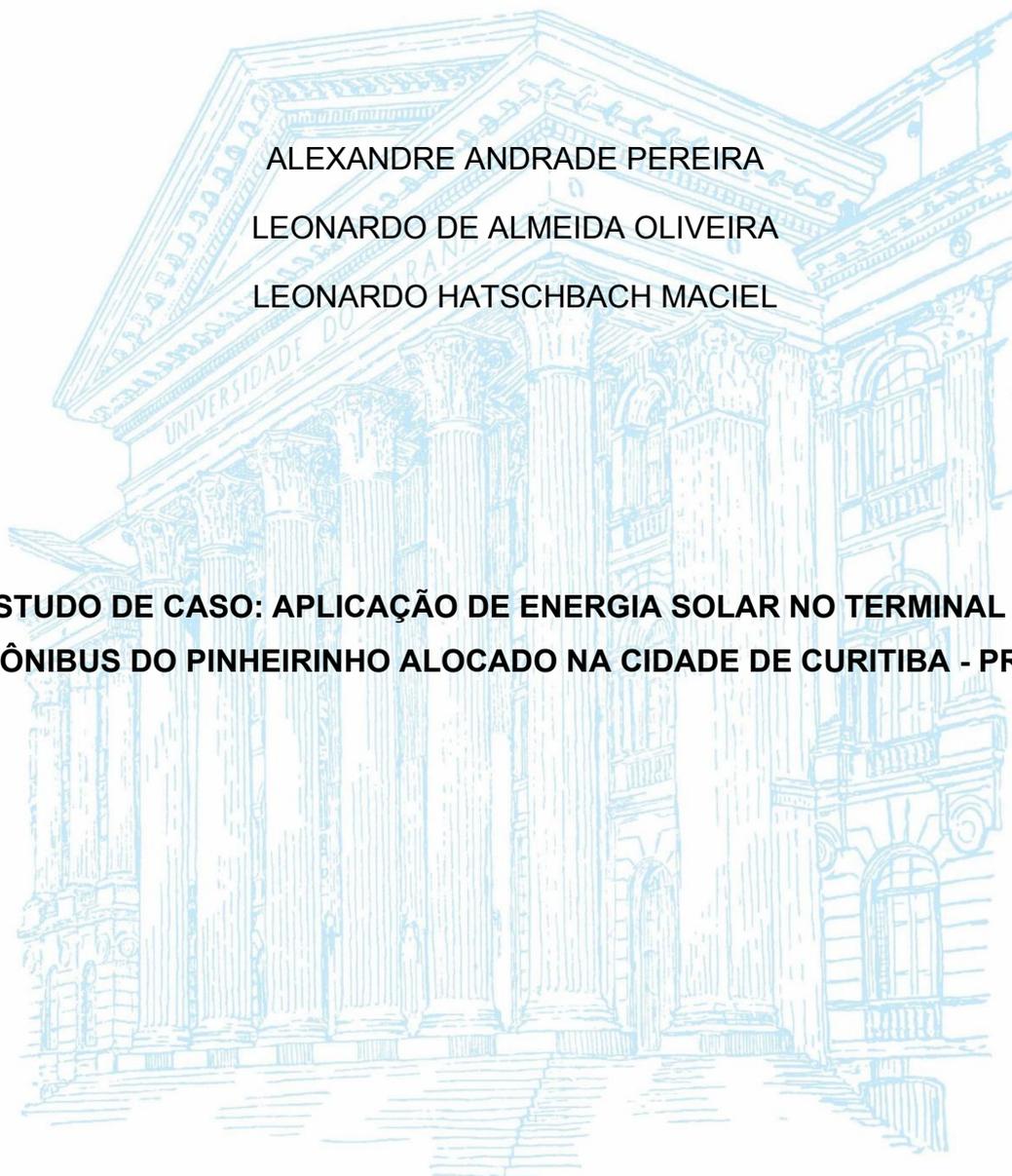


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE ANDRADE PEREIRA  
LEONARDO DE ALMEIDA OLIVEIRA  
LEONARDO HATSCHBACH MACIEL

**ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO TERMINAL DE  
ÔNIBUS DO PINHEIRINHO ALOCADO NA CIDADE DE CURITIBA - PR.**



CURITIBA

2019

ALEXANDRE ANDRADE PEREIRA  
LEONARDO DE ALMEIDA OLIVEIRA  
LEONARDO HATSCHBACH MACIEL

**ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO TERMINAL DE  
ÔNIBUS DO PINHEIRINHO ALOCADO NA CIDADE DE CURITIBA - PR.**

Projeto apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel.

CURITIBA

2019

## RESUMO

Este estudo foi baseado unicamente no terminal de ônibus do Pinheiro para podermos detalhar os métodos de cálculos e os resultados para um local em específico, mas a aplicação não seria restrita a este único ambiente público. Com a confirmação dos resultados positivos o projeto poderia se expandir a outras localidades com áreas ociosas. O estudo foi feito para a cidade de Curitiba, um local famoso por não possuir uma grande incidência solar ao longo do ano em comparação a outras localidades do Brasil. Este sistema ser implantado em regiões ainda mais promissoras geograficamente (informação que pode ser obtida nos atlas citados anteriormente) pode ser ainda mais viável do que o que foi apresentado neste trabalho. É possível atestar por meio do Memorial de Cálculo, o payback ocorre de maneira rápida dadas as proporções do empreendimento e se considerarmos uma vida útil de 25 anos, que é o padrão dos módulos fotovoltaicos e dos inversores, teremos uma economia de pelo menos R\$ 12.000.000,00 ao longo dos; isso sem considerar inflação energética e apontando uma eficiência média dos painéis de 80%, nesse período.

Palavras-chave: Energia Solar. Modelo de negócio. Energias Renováveis. Painéis fotovoltaicos. Energia renováveis em estações de ônibus.

## **ABSTRACT**

This study was based solely on the district bus terminal so that we can detail the calculation methods and the results for a specific location, but the application would not be restricted to this single public environment. With the confirmation of positive results, the project could expand to other locations with idle areas. The study was done for the city of Curitiba, a place famous for not having a large solar incidence throughout the year in comparison to other locations in Brazil. This system being implemented in even more promising regions geographically (information that can be obtained in the atlases mentioned above) can be even more viable than what was presented in this work. It is possible to attest through the Calculation Memorial, the payback occurs quickly given the proportions of the project and if we consider a useful life of 25 years, which is the standard of photovoltaic modules and inverters, we will have savings of at least R \$ 12,000,000.00 over the years; this without considering energy inflation and pointing to an average efficiency of the panels of 80%, in this period.

Keywords: Solar energy. Business model. Renewable energy. Photovoltaic panels. Renewable energy at bus stations.

## **Introdução**

O curso de especialização em Energias Renováveis e Eficiência Energética é rico em oportunidades profissionais na medida em que proporciona inúmeras perspectivas de aplicação dos conceitos energéticos. Sabendo que, hoje, estamos passando um por um período de ampliação de fontes da matriz energética global, as fontes renováveis vêm se posicionando de maneira cada vez mais estratégica, dado que as fontes fósseis são finitas e podem gerar impactos ambientais. Além do mais, a demanda energética é cada vez maior, o que incorre na busca por mais e mais fontes que possam saciar essa necessidade.

No tocante às energias renováveis, o Sol corresponde a maior e mais abundante fonte de Energia disponível liberando para o universo cerca de  $10^{22}$  TJ por ano, porém somente uma quantia infinitesimal dessa energia atinge nosso planeta atualmente. Ainda sim, essa quantidade de energia é 10.000 vezes maior do que a necessidade humana, o que incorre numa grande oportunidade de geração de energia usando por base a radiação solar.

Foi pensando nas possibilidades que a radiação solar pode nos trazer que decidimos focar o nossos esforços para com esse trabalho, num projeto que alie sustentabilidade, economia e eficiência energética. Sendo assim, propusemos uma solução de energia fotovoltaica a ser empregada em terminais de ônibus da cidade de Curitiba. A geração energética irá alimentar a demanda do terminal, e o excedente será injetado na rede de transmissão de energia elétrica, o que beneficiará a população próxima do Terminal do Pinheirinho.

## **Funcionamento de uma célula fotovoltaica**

O raio solar é transformado em eletricidade em uma célula fotovoltaica, fabricada com materiais chamados de semicondutores. O mais utilizado é o silício, por ser o segundo elemento mais abundante da face da terra, não há limites com relação à matéria-prima para produção de células solares. As células solares são produzidas com uma camada positiva (com falta de elétrons) e uma camada negativa (com excesso de elétrons) que, juntas, criam um campo elétrico, assim como em uma bateria.

## Como funcionam as células fotovoltaicas?

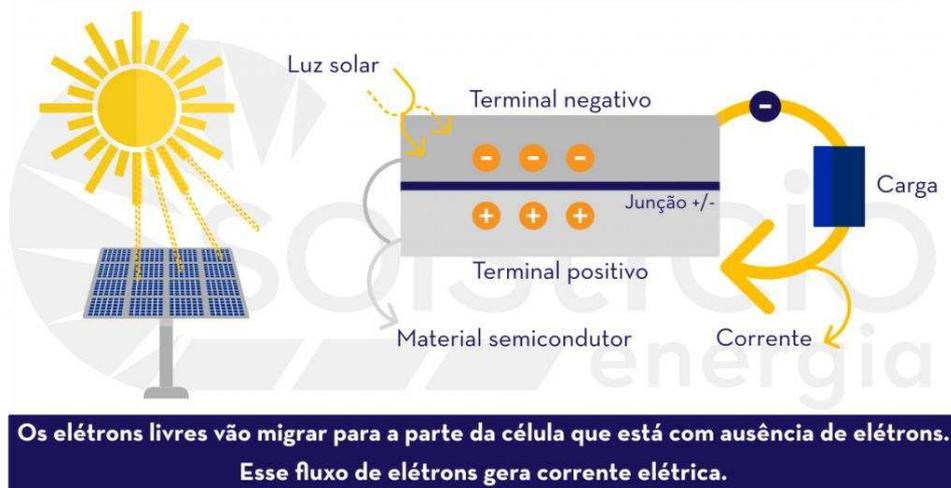


Figura 01 – Funcionamento das Células Fotovoltaicas

A luz solar é pura energia, composta de pequenos elementos denominados fótons. Quando os fótons atingem a célula fotovoltaica, parte deles é absorvida, eles liberam os elétrons em excesso dos átomos da camada negativa, que passam para a camada positiva criando, assim, um circuito elétrico. Ou seja, esses fótons despertam os elétrons do material semicondutor, gerando assim eletricidade.

Quanto maior a intensidade da luz solar, maior o fluxo da eletricidade. A eletricidade gerada pelas células está em corrente contínua, que pode ser imediatamente usada ou armazenada em baterias. Em sistemas conectados à rede, a energia gerada precisa passar por um equipamento chamado inversor, que irá converter a corrente contínua em alternada com as características (frequência, conteúdo de harmônicos, forma da onda, etc) necessárias para atender as condições impostas pela rede elétrica pública. Assim, a energia que não for consumida pode também ser lançada na rede.

## A energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a geração de energia elétrica através da luz do sol, quando, através de um sistema fotovoltaico, o consumidor pode abastecer todo o consumo elétrico. Agindo como um grande reator nuclear natural, o sol libera a cada instante pequenos pacotes de energia, chamados fótons, que percorrem aproximados 150 milhões de quilômetros, em cerca de 8,5 minutos, para chegar a Terra. A cada hora, a quantidade de fótons que atingem o planeta Terra seria suficiente para gerar energia para, teoricamente, satisfazer as necessidades energéticas globais por um ano inteiro. No entanto, a porcentagem de participação da energia solar na geração elétrica mundial ainda é ínfima mas, conforme a tecnologia vai evoluindo e seus custos vão reduzindo, a capacidade de aproveitar a abundância de energia do sol vai aumentando.

Os principais equipamentos que compõem o sistema são os módulos fotovoltaicos, conhecidos popularmente como placas solares, e o inversor interativo. Os módulos fotovoltaicos são compostos por muitas células solares, unidade mínima da tecnologia e responsáveis pela conversão direta da luz em eletricidade. Múltiplas células compõem um módulo fotovoltaico e vários destes são agrupados para formar um painel solar. Quanto mais painéis solares forem implantados, mais energia poderá ser gerada.

## **Diferença entre célula, módulo e painel**

A célula nada mais é que a unidade básica desenvolvida para realizar a conversão direta de energia solar em elétrica. O módulo é a unidade formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar eletricidade. Já os painéis são um ou mais módulos fotovoltaicos interligados eletricamente, montados de modo a formar uma única estrutura. Um conjunto de módulos, juntamente com equipamentos complementares (inversores e cabos), forma um sistema FV.

## **Como fabricar um módulo solar**

Existem duas maneiras de fabricar um módulo solar: A primeira delas é com células solares feitas de fatias super finas de silício em formato cristalino. Normalmente elas são colocadas entre vidros, com moldura de alumínio. Essa técnica é a mais tradicional e atualmente com maior escala de produção em nível comercial.

O segundo modo de fabricar os módulos é através da aplicação a plasma (quase como um “spray”) de um material semicondutor sobre um vidro ou em outro material (que pode ser flexível), que servirá como uma “cama”. Em seguida, esse conjunto é coberto por um material transparente como o vidro. Está pronto o chamado filme fino, a tecnologia mais fácil de ser integrada às edificações urbanas. Os elementos utilizados neste caso são silício (na sua forma não cristalina, que é chamada de silício amorfo) ou compostos químicos como telureto de cádmio (CdTe) ou disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS).

## **Geração e conversão de energia**

Conforme os elétrons circulam em uma direção ao redor desse circuito, os módulos fotovoltaicos produzem energia em corrente contínua (CC). No entanto, a energia consumida chega como corrente alternada (CA). Para que os sistemas entreguem a energia em CA, usa-se um inversor.

Um inversor solar pega a eletricidade gerada pelo painel em CC e a converte em CA, por esse motivo que eles costumam ser considerados como o “cérebro” do sistema. Juntamente com a inversão de CC para CA, eles também fornecem proteção

contra falhas elétricas e geram estatísticas do sistema, incluindo a produção de energia e rastreamento de ponto máximo de potência. Porém, a função mais importante do inversor, após a conversão de corrente, é a realização da troca da energia gerada com a energia da rede elétrica.

Por não produzirem energia durante a noite ou energia insuficiente em momentos de pouca luminosidade, os sistemas fotovoltaicos precisam ser conectados à rede elétrica para que o consumidor possa contar com a energia dela nesses momentos. Da mesma forma, naqueles momentos de maior geração, quando o sistema pode estar suprindo mais do que é consumido, é preciso que essa energia seja enviada para algum lugar, visto o caráter imediato do uso desta. Cabe, então, ao inversor realizar a troca dessa energia sistema/rede, injetando o excedente gerado na rede ou “pegando” desta nos momentos em que o sistema não consiga suprir o consumo.

## **Diferença entre energia solar térmica e fotovoltaica**

A geração solar térmica consiste na transformação da energia do sol em calor para a utilização no aquecimento de água em residências, hotéis, clubes, etc. Para captar essa energia são usados coletores solares.

Na geração solar fotovoltaica, a energia é diretamente convertida em eletricidade e, neste caso, são utilizados módulos solares.

## **Sistema de energia solar fotovoltaico**

Um sistema de energia solar fotovoltaico, também chamado de sistema de energia solar ou, ainda, sistema fotovoltaico, é um sistema capaz de gerar energia elétrica através da radiação solar. Existem dois tipos básicos de sistemas fotovoltaicos: Sistemas Isolados (Off-grid) e Sistemas Conectados à Rede (Grid-tie).

Os Sistemas Isolados são utilizados em locais remotos ou onde o custo de se conectar a rede elétrica é elevado. São utilizados em casas de campo, refúgios, iluminação, telecomunicações, bombeio de água, etc. Já os Sistemas Conectados à rede, substituem ou complementam a energia elétrica convencional disponível na rede elétrica.

Um sistema fotovoltaico possui quatro componentes básicos:

**Painéis solares** – Fazem o papel de coração, “bombeando” a energia para o sistema. Podem ser um ou mais painéis e são dimensionados de acordo com a energia necessária. São responsáveis por transformar energia solar em eletricidade.

**Controladores de carga** – Funcionam como válvulas para o sistema. Servem para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho.

**Inversores** – Cérebro do sistema, são responsáveis por transformar os 12 V de corrente contínua (CC) das baterias em 110 ou 220 V de corrente alternada (AC), ou

outra tensão desejada. No caso de sistemas conectados, também são responsáveis pela sincronia com a rede elétrica.

Baterias – Trabalham como pulmões. Armazenam a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há sol.

Enquanto um sistema isolado necessita de baterias e controladores de carga, sistemas conectados à rede funcionam somente com painéis e inversores, já que não precisam armazenar energia.

## Ilustração do sistema de como funciona energia solar fotovoltaica

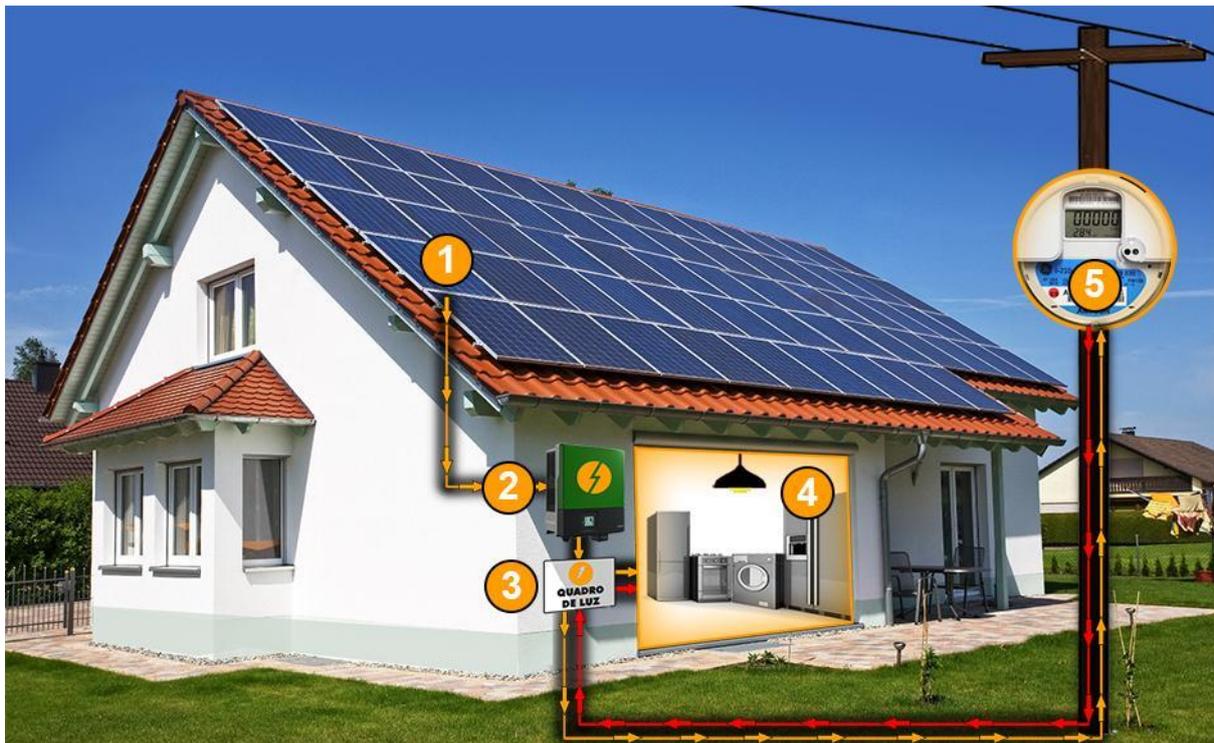


Figura 02 – Funcionamento do Sistema Fotovoltaico

Este é um exemplo de como funciona energia solar fotovoltaica em uma instalação solar doméstica. Primeiro, a luz solar atinge um painel solar. Os painéis convertem a energia em corrente contínua, que flui para um inversor. O inversor converte a eletricidade de CC para CA e, caso exista consumo no momento, ele irá enviá-la ao quadro de distribuição. Se não houver consumo, então, ele irá injetar essa energia na rede da distribuidora. Quando não houver geração, então, ele pega a energia da rede e envia para o quadro de distribuição. Um medidor bidirecional é responsável por medir a energia consumida e a energia injetada na rede.

## História

No Hemisfério Norte, desde a década de 1970, a energia solar está na pauta permanente dos governos. O físico francês Edmund Becquerel a descobriu, ainda no

século XIX, , quando experimentava o efeito fotovoltaico com dois eletrodos metálicos numa solução condutora. Bequerel percebeu o aumento na geração de energia elétrica com a luz e, a partir daí, a tecnologia fotovoltaica passou por vários estágios até chegar ao uso em grande escala do silício.

Em 1873, Willoughby Smith descobriu o efeito fotovoltaico em sólidos com o selênio. A produção da primeira célula fotovoltaica neste metal veio quatro anos mais tarde, com W. G. Adams e R.E. Day. Em 1904, Albert Einstein publicou um artigo sobre o efeito fotovoltaico, ao mesmo tempo em que divulgava ao mundo sua teoria da relatividade. Com a explicação do efeito fotovoltaico em 1923, Einstein ganhou seu primeiro Prêmio Nobel.

A primeira célula de silício foi produzida em 1954, nos Laboratórios Bell, em Murray Hill, Nova Jérsei, Estados Unidos. E no ano seguinte começou no mesmo país a produção de elementos solares fotovoltaicos para aplicação espacial. Daí por diante, esta indústria foi se aprimorando e as placas tornaram-se mais eficientes.

Em 1980, Israel foi o primeiro país estabelecer uma política pública de energia solar. Nesta década, a produção mundial ainda era pequena. Em 1983, por exemplo, não passava de 20 MW. Em 1994, ocorreu a primeira Conferência Mundial Fotovoltaica, no Hawai, e o século XX terminou com pouco mais de 1000 MW em sistemas instalados no mundo.

## **Radiação Solar**

Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética.

Cerca de metade desta energia é emitida como luz visível na parte de frequência mais alta do espectro eletromagnético e o restante na do infravermelho próximo e como radiação ultravioleta.

A radiação solar que atinge o solo é composta por raios solares que chegam de todas as direções e são absorvidos, espalhados e refletidos pelo ar, poeira e nuvens. Sendo composta por três componentes as quais são:

Radiação solar direta, composta de raios paralelos diretos do sol;

Radiação solar difusa, composta de raios espalhados pela atmosfera terrestre refletidos pelas nuvens;

Radiação solar refletida (Albedo), radiação refletida pelas superfícies adjacentes terrestres tais como prédios, árvores, solos ou qualquer outro obstáculo, que ainda depende da forma e textura do meio ambiente adjacente, ou seja, é o poder de reflexão de uma superfície ou de um corpo.

A radiação solar que é distribuída pela superfície da terra não é uniforme, pois depende das regiões iluminadas, ou seja, a região do equador é mais iluminada que a polar. Além disso, a intensidade depende da estação do ano, do clima, da poluição local e hora.

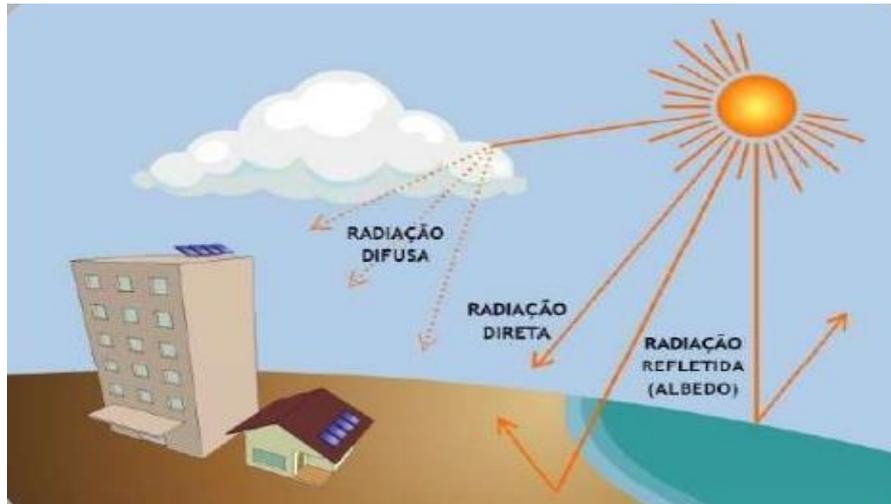


Figura 03 – Tipos de Radiação

O comportamento da Radiação ao longo do dia influencia diretamente na produção diária da placa solar fotovoltaica. É possível perceber essa variação diante de todos os cenários de tempo, como dias nublados, com nuvens no período da tarde etc. Nos gráficos de radiações medidas ao longo do ano nesses cenários pode-se perceber que o sistema solar fotovoltaico não possui uma linearidade de produção e, portanto, não pode-se generalizar as análises.

A exemplo disso, as figuras mostram as variações ao longo do ano, da radiação (H) solar diária média mensal extraterrestre, terrestre global e difusa no plano horizontal.

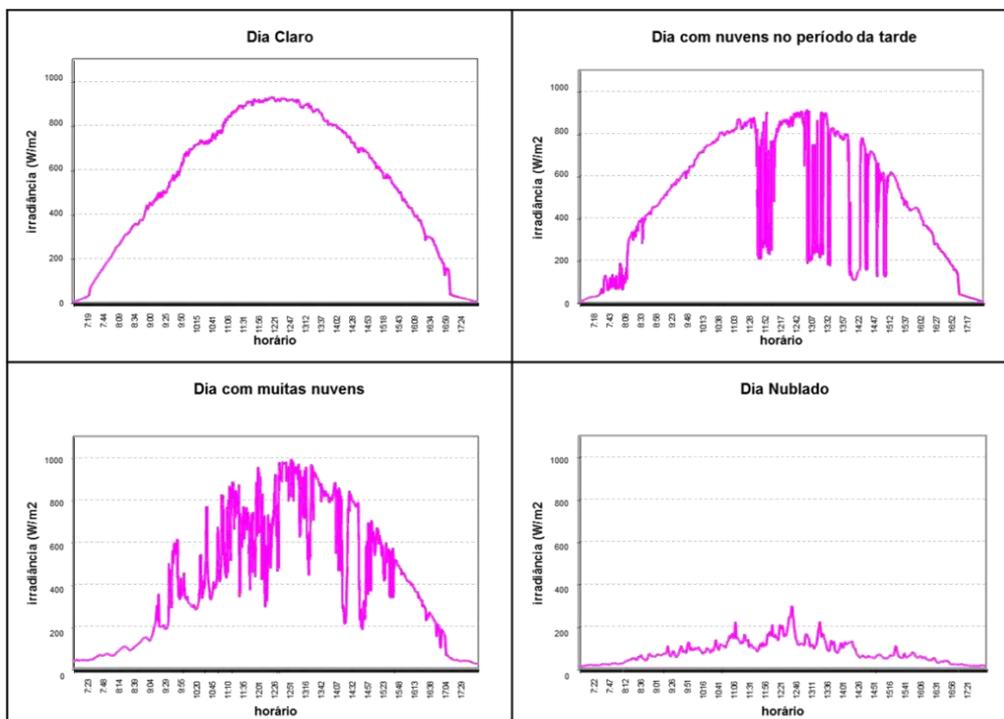


Figura 04 – Variação da Irradiância em relação com o clima e a radiação

Assim, conclui-se que:

1. Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a IRRADIÂNCIA, expressa em  $W/m^2$ .
2. Na superfície terrestre a irradiância da luz solar é tipicamente em torno de  $1000 W/m^2$ .
3. Medindo-se a irradiância pode-se calcular a energia recebida do sol num determinado período, por exemplo em um dia.
4. Somando-se os valores da irradiância ao longo do tempo, obtém-se o valor da energia recebida do sol durante o dia por unidade de área.

### **Fontes de Dados de Radiação**

Atualmente, existem diversas fontes de dados de radiação solar disponíveis na internet e com os diversos dados de irradiação solar para o território brasileiro fornecida por diversas fontes podem haver discrepâncias apreciáveis. Isso acontece devido ao número de fontes que subsidiam essas medições, ou seja, quanto menor a quantidade de bases meteorológicas maior será a área de interpolação.

Não se pode dizer que uma fonte está certa e outra está errada e sim o que verificamos é qual fonte apresenta valores com um número maior de referências. Caso se faça o dimensionamento de um determinado sistema de energia solar fotovoltaica, considerando um valor único de irradiação solar, e se opte por uma atitude conservadora, o valor adotado para o dimensionamento seria o “pior mês” dentre todas as fontes a que se tiver acesso. Por outro lado, caso necessite a sequência de valores mensais de irradiação para o dimensionamento, como seria o caso de utilizar algum software de simulação, então a atitude mais conservadora seria compor uma sequência utilizando os piores valores para cada mês (“pior janeiro”, “pior fevereiro” etc.) disponíveis em todas as fontes.

### **Geometria solar – movimentos de rotação, translação (solstício e equinócio)**

O movimento de rotação corresponde ao movimento da terra em torno do seu próprio eixo, esse movimento se dá no sentido anti-horário de oeste para leste e tem duração de 24 horas. Graças ao movimento de rotação, a luz solar vai progressivamente iluminando diferentes áreas, do que resulta a sucessão de dias e noites nos diversos pontos da superfície terrestre.

Durante o ano, a iluminação do Sol não é igual em todos os lugares da Terra, pois o eixo imaginário, em torno do qual a Terra faz a sua rotação, tem uma inclinação de  $23^{\circ}27'$ , em relação ao plano da órbita terrestre, e devido a esta inclinação expõe ao sol vários locais do mundo em momentos diferentes, dando-se assim os dias e as noites. Um observador em local qualquer verá o sol descrever uma trajetória no céu nascendo a leste e se pondo a oeste.

O movimento de translação corresponde ao movimento da terra em torno do sol de forma elíptica, e pelo fato de haver uma inclinação da terra em relação ao plano da sua órbita elíptica impõe as estações nos dois hemisférios, Norte e Sul.

A posição angular do sol ao meio dia solar, em relação ao equador é chamada de Declinação Solar ( $\delta$ ). A declinação varia de acordo com o dia do ano, com valores entre:  $-23^\circ 27'' \leq \delta \leq 23^\circ 27''$ , sendo positivo ao Norte e negativo ao Sul.

Com isso tem-se o que é chamado de Solstícios e Equinócios que modificam a exposição do globo terrestre em relação a radiação vinda do Sol, fatores esses que são importantes para o desenvolvimento de qualquer projeto de Energia Solar Fotovoltaica, pois ao avaliar o recurso solar disponível é que pode-se dimensionar o sistema solar fotovoltaico adequado.

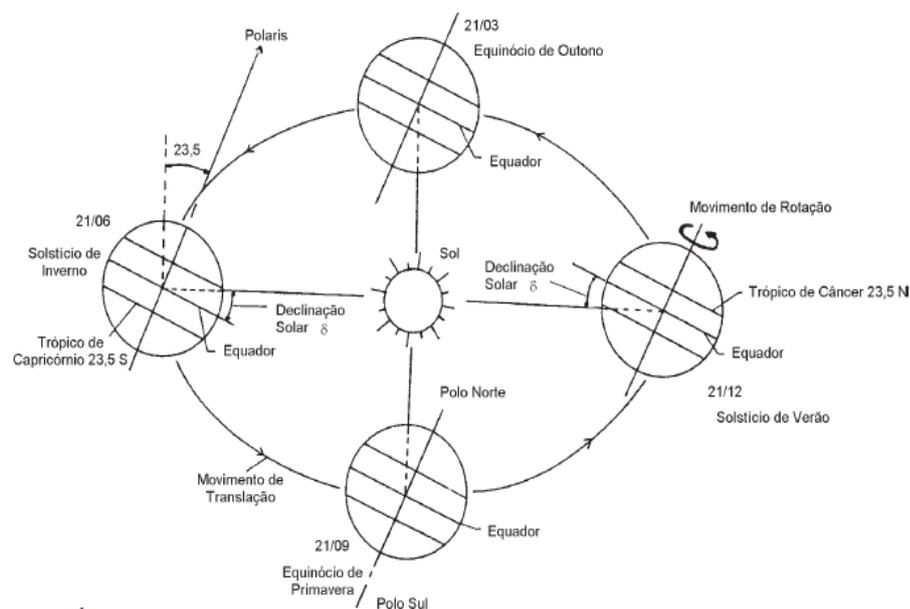


Figura 05 – Efeito da Rotação, Declinação Solar e Translação sobre a oferta de radiação na superfície terrestre.

## Melhor direção para o painel fotovoltaico

A direção do painel solar tem uma grande importância na captação de energia, de modo que utilizar a direção do painel solar correta pode fazer com que um projeto de energia solar tenha menores custos e tempo para ser finalizado, além de aumentar a eficiência do painel solar.

A posição ideal para os seus painéis fotovoltaicos no Brasil é voltado para o Norte. O Sol nasce no leste, sobe se inclinando ao Norte e se põe no Oeste, como na figura abaixo:

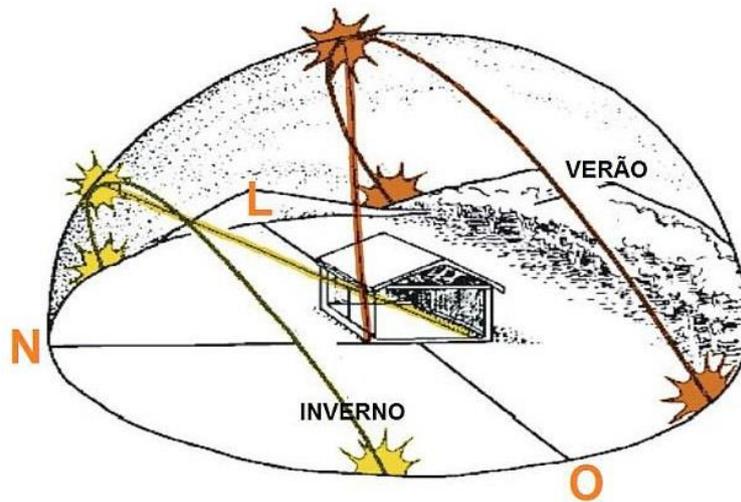


Figura 06 – Trajetória Solar em diferentes estações do ano em relação ao Azimute

Para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, o ângulo de inclinação igual ao da Latitude é normalmente o melhor ângulo para se instalar um painel fotovoltaico.

As perdas direcionais para telhados com face NE (nordeste) ou NO (noroeste) variam entre 3% e 8%. Para um telhado com face Leste ou Oeste, as perdas são entre 12% e 20%. Para face Sul, as perdas já são muito grandes.

No Brasil, devido a sua posição privilegiada em relação ao Sol, é melhor o sistema fotovoltaico ter um grau de Inclinação menor do que o da Latitude do que maior.

Embora o ângulo de inclinação ideal para o painel solar fotovoltaico seja um ângulo igual à latitude do local de instalação, a fixação plana da placa solar fotovoltaica sobre um telhado inclinado não irá resultar numa grande diminuição no desempenho do sistema. Deverá, no entanto, ter em consideração o ângulo do telhado ao dimensionar seu sistema.

A escolha incorreta da inclinação da placa solar fotovoltaica reduz a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica pelo módulo solar fotovoltaico, comprometendo o sistema.

O ideal é que a instalação permita que os raios solares incidam o mais perpendicularmente possível à superfície do módulo. Ou seja: O ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos deve permitir que o maior fluxo de Radiação incida sobre o painel solar fotovoltaico mais perpendicular possível. Isso é fundamental para maximizar a geração solar fotovoltaica do sistema instalado.

## **Radiasol**

Durante o desenvolvimento deste trabalho, utilizamos como suporte para os cálculos, dentre outras ferramentas, a chamada Radiasol 2.



Figura 07 – Página Inicial do Radiasol

Este software, desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do sul (UFRGS), foi criado com a intenção de facilitar os cálculos relacionados a radiação solar, principalmente quando estes são de uma complexidade mais elevada, quando envolvem, por exemplo, estudos de intensidade da radiação em superfícies inclinadas. Este programa se fundamenta internamente em modelos matemáticos retirados da literatura sobre o tema, elaborados por autores diversos, no qual rotinas realizam os cálculos em que são determinados o impacto da inclinação da superfície receptora tomando em conta características intrínsecas da radiação solar, como sua anisotropia e seus componentes diretos e difusos.

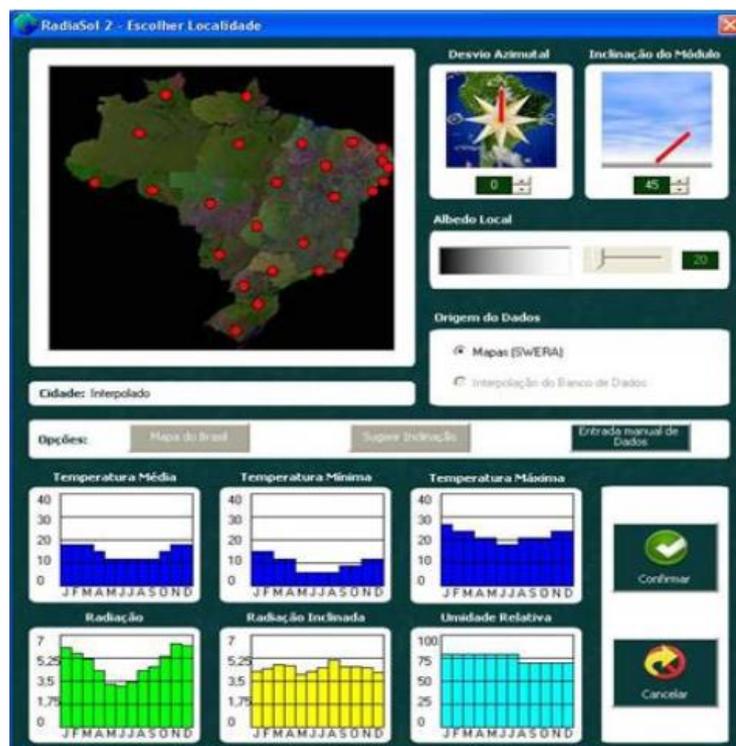


Figura 08 – Interface do Radiasol com base em posição geográfica, desvio azimutal e inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Este software faz parte do SOLARCARD criado pela UFRGS, um pacote de programas que tem por objetivo o desenvolvimento de projetos variados de sistemas de energia solar, englobando tanto modelos térmicos quanto fotovoltaicos, simulando o comportamento real de cada fator do sistema em questão partindo de uma quantidade mínima de parâmetros de entrada, os quais já devem ser de conhecimento prévio do autor do projeto.

É um software simples, com interface amigável, entretanto mesclado com estrutura especialista e flexível capaz de ser utilizado em uma ampla gama de projetos e simulações personalizadas. Com estes fatos em questão, nos pareceu ser esta uma ferramenta muito interessante de ser aplicada em nosso trabalho, como ficará explicitado mais a seguir.

## **Objetivo**

Após o panorama global apresentado visando uma maior compreensão do funcionamento das tecnologias de produção energética via células fotovoltaicas, entramos agora nos tópicos que irão focar no objetivo principal de nosso trabalho.

Com o entendimento teórico melhor fundamentado, iremos demonstrar em detalhes técnicos como poderia ser feita uma aplicação prática desse sistema de produção de energia em prol de toda uma população. No caso, o local escolhido é uma terminal de transporte público da cidade de Curitiba.

Pensando em termos práticos, temos mazelas urbana na cidade de Curitiba (usada como exemplo) as quais podem ser resolvidas com tecnologia. Vide:

- Numerosos espaços públicos mal utilizados e com grandes áreas ociosas no município de Curitiba e região metropolitana, vide terminais de ônibus.

- Necessidade de valorização e melhores investimentos de dinheiro do contribuinte, os quais poderiam estar sendo aplicados nas já citadas áreas subaproveitadas para monetizar esses espaços.

- Uma crescente demanda energética em Curitiba e nas cidades satélite, cuja expansão é exponencial.

- Imprescindibilidade de ampliação de utilização de energias renováveis (painéis fotovoltaicos) em nossa matriz energética.

Além disso, temos também a oportunidade de promover uma maior visibilidade positiva para que o sistema de transporte público de Curitiba volte a ser um marco global, como já foi no passado com a implementação das estações tubo, modelo que serviu de exemplo a outras cidades mundo afora.

Em resumo, nossa ideia se trata da instalação de painéis fotovoltaicos em espaços públicos de nossa cidade, mais especificamente em terminais de transporte de ônibus, conforme já foi comentado, os quais possuem enormes áreas improfícuas que poderiam ser utilizadas em benefício não somente da manutenção energética sustentável do local em si, mas também da população, com a inserção da energia excedente na rede elétrica. Seria a implementação do que existe de mais moderno em energia solar ao alcance de todos, visando democratizar o estado da arte desta

tecnologia na cidade de Curitiba, propulsando-a novamente ao pioneirismo tecnológico em transporte urbano. Por fim, em um futuro próximo, a proposta é expandir a ideia para outras localidades.

## Atlas Solar

Conforme ficou claro, é bastante complexo compreender a fundo o tema da solarimetria e trabalhar em projetos eficientes relacionados a isto. Medir o potencial solar de cada região é uma árdua tarefa, e para isso os recursos a serem aplicados são consideráveis, tanto se considerando material quanto mão de obra humana. Tudo isso visando desenvolver sistemas instalados capazes de medir, processar e disponibilizar de forma contínua e confiável dados relativos a forma de energia em questão. Para termos as necessidades qualitativas atingidas, o recurso solar deve estar em constante processo de inspeção e previsão, com status semelhante a previsões meteorológicas (ainda não alcançado), com o propósito de ele possa ser aproveitado da forma mais otimizada para atender as demandas de nossa sociedade e economia modernas.

Em constante desenvolvimento e atualização, o atlas solar visa atender a esta necessidade de uma melhor focalização e compreensão das áreas para projetos de usinas solares de diversos portes. As medições solarimétricas na superfície terrestre são fundamentais para o estudo da influência das condições atmosféricas nas componentes direta e difusa de radiação solar. Em bases terrestres, estas podem ser tomadas por ferramentas como Heliógrafo, Actinógrafo, Piranômetro Fotovoltaico ou Termoelétrico, Piroheliômetros, entre outros (entre ferramentas novas ou defasadas).

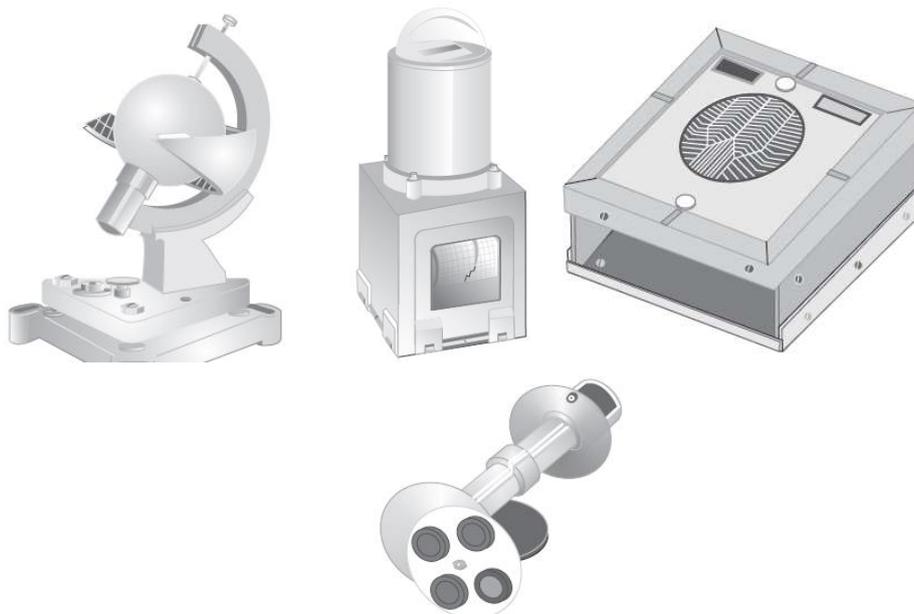


Figura 09 – Equipamentos utilizados para medições solarimétricas

De forma mais contemporânea, luxos de radiação solar também são estimados na superfície utilizando informações de nebulosidade obtidas por meio de imagens de

satélites de dados climatológicos de variáveis ambientais e geoestacionários tendo em vista criar um modelo da atmosfera e os processos radioativos nela ativos. São obtidos dados climatológicos com temperatura e visibilidade no local, albedo de superfície (função da refletância da camada de cobertura do solo e seu iso), umidade relativa e altitude, com cálculos de interpolação.

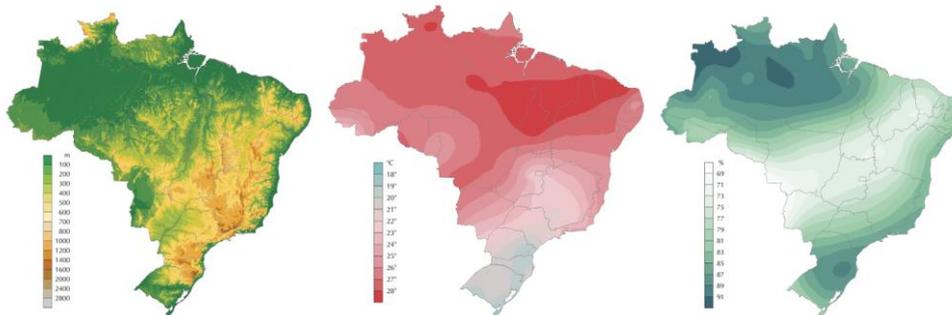


Figura 10 – Modelos Interativos com o objetivo de apresentar as variações de temperatura, visibilidade e albedo, respectivamente.

Para o desenvolvimento, os dados coletados e as estimativas de irradiação solar tem sua confiabilidade avaliada ao serem validados com base nas informações de valores medidos em estações distribuídas pela superfície do território brasileiro (dados, por exemplo, coletados e estações da rede do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o setor de energia, ou SONDA, ou então a rede PCD, operada pelo CPTEC/INPE).



Figura 11 – Estação de Medição de Dados para compilar a Irradiação

Além disso, os níveis de confiabilidade das estimativas de irradiação solar no Brasil (BRASIL-RS) foram intercomparados com valores obtidos com outros modelos de transferência radiativa, como o Heliosat (Europa), Sunny/Albany (EUA) e DLR (Alemanha).

Os mapas a seguir apresentam os valores médios estimados dos dados diários de irradiação solar providenciados pelo modelo BRASIL-RS para o período entre julho de 1995 a dezembro de 2005, com uma resolução espacial de 10km x 10km.

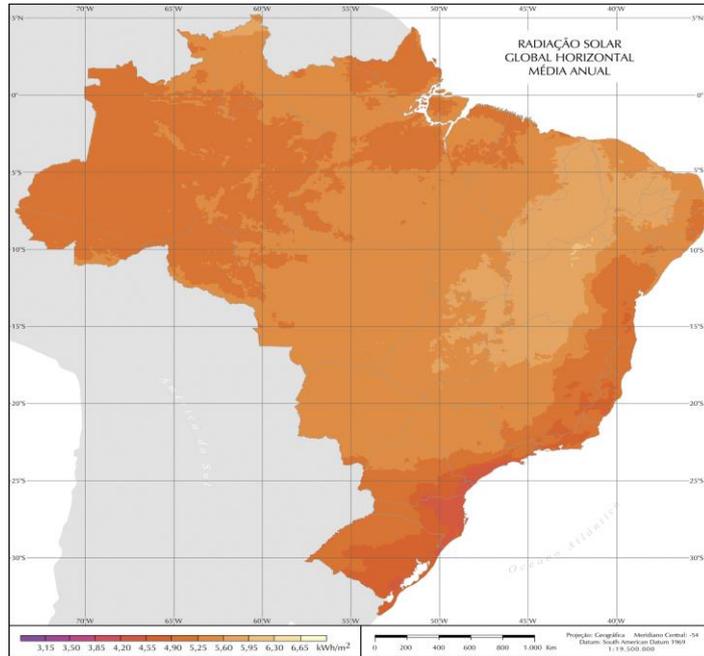


Figura 12 - Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro

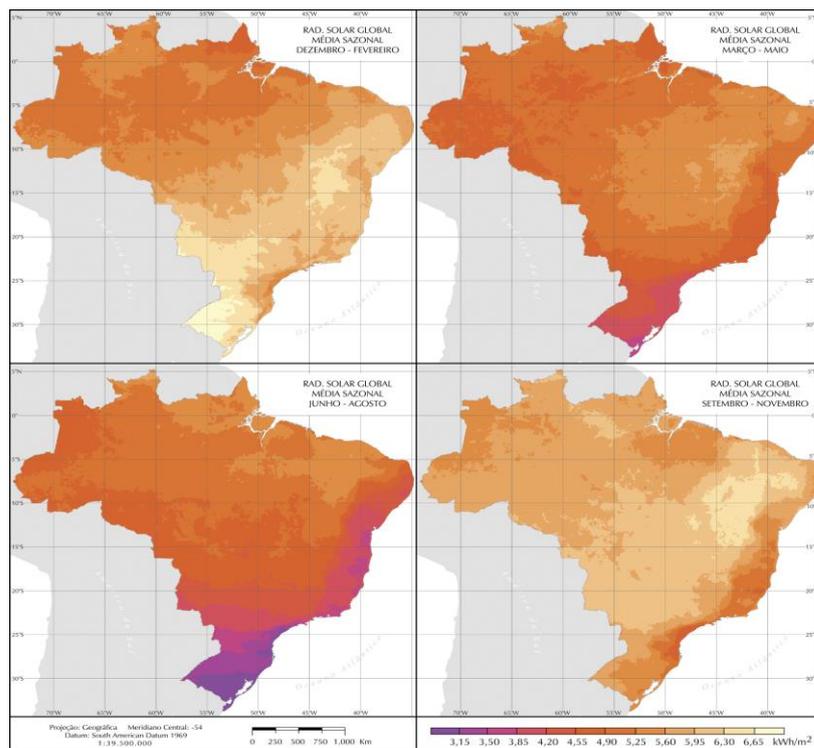


Figura 13 - Médias Sazonais da Irradiação Global Diária

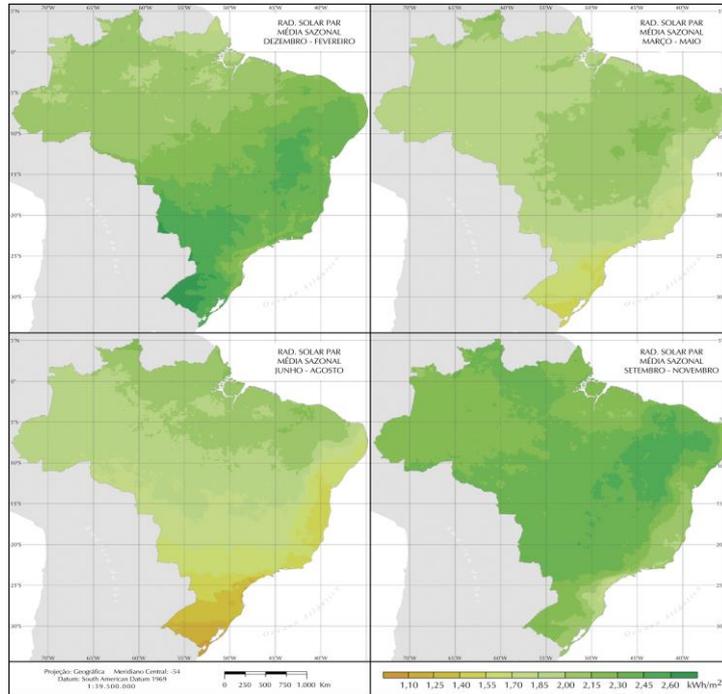


Figura 14 - Média do Total Diário de Irradiação solar na Faixa Espectral Fotossinteticamente Ativa

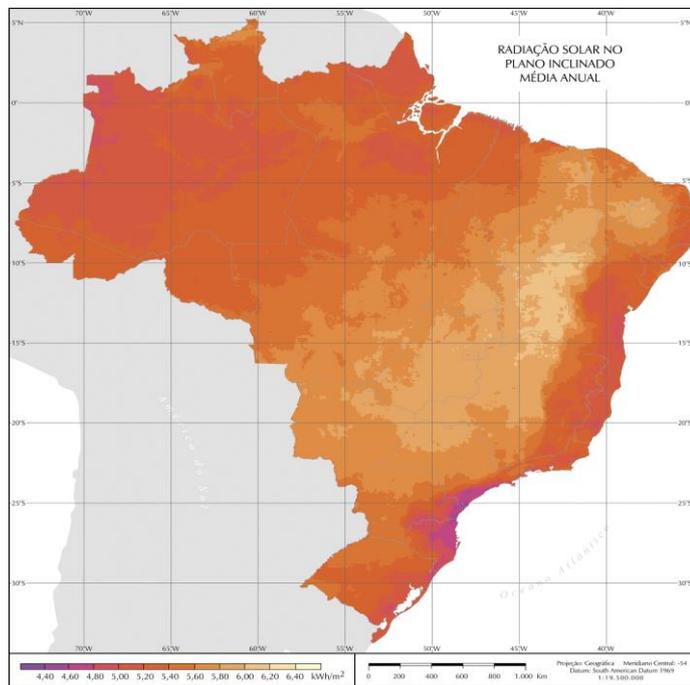


Figura 15 - Médias Anual e Sazonais da Irradiação Solar Diária Incidente sobre um Plano com Inclinação igual a Latitude do Pixel em Consideração.

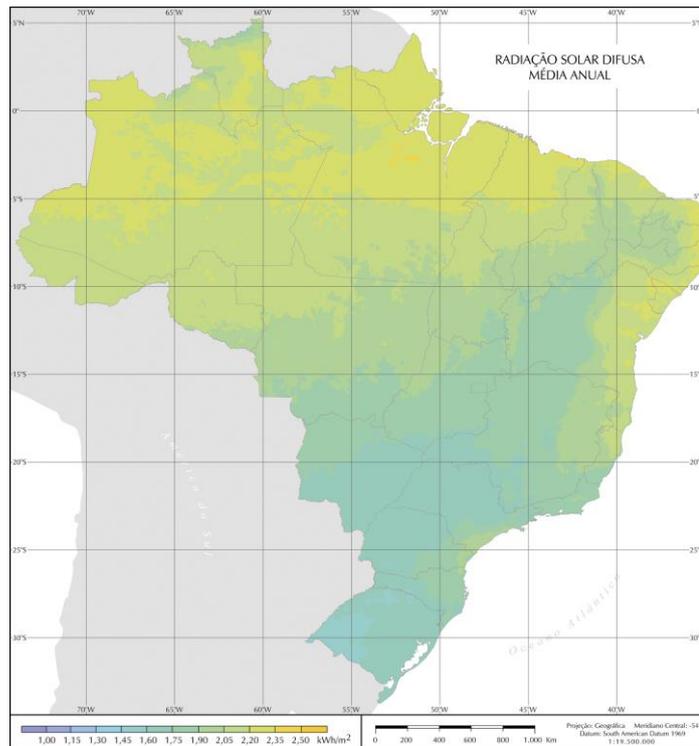


Figura 16 - Médias Anuais e Sazonais para a Componente Difusa do total Diário da irradiação solar

Estudos abrangentes para projetos devem levar em consideração a maior quantidade de informações que estes mapas podem fornecer, em seus modelos mais atualizados, juntamente com estudos de viabilidade e tendências.

## O modelo Paranaense - Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná

Desenvolvido em conjunto entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), a Itaipu Binacional (através do parque tecnológico Itaipu, ou PTI), o Centro Internacional de Hidroinformática (CIH) e com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi desenvolvido o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, disponível e acessível para toda a sociedade.

Elaborada por meio do Grupo de Pesquisa em Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos e do Laboratório de Energia Solar (UTFPR/LABENS), foi elaborada uma ferramenta de consulta e análise do potencial de irradiação solar e geração de energia elétrica no estado de forma a distribuir de forma mais democrática a informação e o uso destas tecnologias em prol do desenvolvimento sustentável.

A Ferramenta Interativa Web do Atlas em questão permite que seja visualizada a distribuição da irradiação solar em todos seus componentes (global horizontal, direta normal, difusa e no plano inclinado na latitude) por meio de mapas, em formato de

valor e em forma gráfica e didática. Ela possibilita a visualização das médias de irradiação e do potencial fotovoltaico de todo o estado, por município e mesorregião, de forma a suprir a demanda de diferentes aplicações desta fonte de energia.

O modelo citado para desenvolvimento do atlas foi o já citado de transferência radiativa BRASIL-RS.

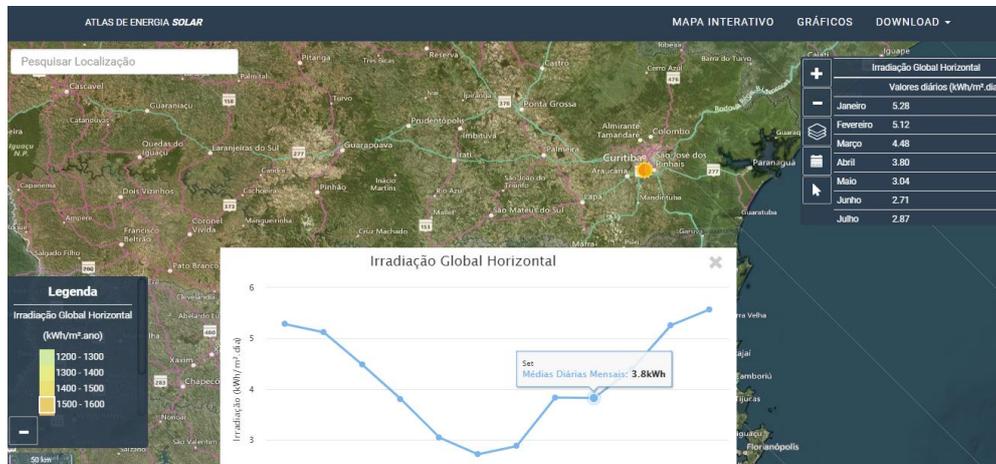


Figura 17 - Irradiação Global Horizontal no Estado do Paraná

## Curitiba

Município foco de nosso estudo, Curitiba é uma cidade localizada a 934 metros de altitude no primeiro planalto paranaense, a uma distância de aproximadamente 100km do Oceano Atlântico, com uma área de 435,036 km<sup>2</sup> e uma área urbana de 319,4 km<sup>2</sup>, com em torno de 1.933.105 habitantes.

Curitiba se alçou à fama mundial principalmente, mas não somente, devido ao pioneirismo de seu transporte público, com planos urbanísticos inovadores, sistemas de vias exclusivas para ônibus, estações tubo, entre outros, mas também por ser uma capital atenta ao cuidado do meio ambiente, com programas de conscientização a população, como por exemplo o “lixo que não é lixo”, e uma grande quantidade de áreas verdes em comparação a outros grandes centros urbanos.

## Informações detalhadas do Terminal de Ônibus do Pinheirinho

O terminal de ônibus do pinheirinho se localiza na região sul da cidade de Curitiba e alimenta 49 linhas de ônibus. Por se tratar do maior terminal da região sul da cidade, é compatível que possua dimensões avantajadas, motivando assim seus mais de 13000 m<sup>2</sup>.

Vale ressaltar que o terminal não é presença única na região. Ele compõe parte da regional do Pinheirinho que oferta um Armazém da Família, lojas, caixas

eletrônicos, lanchonetes além de possuir postos de atendimento de quase todas as secretarias municipais. Por esse complexo, são atendidas mais de 60 mil pessoas por mês, sem contar os milhares de passageiros de ônibus que transitam pela região todos os dias.

Com base nesse cenário, fica claro a enorme quantidade de energia necessária para se manter o local em funcionamento e sua relevância para a população Curitibana.

Somente o terminal de ônibus, consome por mês quase R\$50.000,00 em contas de iluminação pública, ou seja, entrega muito a população, mas cobra seu preço em estrutura e manutenção.

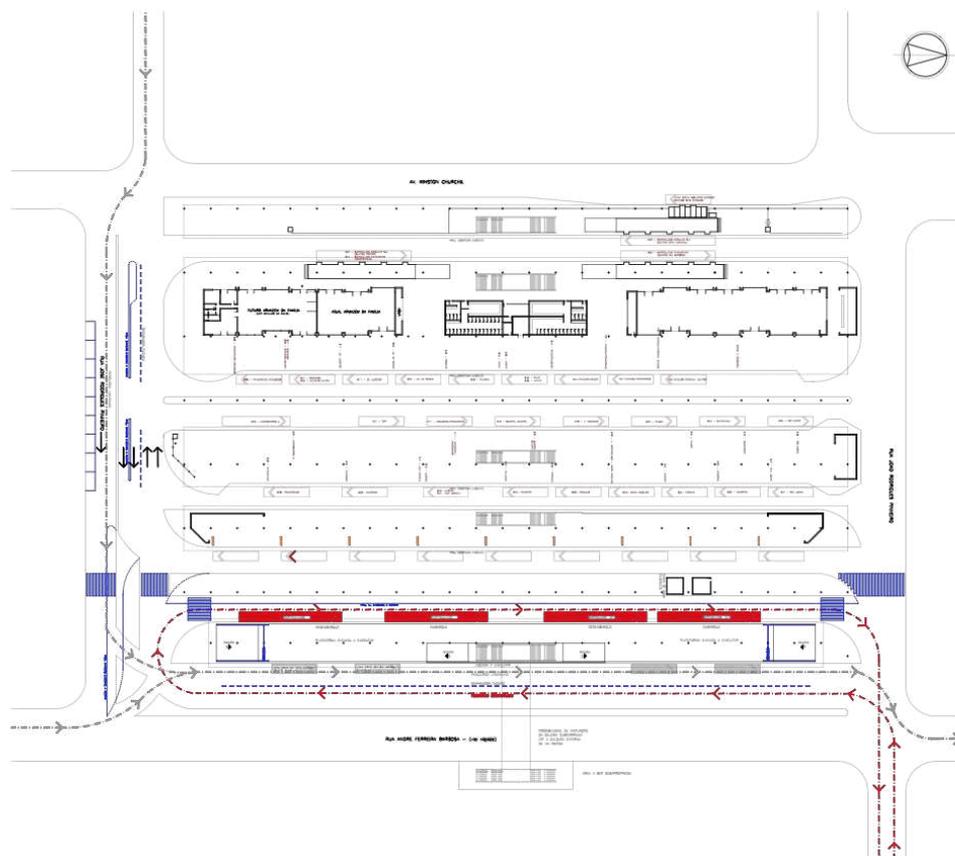


Figura 18 - Planta Baixa do Terminal do Pinheiro

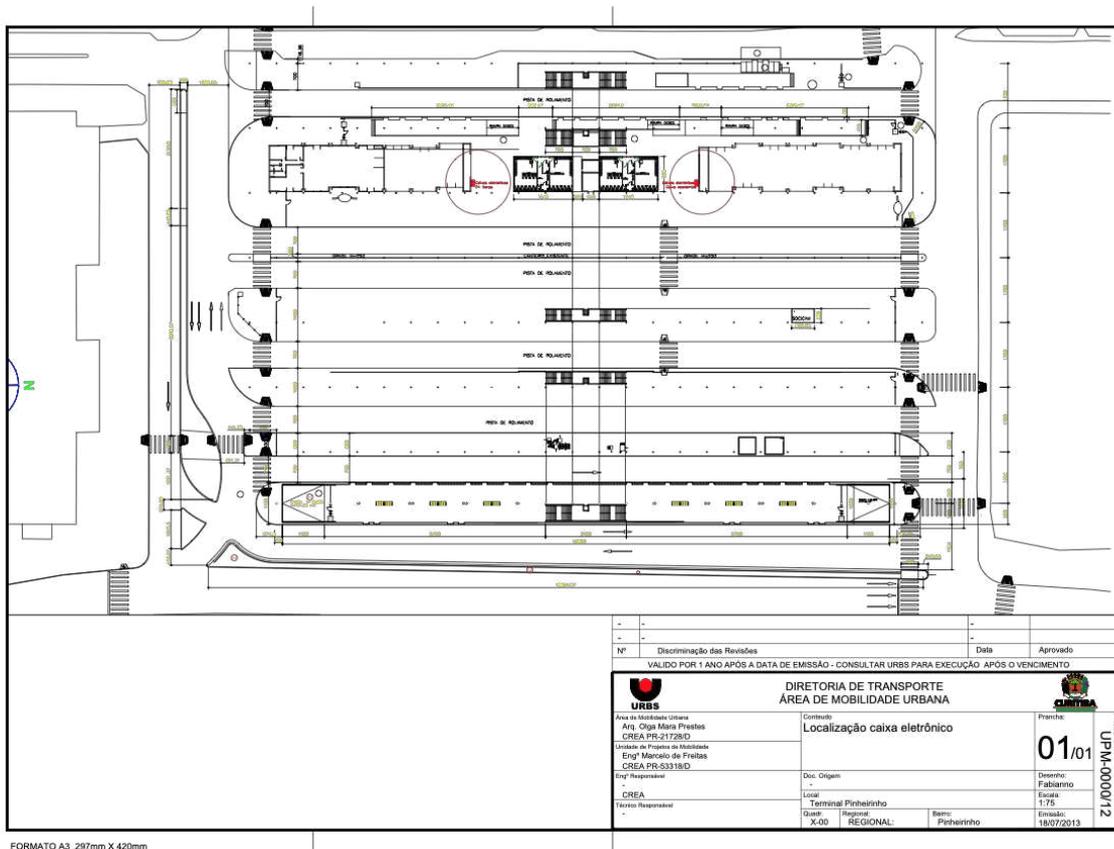


Figura 19 - Desenho Técnico do Terminal de Ônibus do Pinheirinho.

## Memorial de Cálculo

Fatura do Cliente: R\$ 45.000,00

Trifásico: 100 KWh (Tarifa Mínima)

Média de Consumo mensal: 60,562 MWh = 60.562 KWh

Abatendo-se 100 KWh da tarifa mínima, ou seja, temos 60.462 KWh como base para desenvolver o projeto.

Sabendo que um mês possui 30 dias e que o consumo é de 50 MWh conforme mencionado anteriormente:

$$\frac{60562 \text{ kWh}}{30 \text{ dias}} = 2018,75 \text{ kWh/dia}$$

Tomando por base as informações extraídas do Atlas Solarimétrico do Brasil, a região de Curitiba – PR possui uma insolação de cerca de 4,5 horas por dia e

sabendo que o rendimento do sistema fotovoltaico ( $\eta_{SFVCR}$ ) gira em torno de 75%, calculamos a potência de pico do sistema ( $Pot_{Fotovoltaica}$ ). Vale

$$Pot_{Fotovoltaica} = \frac{2018,75 kWh}{0,75 * 4,5 horas} = 598,15 kWp/dia$$

Outra forma de abordar a Potência Fotovoltaica é por meio da fórmula:

$$Pot_{Fotovoltaica} = \frac{E * G}{H_{TOT} * PR} = \frac{2018750 Wh * 1000 W/m^2}{4500 Wh/m^2 * 0,75} = 598,15 kWp/dia$$

Onde E: Energia Diária a ser gerada (Wh)

G: Irradiância na condição STC (1000 W/m<sup>2</sup>)

$Pot_{Fotovoltaica}$ : É a potência instalada (Wp)

$H_{TOT}$ : Irradiação Diária (Wh/m<sup>2</sup>)

PR: Performance Ratio do SFVCR (0,75)

Considerando que uma placa da Canadian Solar produza uma potência de 400W, podemos inferir a quantidade de painéis a ser empregado no sistema fotovoltaico.

$$\frac{598,15kWp}{400W} = 1496 painéis$$

Outro ponto que merece atenção na continuação dos cálculos é o fato de não considerarmos para esse projeto o custo de ICMS ao utilizarmos a energia da rede fora do período de geração de energia. Essa premissa foi adotada por estarmos considerando um local público e não uma propriedade privada.

Com base nas informações detalhadas no memorial de cálculo, foi possível definir o Investimento desse projeto:

- 1496 Painéis Solares Canadian Solar – CS3U – 400 Wp = 1496 unidades \* R\$ 800 = R\$ 1.196.800,00
- 22 Inversores Grid-Tie 27 KW c/ Wi-Fi Fronius – ECO Light = 22 \* R\$ 22.404,00 = R\$ 492.888,00
- Estrutura de Fixação (Cercade R\$90,00 por placa devido à quantidade = R\$ 95,00 \* 1496 = R\$ 142.120,00
- Materiais Adicionais (Cabeamento, Eletroduto, canaletas, conduítes) = R\$ 11.000,00
- Frete dos Produtos Base = R\$ 30.000,00

- Desenvolvimento do Projeto Unifilar + ART (Anotação de Responsabilidade Técnica) + Custos de Instalação: R\$ 561.842,40
- Margem para imprevistos: R\$ 65.000,00
- Custo Total: R\$ 2.500.000,00

Payback:

O retorno sobre o Investimento é calculado pela razão entre o investimento do empreendimento dividido pela redução na conta de luz.

$$\text{Payback} = \frac{\text{R\$ 2.500.000,00}}{\text{R\$ 50.000,00}} = 50 \text{ meses ou } 4,3 \text{ anos}$$

## Conclusão

Com uma demanda cada vez maior para geração eficiente de energia, e uma necessidade global pungente para que esta geração não desenvolva mazelas a curto, médio e longo prazo para o meio ambiente, este estudo mostrou que, além de ecologicamente interessante, a instalação de plantas fotovoltaicas em locais com áreas obsoletas mas com demanda energética se apresentou viável tanto tecnicamente até como economicamente.

A energia produzida, excedente do caracimento do terminal de transporte público, seria utilizada no entorno do local, gerando benefícios e economias a população em geral.

Além disso, como benefício em paralelo, este projeto poderia trazer novamente à tona a característica inovadora da cidade de Curitiba, com um terminal moderno e mais atraente visualmente falando, levando em conta que a implementação dos painéis solares pode ser feita em conjunto com uma equipe de arquitetos e urbanistas, visando levar uma maior harmonia visual a lugares que tem a tendência a serem mal cuidados e ficarem decadentes rapidamente com o passar dos anos.

O nosso estudo foi baseado unicamente no terminal de ônibus do Pinheiro para podermos detalhar os métodos de cálculos e os resultados para um local em específico, mas a aplicação não seria restrita a este único ambiente público. Com a confirmação dos resultados positivos o projeto poderia se expandir a outras localidades com áreas ociosas em que comprovadamente sejam entregues os benefícios já citados.

Vale ressaltar que o estudo foi feito para a cidade de Curitiba, um local famoso por não possuir uma grande incidência solar ao longo do ano em comparação a outras localidades do Brasil. Este sistema ser implantado em regiões ainda mais promissoras

geograficamente (informação que pode ser obtida nos atlas citados anteriormente) pode ser ainda mais viável do que o que foi apresentado neste trabalho.

Por fim, é possível atestar por meio do Memorial de Cálculo, o payback ocorre de maneira rápida dadas as proporções do empreendimento e se considerarmos uma vida útil de 25 anos, que é o padrão dos módulos fotovoltaicos e dos inversores, teremos uma economia de pelo menos R\$ 12.000.000,00 ao longo dos; isso sem considerar inflação energética e apontando uma eficiência média dos painéis de 80%, nesse período.

## **Referências Bibliográficas**

1. Aula Professora Lorena Castanho Chagas Duarte
2. Kalogirou S.A. - Engenharia de energia solar: Processos e Sistemas 1ª Edição: Editora Elsevier 2016
3. Silva P.H.T.; Florian F.; Pestana F.A.B. - Estudo de Perdas em Sistemas Fotovoltaicos – Uniara 2018
4. Langerhorst D. R. – Estudo das Perdas em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica devidas ao controle de Potência Reativa em um Gerador Solar Fotovoltaico – Universidade de São Paulo (USP) 2013
5. Pinho J.T.; Galdino M.A – Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos – Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES) – CEPEL – DTE – CRESESB - 2014