estudo e análise algumas localidades da região sudeste do Brasil, é possível dimensionar a capacidade real de implantação de ciclovias solares devido a grande extensão de ciclovias urbanas existentes nestes locais. Estados como Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, possuem cerca de 1000km de ciclovias se somadas em suas totalidades (CRESESB, 2014).

A Figura 7 mostra uma análise da estrutura ciclovária em relação a quantidade de habitantes de algumas cidades do Brasil.

Habitantes por ciclovias

Nº de pessoas para cada km de malha ciclovária

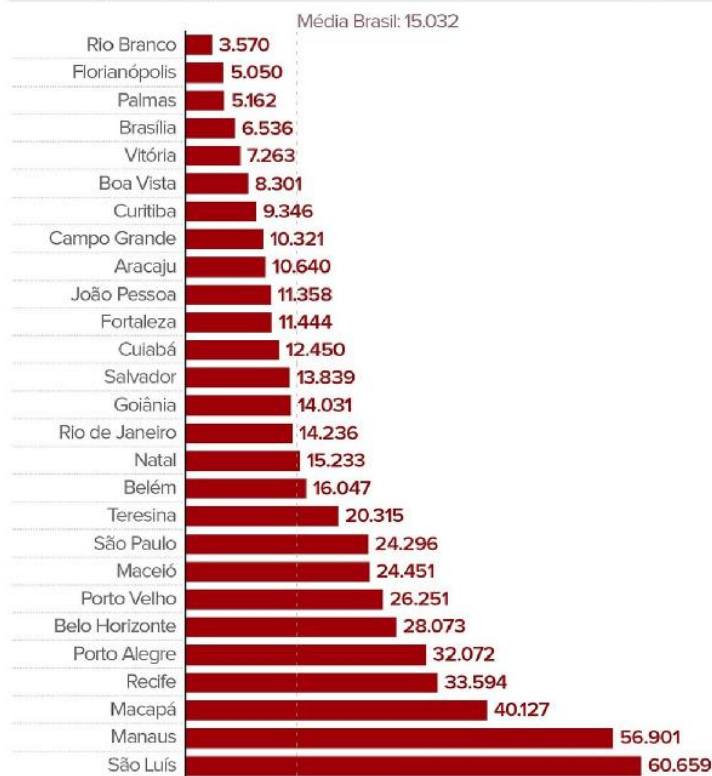


Figura 7: Infográfico da malha ciclovária nas capitais brasileiras (habitantes por ciclovía)

Fonte: Prefeituras das capitais e governo do DF

É notável que se somadas, há uma capacidade consideravelmente grande de utilização das ciclovias, onde podem ter módulos solares gerando energia elétrica. Mesmo sem levar em consideração neste momento, possíveis interferências, pensando somente em um sistema ideal.

Nas redes de distribuição convencionais, em geral com topologia radial, o fluxo de potência ocorre da subestação para as cargas, ocasionando uma queda de tensão ao longo dos alimentadores. A tensão nos pontos terminais desses alimentadores é mantida dentro dos limites previstos nas normas de operação pelo controle da tensão no terminal de baixa tensão dos transformadores da subestação e, eventualmente, pelo uso de reguladores de tensão ao longo dos alimentadores. Em muitos casos, utiliza-se, também, o chaveamento automático ou manual de bancos de capacitores para compensar a potência reativa requerida pela carga. A lógica de operação desses elementos de controle de tensão é simples e segue a flutuação da demanda, a qual apresenta um ciclo diário previsível. A presença de fontes intermitentes, com capacidade considerável na rede, altera a lógica de controle de tensão da rede de distribuição. Em momento de intensificação da potência entregue por essas fontes, a direção do fluxo de potência na rede pode sofrer uma inversão, produzindo uma elevação da tensão nos pontos em que está sendo

injetada na rede. Nesta situação, a lógica de controle convencional deve ser alterada para manter as tensões em todos os pontos da rede dentro dos limites operacionais. Essa alteração de lógica é complexa devido à intermitência da geração, o que exige um processo automático de adaptação das diversas fontes. Reguladores de tensão capazes de se adaptar a essa situação já começaram a ser disponibilizados no mercado, o que leva a conclusão de que soluções viáveis estão sendo tomadas, e que cada dia mais as dificuldades técnicas na implantação e conexão de sistemas solares fotovoltaicos à rede vem diminuindo.

6 EXPLANAÇÃO DE PROJETO PILOTO

O projeto em questão, tem por finalidade o desenvolvimento do *energy concept*. Os parâmetros adotados, local escolhido, e estudos técnicos e financeiros realizados, almejam ter aplicabilidade e serão detalhados no capítulo atual.

6.1 MEMORIAL DESCRITIVO DO LOCAL

O local destinado a aplicação da ciclovia solar, encontra-se no estado do Rio de Janeiro, no bairro Recreio dos Bandeirantes. O trecho irá possuir 1 quilômetro de extensão, e será executado em linha reta, margeando a praia. Na periferia da ciclovia, encontram-se quiosques e alguns pontos de iluminação. O local escolhido possui área de ciclovia aberta e exposta ao sol, o que contribuiu para a escolha. Longe de sombreamentos permanentes e interferências diretas, a quantidade de horas no dia em que a iluminação do sol chega a sua superfície, é extremamente elevada. Outro ponto decisivo para escolha do local, deve-se a quantidade de pessoas que utilizam a área para passear, praticar atividades físicas, se deslocar para o trabalho, e outras atividades afins, o fluxo é constante. Na Figura 8, pode ser observado o local de implementação do projeto.

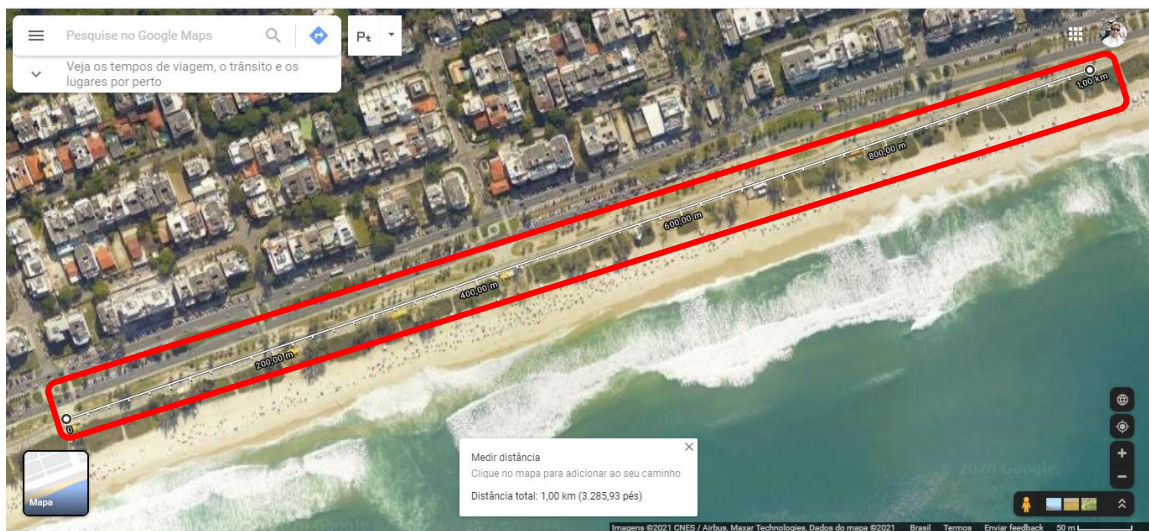


Figura 8: Trecho de 1km da ciclovia

Fonte: Google Maps

6.2 ANÁLISE DO RECURSO SOLAR LOCAL

Antes de iniciar qualquer etapa de um projeto de energia solar fotovoltaica, é imprescindível avaliar a disponibilidade de recurso solar no local, e validar que existem bons

índices solares para receber um investimento em projeto solar. Para obter essas informações, um levantamento detalhado do histórico de irradiação solar disponível para o local foi realizado previamente, e de igual maneira pretende-se instalar 6 meses antes da execução do projeto, uma estação meteorológica solarimétrica, afim de mensurar o potencial de radiação solar a nível do solo de maneira precisa.

A partir da distribuição espacial da irradiância solar média anual (W/m^2) que incide sobre a superfície da terra, é possível dimensionar a radiação ou irradiação solar na base temporal diária média anual, em $\text{kWh/m}^2.\text{dia}$.

Segundo o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), para as coordenadas -23.025734, -43.458332, que encontram-se no ponto médio da futura construção da ciclovia solar (a 500m do ponto inicial), o valor de irradiação solar diária média mensal é de $4,62\text{kWh/m}^2.\text{dia}$. Este valor é obtido a partir de análise e triangulação de dados a 3km de distância do ponto de referência, que é onde está localizada a estação solarimétrica mais próxima, e considera uma instalação com 0° de inclinação, no plano horizontal da superfície.

Estes valores são médios anuais, e variam mês a mês e até mesmo, dia a dia. Porém, para o fim destinado as informações mensais são suficientes.

A Figura 9, mostra as informações citadas acima.

Estação: Rio de Janeiro
Município: Rio de Janeiro, RJ - BRASIL
Latitude: 23° S
Longitude: $43,449^\circ$ O
Distância do ponto de ref. ($23,025734^\circ$ S; $43,458332^\circ$ O) : 3,0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [$\text{kWh/m}^2.\text{dia}$]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	6,00	6,11	4,92	4,31	3,53	3,25	3,26	4,08	4,27	4,90	5,03	5,78	4,62	2,85
✓	Ângulo igual a latitude	23° N	5,41	5,82	5,06	4,88	4,34	4,20	4,09	4,80	4,53	4,78	4,63	5,15	4,81	1,73
✓	Maior média anual	20° N	5,52	5,90	5,07	4,83	4,26	4,10	4,01	4,73	4,52	4,83	4,71	5,27	4,81	1,89
✓	Maior mínimo mensal	33° N	4,99	5,49	4,94	4,94	4,53	4,45	4,30	4,93	4,48	4,57	4,32	4,73	4,72	1,19

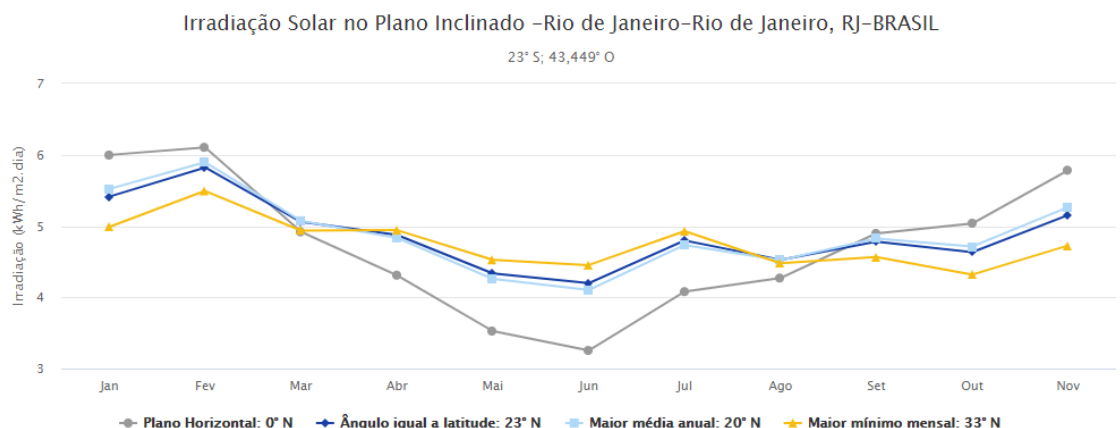


Figura 9: Medição das coordenadas -23.025734, -43.458332

Fonte: CRESESB

Mediante esta avaliação, fica constatado o índice de recurso solar disponível para instalação de sistema fotovoltaico, visto que durante aproximadamente 5 horas por dia, a irradiância (W/m^2) incidente sobre o local, é superior a $1.000W/m^2$, que é o que caracteriza o índice HSP (Horas de Sol Pleno, ou Sol Pico).

6.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ESTIMADA IDEAL

Levando em consideração que ao longo de 1km de ciclovias implementada, os recursos solares disponíveis se permanecem inalterados em condições ideais, sem levar ainda em consideração as perdas principalmente por sombreamento parcial e transitório, devido ao fluxo de ciclistas e pedestres atravessando. Será tomado como premissa um único valor de irradiância por metro quadrado local, e os valores calculados serão validados por extrapolação para toda extensão da ciclovias solar.

Nas estimativas de produção de energia elétrica, torna-se útil considerar a totalidade da energia elétrica convertida em intervalos horários.

Observando a equação 1, é possível visualizar a maneira de se chegar a quantidade de horas de sol pleno disponível por dia, já informada na imagem anterior:

$$HSP = \frac{4,62 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]}{1 \left[\frac{kW}{m^2} \right]} 5,02 \left[\frac{h}{dia} \right] \quad (1)$$

De forma simples podemos equacionar a estimativa de geração de energia elétrica por metro quadrado no local da ciclovias solar. A equação 2 abaixo, demonstra isto:

$$ED = ES \times AP \times nP \times TD \quad (2)$$

Onde, ED representa a energia produzida pelo sistema, ES representa a energia solar recebida por dia na superfície da ciclovias solar, AP é a área estudada, nP a eficiência do material celular disposto em cada metro quadrado e TD a taxa de desempenho deste sistema, que por hora estaremos considerando ideal, ou seja, sem perdas. Dito isto, obteremos como resultado as informações da equação 3:

$$ED = 5,02 \times \left(\frac{21,3}{100} \right) = \frac{1,07kWh}{dia} / m^2 \quad (3)$$

Para cada metro quadrado de ciclovia solar, será possível uma geração diária estimada de 1,07kWh. Levando em consideração que a ciclovia terá a largura de 2,5 metros, que é a mínima exigida para fluxos bidirecionais, e aproximadamente 2,26 metros de largura de módulos solares, pode-se equacionar por extrapolação, e estimar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica para toda extensão da ciclovia, como mostrado na equação 4 abaixo:

$$ED = 5,02 \times (2,26m \times 1.000m) \times \left(\frac{21,3}{100} \right) = 2.416,52kWh/dia \quad (4)$$

Considerando a geração ideal, toda extensão da ciclovia, deve ser capaz de gerar aproximadamente 2,4MWh/dia de energia solar fotovoltaica.

6.4 GERAÇÃO DE ENERGIA ESTIMADA REAL

A análise estimada de geração de energia ideal e real se fazem necessárias, para que haja pleno entendimento das condições de implementação do projeto, conhecendo de forma mais precisa possível os rendimentos e perdas envolvidas que precisam ser consideradas.

Para o cálculo da estimativa de energia real a ser gerada, devem ser considerados uma série de coeficientes de perdas e índices de rendimento, que variam de acordo com o projeto.

6.4.1 Perdas energéticas consideradas

Para o projeto em questão, se fazem necessárias as considerações de algumas perdas no sistema, devido as condições do local, tanto climática, quanto em relação a circulação de pessoas por exemplo. A Tabela 1 - Coeficientes energéticos a seguir, mostra as perdas relacionadas e o devido impacto de cada uma delas. Lembrando que alguns valores são adimensionais, outros são fixados de acordo com o conhecimento do local, e ainda alguns variam de acordo com sua sazonalidade.

Tabela 1 - Coeficientes energéticos

COEFICIENTES DE PERDAS ENERGÉTICAS			
Coeficiente de Perda	Descrição	Valor (%)	Equação dos valores
Sombreamento	Possibilidade de pássaros, folhas e trânsito constante de pessoas	2	$100\% - 2\% = 98\% > 0,98$
Sujeira	Possibilidade de areia, lama em dias de chuvosos e acúmulo de fuligem e fezes de pássaros entre os períodos de limpeza	5	$100\% - 5\% = 95\% > 0,95$
Mismatch	Incompatibilidade elétrica entre módulos	2	$100\% - 2\% = 98\% > 0,98$
Temperatura	A potência dos módulos reduz com o aumento da temperatura de operação	x	$100\% - (x)\% = (X)\% > x$
Cabeamento CC	Perdas por efeito Joule nos cabos	1	$100\% - 1\% = 99\% > 0,99$
Relação de transformação CC/CA	Perdas pelo fato da eficiência do inversor ser menor que 100%	4	$100\% - 4\% = 96\% > 0,96$
Cabeamento CA	Perdas por efeito Joule nos cabos	1	$100\% - 1\% = 99\% > 0,99$

O coeficiente de perda por fator de temperatura, é calculado de forma separada pelo fato de ser um valor sazonal, que para melhor estima-lo ao longo do ano, será calculado mês a mês.

Antes de prosseguir para detalhar a energia real gerada pela ciclovias solar, é necessário determinar a potência-pico instalada, que será mostrada no subcapítulo posterior a este.

6.4.2 Potência-pico instalada da ciclovias

Para definir a potência instalada necessária neste caso onde não há detalhamento por histórico de consumo, deve-se levar em consideração a área total do empreendimento, de maneira que seja atendida em sua totalidade. A equação 5 abaixo relaciona isto:

$$P_{peak} = \frac{A_t}{A_{mod}} \times P_{mod} > \left(\frac{2.260m^2}{2,584m^2} \right) \times 550W$$

$$P_{peak} = 875,9 (\sim 876) \times 0,550 = 481,8kWp \quad (5)$$

Onde A_t corresponde a área total da ciclovía, e A_{mod} a área total do módulo, e ainda P_{mod} corresponde a potência-pico de cada módulo do projeto. De posse da informação que mostra a potência instalada de módulos necessária ao projeto, é possível calcular a geração de energia real estimada.

6.4.3 Coeficientes de perda por fator de temperatura

A Figura 10 abaixo, mostra o mapa das normais climatológicas exibindo valores de temperatura máxima para o mês de janeiro em todo Brasil, através desta informação que se baseia todo cálculo de rendimento do sistema pelo fator de temperatura, que é um dos índices de maior influência em sistemas solares fotovoltaicos.

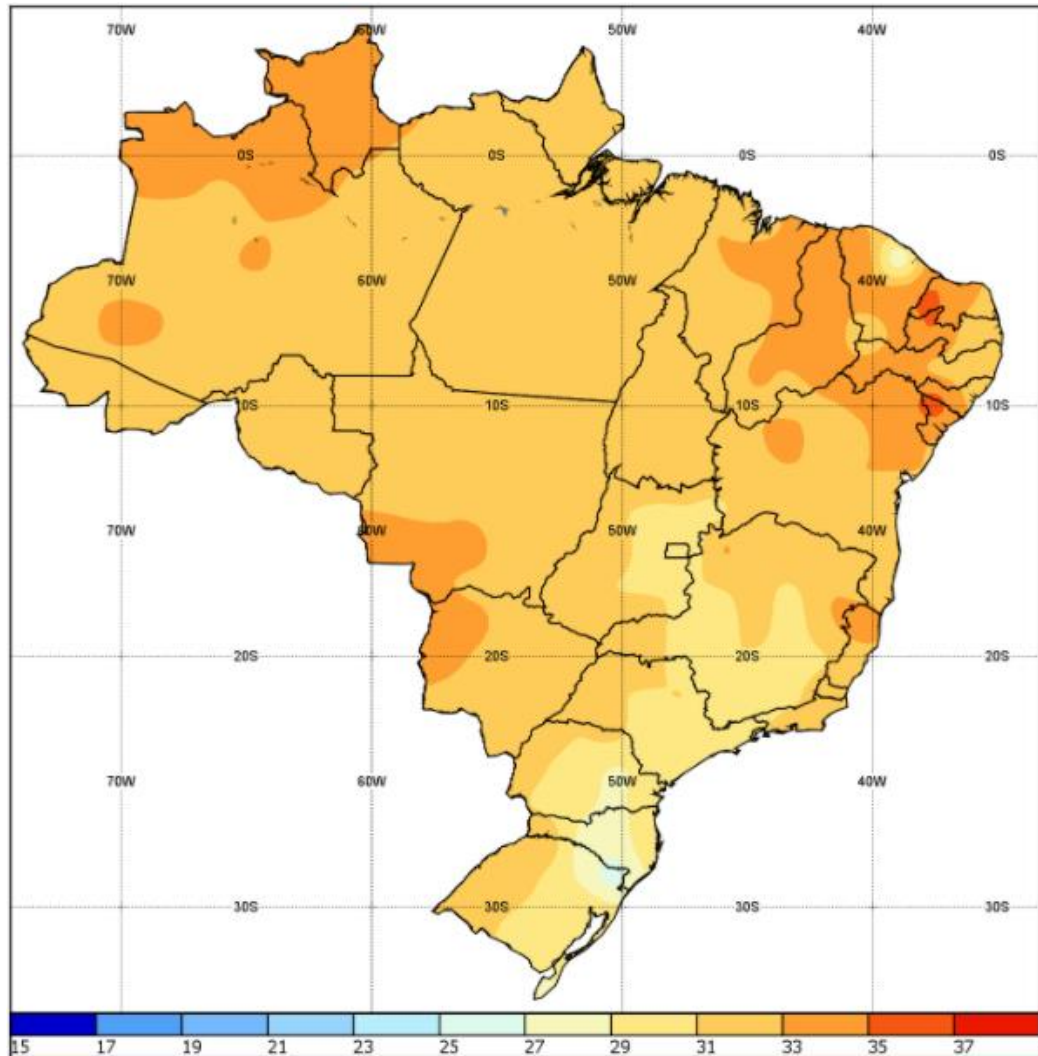


Figura 10: Normais climatológicas – temperaturas máximas de janeiro
Fonte: INMET

Seguem relacionados nas equações 6 e 7, e na tabela 2, valores das temperaturas de cálculo que serão utilizadas para estimar os coeficientes de temperatura usados na equação do fator de desempenho global do sistema.

$$T_{calc} = T_{amb} + (\Delta t - T_{ref}) \quad (6)$$

Onde Δt corresponde a diferença de temperatura da célula fotovoltaica e o ambiente, e T_{ref} representa a temperatura referência para testes em STC, que é igual a 25°C.

De posse destas informações, utilizamos o coeficiente de temperatura para potência máxima, informada na folha de dados do fabricante do módulo, para calcular as perdas por temperatura do sistema solar mês a mês, conforma a equação 7 abaixo:

$$Crend = {}^{\circ}C_{wp} \times T_{calc} \quad (7)$$

Em que $Crend$ é o coeficiente de rendimento por fator de temperatura, e ${}^{\circ}C_{wp}$ é o coeficiente de temperatura em máxima potência informado pelo fabricante. Abaixo na Tabela 2 seguem os valores de temperatura corrigidos para cálculo:

Tabela 2 - Valores corrigidos de temperatura

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
37	37	37	35	33	31	31	33	33	35	37	37

Fazendo uso da equação (7), é possível obter os seguintes resultados exibidos na Tabela 3 - Coeficientes de rendimento por fator de temperatura logo em seguida:

Tabela 3 - Coeficientes de rendimento por fator de temperatura

COEFICIENTES DE RENDIMENTO POR FATOR DE TEMPERATURA			
MÊS	Valor do $Crend$	Valor equacionado	Valor em decimal
Janeiro	-12,95%	100% - 12,95% = 87,05%	0,8705
Fevereiro	-12,95%	100% - 12,95% = 87,05%	0,8705
Março	-12,95%	100% - 12,95% = 87,05%	0,8705
Abril	-12,25%	100% - 12,25% = 87,75%	0,8775
Maio	-11,55%	100% - 11,55% = 88,45%	0,8845
Junho	-10,85%	100% - 10,85% = 89,15%	0,8915
Julho	-10,85%	100% - 10,85% = 89,15%	0,8915
Agosto	-11,55%	100% - 11,55% = 88,45%	0,8845
Setembro	-11,55%	100% - 11,55% = 88,45%	0,8845
Outubro	-12,25%	100% - 12,25% = 87,75%	0,8775
Novembro	-12,95%	100% - 12,95% = 87,05%	0,8705
Dezembro	-12,95%	100% - 12,95% = 87,05%	0,8705

Tendo conhecimento de todos os coeficientes de rendimento ou de perdas relacionados ao projeto, pode ser calculado o fator de desempenho global do sistema através do produto de todos eles, e posteriormente a energia real a ser produzida através da equação 8 exibida logo abaixo. A Tabela 4 - Desempenho mensal e a Tabela 5 - Geração média real mostram tais resultados:

$$E_{real} = P_{peak} \times HSP \times Fdg \quad (8)$$

Tabela 4 - Desempenho mensal

MÊS	Desempenho Global (%)
Janeiro	74,73%
Fevereiro	74,73%
Março	74,73%
Abril	75,33%
Maio	75,93%
Junho	76,53%
Julho	76,53%
Agosto	75,93%
Setembro	75,93%
Outubro	75,33%
Novembro	74,73%
Dezembro	74,73%

Conforme pode ser notado, os meses mais frios de inverno, apresentam melhor rendimento global, devido ao grande impacto que a temperatura tem sobre o sistema. Abaixo, pode ser verificado o resumo de geração média real mês a mês.

Tabela 5 - Geração média real

MÊS	kWh/mês	MWh/mês
Janeiro	64807,53	64,81
Fevereiro	65995,67	66,00
Março	53142,17	53,14
Abril	46927,76	46,93
Maio	38741,64	38,74
Junho	35950,93	35,95
Julho	36061,55	36,06
Agosto	44777,87	44,78
Setembro	46863,11	46,86
Outubro	53351,75	53,35
Novembro	54330,31	54,33
Dezembro	62431,25	62,43
Média anual	50281,79	50,28

A geração média mensal real deste sistema anualmente, é da ordem de grandeza de 50,28MWh/mês, e o total anual chega a 603,38MWh/ano de energia solar fotovoltaica produzida.

6.5 DIMENSIONAMENTO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para o projeto, foi definido parceria com alguns fabricantes de equipamentos que compõe um gerador fotovoltaico, estes estão listados a seguir:

- JA Solar (módulos fotovoltaicos)
- Ginlong SOLIS (inversores string)
- Clamper Solar (string box e proteções)
- Nexans (cabos cc)
- Staubli (Conectores MC4)

Estes equipamentos fazem parte do gerador, que compreende desde a etapa dos módulos até o inversor. Todos os materiais e equipamentos utilizados para infraestrutura e conexão do lado CA será discriminado em outra etapa, como por exemplo bloco pré-moldado de concreto, disjuntores, DPS, fusíveis, cabos, bandejamento, eletrodutos e outros.

A figura 11 mostra a lista de equipamentos que foram cotados para implementação do projeto, tal como a quantidade necessária prevista de cada um deles.

IMAGEM	PRODUTO(S)
	GERADOR SOLAR FV WIN - 481,80 KWP - SEM ESTRUTURA 876 x Modulo Fv 144 Celulas 550w Mono Jam72s30-550/MR Es3 4 x Inversor Solis Trifasico 75kw-5g - 9 Mppt - 380v - Solis-75k-5g 1 x Inversor Solis Trifasico 30kw - 3 Mppt - 380v - Solis-30k-5g Wifi 36 x String Box Clamper Solar Sb1000 1-2e/2s 3 x String Box Clamper Solar Sb1000 1-2e/2s 78 x Par Conector Mc4 M/F Staubli Pv-Kbt4/Kst4/6ii-Ur 78 x Cabo Nexans Energyflex Afitox 120 0,6/1kv 1x6mm2 - Vermelho - Rolo 50m 78 x Cabo Nexans Energyflex Afitox 120 0,6/1kv 1x6mm2 - Preto - Rolo 50m

Figura 11: Lista de equipamentos
Fonte: WIN Energias Renováveis

A relação de equipamentos exibida acima, é suficiente para atender ao projeto da ciclovia solar. No sub capítulo 6.6 onde será tratado sobre a viabilidade técnica do projeto, detalhes construtivos e de características elétricas e mecânicas de cada componente, será abordado com a devida atenção.

Para conhecimento, abaixo será ilustrado cada um dos componentes selecionados para composição do projeto. Na figura 12 pode ser observado o módulo fotovoltaico JA Solar de 550W de potência nominal, tecnologia das células mono PERC, Half-cell de 144 células.

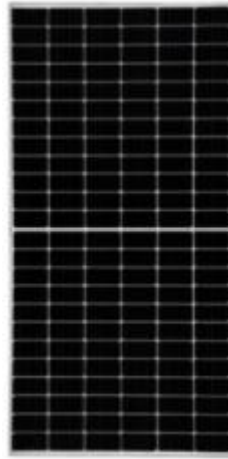


Figura 12: Módulo JA Solar 550W
Fonte: WIN Energias Renováveis

Em seguida, pode ser observado os inversores selecionados para o projeto, do fabricante Ginlong Solis, são eles os modelos 75K-5G e 30K-5G, possuem 75kW e 30kW de potência nominal, são dotados de tecnologia de comunicação via WiFi, trifásicos com tensão nominal de operação em 380V, com 2 entradas disponíveis em cada uma de suas MPPT's. As figuras 13 e 14 ilustram eles.



Figura 13: Inversor Solis 30kW-5G
Fonte: WIN Energias Renováveis



Figura 14: Inversor Solis 75kW-5G
Fonte: WIN Energias Renováveis

Será ilustrada na figura 15, a string box a ser utilizada no projeto com suas devidas proteções internas à caixa hermética. Está sendo considerada chave seccionadora de 4 polos, com tensão nominal de isolamento de 1200Vdc. DPS classe II de proteção, tensão de operação de 1040Vdc e nível de proteção de 5,0 kV. Neste caso, não se faz necessário o uso de fusíveis, a explicação será abordada no capítulo seguinte de viabilidade técnica.



Figura 15: Clamper Solar SB1000 1-2E/2S
Fonte: WIN Energias Renováveis

Os cabos solares ilustrados na figura 16, são do fabricante nexans, Cabo unipolar de potência Flexível, com condutor de cobre estanhado, isolamento em composto termofixo extrudado e cobertura em composto a base de copolímero termofixo resistente a altas temperaturas e resistência a UVB, para tensões de até 1 kV (1500 Vdc). Para tensão entre

condutores isolados, positivo e negativo, o cabo pode ficar submetido à tensão máxima de 1800 V em corrente contínua (1800 Vdc Máx).



Figura 16: Cabo solar Nexans 6mm²
Fonte: WIN Energias Renováveis

Por último, na figura 17 estão os conectores MC4 que são utilizados para as conexões entre as strings e os módulos, e também entre as string box e os inversores. Possui capacidade de conduzir corrente de até 39^a para bitolas de 6mm², e opera com tensões nominais de até 1500Vdc.



Figura 17: Conectores MC4 Staubli
Fonte: WIN Energias Renováveis

Tendo definido a parte CC dos componentes, que de fato compõe o gerador fotovoltaico, listaremos o restante dos equipamentos, componentes e materiais previstos para o projeto:

- Bloco de concreto armado pré-moldado
- Cabos CA (16mm², 25mm² e 70mm²)
- Disjuntores e miscelâneas

6.6 VIABILIDADE TÉCNICA

Afim de garantia a viabilidade técnica do projeto, neste capítulo será descrito uma espécie de memória de cálculo mostrando cada um dos arranjos e interconexões elétricas e mecânicas dos equipamentos. Para iniciar, será descrito cada uma das validações necessárias para que a instalação esteja dentro das normas exigidas, e dentro dos limites operacionais de cada componente do sistema FV.

Para validar a utilização dos módulos fotovoltaicos com os inversores selecionados, uma série de premissas precisam ser seguidas, e abaixo será listada em forma de equação, as lógicas a serem aplicadas. Antes será exibido o layout pré-definido na Tabela 6:

Tabela 6 - Resumo de layout da instalação

RESUMO DO LAYOUT				
Qtde	Inversor	Strings	Módulos por Inversor	CC/CA
4	75kW-5G	14x11 4x12	202	148%
1	30kW-5G	4x11 2x12	68	125%

Para os inversores de 75kW de potência nominal, serão destinados 202 módulos de 550W em cada um deles, totalizando uma potência de 111,10kWp e 48% de oversizing. Já no inversor de 30kW de potência nominal, será destinado 68 módulos igualmente de 550W, totalizando uma potência de 37,4kWp e 25% de oversizing.

Os inversores de 75kW possuem 9 entradas MPPTs duplas, que totalizam 18 entradas DC no equipamento, que serão divididas conforme exibido na tabela, 14 strings de 11 módulos, mais 4 strings de 12 módulos para cada um dos inversores. O inversor de 30kW possui 3 entradas MPPTs duplas, que totalizam 6 entradas DC no equipamento, os módulos serão divididos em 4 strings de 11 módulos, mais 2 strings de 12 módulos.

A tabela 7 mostra a relação e validação das grandezas elétricas dos módulos e inversores, afim de comprovar a possibilidade de instalação dos arranjos definidos.

Tabela 7 - Validação das grandezas elétricas

VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS					
Grandeza		Valor	String (Inversor 75kW)	String (inversor 30kW)	Status
MÓDULO	Isc	14A	Tensão da String: 14x11 = 548,9Vdc 4x12 = 598,8Vdc	Tensão da String: 4x11 = 548,9Vdc 2x12 = 598,8Vdc	VALIDADO
	Imp	13,1A			
	Voc	49,9V			
	Vmp	41,9V	Corrente da String: 14x11 = 14A 4x12 = 14A	Corrente da String: 4x11 = 14A 2x12 = 14A	VALIDADO
INVERSOR	Pmáx	126kW 45kW			
	Vmáx	1100V 1000V			
	Imáx	15A(30)	Corrente da MPPT: 7x11 = 28A 2x12 = 28A	Corrente da MPPT: 2x11 = 28A 1x12 = 28A	VALIDADO
	Imáxlsc	20A(40)			

6.6.1 Resumo técnico e premissas da instalação elétrica

Para o desenvolvimento do projeto, serão consideradas as seguintes premissas técnicas descritas abaixo:

- Potência do sistema fotovoltaico: 481,8kWp, divididos em 5 seções a saber:
 - Gerador 1: 111,10kWp, sendo 11+11 (nas primeiras 7 MPPT's) e 12+12 (nas 2 últimas MPPT's). Total: 202 módulos.
 - Gerador 2: 111,10kWp, sendo 11+11 (nas primeiras 7 MPPT's) e 12+12 (nas 2 últimas MPPT's). Total: 202 módulos.
 - Gerador 3: 111,10kWp, sendo 11+11 (nas primeiras 7 MPPT's) e 12+12 (nas 2 últimas MPPT's). Total: 202 módulos.
 - Gerador 4: 111,10kWp, sendo 11+11 (nas primeiras 7 MPPT's) e 12+12 (nas 2 últimas MPPT's). Total: 202 módulos.
 - Gerador 5: 37,4kWp, sendo 11+11 (nas primeiras 2 MPPT's) e 12+12 (na última MPPT). Total: 68 módulos.
- Tipo de sistema: On-grid (grid-tie) / conectado à rede.
- 36 String box CC, 9 para cada inversor de 75kW, com 1-2 entradas e 2 saídas CC, para cada uma das MPPT's, e ainda mais 3 string box do mesmo modelo e

característica para o inversor de 30kW.

- Tipo de onda no gerador (em cada string):
 - Gerador 1:
 - Seção a da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção b da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Gerador 2:
 - Seção a da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção b da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Gerador 3:
 - Seção a da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção b da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Gerador 4:
 - Seção a da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção b da MPPT de 1 a 7: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 8 e 9: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Gerador 5:
 - Seção a da MPPT 1 e 2: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção b da MPPT 1 e 2: 461,56V_{cc} / 13,11A
 - Seção a da MPPT 3: 503,52V_{cc} / 13,11A
 - Seção b da MPPT 3: 503,52V_{cc} / 13,11^a
- Tipo de onda na saída: 380V, corrente alternada, 60Hz, trifásico.
- Considera-se instalação de sistema de aquisição de dados e monitoramento do SFV.
- Considera-se instalação de dispositivos de proteção contra surtos eletromagnéticos, tais como DPS e sistema de aterramento dos módulos e estruturas.

- String box e inversores instalados em sala técnica de alvenaria.
- Cabeamento apto para instalações fotovoltaicas com o seguinte código de cores:
 - Positivo: vermelho
 - Negativo: preto
 - Fases: R – Vermelho, S – Preto, T – Marrom.
 - Neutro: Azul
 - Terra (PE): Verde/Amarelo

6.6.2 Resumo técnico e premissas da instalação civil

Os blocos pré-moldados devem comportar um conjunto de 6 módulos, portanto possuem aproximadamente 12m² cada um. Conforme ilustra a figura 18:



Figura 18 - Bloco pré-moldado para módulos FV, Frankrijk.
Fonte: SolaRoad Frankrijk

- Quantidade de blocos necessários: 146

6.7 VIABILIDADE FINANCEIRA

O projeto em questão conta com uma análise financeira detalhada, para que haja entendimento de que a viabilidade técnica acompanha a viabilidade financeira, e que todo custo necessário para execução tenha retorno atraente e plausível. Na figura 19 pode ser encontrada a relação de todos os itens do orçamento para este projeto:

ORÇAMENTO					% Venda	% Custo
Item	Descrição	Quantidade	Valor Unidade	Valor Total		
1	KIT GERADOR SOLAR 481,8kWp	1	R\$ 861.304,79	R\$ 861.304,79	40,432%	53,910%
2	BLOCO PRÉ MOLDADO 4Mx3M	146	R\$ 2.403,00	R\$ 350.838,00	16,469%	21,959%
3	MATERIAL CA	1	R\$ 73.000,00	R\$ 73.000,00	3,427%	4,569%
4	MÃO DE OBRA	1	R\$ 108.405,00	R\$ 108.405,00	5,089%	6,785%
5	PROJETO	1	R\$ 40.000,00	R\$ 40.000,00	1,878%	2,504%
6	HOMOLOGAÇÃO E DOCS	1	R\$ 4.500,00	R\$ 4.500,00	0,211%	0,282%
7	ALIMENTAÇÃO	1	R\$ 16.200,00	R\$ 16.200,00	0,760%	1,014%
8	HOSPEDAGEM	1	R\$ 50.400,00	R\$ 50.400,00	2,366%	3,155%
9	TRANSPORTE	1	R\$ 13.500,00	R\$ 13.500,00	17,731%	0,845%
10	LOCAÇÃO DE MUNCK	1	R\$ 27.000,00	R\$ 27.000,00	63,373%	1,690%
11	LOCAÇÃO DE ESCAVADEIRA	1	R\$ 6.000,00	R\$ 6.000,00	1,657%	0,376%
12	NÃO-PREVISTOS	3,0%	R\$ 46.534,43	R\$ 46.534,43	2,184%	2,913%
Total Custo				R\$ 1.597.682,22	75,000%	
Total Venda				R\$ 2.130.242,96		
IMPOSTOS			6,00%	R\$ 76.136,29	3,574%	
OVERHEAD			2,00%	R\$ 42.604,86	2,000%	
MARGEM			17,00%	R\$ 362.141,30	17,000%	
MARK UP			75,00%			
Custo de Conexão - Concessionária				R\$ -		
Soma Total de Custos - Cliente				R\$ 2.130.242,96		

Figura 19 - Tabela de orçamento

Fonte: Autor

O orçamento para execução do projeto e investimento inicial, possui o valor global de R\$2.130.242,96 (Dois milhões, centro e trinta mil, duzentos e quarenta e dois reais e noventa e seis centavos). A seguir, será mostradas etapas que validam financeiramente a execução do mesmo.

6.7.1 Detalhamento financeiro resumido

Na Tabela 8, é apresentada as premissas operacionais do projeto, que dizem respeito ao custo operacional de manutenção do trajeto da ciclovia, a degradação anual dos módulos fixados a superfície, o custo em reais de cada quilowatt-pico instalado, e o custo de obras e adequações para a conexão à rede elétrica da distribuidora local.

Tabela 8 - Premissas operacionais

PREMISSAS OPERACIONAIS	Custo Operacional Anual (R\$)	Degradação do Painel (%)	R\$/kWp	Custo de Conexão (R\$)
	R\$ 20.000,00	0,80%	R\$ 4.421,43	R\$ 85.000,00

Na Tabela 9 é apresentada as premissas energéticas do projeto, que dizem respeito ao limite de consumo monetário que a planta solar fotovoltaica instalada na ciclovia é capaz de compensar mensalmente. De igual maneira, é mostrado valores atuais referentes ao primeiro ano de funcionamento para tarifa energética e demanda contratada.

Tabela 9 - Premissas da conta de energia

PREMISSAS DA CONTA DE ENERGIA	Consumo Médio Mensal Total (kWh)	Valor Médio Mensal Pago na Conta de Energia (R\$)	Consumo Médio Mensal (kWh)	Tarifa Energética (R\$/kWh)
	23.000,00	R\$ 52.790,00	18.000,00	0,6900
	Consumo Médio Mensal Hora Ponta (kWh)	Tarifa Energética Hora Ponta (R\$/kWh)	Valor da Demanda Contratada (R\$/kW)	Demanda Contratada SEM UFV (kW)
	5.000,00	3,16000	R\$ 37,80	650
	Demanda Contratada SEM UFV (R\$)	Demanda Contratada COM UFV (kW)	Demanda Contratada COM UFV (R\$)	
	R\$ 24.570,00	490	R\$ 18.522,00	

Na Tabela 10 é mostrada algumas outras premissas de projeto, relacionadas ao valor total do investimento, potência em quilowatt-hora que a planta é capaz de gerar, capacidade de módulos instalada, e a inflação energética ajustada anualmente a partir de base histórica para os próximos anos.

Tabela 10 - Premissas de projeto

PREMISSAS DO PROJETO	Investimento (R\$)	Potência do Sistema (kWp)	Energia Gerada Mensal (kWh)	Inflação Energética (%)
	R\$ 2.130.242,96	481,80	50.281,79	10,00%

Na Figura 20 é mostrado um quadro com resumo financeiro do projeto, onde pode ser encontrado informações sobre a TIR, VPL e tempo de payback descontado do projeto.

OPÇÃO DE FINANCIAMENTO		TIR	TMA	VPL
-		28,16%	4,50%	R\$ 17.261.727,54
TEMPO DE PAYBACK DESCONTADO 5,05 ANOS				ECONOMIA GERADA ATÉ O ANO 25
				R\$ 40.441.884,39
				GASTOS AO LONGO DO PROJETO
				R\$ 2.715.242,96
				RESULTADO NOMINAL
				R\$ 37.726.641,43
ANO	CONTA DE ENERGIA MENSAL SEM UFV	CONTA DE ENERGIA MENSAL COM UFV	PORCENTAGEM DE ECONOMIA	CRÉDITOS INJETADOS NA REDE (KWH)
2022	R\$ 52.790,00	R\$ 18.522,00	64,91%	387.381,48

Figura 20 - Dashboard de resumo financeiro
Fonte: Autor

O retorno do investimento, ocorrerá próximo à metade do quarto ano de funcionamento da planta. Segue detalhamento das informações apresentadas:

- TIR de 28,16%: Taxa Interna de Retorno que avalia qual o percentual de retorno de um projeto para a empresa. Geralmente ela é comparada à Taxa Mínima de Atratividade para que se decida se o projeto deve ou não ser aceito:
 - Se a TIR de um projeto for maior que a sua TMA, significa que este projeto em questão é viável;

- Se a TIR de um projeto for menor que a sua TMA, significa que este projeto em questão não é viável;
 - Se a TIR de um projeto for igual a sua TMA, significa que este projeto em questão será definido viável ou não apenas por seus investidores, já que, por ser um valor igual, não há retorno algum - nem positivo nem negativo;
- TMA de 4,50%: Taxa Mínima de Atratividade, ou seja, uma taxa de juros que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento. Esse valor é usado para ser comparado com a TIR, justamente para que o investidor alinhe de forma concreta suas expectativas com os reais resultados do projeto;
- VPL de R\$17.261.727,54: Valor Presente Líquido, que consiste em trazer para o presente todos os fluxos de caixa do investimento. Sendo que este valor é a representação concreta, em valores monetários atuais, dos pagamentos de um projeto de investimento. Então, a partir dele, pode ser feita a diferença entre recebimentos e pagamentos em valores monetários atuais.
- ECONOMIA GERADA ATÉ O ANO 25 de R\$40.441.884,39: Valor da economia financeira gerada até o ano médio de garantia de rendimento da planta solar fotovoltaica, sem descontar o valor inicial do investimento e custos de manutenção e operação.
- GASTO AO LONGO DO PROJETO de R\$2.715.242,96: Valor do investimento inicial do projeto somados aos custos de operação da planta.
- RESULTADO NOMINAL de R\$37.726.641,43: Economia líquida gerada após 25 anos de funcionamento da planta.
- CONTA DE ENERGIA MENSAL SEM UFV de R\$52.790,00: Conta de energia em valor monetário do primeiro ano imediato sem a instalação do sistema solar fotovoltaico na ciclovía que não seria convertido em consumo evitado.
- CONTA DE ENERGIA MENSAL COM UFV de R\$18.522,00: Conta de energia em valor monetário do primeiro ano imediato com a instalação do sistema solar fotovoltaico na ciclovía.
- PORCENTAGEM ECONOMIZADA DA CONTA DE ENERGIA de 64,91%: Valor em % de economia no primeiro ano com a planta solar fotovoltaica

instalada na ciclovía.

- **TEMPO DE PAYBACK DESCONTADO:** Tempo em anos em que se dá o retorno do investimento realizado.

Os gráficos na Figura 21 mostram de forma didática a economia gerada ao longo dos anos, o tempo de retorno do investimento e uma comparação de investimentos que será detalhada posteriormente.

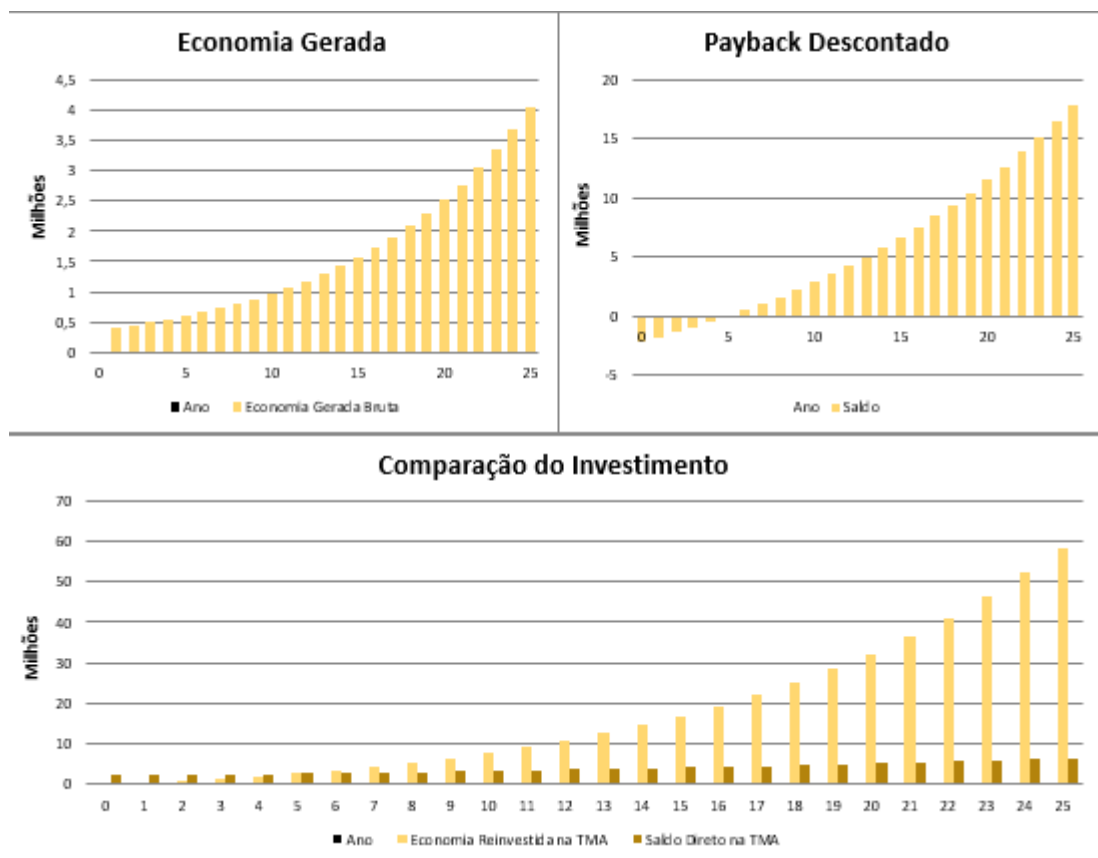


Figura 21 (a) economia gerada, (b) payback descontado e (c) comparação do investimento
Fonte: Autor

No gráfico de comparação do investimento, são calculados os resultados de dois tipos de investimento: o primeiro é referente à aplicação diretamente na TMA (considerando a TMA como a aplicação de baixo risco para investir) e o segundo diz respeito ao valor da economia gerada, em reais, com o sistema solar fotovoltaico, sendo que esse valor economizado será anualmente reinvestido na TMA. Sendo assim, é apresentada a seguinte tabela detalhada:

TAXAS DE JUROS DE CADA INVESTIMENTO				COMPARAÇÃO DOS INVESTIMENTOS – RENTABILIDADE	
IPCA+2045	Poupança	SELIC	UFV	Reinvestindo Economia Líquida na TMA	Investindo Diretamente na TMA
8,40%	3,15%	4,50%	28,16%	R\$ 47.945.537,99	R\$ 3.631.253,25

REINVESTINDO ECONOMIA LÍQUIDA NA TMA				INVESTINDO DIRETAMENTE NA TMA		
Ano	Fluxo de Caixa	Juros	Saldo	Ano	Juros	Saldo
0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	0	R\$ -	R\$ 2.130.242,36
1	R\$ 411.216,00	R\$ 18.504,72	R\$ 411.216,00	1	R\$ 95.860,93	R\$ 2.226.103,30
2	R\$ 452.337,60	R\$ 33.632,62	R\$ 882.058,32	2	R\$ 100.174,68	R\$ 2.326.278,57
3	R\$ 497.571,36	R\$ 63.869,50	R\$ 1.419.322,30	3	R\$ 104.682,54	R\$ 2.430.961,11
4	R\$ 547.328,50	R\$ 91.373,41	R\$ 2.030.520,30	4	R\$ 109.333,25	R\$ 2.540.354,36
5	R\$ 602.061,35	R\$ 122.577,98	R\$ 2.723.955,06	5	R\$ 114.315,35	R\$ 2.654.670,31
6	R\$ 662.267,48	R\$ 157.896,02	R\$ 3.508.800,52	6	R\$ 119.460,16	R\$ 2.774.130,47
7	R\$ 728.494,23	R\$ 197.783,58	R\$ 4.395.190,77	7	R\$ 124.835,87	R\$ 2.898.966,34
8	R\$ 801.343,65	R\$ 242.744,31	R\$ 5.334.318,01	8	R\$ 130.453,49	R\$ 3.029.419,83
9	R\$ 881.478,02	R\$ 293.334,32	R\$ 6.518.540,34	9	R\$ 136.323,89	R\$ 3.165.743,72
10	R\$ 969.625,82	R\$ 350.167,52	R\$ 7.781.500,47	10	R\$ 142.458,47	R\$ 3.308.202,19
11	R\$ 1.066.588,40	R\$ 413.321,54	R\$ 9.198.256,39	11	R\$ 148.869,10	R\$ 3.457.071,28
12	R\$ 1.173.247,24	R\$ 485.344,13	R\$ 10.785.425,17	12	R\$ 155.568,21	R\$ 3.612.639,49
13	R\$ 1.290.571,96	R\$ 565.260,36	R\$ 12.561.341,26	13	R\$ 162.568,78	R\$ 3.775.208,27
14	R\$ 1.419.629,16	R\$ 654.580,39	R\$ 14.546.230,78	14	R\$ 169.884,37	R\$ 3.945.092,64
15	R\$ 1.561.592,08	R\$ 754.308,15	R\$ 16.762.403,24	15	R\$ 177.529,17	R\$ 4.122.621,81
16	R\$ 1.717.751,28	R\$ 865.550,82	R\$ 19.234.462,67	16	R\$ 185.517,98	R\$ 4.308.139,79
17	R\$ 1.889.526,41	R\$ 989.529,30	R\$ 21.389.539,30	17	R\$ 193.866,29	R\$ 4.502.006,08
18	R\$ 2.078.479,05	R\$ 1.127.589,67	R\$ 25.057.548,25	18	R\$ 202.590,27	R\$ 4.704.596,36
19	R\$ 2.286.326,96	R\$ 1.281.215,92	R\$ 28.471.464,88	19	R\$ 211.706,84	R\$ 4.916.303,19
20	R\$ 2.514.959,65	R\$ 1.452.043,82	R\$ 32.267.640,45	20	R\$ 221.233,64	R\$ 5.137.536,83
21	R\$ 2.766.455,62	R\$ 1.641.876,30	R\$ 36.486.139,89	21	R\$ 231.189,16	R\$ 5.368.725,39
22	R\$ 3.043.101,18	R\$ 1.852.700,28	R\$ 41.171.117,37	22	R\$ 241.592,67	R\$ 5.610.318,66
23	R\$ 3.347.411,30	R\$ 2.086.705,30	R\$ 46.371.228,95	23	R\$ 252.464,34	R\$ 5.862.783,00
24	R\$ 3.682.152,43	R\$ 2.346.303,30	R\$ 52.140.086,68	24	R\$ 263.825,24	R\$ 6.126.608,24
25	R\$ 4.050.367,67	R\$ -	R\$ 58.536.758,25	25	R\$ 275.697,37	R\$ 6.402.305,61

Figura 22 - Comparação de Investimento
Fonte: Autor

- **TAXA DE JUROS DE CADA INVESTIMENTO:** são exibidas as taxas de juros de cada investimentos, além da “UFV”, que representa a TIR do projeto.
- **COMPARAÇÃO DOS INVESTIMENTOS – RENTABILIDADE:** apresenta a rentabilidade líquida de cada um dos dois investimentos: “Reinvestindo Economia Líquida na TMA” e “Investindo Diretamente na TMA”. Dessa forma, quando o “Investimento Base”, for “SELIC” ou “IPCA+2045”, haverá alíquota de Imposto de Renda de 15% que será descontada automaticamente sobre a rentabilidade dos investimentos.
- **REINVESTINDO ECONOMIA LÍQUIDA NA TMA:** Esta parte calcula o saldo final, investindo na TMA toda a economia líquida obtida ao longo da vida útil do sistema solar fotovoltaico. É composta por quatro colunas:
 - Ano: corresponde ao período de 25 anos da durabilidade e expectativa de vida útil do sistema fotovoltaico;
 - Fluxo de caixa: reflete os valores da economia gerada pelo sistema solar fotovoltaico no ano em questão;
 - Juros: resultado da multiplicação do “Saldo” do ano referente pela taxa de juros da TMA;
 - Saldo: representa a soma do valor do “Fluxo de Caixa” do ano atual aos

valores do “Saldo” e dos “Juros” do ano anterior.

- INVESTINDO DIRETAMENTE NA TMA: Calcula o saldo final do investimento, o qual tem a expectativa de vida útil de 25 anos, aplicando o valor total do orçamento do projeto diretamente na TMA. É composta por três colunas:
 - Ano: corresponde ao período de 25 anos da durabilidade e expectativa de vida útil do sistema fotovoltaico;
 - Juros: resultado da multiplicação do “Saldo” do ano referente pela taxa de juros da TMA;
 - Saldo: reflete a soma dos valores do “Saldo” do ano anterior com o valor do “Juros” do ano em questão.

Com estas informações é possível analisar de forma concreta a diferença de rendimento do dinheiro se ele fosse aplicado diretamente na TMA ou Reinvestido sua Economia Líquida na TMA, que acontece quando se investe neste projeto da usina solar fotovoltaica aplicada a ciclovias. Sendo o maior valor o mais vantajoso para o investidor.

7 REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GEE

Uma das premissas para que este projeto se tornasse viável e implementável, baseava-se na redução de CO₂ e outros gases na atmosfera. Abaixo é demonstrado através de equação a quantidade de emissão de GEE evitada e reduzida com a aplicação do projeto em questão. Considerando a média anual de 2017 da Figura 23 extraída da tabela do MCTI, temos que:

Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)													Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)
2017	MÊS												ANO - 2017
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	0,0927
	0,0566	0,0536	0,0696	0,0815	0,0847	0,0676	0,0965	0,1312	0,1264	0,1366	0,1193	0,0892	

Figura 23 - Fator de Emissão de tCO₂
Fonte: MCTI (2018)

Quantidade de CO₂e = Fator médio Anual de Emissões de CO₂ x (Consumo evitado MWh Anual + Geração FV Anual em MWh).

$$CO_2 \text{ evitado} = Fma \times (Ce + Gfv) \quad (9)$$

Onde:

- Fma: Fator médio anual de emissões em kgCO₂/kWh
- Ce: Consumo evitado anual de energia elétrica em kWh
- Gfv: Geração fotovoltaica anual em kWh

Sendo assim, temos que para o primeiro ano de funcionamento da planta:

$$CO_2 \text{ evitado} = 0,0927 \times \left(\frac{276.000,00kWh}{ano} + \frac{603.381,48kWh}{ano} \right)$$

$$CO_2 \text{ evitado} = 0,0927 \times \frac{879.381,48kWh}{ano}$$

$$CO_2 \text{ evitado} = 81.518,66kgCO_2/ano$$

Para o primeiro ano de funcionamento da planta solar fotovoltaica aplica a ciclovía, estima-se evitar a emissão de 81,5tCO₂ (Oitenta e uma toneladas e quinhentos quilos de CO₂) na atmosfera. Com uma simples projeção, é possível estimar este resultado para os próximos 25 anos de expectativa de vida útil da planta. Lembrando que a energia elétrica gerada em cada ano através do Sol, é variável por conta da natureza da fonte, que é intermitente, sendo assim faz-se necessário o cálculo ano-a-ano para se obter o resultado esperado. Na tabela 11 é possível

visualizar este resultado:

Tabela 11 - Projeção da redução de GEE

ANO	Consumo Médio Anual Fora Ponta (kWh)	Consumo Médio Anual Hora Ponta (kWh)	Energia Gerada (kWh)	Fma	kgCO ₂ e
01	216000	60000	603381,48	0,0927	81518,66
02	216000	60000	598554,4282	0,0927	81071,20
03	216000	60000	593765,9927	0,0927	80627,31
04	216000	60000	589015,8648	0,0927	80186,97
05	216000	60000	584303,7379	0,0927	79750,16
06	216000	60000	579629,308	0,0927	79316,84
07	216000	60000	574992,2735	0,0927	78886,98
08	216000	60000	570392,3353	0,0927	78460,57
09	216000	60000	565829,1966	0,0927	78037,57
10	216000	60000	561302,5631	0,0927	77617,95
11	216000	60000	556812,1426	0,0927	77201,69
12	216000	60000	552357,6454	0,0927	76788,75
13	216000	60000	547938,7843	0,0927	76379,13
14	216000	60000	543555,274	0,0927	75972,77
15	216000	60000	539206,8318	0,0927	75569,67
16	216000	60000	534893,1771	0,0927	75169,80
17	216000	60000	530614,0317	0,0927	74773,12
18	216000	60000	526369,1195	0,0927	74379,62
19	216000	60000	522158,1665	0,0927	73989,26
20	216000	60000	517980,9012	0,0927	73602,03
21	216000	60000	513837,054	0,0927	73217,89
22	216000	60000	509726,3575	0,0927	72836,83
23	216000	60000	505648,5467	0,0927	72458,82
24	216000	60000	501603,3583	0,0927	72083,83
25	216000	60000	497590,5314	0,0927	71711,84
TOTAL ACUMULADO EM 25 ANOS DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE GEE:					1.911.609,26kgCO₂e
					1.911,61tCO₂e

É notável a expressiva redução de GEE ao longo dos anos com a implementação do projeto em questão. 1.911,61 toneladas de CO₂ evitadas na atmosfera, o que prova toda viabilidade deste empreendimento. Técnica, financeira, econômica e ambientalmente.

8 CONCLUSÃO

A diversificação da matriz energética no Brasil depende diretamente da utilização de fontes renováveis de energia, aplicadas dos mais diversos modos possíveis. A geração distribuída e descentralizada coopera para o alívio de cargas, e para a redução de custos de implantação e manutenção nas linhas de transmissão, o que faz com que se torne atraente e rentável o investimento em soluções sustentáveis na gestão e operação de energia a nível nacional.

Através do desenvolvimento de projetos em que se aplicam painéis solares fotovoltaicos em ciclovias urbanas, é possível demonstrar o potencial energético que pode ser obtido com a implantação dos módulos, devido a extensão territorial existente de ciclovias no país. Estar localizado próximo a linha do equador, região esta onde se concentra grande índice de radiação solar ao longo do ano, torna o território brasileiro um dos mais atraentes para investimentos fotovoltaicos, podendo gerar grandes quantidades de energia elétrica.

Devido a poucos incentivos do governo nos anos anteriores, e por barreiras técnicas e políticas, o mercado solar fotovoltaico começa a caminhar a passos largos somente recentemente. É possível verificar um significativo aumento na procura e interesse por parte dos indivíduos nos últimos anos, trazendo assim uma movimentação por parte de empresas privadas, instituições que representam os interesses do mesmo, porém poucas mudanças por parte de entidades competentes governamentais.

Acredita-se numa mudança significativa neste panorama para os próximos anos, tornando o mercado solar fotovoltaico o maior meio de diversificar a matriz energética do Brasil, sendo acessível a grandes e pequenos empreendimentos, cooperando desta forma para o setor energético, que por sinal é extremamente estratégico para o desenvolvimento social e econômico de uma nação.

Em conclusão, atrelar todas estas soluções à gestão do transporte ativo no país, torna ainda mais atraente e satisfatórios os resultados, visto que elimina grandes e caros investimentos em infraestrutura, por utilizar-se de um espaço já existente e destinado a finalidades de mesmo interesse. Somar a infraestrutura de transporte ativo com a geração de energia elétrica, e ainda associar uma infraestrutura de multisserviços, é promissor e inovador, grandes resultados são esperados com estas aplicações.

Existe ainda uma expectativa de se atrelar toda economia energética e financeira gerada, a uma aplicação política, em que os recursos evitados sejam obrigatoriamente destinados a melhorias nas cidades através de projetos do poder executivo, como por exemplo as secretarias

de saúde, educação, cultura, esporte e lazer, turismo, dentre outras.

Diversos modelos de negócio podem ser escolhidos para gerir este projeto. A capacidade instalada da planta, faz com que ele seja enquadrado e esteja apto para funcionar dentro do sistema de compensação de energia regido atualmente pela REN 482.

Espera-se que todo potencial de geração de energia elétrica aqui já demonstrado, sirva de ponto de partida para muitos outros projetos como este, que explora toda malha cicloviária disponível nos grandes centros urbanos de todos os estados do Brasil, juntando de forma inteligente a gestão pública de transporte ativo, o cuidado com o meio ambiente com as reduções de GEE, e a geração de energia elétrica através da fonte solar fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

BALFOUR, John. Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

BOREAL SOLAR. Energia Solar no Brasil. Disponível em: <<http://borealsolar.com.br/blog/2016/10/10/energia-solar-no-brasil/>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

CAMARGO, José; GRANDINETTI, Francisco; NOHARA, Evandro. Sistemas Fotovoltaicos: Conceitos, Inovações e Aplicações. São Paulo: Editora Universitária da Universidade de Taubaté, 2016.

CERQUEIRA, Wagner. Localização geográfica do Brasil. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/brasil/localizacao-geografica-brasil.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

FALCÃO, Djalma. Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica. Espaço IEEE, Rio de Janeiro, p. 148-149, set 2013.

GALDINO, Marco; PINHO, João. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 2. ed. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

TNO, innovation for life. The Solar Road. Disponível em: <<https://www.tno.nl/en/>>. Acesso em: 13 fev. 2021.

VILLALVA, Gradella Marcelo. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações de Sistemas Isolados e Conectados à Rede. 2. ed. São Paulo: Érica, 2017.

ZILLES, Roberto et al. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.