

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DEYVISSON LIRA SANTANA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM
TELHADOS: ESTUDO DE CASO NOS PRÉDIOS ADMINISTRATIVOS DA
MINERAÇÃO PARAGOMINAS S/A.

PARAGOMINAS/PA

2023

DEYVISSON LIRA SANTANA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM
TELHADOS: ESTUDO DE CASO NOS PRÉDIOS ADMINISTRATIVOS DA
MINERAÇÃO PARAGOMINAS S/A.

Artigo apresentado como requisito parcial à
conclusão do curso de MBA em Gestão Estratégica
em Energias Naturais Renováveis, Setor de
Ciências Agrárias, Universidade Federal do
Paraná.

Professor: Dr. Marcelo Langer.

PARAGOMINAS/PA

2023

Avaliação do potencial de geração de energia fotovoltaica em telhados: Estudo de Caso nos Prédios Administrativos da Mineração Paragominas S/A

Deyvisson Lira Santana

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo verificar o potencial de energia fotovoltaica possível de ser gerada considerando a área dos telhados disponíveis nos prédios administrativos da Mineração Paragominas S/A, localizada no município de Paragominas-PA. Para realizar essa estimativa, foi utilizado o software ArcGIS no mapeamento das áreas dos telhados em m², bem como da orientação geográfica das águas de cada telhado. Com base na área encontrada em m², na maior média anual de irradiação solar no plano inclinado para a localização da área de estudo, e tendo como base para estimativa de energia gerada o módulo fotovoltaico Canadian Solar BiHiKu7 640~670W, calculou-se a energia possível de ser gerada mensalmente nas áreas disponíveis dos telhados. O potencial de energia obtido foi de 245,6 MWh/mês. Por fim, a partir da comparação entre a potencial de energia obtido e a demanda das áreas comuns do empreendimento, verificou-se que a energia possível de ser gerada seria insuficiente para atender a demanda mensal das áreas comuns.

Palavras-chave: Energia. Módulo Fotovoltaico. Telhados. Irradiação. Áreas Comuns.

Photovoltaic power generation on rooftops evaluation: Case Study on the Administrative Buildings of Mineração Paragominas S/A

This research aimed to verify the potential of photovoltaic energy that can be generated considering the available roof area in the administrative buildings of Mineração Paragominas S/A, located in the municipality of Paragominas-PA. The ArcGIS software was applied to estimate the roofs areas in square meters, as well as the geographic orientation of each roof section. Considering the area found in square meters, the highest annual average of solar irradiation on the inclined plane for the studied area, and estimated energy generated the photovoltaic module Canadian Solar BiHiKu7 640~670W, it was possible to find the energy amount on a monthly basis in the available roof areas. The amount found was 245,6 MWh/month. Finally, it was made a comparison between de amount of energy possible to be produced by the photovoltaic modules and the energy consumed by the common areas from the bauxite mine project, resulting on an insufficient amount to meet the monthly demand of the common areas.

Keywords: Energy. Roof Areas. Solar Irradiation. Photovoltaic Module. Common areas.

1 INTRODUÇÃO

A superfície da Terra recebe uma quantidade de energia solar nas formas de luz e calor, suficiente para suprir milhares de vezes as necessidades mundiais. No entanto, apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada para geração de energia elétrica. Considerando o aumento crescente da demanda por energia elétrica, bem como a necessidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis, outras fontes de energia consideradas renováveis têm se tornado cada vez mais relevantes no cenário mundial.

A Mineração Paragominas S/A (MPSA) faz parte da empresa norueguesa Norsk Hydro, que atua no setor de energia e na cadeia produtiva do alumínio desde a extração do minério de bauxita até a reciclagem do alumínio utilizado. Atualmente os objetivos de adequação ao cenário global da empresa passam pela redução das emissões de carbono com metas estabelecidas até atingir a neutralidade das emissões até 2050. Neste sentido, a Hydro trabalha para desenvolver novas oportunidades na área de energia renovável, contribuindo assim com a transição mundial para uma energia mais verde (HYDRO, 2023).

Segundo o Relatório de Informação Ambiental Anual (RIAA) da Licença de Operação (LO) 5533/2010 (2022, p. 13), a MPSA “é parte de um sistema integrado de produção de bauxita beneficiada, que inclui entre as suas atividades a mineração, o beneficiamento de minério e o transporte da bauxita beneficiada através de um mineroduto.”

No RIAA da LO 5590/2011 (2023) informa-se que a de energia elétrica do empreendimento é feita por meio de uma linha de transmissão de 236 Km, desde a fonte, na subestação de Vila do Conde em Barcarena (PA), até a subestação na MPSA em Paragominas (PA), passando por sete municípios do estado do Pará: Barcarena, Abaetetuba, Moju, Acará, Tomé-Açu, Ipixuna do Pará e Paragominas.

Quando há interrupção no fornecimento de energia ocorre o acionamento de geradores a diesel voltados para atender a demanda do empreendimento, a saber, planta de beneficiamento de bauxita, áreas comuns e estação de bombeamento do mineroduto.

Nota-se que as áreas comuns do empreendimento, correspondem aos prédios do setor administrativos, onde estão localizadas o refeitório, laboratório, diretoria, portaria, rodoviária, centro de treinamento, gerência de meio ambiente,

gerência de controladoria, gerência de infraestrutura, gerências de saúde, e segurança patrimonial e segurança do trabalho. Outras áreas do empreendimento localizadas nas áreas operacionais, também contabilizam o consumo das áreas comuns, tais como: sistema de aspersão de vias de acessos utilizados na área de mina, sistema de iluminação das áreas operacionais, cancelas das portarias de acesso à área de mina, área de recepção de animais silvestres, bombas de captação de águas subterrâneas e a central de materiais descartados.

Considerando a existência de fontes alternativas de geração de energia, avaliar o potencial de geração de energia fotovoltaica nos telhados dos prédios administrativos da Mineração Paragominas S/A pode demonstrar que essa modalidade de geração é uma opção viável capaz de atender a demanda das áreas comuns em caso de interrupção do fornecimento, contribuir com os objetivos de redução de emissão de carbono da empresa e gerar economia financeira no valor pago pela energia consumida diariamente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de geração de energia fotovoltaica nas áreas dos telhados dos prédios administrativos da Mineração Paragominas S/A.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO

Descobrir a área dos telhados possíveis para instalação de painéis solares na Mineração Paragominas S/A.

Avaliar se o potencial de geração de energia fotovoltaica na área de estudo é suficiente para compensar a energia elétrica consumida no funcionamento das áreas comuns do empreendimento.

2.3 JUSTIFICATIVA

A Mineração Paragominas S/A tem o seu fornecimento de energia abastecido por uma única linha de transmissão. Desta forma, quando há interrupção no abastecimento por falta de fornecimento ou por quedas das torres que sustentam a linha de transmissão, as atividades operacionais e administrativas são impactadas.

A fim de evitar maiores prejuízos operacionais, o empreendimento conta com um sistema de *back-up power* que funciona através de geradores a óleo diesel, um combustível proveniente de uma fonte não renovável e emissora de CO₂, contribuindo, portanto, com o efeito estufa.

Atualmente a Mineração Paragominas S/A estuda formas de contribuir com as metas globais de redução nas emissões de CO₂ estabelecidas por sua controladora. Desta forma, iniciativas na área de geração de energia fotovoltaicas, redução no uso de diesel e eletrificação da frota de veículos tem sido estudadas e implementadas no empreendimento.

Este trabalho visa apresentar uma alternativa de geração de energia renovável para o empreendimento, através da avaliação do potencial de geração de energia fotovoltaica nas áreas disponíveis dos telhados dos prédios administrativos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo abordará os conceitos necessários para entendimento das discussões que serão feitas nos capítulos seguintes e está dividido em 3 tópicos: Energia Solar no Brasil e Mundo, Energia Fotovoltaica e Sistemas de Informação Geográfica.

3.1 ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO

A energia solar é a energia eletromagnética proveniente do sol, que se propaga pelo espaço e atinge a superfície da Terra constantemente. Segundo Pereira (2002) a radiação solar é a fonte primária de todos os processos químicos, físicos e biológicos, e pode ser aproveitada de várias formas, tais como: biomassa, aquecimento de ar e água, geração de energia elétrica ou aproveitamento térmicos.

Vichi (2009) diz que se apenas 0,1% da energia solar pudesse ser convertida com eficiência de 10%, a quantidade de energia gerada seria quatro vezes maior que a capacidade mundial total, que é de 3000GW.

O aproveitamento da energia solar para as diversas necessidades humanas pode se dar de diversas formas. PEREIRA (2017, p. 52) declara que:

Nas temperaturas mais baixas, próximas à temperatura ambiente e chegando à faixa em torno dos 100°C, uma série de aplicações podem ser feitas (secagem, controle térmico de ambientes, processos que usam água aquecida), porém, deve-se destacar o aquecimento de água para uso doméstico, que é a aplicação da energia solar mais difundida atualmente. À medida que temperaturas mais altas são necessárias, surgem possibilidades de aplicação como: processos industriais que demandam vapor, refrigeração, fornos, entre outras. (PEREIRA, 2017, p. 52).

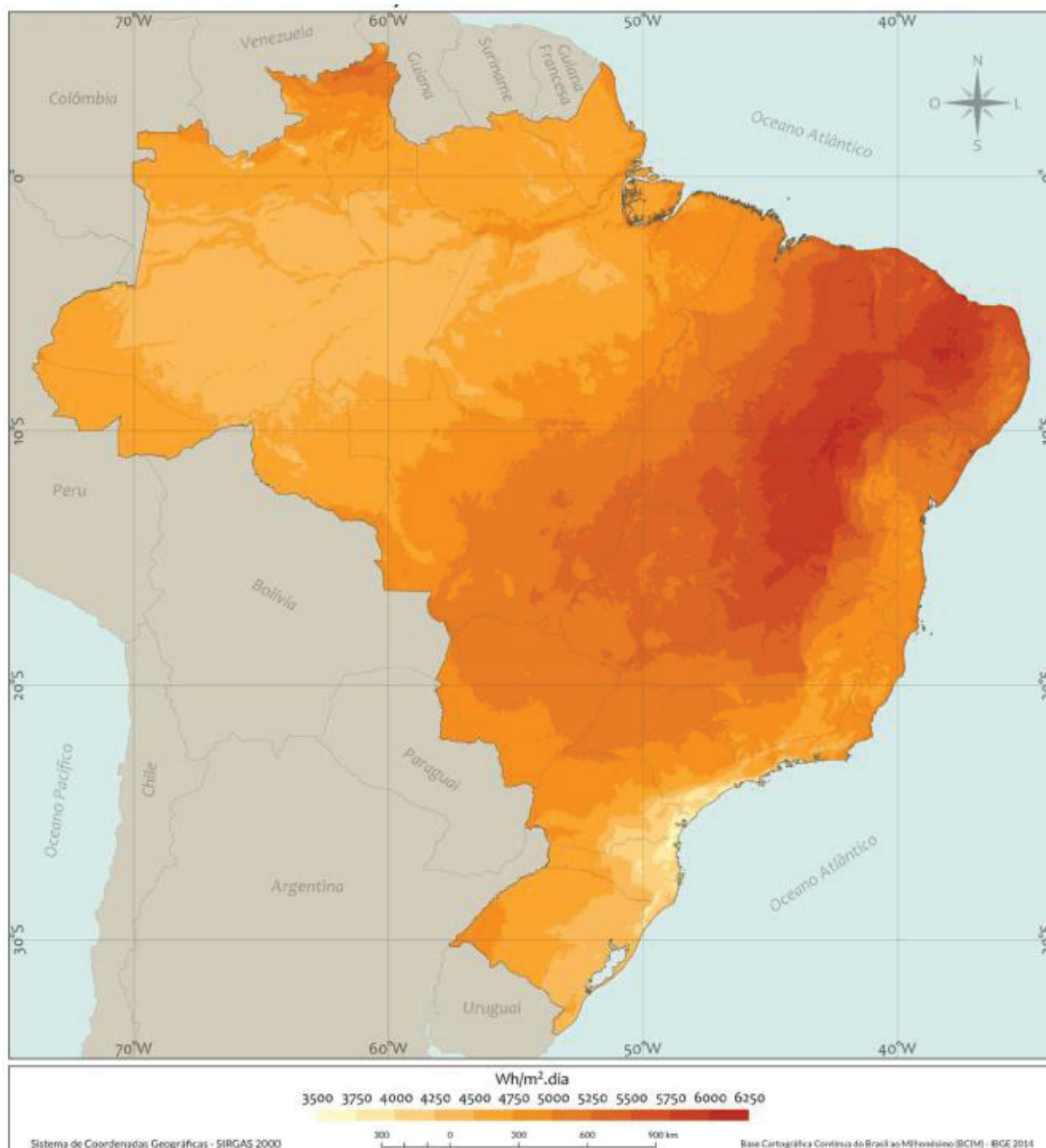
“O Brasil é um país com alto índice de irradiação solar, sendo o uso desta energia renovável uma importante alternativa na busca por uma sociedade sustentável” (DA SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 860).

De acordo com Vargas (2021) o território brasileiro possui alto potencial para captação de energia solar, com variações de disponibilidade energética de acordo

com cada região, sendo o Nordeste com 5,9 kWh/m², o Centro-Oeste com 5,7 kWh/m², o Sudeste 5,6 kWh/m², a região Norte com 5,5 kWh/m², e a região Sul com 5,2 kWh/m².

Na figura 1 pode-se verificar a média anual de irradiação global horizontal no Brasil.

FIGURA 1 - TOTAL DIÁRIO DE IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL | MÉDIA ANUAL



FONTE: BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (2022).

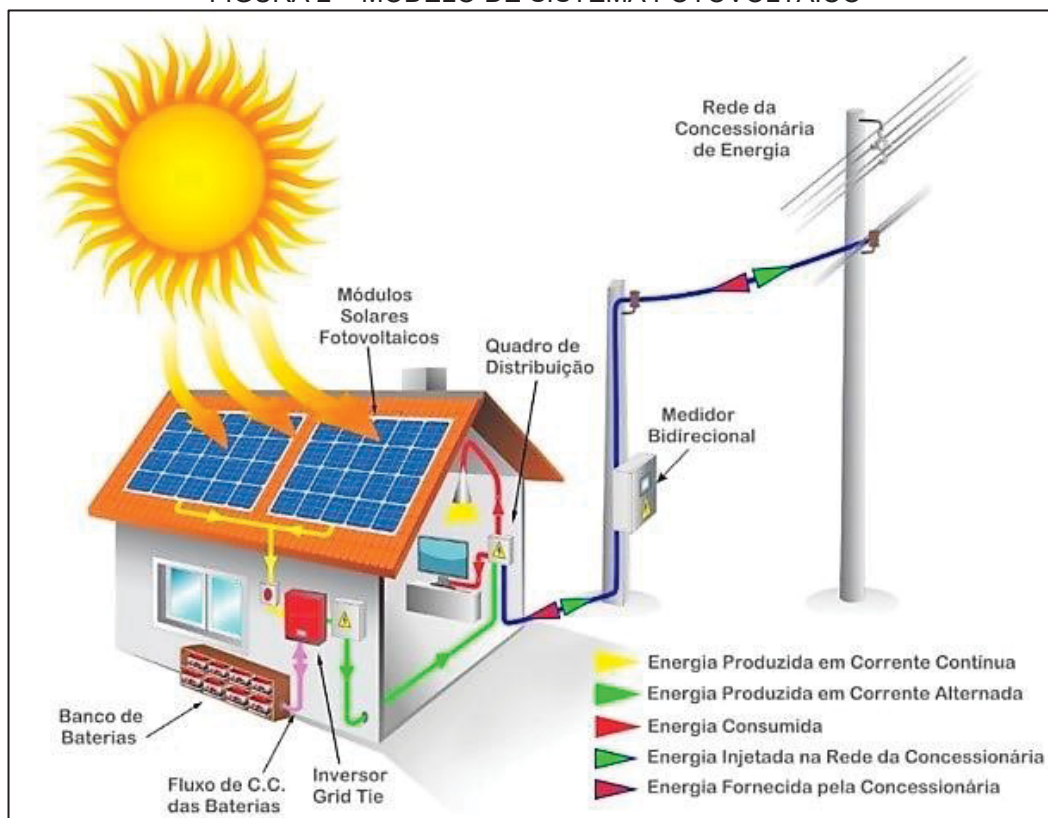
No entanto, apesar do alto índice de irradiação solar disponível no país, a oferta de energia elétrica proveniente de fonte solar representa apenas 2,4% do total disponível (Balanço Energético Nacional, 2022).

3.2 RADIAÇÃO SOLAR E ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia solar é a radiação eletromagnética proveniente do sol e transmitida ao nosso planeta através do espaço. Essa radiação é constituída de ondas eletromagnéticas que possuem diferentes frequências e comprimentos de onda, podendo ser medida em fluxo de potência quando se trata de irradiância solar, ou por unidade de área quando se trata de irradiação solar (DA SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 864).

Para produção de energia fotovoltaica o sistema utilizado converte a radiação solar diretamente em energia elétrica (DA COSTA; 2022, p. 18), figura 2.

FIGURA 2 – MODELO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO



FONTE: DA COSTA (2022).

Segundo PINHO e GALDINO (2014, p. 103), o efeito fotovoltaico foi descoberto por Becquerel em 1839, quando observou que ao iluminar uma solução

ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nessa solução. Os primeiros dispositivos denominados de células solares surgiram nos Estados Unidos e foram fabricados a partir de lâminas de silício cristalino, com eficiência de 6%, potência de 5mW e área de 2cm². Atualmente, no entanto, as células fotovoltaicas são fabricadas a partir de lâminas de silício monocristalino ou policristalino, um material semicondutor capaz de conduzir corrente elétrica.

PEREIRA (2017, p. 52) relata que:

Por meio do processo chamado dopagem de semicondutores, se adiciona ao cristal intrínseco uma pequena quantidade de impureza com propriedades adequadas para afetar o comportamento elétrico do semicondutor, obtendo-se dois tipos de materiais com cargas diferentes. Um material com falta de elétrons e cargas positivas, que se refere a dopagem do boro ou dopagem tipo p, e outro com elétrons livres e cargas negativas, que se refere a dopagem do fósforo ou simplesmente chamada de dopagem tipo n. Assim, a célula fotovoltaica é constituída por uma camada de material tipo p e uma camada de material tipo n, formando uma junção p-n. A exposição à luz, faz com que os elétrons presentes na camada p se movem para a camada n, gerando um potencial negativo no material n devido ao excesso de elétrons e consequentemente um potencial positivo na camada p devido às brechas que surgiram pela saída dos elétrons. A barreira potencial mantém os elétrons distantes das brechas de modo que ocorra uma diferença de potencial nas extremidades do material semicondutor. Quando fios são colocados nestas extremidades, fazem com que ocorra um fluxo de corrente elétrica, conduzindo os elétrons de volta à camada p, reiniciando assim, todo processo descrito anteriormente. Deste modo, a luz solar fornece energia para impulsionar os elétrons em um único sentido, estabelecendo uma corrente elétrica contínua. (DA COSTA; 2022, p. 20).

3.3 COMPONENTES DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Conforme exemplificado na figura 2, um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica é composto por um serie de equipamentos, sendo estes os principais:

- **Painel Fotovoltaico**

O painel fotovoltaico é por um conjunto de módulos e cada módulo por um conjunto de células conectadas em arranjos que produzirão tensão e correntes suficientes para utilização da energia. Os painéis fotovoltaicos são instalados em estruturas de suporte e interligados por cabeamento elétrico.

Os módulos fotovoltaicos podem ser associados em série ou em paralelo para aumento de tensão ou aumento de corrente elétrica conforme a necessidade do projeto (MITSUHASHI, 2019)

As células presentes nos painéis fotovoltaicos são feitas geralmente de silício monocristalino, formadas por um único cristal de silício com eficiência máxima é de 23%, silício policristalino, formado por um agrupamento de silício em uma única barra retangular e com eficiência abaixo de 15%, e silício amorfo, que é uma das primeiras tecnologias e possui eficiência entre 7% e 10% (MITSUHASHI, 2019).

Em um sistema fotovoltaico, para obter um melhor aproveitamento da irradiação solar, o coletor ou painéis solares, pode ser ajustado conforme a latitude, que é denominado como irradiação solar no plano inclinado e o período do ano que possua maior tempo de radiação. Como o Brasil localiza-se no hemisfério sul, as placas devem ser orientadas para o norte geográfico com a angulação similar ao da latitude local (PINHO; GALDINO, 2014).

- **Inversores e Controladores de Carga**

Segundo PINHO e GALDINO (2014) inversores são dispositivos eletrônicos que fornecem energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua. A energia em corrente contínua pode ser proveniente de baterias, células e combustível ou módulos fotovoltaicos. Já a tensão em corrente alternada deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado a carga que deve ser alimentada. Em caso de sistemas conectados à rede (on-grid), a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada como a tensão da rede.

Os controladores de carga são componentes críticos em sistemas fotovoltaicos isolados (*off-grids*) para proteção das baterias em caso de falhas. A utilização desses equipamentos permite uma otimização no sistema de dimensionamento das baterias, bem como em seu carregamento, desconexão, e

variações de consumo. Cabe destacar também que os controladores de carga devem ser especificados segundo o tipo de bateria, regime de operação, tensão e corrente de operação do sistema. (PINHO; GALDINO, 2014).

- **Banco de baterias**

O banco de baterias é utilizado em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica, servindo para armazenar a energia gerada pelos painéis durante o dia, atendendo a demanda por consumo durante a noite ou dias com baixos níveis de irradiância solar. O banco de baterias também pode ser utilizado em sistemas conectados à rede de distribuição, entrando em operação no caso de falta de energia da rede elétrica. As baterias podem ser de diferentes matérias tais como Níquel, Cádmio e Lítio (PINHO; GALDINO, 2014).

Por fim, cabe destacar que devido a popularização esta tecnologia, atualmente no mercado é possível adquirir os componentes do sistema de diferentes fabricantes, modelos e especificações técnicas, adequando assim as necessidades de cada projeto.

3.4 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Segundo CÂMARA e ORTIZ (1998), um Sistema de Informação Geográfica – SIG é constituído por um conjunto de “ferramentas” especializadas em adquirir, armazenar, recuperar, transformar e emitir informações espaciais. Esses dados geográficos descrevem objetos do mundo real em termos de posicionamento, com relação a um sistema de coordenadas, podendo ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento.

Relativo à aplicabilidade de um SIG para a temática da energia solar, Fernandes (2015, p. 30), diz que:

"Os SIG apresentam-se como uma importante ferramenta para a avaliação dos recursos solares, já que, a interação da radiação solar com o ambiente natural e humano é muito variável e complexa. Neste cenário, os SIG constituem-se como a ferramenta mais

adequada para o processamento de informações espaciais (2015, p. 30).

Neste trabalho a principal ferramenta de SIG utilizada foi o software ARCGIS, que permite dentre outras funções, a criação de mapas e análise de dados espaciais de todo o mundo.

4 METODOLOGIA

Este capítulo abordará a metodologia utilizada para coleta e análise de dados utilizados no trabalho.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

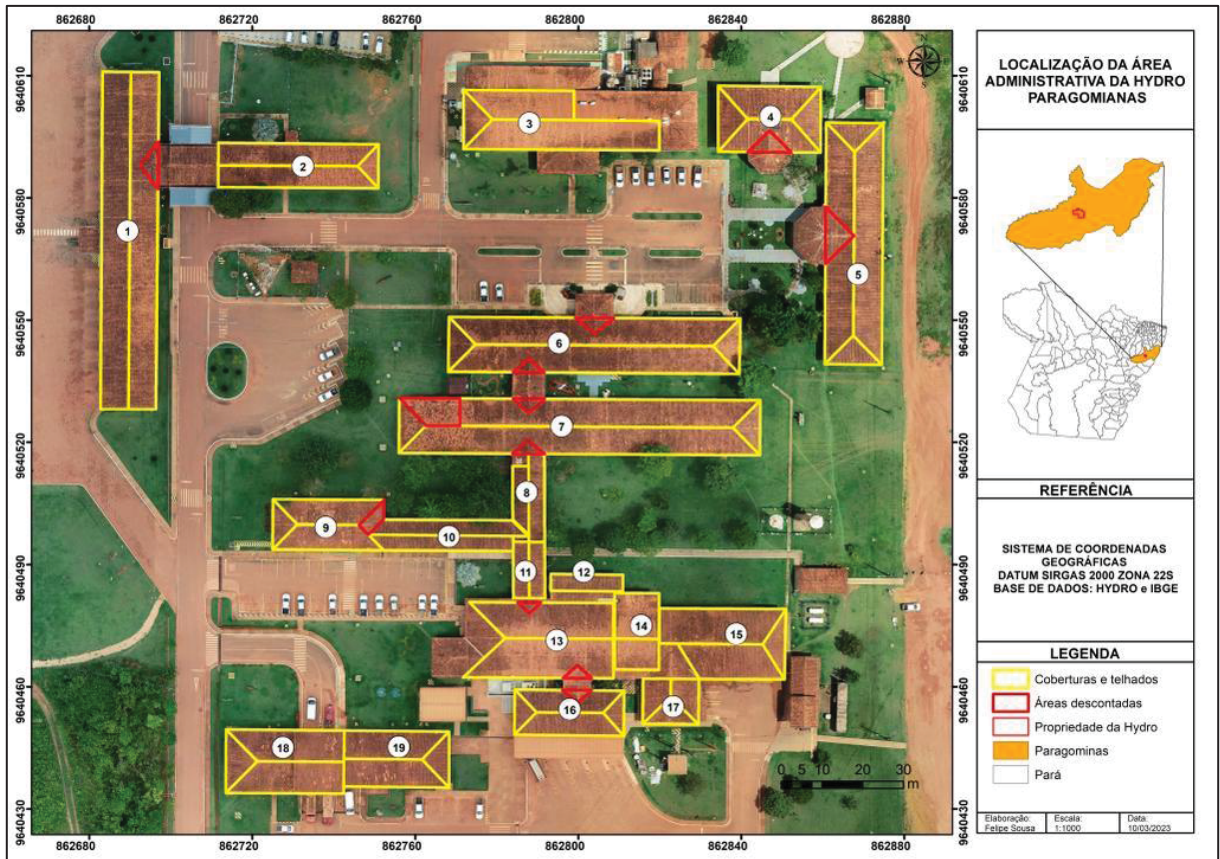
Este trabalho foi realizado tendo como área de estudo para a instalação dos painéis solares, os prédios do setor administrativo da MPSA localizados aproximadamente nas coordenadas geográficas: -3,245769° latitude e -47,738211° longitude. Para este trabalho, os prédios do setor administrativo compreendem o refeitório, laboratório, diretoria, portaria, rodoviária, centro de treinamento, meio ambiente, controladoria, infraestrutura, saúde e segurança do trabalho.

Cabe destacar, no entanto, que área dos prédios do setor administrativo não possui medidor de energia específico que para aferir o consumo de energia específico para essa áreas, de forma que a energia do consumida nos prédios administrativos compõe a energia mensurada nas **áreas comuns** do empreendimento. Tais áreas abrangem: prédios do setor administrativo, áreas operacionais exceto a planta de beneficiamento e o bombeamento do mineroduto, sistema de aspersão de vias de acessos utilizados na área de mina, sistema de iluminação das áreas operacionais, cancelas das portarias de acesso à área de mina, área de recepção de animais silvestres, bombas de captação de águas subterrâneas e a central de materiais descartados.

Segundo as informações disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o município de Paragominas possui uma área territorial de 19342,6 Km², aproximadamente 115838 habitantes e está localizado na mesorregião do sudeste paraense (IBGE, 2023).

No mapa da figura 3 é possível identificar a área de estudo e a localização do município de Paragominas.

FIGURA 3 – ÁREA DOS TELHADOS MAPEADOS



FONTE: SOUZA (2023)

4.2 MAPEAMENTO DA ÁREA DOS TELHADOS

A área disponível para a instalação dos painéis solares foi obtida através do uso das ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Utilizando as ferramentas de geoprocessamento, levantou-se as áreas de estudo através de ortomosaico, que consiste em um conjunto de ortofotos que expressam posições ortográficas verdadeiras. Tal recurso é propiciado por meio de mapeamento aéreo de drone, o qual captura dados com os sensores de câmeras RGB e multiespectrais, reunindo informações relativas à topografia e fotogrametria do espaço estudado.

Na figura 4 observa-se a ortofoto parcial da área do empreendimento na qual é possível verificar a área dos prédios administrativos no canto superior esquerdo, em comparação as áreas da planta de beneficiamento ao meio, e áreas a direita na qual se localizam oficinas mecânicas, pátios de manobra e almoxarifado.

FIGURA 4 – ORTOFOTO PARCIAL DA MPSA



Fonte: SOUZA (2023).

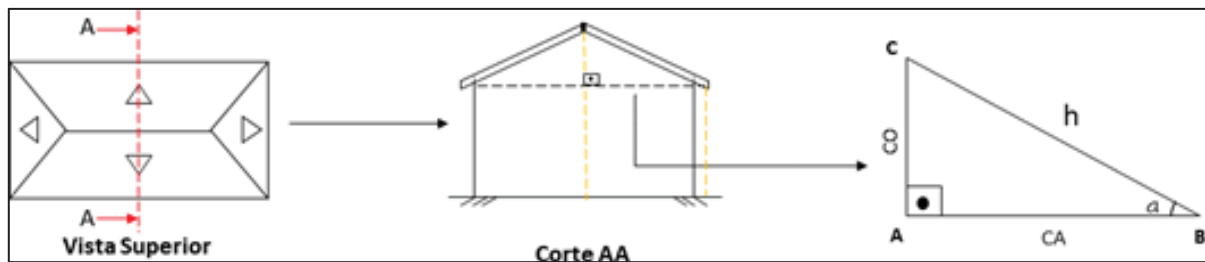
4.3 INCLINAÇÃO DOS TELHADOS

A inclinação dos telhados é uma informação necessária para que a inclinação do módulo fotovoltaico seja determinada de maneira que a eficiência do sistema seja a melhor possível. Tal informação foi obtida através de coletas de dados primários em campo e do tratamento de dados por meio de aplicação de relações trigonométricas.

A altura dos telhados foi determinada pelo equipamento hipsômetro, medindo-se as cotas das estruturas cumeeira e beiral das coberturas. Em seguida aplicou-se relações trigonométricas a fim de medir as inclinações dos telhados.

Conforme ilustra a figura 5, após identificadas as cotas da cumeeira e do beiral dos telhados, foi possível estimar as medidas inerentes ao cateto oposto (CO) e ao cateto adjacente (CA). Posteriormente, utilizou-se as razões trigonométrica de seno, cosseno e tangente para determinação da medida da hipotenusa e de ângulos.

Figura 5 – ILUSTRAÇÃO APLICAÇÃO DAS RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS



FONTE: SOUZA (2023),

Segundo PINHO e GALDINO (2014, p. 216) para geração máxima de energia ao longo do ano, o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico deve ser igual a latitude do local onde o sistema será instalado, no entanto, para áreas muito próximas do equador, com latitudes entre -10° e $+10^\circ$ aconselha-se uma inclinação mínima de 10° para favorecer a autolimpeza dos módulos através da ação da água da chuva. Nota-se que a latitude do local desse estudo é inferior a 4° , localizando-se, portanto, na faixa próxima ao equador.

4.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Para estimar o potencial de geração de energia fotovoltaica, considerou-se as informações de irradiação disponíveis no site do Centro de Referência Para as Energias Solar e Eólica (CRESEB), a fim de encontrar a irradiação solar nas coordenadas referentes a localização dos prédios administrativos. O cálculo considerou o maior valor de irradiação média anual no plano inclinado, de **4,78 Kwh/m²/dia**.

Adicionalmente, verificou-se a base de dados do disponíveis no site do laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), que apresenta o valor de irradiação média anual no plano inclinado de **4,77 Kwh/m²/dia**, valor semelhante ao disponibilizado no site do CRESEB, figura 6.

Figura 6 – IRRADIAÇÃO SOLAR NO PLANO INCLINADO EM PARAGOMINAS, PA - BRASIL

Estação: Paragominas Município: Paragominas, PA - BRASIL Latitude: 3,201° S Longitude: 47,749° O Distância do ponto de ref. (3,24° S; 47,73° O): 4,8 km															
#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
✓	Plano Horizontal	0° N	4,48	4,53	4,61	4,63	4,64	4,88	4,95	5,17	5,20	4,95	4,65	4,50	4,77
✓	Ângulo igual a latitude	3° N	4,40	4,48	4,61	4,67	4,73	5,00	5,06	5,25	5,22	4,91	4,57	4,42	4,78
✓	Maior média anual	5° N	4,35	4,45	4,60	4,69	4,78	5,07	5,13	5,29	5,22	4,88	4,52	4,36	4,78
✓	Maior mínimo mensal	3° S	4,54	4,56	4,61	4,58	4,55	4,75	4,83	5,09	5,18	4,98	4,71	4,58	4,75

FONTE: CRESEB (2018).

Além de considerar a irradiação solar emitida para o local do projeto, a energia gerada por um sistema fotovoltaico depende também da potência gerada pelos módulos fotovoltaicos, equipamentos que são disponibilizados em diversas configurações de dimensão (área ocupada), potência e eficiência. Assim sendo, para este trabalho optou-se por considerar um painel com alta capacidade de potência gerada por módulo, sendo escolhido o módulo BiHiKu7 Bifacial Mono Perc com **potência máxima de 670W** da fabricante CanadianSolar e eficiência de 21,7%.

A estimativa de energia gerada por um sistema fotovoltaico deve considerar fatores de perda, tais como: perdas por temperatura, incompatibilidade elétrica, direcionamento menos favorável do sistema, perdas por transmissão etc. LIMA e PESTANA (2018, p. 9) consideram um fator de rendimento de **79% ou 0,79**, percentual este que foi utilizado para os cálculos de estimativa deste trabalho.

Para estimativa da energia gerada na área total mapeada dos telhados, considerou-se a seguinte equação:

$$Energia(geração) = Potência(painéis) \times [Tempo(exposição) \times Rendimento]$$

Considerando que a variável *Tempo (exposição)* será dada pela irradiação anual média de **4,78 Kwh/m²/dia** e o *Rendimento* é igual a **0,79**, faz necessário calcular a variável *Potência (painéis)*, considerando a equação abaixo:

$$Potência(painéis) = Quantidade (painéis) \times Potência (Painel individual)$$

Onde a *Potência (Painel individual)* será dada pela potência máxima de 670w correspondente ao modelo de painel fotovoltaico escolhido e a *Quantidade (painéis)* será dada através da estimativa de painéis possíveis de serem instalados na área total

disponível, considerando que cada módulo fotovoltaico tem **dimensão aproximada de 3,1m²**.

Para os cálculos matemáticos, considerou-se toda a área mapeada nos telhados dos prédios administrativos, desconsiderando a impossibilidade de alocação dos painéis retangulares em áreas de “quinas” (áreas de vértices dos triângulos), onde um módulo não poderia de fato ser instalado para o aproveitamento da área.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ÁREA DISPONÍVEL, ORIENTAÇÃO GEOGRÁFICA E INCLINAÇÃO DOS MÓDULOS

A partir da análise dos dados geoespaciais obtidos, foi possível levantar um quantitativo equivalente a **10051,6 m²** de área total disponível de cobertura nos telhados, distribuído entre 19 unidades de prédios presentes no setor administrativo. Somente as áreas delimitadas em amarelo (figura 3) foram consideradas no levantamento, haja vista que as áreas em vermelho possuíam equipamentos ou disposição de telhado, que poderiam inviabilizar a instalação de um painel solar.

Na tabela 1 se pode verificar a área em m² levantada para cada prédio conforme a numeração de 1 a 19.

TABELA 1 – ÁREA DE TALHADOS DISPONÍVEIS

Prédio	Área Total (m ²)	Orientação do Telhado (m ²)			
		Norte	Sul	Leste	Oeste
1	1173,1	N/A	N/A	573,5	599,7
2	480,6	211,5	211,5	57,7	N/A
3	1133,9	356,4	673,8	N/A	103,7
4	514,2	210,3	182,1	60,9	60,9
5	811,4	51,7	51,7	378,5	329,7
6	985,1	442,8	447,9	47,1	47,1
7	1157,2	570,8	492,4	47,0	47,0
8	208,3	N/A	N/A	87,2	121,1
9	316,1	138,5	138,5	N/A	39,2
10	269,5	138,3	131,2	N/A	N/A
11	111,2	N/A	N/A	55,6	55,6
12	74,8	74,8	N/A	N/A	N/A
13	587,0	277,0	309,9	N/A	N/A
14	209,3	125,8	83,4	N/A	N/A
15	540,9	254,3	180,4	106,2	N/A
16	314,3	119,1	130,0	32,6	32,6
17	207,5	N/A	96,1	55,7	55,7
18	538,9	206,1	206,1	N/A	126,7
19	418,2	161,6	161,6	95,0	N/A
Total	10051,6	3339,1	3496,6	1597,0	1618,8

FONTE: SOUZA (2023).

Conforme detalhado anteriormente, a orientação dos painéis é uma variável que influencia no rendimento dos módulos fotovoltaicos de forma que os equipamentos instalados no hemisfério sul do planeta devem ser voltados preferencialmente para o norte, no entanto considerando o objetivo de estimar o máximo potencial possível de geração de energia solar nas áreas de telhados disponíveis, considerou-se no cálculo a área dos telhados nas quatro orientações, norte, sul, leste e oeste.

No que se refere a Inclinação dos telhados, os 19 prédios apresentaram inclinações que variam entre 13° e 25°, valores acima da inclinação recomendada para a instalação dos painéis solares na latitude da área de estudo. Considerando a inclinação indicada na literatura (inclinação mínima de 10°) para latitudes próximas da linha do equador, é recomendado avaliar os tipos de suportes disponíveis no mercado que possibilitem correções de angulação para que a inclinação seja reduzida nos casos de maior diferença e eliminadas nos casos de menor diferença, sem que haja comprometimento na segurança da instalação dos módulos.

5.2 ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA

Para estimar o potencial de energia possível de ser gerada na área disponível, foram executados os cálculos mostrados a seguir.

Para a estimativa de irradiação foi considerada a área total disponível de 10051,6 m², na qual poderia ser instalado até 3235 módulos solares do tipo escolhido para este trabalho. Veja a seguir:

$$Quatidade(paineis) = \frac{\text{Área total (m}^2\text{)}}{\text{Área do Paineis (m}^2\text{)}}$$

$$Quatidade(paineis) = \frac{10051,6}{3,1m^2}$$

$$Quatidade(paineis) = \mathbf{3235}$$

A potência total gerada em KWp utilizando-se 3235 painéis foi obtida através da seguinte equação:

$$Quatidade(paineis) = \frac{\text{Potência (painéis)}}{\text{Painel}}$$

$$3235 = \frac{\text{Potência (painéis)}}{670W}$$

$$3235 = \frac{\text{Potência (painéis)}}{670W}$$

$$\text{Potência (painéis)} = \mathbf{2168,0 \text{ KWp}}$$

Em seguida calculou-se a energia total gerada em KWh/dia, gerada pelo sistema considerando a incidência de radiação e o rendimento estimado. Veja a seguir:

$$\text{Energia(geração)} = \text{Potência(painéis)} \times [\text{Tempo(exposição)} \times \text{Rendimento}]$$

$$\text{Energia(geração)} = 2168,0 \text{ KWp} \times [4,78 \text{ KWh/m}^2 \times 0,79]$$

$$\text{Energia(geração)} = 2168,0 \text{ KWp} \times [4,78 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \times \text{dia}} \times 0,79]$$

$$\text{Energia(geração)} = \mathbf{8186,8 \text{ KWh/dia}}$$

Considerando que a base de dados de consumo de energia da MPSA está expressa em MWh/mês (tabela 2), para efetiva comparação entre a energia gerada e a demanda mensal por energia, é necessário converter a energia gerada em KWh/dia para MWh/mês, bastando multiplicar o resultado por 30 (nº de dias em um mês), e dividir o montante por 1000 para conversão da unidade *quilo* para *mega*, obtendo-se o seguinte valor:

$$\text{Energia(geração)} = \mathbf{245,6 \text{ MWh/mês}}$$

Conforme pode-se verificar na tabela abaixo, a aferição de energia na MPSA é mensurada de três formas: energia gasta para a atividade de Beneficiamento (**Eletricidade Beneficiamento**), energia gasta para bombeamento (**Eletricidade Bombeamento**) do mineroduto, e energia gasta nas áreas comuns (**Eletricidade Áreas Comuns**), que correspondem as áreas dos prédios do setor administrativo e as áreas de suporte operacional às atividades conforme mencionado anteriormente.

TABELA 2 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM 2022, EM MWH/MÊS

2022	Eletricidade Beneficiamento	Eletricidade Bombeamento	Eletricidade Áreas Comuns	Total
Janeiro	24140,3	5562,3	2449,7	32152,5
Fevereiro	20658,7	4760,1	2096,4	27515,3
Março	22090,6	5090,1	2241,7	29422,4
Abril	23714,7	5464,3	2406,5	31585,5
Mai	22400,9	5161,6	2273,2	29835,8
Junho	23058,6	5313,1	2340,0	30711,7
Julho	24526,6	5651,4	2489,0	32666,9
Agosto	24933,3	5745,1	2530,2	33208,6
Setembro	22579,7	5202,8	2291,3	30073,9
Outubro	25177,6	5801,4	2555,0	33534,0
Novembro	24008,4	5532,0	2436,4	31976,7
Dezembro	24158,1	5566,5	2451,6	32176,1
Total	281447,5	64850,7	28561,1	374859,3

FONTE: RELATÓRIO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL ANUAL - LINHA DE TRANSMISSÃO LO 5590/2011 (2023).

Desta forma, comparando o valor de energia fotovoltaica de 245,6 MWh/mês possível de ser gerada nos telhados dos prédios do setor administrativo, nota-se que o valor insuficiente para atender a eletricidade consumida mensalmente nas áreas comuns do empreendimento, haja visto que o consumo mensal dessas áreas varia entre 2096,4 e 2555,0 MWh/mês.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o potencial de geração de energia fotovoltaica nos telhados dos prédios administrativos da MPSA, bem como avaliar se a energia elétrica possível de ser gerada a partir da instalação de painéis solares nos telhados dos prédios do setor administrativo, seria suficiente para compensar o consumo de energia das áreas comuns do empreendimento. Adicionalmente, também foi proposto mapear as áreas de telhados disponíveis nos prédios do setor administrativo para instalação de painéis solares fotovoltaicos.

A partir do uso do Software ArcGIS, mapeou-se as áreas dos telhados dos prédios administrativos, sendo obtido um total de 10051,6 m². A orientação geográfica dos telhados também foi obtida neste trabalho, de forma que foi possível identificar quanto da área total estaria direcionada para a orientação norte, orientação mais indicada para instalação de módulos fotovoltaicos.

Outro dado relevante obtido foram as inclinações dos telhados e consequente inclinação na qual os módulos fotovoltaicos seriam instalados. Verificou-se que todos os telhados apresentaram inclinações superiores a 10°, valores acima daquele indicado na literatura como inclinação ideal para módulos fotovoltaicos próximos da linha do equador.

O potencial de geração de energia fotovoltaica foi obtido através cálculo matemático, considerando entre outros fatores a área total disponível nos telhados, a maior média anual de irradiação (4,78 KWh/m². dia) nas coordenadas do local de estudo, e o uso do modelo de painel Canadian Solar BiHiKu7 640~670W. Sendo obtido o potencial de geração de 245,6 MWh/mês, caso houvesse a instalação dos painéis solares nas áreas disponíveis.

Comparando a estimativa do potencial de geração de energia obtido de 245,6 MWh/mês com o consumo mensal das áreas comuns na MPSA, que variou entre 2096,44 e 2555,01 MWh/mês durante o ano de 2022, verificou-se que o potencial de energia gerado é insuficiente para compensar a energia mensal consumida nas áreas comuns do empreendimento, sendo de 8 a 10 vezes menor do que o total necessário para abastecer o consumo de Eletricidade das Áreas Comuns.

Considerando os resultados obtidos na análise, a geração de energia fotovoltaica a partir da instalação de painéis fotovoltaicos nas áreas dos telhados dos prédios administrativos pode não ser a opção mais viável do ponto de vista técnico, já

que o objetivo de suprir a demanda das áreas comuns não poderia ser alcançado. Já do ponto de vista financeiro, cabe ainda uma futura avaliação do custo de implantação dos painéis solares em comparação com custo do kWh pago atualmente, e custo projetado para os próximos anos, a fim de avaliar se haveria ou não uma economia financeira para o empreendimento.

A ideia de avaliar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica no empreendimento veio a partir crescente demanda global pelo uso de energia a partir de fontes renováveis de energia, a fim de diminuir a pegada de carbono das indústrias. Nota-se que a Norsk Hydro vem trabalhando globalmente com iniciativas na redução da pegada de carbono em sua cadeia, portanto é interessando que a Mineração Paragominas, uma de suas subsidiárias, continue a desenvolver projetos e soluções para aumentar a participação nestas iniciativas. Neste sentido o aproveitamento de uma área e estrutura já existente (telhados dos prédios), está alinhado a estratégia global da empresa, bem como as iniciativas locais da MPSA tais como: recuperação de áreas degradadas, adoção de tecnologia de *Taillings Dry Backfill* (retomada de rejeito seco para cavas lavradas), manutenção do Consorcio de Pesquisa em Biodiversidade, eletrificação da frota atual e avaliação de eletrificação da frota para projetos de expansão, redução do uso de veículos a diesel, e aumento do uso de veículos a álcool.

Cabe destacar a importância de fomentar estudos na temática das energias renováveis na região norte do Brasil, sabidamente uma localidade que necessita avançar no desenvolvimento econômico, e social, mantendo a preservação ambiental e uso racional dos recursos naturais disponíveis. Portanto é interessante que empresas já consolidadas no mercado local, caso da Mineração Paragominas, estudem as possibilidades de investir em novas fontes de energia renovável na região.

REFERÊNCIAS

CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. **Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral**. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA: CARTOGRAFIA, SENSORIAMENTO E GEOPROCESSAMENTO (Vol. 27, pp. 59-88). 1998.

CRESEB. Site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso 01 abr. 2023.

CSI SOLAR Co., Ltd. **BiHiKu7 Bifacial Mono Perc 640 W ~ 670W CS7N-640 | 645 | 650 | 655 | 660 | 665 | 670MB-AG**. PV Module Product Datasheet V2.52_EN. Mar. 2023

LABREN. Site do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia. Disponível em http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso 1 abr. 2023.

DA COSTA, M. V.; **Análise da viabilidade econômica da implantação de usina solar fotovoltaica como alternativa de reabilitação de áreas degradadas pela mineração: estudo de caso aplicado à uma pedreira**. 2022. 47 f. Monografia - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2022.

DA SILVA, H. M. F.; ARAÚJO, F. J. C., **Energia Solar Fotovoltaica No Brasil: Uma Revisão Bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação. São Paulo, v.8.n.03. mar. 2022. ISSN - 2675 – 3375

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE., **Balanço Energético Nacional 2022 | Ano base 2021 – Relatório Final**. Ministério de Minas e Energia – MME. Brasília – DF, 2022. 300p.

FERNANDES, T. M. F.; **Metodologias de aquisição de dados para o cálculo da radiação solar – aproveitamento da energia fotovoltaica no parque industrial de Lustosa**. 2015. 82 f. Dissertação - Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica, Faculdade de Letras, Universidade do Porto. Setembro. 2015

IBGE. Site do IBGE, 2023. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/paragominas/panorama>. Acesso em 26 mar. 2023.

HYDRO. Site da Hydro, 2023. Energia. Disponível em <https://www.hydro.com/pt-br>. Acesso 23 fev. 2023.

LIMA, L. M. R.; PESTANA, F. A. B.; **Geração de energia elétrica fotovoltaica – estudo de viabilidade econômica e *payback***. 2018. 18 f. Universidade de Araraquara, 2018.

Mineração Paragominas S/A. Terra Meio Ambiente. Linha de Transmissão LO 5590/2011. **Relatório de Informação Ambiental Anual. Ano de Referência: 2022.** Paragominas | PA. 2023

Mineração Paragominas S/A. Terra Meio Ambiente. Linha de Transmissão LO 5533/2010. Substituída pela LO 13289/2022. **Relatório de Informação Ambiental Anual. Ano de Referência: 2021.** Paragominas | PA. 2022

MITSUHASHI, B. S. **Estimativa do potencial de energia fotovoltaica em telhados com imagens obtidas por aeronaves remotamente pilotadas - RPA - *Remotely Piloted Aircraft* - Um estudo de caso.** 2019. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná. 2019.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. **Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo.** Scientia Agrícola, v.59, n.2, p.211-216. 2002

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. 36

SOUZA, S. F.; DA SILVA, P. L.; **APLICAÇÃO DE RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS E GEOINFORMAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE COBERTURA E TELHADOS DE EDIFÍCIOS EM ÁREA ADMINISTRATIVA.** 2023, 10f. Paragominas, Pará. 2023

VARGAS, C. M.; **Energia solar disponível e energia gerada em sistemas fotovoltaicos em diferentes inclinações e orientações de telhados de edificações.** 2021. 107 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná. 2021.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C.; **Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial.** Quimica Nova. 2009; vol. 32, No. 3, 757-767