



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ELETRICIDADE

Projeto Final de Curso

Proposta de implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica no estacionamento da faculdade de tecnologia: uso para redução de consumo de energia e para laboratório

Jeovana Silva Leão

Manaus

2022



Jeovana Silva Leão

Proposta de implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica no estacionamento da faculdade de tecnologia: uso para redução de consumo de energia e para laboratório

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica - Eletrotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Bezerra Trindade

Manaus

2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

L687p Leão, Jeovana Silva
Proposta de implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica no estacionamento da faculdade de tecnologia: uso para redução de consumo de energia e para laboratório / Jeovana Silva Leão . 2022
85 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Alessandro Bezerra Trindade
TCC de Graduação (Engenharia Elétrica - Eletrotécnica) - Universidade Federal do Amazonas.

1. energia solar. 2. off-grid. 3. on-grid. 4. bifacial. 5. half-cell. I. Trindade, Alessandro Bezerra. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela oportunidade de cursar engenharia elétrica e por ter me dado ânimo durante os últimos anos, apesar das dificuldades. À minha mãe, que desde o início de minha trajetória foi incentivadora e lutou junto comigo por todos os meus objetivos pessoais. Ao meu irmão pela parceria mesmo com a distância. Ao meu companheiro de vida, Leandro, pelo grande suporte em todos os âmbitos de minha vida.

Ao meu professor orientador, Alessandro Trindade, pela orientação, ajuda e acessibilidade. Orientação indispensável para realização deste trabalho.

À Francieny de Sá Marinho, discente de Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal do Amazonas pelo suporte com o memorial descritivo/estrutural apresentado neste trabalho. À direção da Faculdade de Tecnologia pela disponibilização de materiais necessários para a pesquisa feita neste trabalho.

Resumo

Há uma tendência mundial hoje em geração de energia elétrica por meio de fontes solares fotovoltaicas, aliando o uso de uma fonte renovável e limpa com a diminuição dos custos de instalação. Neste trabalho, foram propostos e projetados sistemas de energia solar fotovoltaica para provimento de energia elétrica à Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas e alimentação das lâmpadas dos corredores da unidade. Para isso, são tomadas as configurações *on-grid* (sistema conectado à rede elétrica local) e *off-grid* (sistema independente da rede elétrica local). Ademais, o sistema apresentado conta com a utilização do *software AutoCAD* para o *design* da disposição dos painéis solares, empregados em 4 tecnologias e modelos diferentes: convencional monocristalino (*Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS*), convencional policristalino (*Canadian HiKu Perc Poly CS3W-440P*), *half-cell* (*BYD MLK-36 Monofacial Perc half-cell 540W*) e bifacial (*BYD MLTK-36 Bifacial 540W*). Além disso, realizou-se o dimensionamento da carga a ser alimentada pelo sistema *off-grid* tendo como base a substituição das lâmpadas AC (*alternating current*, em português corrente alternada) existentes por lâmpadas DC (*direct current*, em português corrente contínua) de potência equivalente do modelo CP-T812-18W. Com o sistema aqui proposto, é esperada uma redução no consumo mensal de energia na unidade de cerca de 37.408 kWh/mês e uma redução nas emissões de gases equivalentes de CO₂ de 43,28% na atmosfera; tornando-se ainda laboratório para que discentes possam avaliar e conhecer as diferentes tecnologias de células solares ou de tipo de ligação possíveis.

Palavras-chaves: energia solar, *off-grid*, *on-grid*, bifacial, *half-cell*.

Abstract

There is a worldwide trend today in electricity generation through photovoltaic solar sources, combining the use of a renewable and clean source with the reduction of installation costs. In this work, a photovoltaic solar energy system was proposed and designed to supply electricity to the Faculty of Technology of the Federal University of Amazonas and supply the lamps in the corridors of the unit. For this, on-grid (system connected to the local electrical grid) and off-grid (system independent from the local electrical grid) configurations are taken. Furthermore, the presented system uses AutoCAD software for the design of the solar panels arrangement, used in 4 different technologies and models: conventional monocrystalline (Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS), conventional polycrystalline (Canadian HiKu Perc Poly CS3W-440P), half-cell (BYD MLK-36 Monofacial Perc half-cell 540W) and bifacial (BYD MLTK-36 Bifacial 540W). In addition, the sizing of the load to be fed by the off-grid system was carried out based on the replacement of existing AC (alternating current, in Portuguese alternating current) lamps by DC (direct current, in Portuguese direct current) lamps of equivalent power of the CP-T812-18W model. With the system proposed here, a reduction in monthly energy consumption in the unit of about 37,408 kWh/month and a reduction in CO₂ equivalent gas emissions of 43.28% in the atmosphere is expected; becoming a laboratory so that students can evaluate and learn about the different technologies of solar cells or the type of connection possible.

Keywords: solar energy, off-grid, on-grid, bifacial, half-cell.

Lista de Tabelas

Tabela 1 Número de empreendimentos no estado do Amazonas	18
Tabela 2 Dados elétricos do módulo <i>HiKu6 Mono CS6W</i>	36
Tabela 3 Dados elétricos do módulo <i>HiKu PERC POLY CS3W</i>	37
Tabela 4 Dados elétricos do módulo <i>MLTK-36 BIFACIAL</i>	39
Tabela 5 Dados elétricos do módulo <i>MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell</i>	40
Tabela 6 Irradiação solar média	42
Tabela 7 Dados elétricos lâmpada CP-T812-18W	43
Tabela 8 Dados elétricos luminária PRDSSL	45
Tabela 9 Quantidade de lâmpadas por bloco da FT	46
Tabela 10 Especificações e Condições Operacionais bateria UPLFP48-100-3U	48
Tabela 11 Especificações elétricas controlador de carga MPPT 100 600	49
Tabela 12 Medição de potência do transformador da subestação da FT	55
Tabela 13 Ficha de dados inversor MAC 36KTL3-XL	60
Tabela 14 Dados elétricos de cabos Cortox Solar/Cordeiro	74
Tabela 15 Orçamento dos componentes dos sistemas <i>on-grid</i> e <i>off-grid</i>	75
Tabela 16 Orçamento dos módulos fotovoltaicos	75

Lista de figuras

Figura 1 Expansão da matriz elétrica Brasileira	18
Figura 2 Uma célula de silício monocristalino	20
Figura 3 Uma célula de silício policristalino	21
Figura 4 Incidência da irradiação solar em módulos bifaciais	22
Figura 5 Projetos de módulos esquemáticos	25
Figura 6 Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	28
Figura 7 Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	30
Figura 8 Base <i>SunData</i> v 3.0	31
Figura 9 Fluxograma da metodologia	34
Figura 10 Desenho técnico do módulo <i>HiKu6 Mono CS6W</i>	35
Figura 11 Desenho técnico do módulo <i>HiKu PERC POLY CS3W</i>	37
Figura 12 Desenho técnico do módulo <i>MLTK-36 BIFACIAL</i>	38
Figura 13 Desenho técnico do módulo <i>MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell40</i>	
Figura 14 Coordenadas do Estacionamento da Faculdade de Tecnologia	41
Figura 15 Lâmpada CP-T812-18W	43
Figura 16 Área de circulação do estacionamento da Faculdade de Tecnologia	44
Figura 17 Luminária PRDSSL	44
Figura 18 Área da Faculdade de Tecnologia	45
Figura 19 Curva de carga da FT	47
Figura 20 Bateria UPLFP48-100-3U	48
Figura 21 Controlador de Carga MPPT 100 600	49
Figura 22 Transformador 225kVA	55
Figura 23 Transformador 500kVA	55
Figura 24 Planta baixa da FT	57
Figura 25 Inversor MAC 36KTL3-XL	59
Figura 26 Planta baixa do estacionamento da FT com disposição de módulos fotovoltaicos	63
Figura 27 Rampa de acesso ao estacionamento da FT	64
Figura 28 Posição de <i>container</i>	65
Figura 29 <i>Container reefer</i> 40ft	65
Figura 30 Corte AA"- Proposta 1	66

Figura 31 Corte BB'	66
Figura 32 Corte AA''- Proposta 2	66
Figura 33 Detalhamento da base	67
Figura 34 Detalhamento da parte superior	68
Figura 35 Vista de um módulo da estrutura para painéis solares	68
Figura 36 Corte/vista lateral dos módulos	69
Figura 37 Vista superior dos módulos	69
Figura 38 Vista frontal dos módulos	70
Figura 39 Vista de um módulo com os painéis implantados	70
Figura 40 Imagem do estacionamento da faculdade de tecnologia às 12:00hrs	71
Figura 41 Imagem do estacionamento da faculdade de tecnologia depois de 12:00hrs	71
Figura 42 Imagem da área superior do estacionamento da faculdade de tecnologia	72
Figura 43 Imagem geral do estacionamento da faculdade de tecnologia	72

Lista de abreviaturas e siglas

CO ₂	Dióxido de carbono
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FT	Faculdade de Tecnologia
ONU	Organização das Nações Unidas
REmap	<i>Renewable Energy Roadmaps</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SIN	Sistema Interligado Nacional
m-Si	Silício Monocristalino
p-Si	Silício Policristalino
a-Si	Silício Amorfo
CIS	Disseleneto de cobre e índio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CdTe	Telureto de cádmio
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
CPV	Célula fotovoltaica para concentração
DSSC	Células sensibilizadas por corante
OPV	Células orgânicas ou poliméricas
IEA	Agência Internacional de Energia
W	<i>Watts</i>

°C	<i>Celsius</i>
PID	<i>Potential-Induced Degradation</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
DOD	Profundidade de descarga
SOC	Estado de carga
NBS	Número de baterias em série
NBP	Número de baterias em paralelo
NPS	Número de painéis em série
NPP	Número de painéis em paralelo
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NBR	Norma Brasileira

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Objetivos	14
1.2. Objetivos Específicos	14
1.3. Organização da Monografia	14
2. Revisão da Literatura	16
2.1. Importância da Energia Elétrica	16
2.2. Energia solar fotovoltaica	19
2.2.1. Célula de Silício Monocristalino	20
2.2.2. Célula de Silício Policristalino	20
2.2.3. Módulos Bifaciais	21
2.2.4. Tecnologia <i>Half-cell</i>	24
2.2.5. Sistema Fotovoltaico <i>On-grid</i>	26
2.2.5.1. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico <i>On-grid</i>	28
2.2.6. Sistema Fotovoltaico <i>Off-grid</i>	29
2.2.6.1. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico <i>Off-grid</i>	30
3. Metodologia	33
3.1. Módulos fotovoltaicos	34
3.2. Dimensionamento do Sistema Solar Fotovoltaico <i>Off-grid</i>	41
3.2.1. Insolação Diária	41
3.2.2. Curva de Carga	42
3.2.3. Bateria	47
3.2.3. Controlador de Carga	49
3.2.4. Energia corrigida	50
3.2.5. Potência demandada	50
3.2.6. Quantidade de Painéis Solares, Controladores de Carga e Baterias	51
3.3. Dimensionamento do Sistema Solar Fotovoltaico <i>On-grid</i>	53
3.3.1. Insolação Diária Média Anual	54
3.3.2. Consumo Médio	54

3.3.3. Potência Diária Demandada	56
3.3.4. Quantidade de Painéis Solares	57
3.3.5 Inversor	59
4. Resultados	63
4.1. Projeto	63
4.1.1. Cortes	65
4.1.2. Estrutura	66
4.1.3. <i>Renders</i>	70
4.2. Cálculo de Queda de tensão DC	72
4.3. Orçamento	74
4.4. Economia gerada	76
5. Conclusão	78
Referências	79

1. Introdução

Em meio às mudanças climáticas cada vez mais alarmantes, atividades associadas às emissões de CO₂ são vetores que precisam ser transformados. Neste contexto, é importante destacar o papel da geração de energia por fontes renováveis, substituindo assim cada vez mais o consumo de combustíveis fósseis. Assim, pode-se encontrar o investimento nessas alternativas como uma das metas fundamentais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – energia limpa e acessível – além de estar presente no Acordo de Paris sobre alterações climáticas como necessárias para redução dos gases do efeito estufa (*European Council*, 2014).

Dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) confirmam que a matriz elétrica brasileira é, em seu maior percentual de geração, por fontes renováveis, sendo a geração por meio de hidroelétricas com maior capacidade instalada – cerca de 58,34% do total (ANEEL, 2021). Porém, quando se avalia os dados referentes aos empreendimentos outorgados em implantação, pode-se visualizar que a geração fotovoltaica segue uma tendência de expansão, compreendendo 52,83% do total de novas construções ainda não iniciadas (ANEEL, 2021). Os sistemas solares fotovoltaicos estão emergindo como a melhor solução em termos de custo-benefício para 75% das conexões necessárias no mundo (Hussein e Leal Filho, 2012), por este motivo, a expansão deste tipo de geração segue uma tendência mundial.

Dessa forma, ao considerar-se o consumo de energia da subestação que abastece a Faculdade de Tecnologia da UFAM, avaliou-se o potencial da criação de um projeto de um sistema solar fotovoltaico para diminuição do consumo de energia da concessionária e conseqüentemente do valor da fatura de energia. Ademais, a área central superior e inferior do estacionamento da FT é um lugar propício para a colocação de painéis solares para maior aproveitamento de horas de sol útil o que conseqüentemente geraria áreas de sombreamento para acomodação de veículos.

A falta de laboratórios com o foco em estudo de geração de energia fotovoltaica na FT acaba sendo um limitante para o desenvolvimento de

pesquisas na área, por esse motivo, o projeto irá trazer aos docentes e discentes um ambiente de teste e monitoramento de sistemas distintos (*minigrids*) com tecnologias convencionais e emergentes.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um sistema solar fotovoltaico no estacionamento da Faculdade de Tecnologia da UFAM.

1.2. Objetivos Específicos

- Dimensionar a parte elétrica do sistema solar fotovoltaico *on-grid* que vise a diminuição do consumo de energia elétrica da unidade.
- Dimensionar, no mesmo ambiente, um sistema solar fotovoltaico *off-grid* com baterias estacionárias e em corrente contínua, para energizar o sistema de iluminação dos corredores da unidade, permitindo funcionamento mesmo em caso de interrupções no fornecimento de energia elétrica.
- Utilizar 4 tecnologias de painéis solares para permitir a realização de práticas de laboratórios de alunos dos cursos da unidade: convencional monocristalino, convencional policristalino, *half-cell* e bifacial.
- Elaborar um orçamento do sistema proposto.
- Possibilitar o barateamento da fatura de energia da unidade acadêmica e para que se possa realizar práticas e testes laboratoriais.
- Propor uma estrutura para suportar os painéis solares que sirva ainda para que gere sombra para os carros estacionados no local.

1.3. Organização da Monografia

Para chegar-se a todos os objetivos descritos, esta monografia foi elaborada seguindo as seguintes etapas:

Etapa 1: Primeiramente houve uma revisão da literatura para exposição de referências relacionadas a importância da energia elétrica e conseqüentemente a necessidade de mudança na sua matriz para fontes de energia renováveis. Além disso, destacou-se a relevância da energia solar

fotovoltaica no âmbito do mercado mundial e sua tendência de crescimento. Ademais são mostrados conceitos de sistemas *off-grid* e *on-grid* e seus componentes.

Etapa 2: Obtenção de dados referentes a painéis solares de 4 tipos de tecnologia, sendo estas convencionais como células do tipo monocristalina e policristalina e de tecnologias emergentes como as *half-cells* e os módulos bifaciais. Definição de quantidade e disposição de componentes para os sistemas *off-grid* e *on-grid*.

Etapa 3: Realização de projeto, memorial estrutural e estudo de caso da economia gerada no consumo da Faculdade de Tecnologia, além do orçamento de projeto.

2. Revisão da Literatura

2.1. Importância da Energia Elétrica

A população mundial no ano de 2022 já chegou a 7,8 bilhões e de acordo com dados da ONU a taxa de crescimento populacional anual segue uma taxa de 1,1% com projeções que indicam uma desaceleração, porém, quando analisa-se a demanda mundial de energia elétrica, pode-se verificar que ela segue em constante crescimento, sendo previsto um aumento a uma taxa de 1,3% ao ano até o ano de 2040 (IEA, 2019). Apesar do aumento da demanda de energia elétrica, é importante ressaltar que no ano de 2030, cerca de 670 milhões de pessoas ainda permanecerão sem acesso a eletricidade (IEA, 2021), tal fato é ressaltado pela crise do Covid-19 que gerou uma estagnação do processo de acesso à energia entre os anos de 2019 e 2021, parâmetro este que seguia uma média de 9% de diminuição do número de pessoas sem acesso a eletricidade ao ano (IEA, 2021).

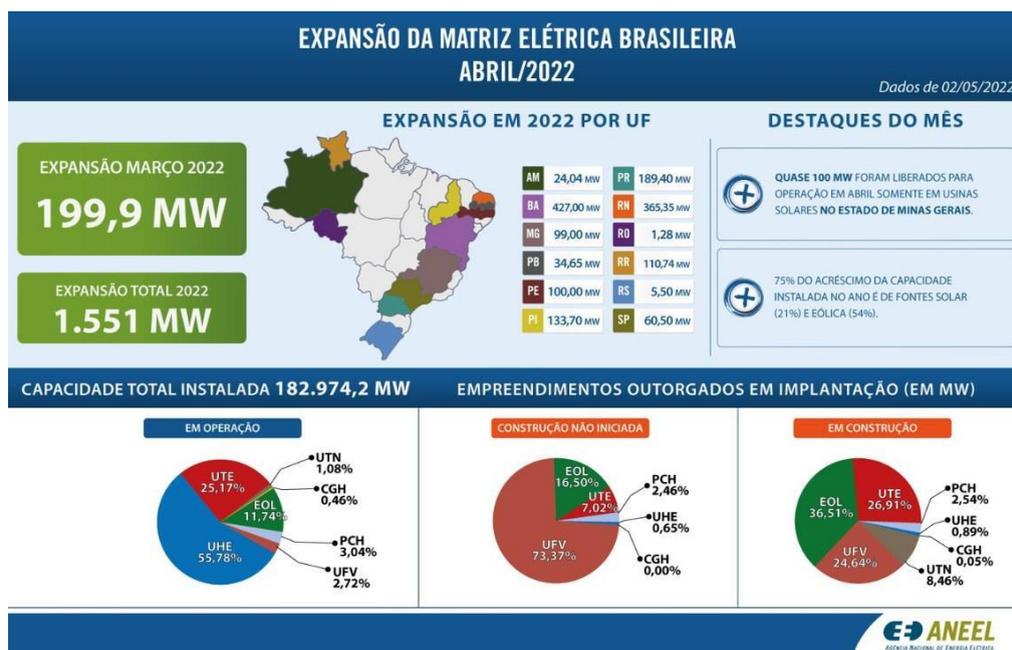
O acesso universal à energia é previsto no sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável, entretanto, países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos ainda sofrem os efeitos da desigualdade social, o que os priva do acesso a serviços básicos como a eletricidade. Nações como Nigéria, República Democrática do Congo e Etiópia não tiveram aumento no número de pessoas com acesso a energia elétrica (ONU, 2021). No Brasil, a situação segue este padrão principalmente para a população em regiões rurais, onde as condições de vida acabam sendo mais precárias devido a baixa renda. Todos esses dados apontam para a interligação entre o Índice de Desenvolvimento Humano e o acesso à energia, já que ela é essencial para fomentar as atividades produtivas já existentes e dá a possibilidade de desenvolvimento de atividades que dependem da energia (Coelho et al, 2015).

Neste contexto, ao considerar por exemplo a China, que é o país que mais emite gás de efeito estufa no mundo – cerca de 27% do total mundial de CO₂ (Regan e Dotto, 2021) – verifica-se que o país com maior investimento em energia renovável também é a China (UNEP, 2019), sendo a geração de

energia solar fotovoltaica destaque com um campo de futebol de painéis solares por hora sendo instalados (Gardiner, 2017). A implantação de energias renováveis vem crescendo em ritmo acelerado nos últimos anos, porém, entre todas as tecnologias, a energia solar fotovoltaica tem dominado o crescimento, chegando a 480 GW de potência instalada no final de 2018, representando uma taxa de crescimento ano a ano de 20% (IRENA, 2019). A literatura mostra através da análise REmap (*Renewable Energy Roadmaps*, programa que determina o potencial de regiões em ampliar a utilização de energias renováveis) da IRENA (*International Renewable Energy Agency*, em português Agência Internacional para as Energias Renováveis) que as instalações de energia solar fotovoltaica poderiam crescer até quase 18 vezes em 2050 relação a 2018 no total de capacidade instalada, chegando a 8519 GW (IRENA, 2019). Esse crescimento decorre da grande disponibilidade de recursos, do potencial de mercado e da competitividade de custos na geração de energia solar fotovoltaica.

No Brasil, essa tendência não é diferente. Ao avaliar os dados mais atuais da ANEEL referentes à capacidade total instalada, verifica-se que o percentual referente a energia solar fotovoltaica corresponde a cerca de 2,72% do total, capacidade maior que o ano anterior (1,55%). Ademais, quando se observa o percentual de usinas fotovoltaicas outorgadas em implantação entre as demais tecnologias, percebe-se a expansão desse tipo de geração, chegando a 73,37% do total de empreendimentos em construção não iniciada, sendo maior que no ano anterior (44,67%) (ANEEL, 2022). Tais dados podem ser verificados na Figura 1.

Figura 1 Expansão da matriz elétrica Brasileira



Fonte: ANEEL, 2022

Ao buscar-se a capacidade instalada no estado do Amazonas através dos dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)¹ é possível concluir que esse estado ainda possui uma matriz energética em seu maior percentual não renovável, sendo composto em 88,35% por geração por usinas termelétricas como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 Número de empreendimentos no estado do Amazonas

Número de Empreendimentos				
342				
Fonte	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Qtde	% (Pot. Fiscalizada)
UFV	651,48	651,48	93	0,03%
UHE	274.710,00	274.710,00	2	11,62%
UTE	2.277.312,40	2.088.020,90	247	88,35%

Fonte: SIGA, 2022

¹ O conjunto de dados extraídos do SIGA (banco de dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL) contém as informações dos empreendimentos de geração de energia elétrica do parque gerador nacional em diversas fases: desde etapas anteriores à outorgas até a revogação.

Apesar de se ter ciência que a capital e os municípios da região metropolitana de Manaus estão ligados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) – por esse motivo a composição da energia consumida por essas regiões acaba não sendo somente a gerada no estado – é importante fomentar o aumento de empreendimentos de geração por fontes renováveis a fim de seguir a tendência nacional e mundial já apontada. É importante salientar o potencial de horas de insolação que a região do Amazonas tem, sendo inclusive igual ou até maior que a de países onde geração de energia solar fotovoltaica é disseminada, como a Alemanha, que possui uma capacidade instalada significativa mesmo tendo uma insolação diária média anual de apenas 3,31 h/dia (*Global Solar Atlas*, 2021).

2.2. Energia solar fotovoltaica

Pode-se definir como energia solar fotovoltaica aquela gerada a partir da conversão da luz solar através da célula fotovoltaica. Tal energia é gerada em corrente contínua podendo ser convertida em corrente alternada através de conversores. Através do agrupamento de células fotovoltaicas eletricamente interligadas forma-se o módulo fotovoltaico o qual compõe a unidade básica comercial do gerador de energia fotovoltaico. Dentre as diversas tecnologias utilizadas na fabricação de células fotovoltaicas, Pinho et al descreve as três gerações classificativas.

A primeira geração é dividida em duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado, por ser considerada uma tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível. A segunda geração, comercialmente denominada de filmes finos, é dividida em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Esta geração apresenta menor eficiência do que a primeira [...]. A terceira geração, ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), testes e produção em pequena escala, é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*). (PINHO ET AL, 2014, p. 50 e 51).

Através da classificação apresentada, quando se verifica o mercado de painéis solares é possível observar que os módulos fotovoltaicos formados por

células de silício monocristalino e policristalino são as tecnologias mais convencionais. Atualmente, tecnologias como *half-cells* e módulos bifaciais estão ganhando espaço como mecanismos de aumento da eficiência na geração de energia.

2.2.1. Célula de Silício Monocristalino

O principal material da indústria fotovoltaica sempre foi a célula de silício cristalino, fabricada de um único cristal ou silício policristalino fundido que é fatiado em pedaços de cerca de 10×10 cm de área e $350 \mu\text{m}$ de espessura, conforme mostrado na Figura 2. Estas células apresentam eficiências entre 13 e 15% dependendo da qualidade do material e da tecnologia celular específica. O cristal único de silício é definido como tendo um tamanho de grão maior que 10 cm. Os módulos feitos desse tipo de célula são os de tecnologia mais madura do mercado. Fabricantes confiáveis deste tipo de módulo fotovoltaico oferecem garantias de até 20-25 anos em 80% da classificação da placa de identificação.

Figura 2 Uma célula de silício monocristalino



Fonte: Mohanty et al, 2016

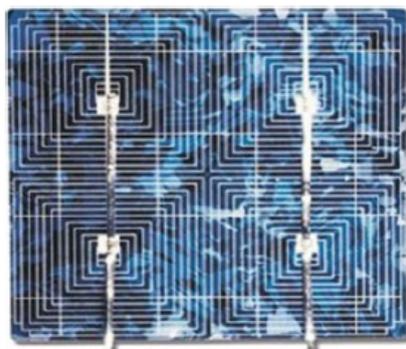
2.2.2. Célula de Silício Policristalino

Essas células são compostas de vários cristais de silício formados a partir de um lingote. Eles são também fatiados e depois dopados e gravados. Eles demonstram eficiências de conversão ligeiramente inferiores aos das células monocristalinas, geralmente de 13% a 15%. Fabricantes confiáveis

normalmente garantem módulos fotovoltaicos policristalinos para 20 anos. Células multicristalinas e policristalinas, respectivamente, têm tamanhos de grão que são 1 μm –1 mm e 1 mm–10 cm. As células nanocristalinas têm tamanho de grão inferior a 100 nm. A Figura 3 mostra um exemplo de célula policristalina.

Hoje, a grande maioria dos módulos fotovoltaicos (85–90% do mercado anual global) são baseados em silício cristalino. Espera-se que os módulos fotovoltaicos de silício cristalino permaneçam uma tecnologia fotovoltaica dominante até pelo menos 2020, com um mercado previsto a uma quota de cerca de 50% nessa altura. Isso se deve à sua tecnologia comprovada e confiável, longa vida útil e recursos primários abundantes. O principal desafio para os módulos de silício cristalino é melhorar a eficiência e a eficácia do consumo de recursos através da redução de materiais, conceitos de célula melhorados e automação de fabricação (IEA, 2013).

Figura 3 Uma célula de silício policristalino



Fonte: Mohanty et al, 2016

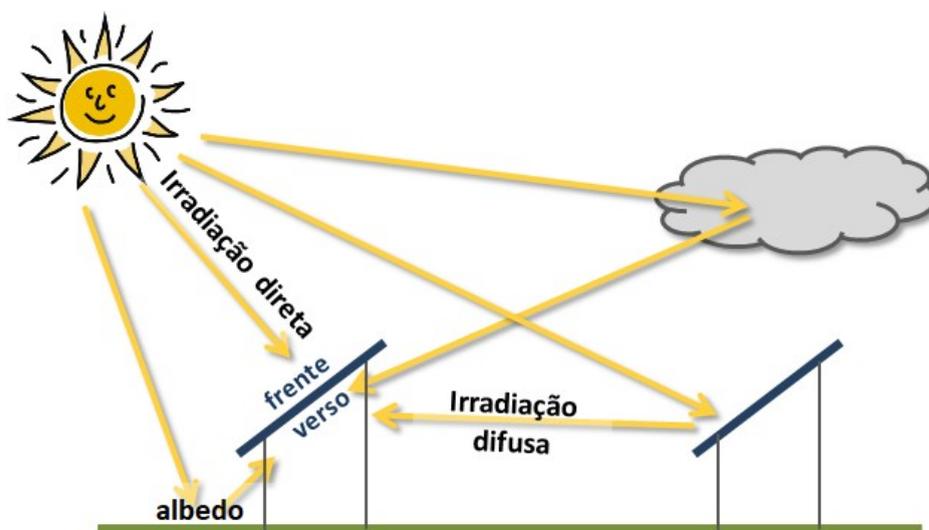
2.2.3. Módulos Bifaciais

A tecnologia de módulos bifaciais têm sido foco de interesse do mercado. Embora as células bifaciais tenham sido investigadas desde a década de 1980, o processo de fabricação em massa era muito complexo até então. No entanto, com os recentes avanços nos processos industriais, foi possível reduzir o custo de produção desta tecnologia a ponto de os módulos bifaciais estarem disponíveis em quase o mesmo preço por Wp que suas contrapartes monofaciais. Desta forma, espera-se que esta tecnologia seja responsável por

aproximadamente 70% da participação de mercado dos módulos fotovoltaicos até 2030.

Módulos bifaciais podem oferecer ganhos de geração de energia de até 25% quando comparados aos módulos convencionais (monofaciais), pois podem gerar energia de ambos os lados da célula, frontal e traseira, através da coleta de luz que incide diretamente na face frontal, assim como a luz refletida pelo solo. Portanto, o desempenho de módulos bifaciais em um sistema fotovoltaico depende não apenas da incidência de irradiação na superfície frontal, mas também na incidência de irradiação na superfície traseira dos módulos. Este último é fortemente dependente de condições específicas do local, como coeficiente de reflexão, estruturas de sistemas, altura e ângulo de inclinação dos módulos, entre outros.

Figura 4 Incidência da irradiação solar em módulos bifaciais



Fonte: Solarize, 2021

Kreinin et al realizou medições em módulos bifaciais em Jerusalém e destacou o aumento da contribuição da superfície traseira do módulo para a geração de energia com o aumento da irradiação difusa. Essa contribuição foi de 15% em maio e 7% em fevereiro. Pelaez et al obtiveram resultados experimentais de um sistema instalado em Oregon, EUA, com ganhos mensais de irradiação em as superfícies traseiras fotovoltaicas dos módulos variando entre 10% - 14,9%.

Yusufoglu et al avaliaram a influência de vários fatores relacionados com a configuração do sistema fotovoltaico com módulos bifaciais na geração de energia. Esses fatores foram: altura da mesa, albedo do solo, ângulo de inclinação, entre outros. Ao otimizar esses fatores, eles mostraram que os módulos bifaciais poderiam fornecer 25% mais energia em comparação aos módulos monofaciais.

Asgharzadeh et al também avaliou a influência dos parâmetros de instalação no ganho bifacial através de simulações usando o modelo ray tracing *RADIANCE* de Sandia. Eles descobriram que o ângulo ótimo de sistemas com módulos bifaciais é maior que o ângulo ótimo de módulos monofaciais e pode ser até aproximadamente 20 vezes superior em Albuquerque, EUA. Eles também observaram que sistemas fotovoltaicos de grande escala com módulos bifaciais proporcionam menos ganho do que sistemas de menor escala devido ao auto-sombreamento, e a diminuição da irradiância refletida pelo solo. Por um albedo de 21%, o módulo central de uma usina gera até 7% menos energia do que um único módulo bifacial isolado. Como módulos bifaciais começaram a ganhar espaço no mercado fotovoltaico recentemente, há uma variedade de problemas a serem investigados, como a validação da precisão nos resultados obtidos pelos modelos de estimativa de irradiância na parte traseira do módulo considerando a sazonalidade, não homogeneidade da irradiância incidente na parte traseira do módulo, entre outros.

Módulos bifaciais podem coletar luz solar tanto na parte frontal quanto na parte traseira, o que é possível com uma simples mudança no processo convencional de fabricação do módulo. Ao contrário de células convencionais monofaciais, as células bifaciais têm a parte traseira apenas parcialmente coberta por contatos de metal serigrafados, enquanto as células monofaciais têm sua parte traseira completamente coberta. Além disso, no nível do módulo, os módulos bifaciais apresentam uma tampa traseira transparente que pode ser uma folha traseira transparente ou vidro na traseira, enquanto os dispositivos monofaciais normalmente apresentam uma folha traseira opaca.

O uso de módulos bifaciais de vidro duplo tem algumas vantagens, tais como reduzir riscos relacionados à permeabilidade do módulo, como

degradação do encapsulante, delaminação, corrosão da linha de grade da célula e rastros de caracol. Em alguns casos, as camadas de vidro duplo reduzem riscos de PID (*Potential-Induced Degradation*), devido à ausência de uma armação metálica. Por outro lado, módulos bifaciais que usam uma folha traseira transparente tem algumas vantagens em comparação com vidro duplo, como menos peso, menos capacidade de aquecimento e um processo de fabricação semelhante ao dos módulos monofaciais. Na superfície frontal, esses módulos têm a mesma eficiência que os módulos monofaciais, com ganho de geração de energia devido à possibilidade de captação de energia com a superfície traseira. No entanto, este ganho depende de vários fatores, como albedo do solo, folga de altura, espaçamento entre linhas e inclinação do módulo.

2.2.4. Tecnologia *Half-cell*

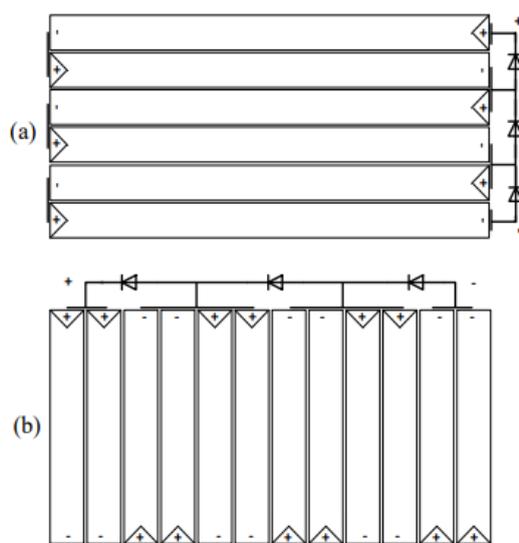
Os módulos solares convencionais consistem em células solares conectadas em séries em *strings* e cada uma delas é protegida por um diodo *bypass*. Condições de sombreamento parcial limitam a corrente gerada na *string* relevante em ponto de potência máxima para a corrente da célula solar sombreada. Em correntes mais altas, a célula sombreada pode se tornar inversamente polarizada e consumir a energia gerada pelas células não sombreadas. Como resultado, a célula sombreada pode formar pontos de calor resultando em forte aquecimento desta célula. Como as *strings* são protegidas por diodos *bypass*, um terço da potência do módulo será perdida para proteger o módulo contra pontos de calor e limitação de corrente. Uma das soluções para evitar esses problemas e aumentar o rendimento dos módulos sob condição de sombreamento parcial é cortar as células ao meio e alterar as configurações do módulo.

Enquanto a corrente gerada pelas células solares é proporcional à área da célula solar, cortar as células pela metade conseqüentemente corta a corrente gerada pela metade. Perdas por causa da resistência em série dos conectores de células em um módulo são relacionadas com o quadrado da corrente que passa pelos conectores, portanto cortar as correntes pela metade reduz essas perdas para um quarto.

As perdas de resistência em série são tipicamente em torno de 8W em um módulo padrão e ao cortar as células pela metade, essa quantidade pode ser reduzida para 2W. Desta forma cerca de 6W podem ser obtidos em um módulo *half-cell*. Deveria ser considerado que os módulos *half-cell* têm o dobro do número de células e isso exige repensar o layout do módulo solar. Normalmente, duas *substrings* são conectadas em paralelo a um diodo *bypass* e essas *substrings* paralelas mostram um comportamento de sombreamento diferente dos módulos padrão.

Devido a essas vantagens, módulos *half-cell* com *strings* em diferentes layouts de módulos tornam-se cada vez mais interessantes e algumas empresas como Bosch Solar, Mitsubishi e REC começam a produzir esses módulos.

Figura 5 Projetos de módulos esquemáticos de células solares



Fonte: Hanifi et al, 2015

Comparado ao módulo de referência com 72 células completas e 6 *strings*, o módulo consiste em 144 *half-cells* e 12 *substrings*, cada uma com 12 *half-cells* em série. As *substrings* são ligadas duas a duas em paralelo para obter a mesma corrente nos terminais de saída assim como nos módulos padrão e a conexão em série das *substrings* em paralelo forma as *strings* do módulo. As *strings* são conectadas por conectores de *string* feitos do mesmo material que os conectores de célula com seção transversal de $5 \times 0,38 \text{ mm}^2$.

Finalmente, cada *string* é protegida por um diodo *bypass*. Este layout permite ter uma caixa de junção padrão como os módulos padrão. A Figura 5 mostra a conexão das células e designs de módulos tanto para os módulos de célula completa quanto para *half-cell*: (a) O módulo padrão de 72 células completas com 6 *strings* e 3 diodos de desvio. Cada bloco representa uma *string* com 12 células full-size em série e seus conectores de célula. (b) O módulo de meia célula com 144 células divididas ao meio e 12 *substrings*. Cada bloco representa uma *substring* de 12 metades de células conectadas em série e seus conectores de célula. Dois *substrings* em paralelo conectados em série formam uma *string*.

Quando compara-se os painéis com tecnologias convencionais de silício monocristalino e policristalino com as tecnologia *half-cell* e módulos bifaciais pode-se verificar que a eficiência do painel fotovoltaico monocristalino pode chegar em média até 21,6%, valor esse que é menor em módulos policristalinos, chegando até 19,9%. Os módulos bifaciais apresentam um ganho de cerca de 25% em relação a eficiência dos módulos convencionais, complementando a tecnologia *half-cell* pode-se ter a diminuição de perdas em até 66,6%. Portanto, módulos convencionais, associados a tecnologia que promovem o aumento da eficiência são uma tendência de mercado.

2.2.5. Sistema Fotovoltaico *On-grid*

O sistema fotovoltaico *on-grid* ou conectado à rede representa o processo de transformação da energia solar em energia elétrica, em conjunto com a possibilidade de agregá-la à rede elétrica da concessionária, de forma que as residências dos consumidores são alimentadas pela rede elétrica e o sistema fotovoltaico *on-grid* opera como fonte complementar de energia. Os sistemas *on-grid* são constituídos por dois blocos: módulos fotovoltaicos (bloco gerador) e inversor (bloco de condicionamento de potência), de tal maneira que juntos formam um conjunto de equipamentos que convertem a energia do Sol em energia elétrica e a disponibiliza para uso instantâneo ou anexação à rede de distribuição da concessionária.

Os módulos fotovoltaicos são compostos por associações série/paralelo de células fotovoltaicas, constituindo sua parte elementar, pois é onde ocorre o efeito fotovoltaico, isto é, a conversão direta da luz do Sol em eletricidade. Os módulos são associados e formam painéis fotovoltaicos para instalações em pequena ou grande escala, visando obter os valores de potência necessários. Os inversores convertem a energia fotovoltaica gerada de corrente contínua para corrente alternada, com características similares às da rede de distribuição, tais como frequência, tensão, frequência, etc.

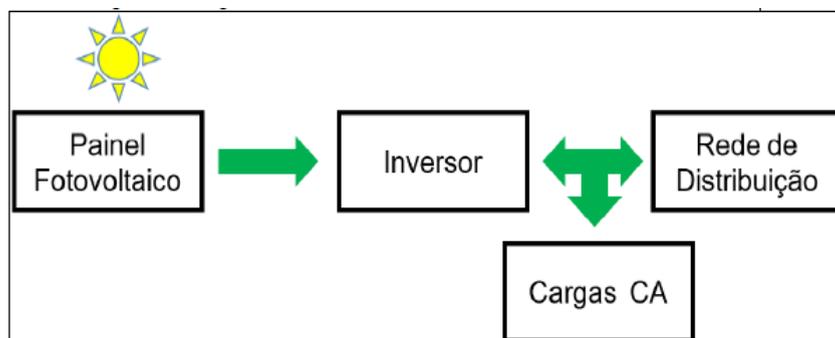
Em um sistema fotovoltaico *on-grid*, não há a exigência de acumuladores de energia, pelo fato de as cargas poderem utilizar tanto a energia fotovoltaica quanto a energia proveniente da rede elétrica local. As cargas são regularmente alimentadas e quando há mais geração de energia do que consumo, o excedente é inserido na rede, reduzindo portanto a geração de energia elétrica pelas fontes convencionais. Em períodos com baixo índice de irradiância, ao amanhecer, anoitecer ou dias chuvosos, a rede é capaz de fornecer a energia elétrica necessária.

Os sistemas fotovoltaicos se tornaram populares no Brasil devido às mudanças na regulação, promovidas pela ANEEL em 2012 e atualizadas em 2015, pela Resolução N° 687, onde foram estabelecidas condições gerais para a mini e microgeração distribuídas. Tais sistemas podem ser construídos como grandes centrais fotovoltaicas, as quais possuem os mesmos princípios das usinas convencionais, tendo como característica a centralização da geração e a necessidade de subestação e utilização de linhas de transmissão. As desvantagens desses métodos são a necessidade de investimentos em linhas de transmissão (a geração fica longe do centro de consumo), as respectivas perdas elétricas e a utilização de grandes áreas para a construção do empreendimento.

Outra possibilidade é a instalação descentralizada, onde a geração se baseia no princípio de aproveitamento de áreas que não seriam ocupadas como telhados, prédios, entre outros; ou até mesmo utilização como material de revestimento ou cobertura, facilmente ampliáveis caso necessário.

Na Figura 6, está representado um diagrama de blocos do sistema fotovoltaico *on-grid*.

Figura 6 Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico *on-grid*



Fonte: Tonolo, 2017

2.2.5.1. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico *On-grid*

Para o dimensionamento desse tipo de sistema, deve-se levantar o consumo médio anual da edificação (Wh/dia), que pode ser calculado a partir das faturas de energia elétrica emitidas pela concessionária. Dessa forma, é possível calcular a potência de pico demandada, ou seja, a potência de pico mínima que o painel solar deverá ter a partir da seguinte equação:

$$P_{FV} (Wp) = \frac{\frac{E}{TD}}{HPS_{MA}} \quad (2.1)$$

Em que E é o consumo diário médio anual da edificação ou fração deste em Wh/dia, HPS_{MA} é a média diária anual das horas de sol pleno incidente no plano do painel fotovoltaico e TD é a taxa de desempenho.

Vale ressaltar que normalmente o dimensionamento é condicionado por outros fatores, como recursos financeiros disponíveis para investimento, área disponível para instalação, entre outros que transcendem questões técnicas e de desempenho.

Para dimensionamento do inversor deve-se analisar a tensão máxima admitida pela entrada do inversor e a tensão máxima do módulo fotovoltaico. Dessa forma, deve-se seguir as seguintes regras:

$$N^{\circ} \text{módulos série} \times V_{ocTmin} < V_{i_{max}} \quad (2.2)$$

Em que $V_{i_{max}}$ é a máxima tensão DC admitida pela entrada do inversor e V_{ocTmin} é a tensão de circuito aberto de um módulo fotovoltaico na menor temperatura de operação prevista.

2.2.6. Sistema Fotovoltaico *Off-grid*

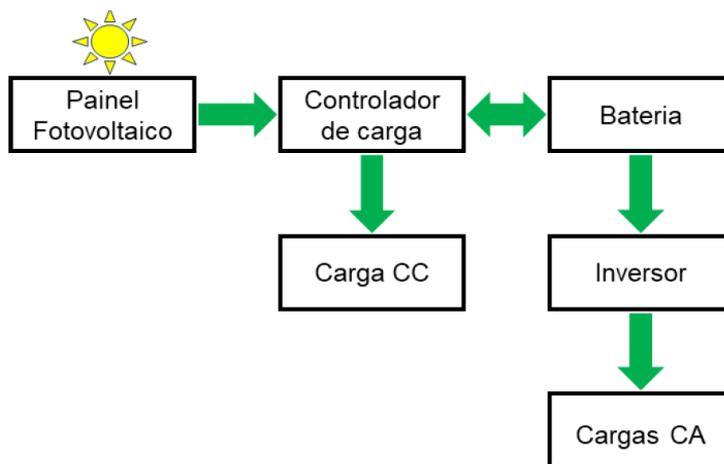
Nos sistemas fotovoltaicos isolados ou *off-grid*, o usuário não possui conexão com o sistema público de distribuição de energia. Estes sistemas *off-grid* podem ter potência na ordem de *miliwatts* a vários *quilowatts*. Os exemplos vão desde calculadoras e relógios solares até instalações que são capazes de fornecer energia a um edifício em áreas remotas. Em sistemas residenciais, são dimensionados para aparelhos como lâmpadas, televisão, rádio e pequenos refrigeradores. Visando garantir o fornecimento do sistema *off-grid* com energia elétrica também nos momentos sem irradiação solar ou com radiação muito baixa, este tipo de sistema possui armazenamento integrado, isto é, baterias, adicionando assim mais um bloco em comparação ao sistema *on-grid*. Os mesmos módulos fotovoltaicos podem ser usados tanto em sistemas *off-grid* quanto em sistemas *on-grid*.

O bloco de condicionamento de potência é composto pelo controlador de carga, essencial para a operação eficiente das baterias, evitando cargas e descargas excessivas. Apresenta também com um inversor *off-grid*, para alimentar as cargas.

O bloco de armazenamento é formado por baterias ou outros acumuladores de energia, para dissociar as horas de geração do horário de consumo, os quais fornecem energia para as cargas quando não há mais geração fotovoltaica. Este bloco representa a maior desvantagem dos sistemas *off-grid*, devido ao uso de bateria, que reduzem a eficiência do sistema, possuem alto custo de aquisição e contribuem com a poluição, já que quando descartadas podem contaminar o solo devido seus componentes tóxicos .

Porém, as aplicações *off-grid* são mais adequadas para comunidades isoladas da rede elétrica, como em ilhas ou população ribeirinha, alimentação de baterias de veículos elétricos, postes de iluminação, bombas d'água, dessalinização de água, sistema de sinalização terrestre ou marítima, telecomunicações, entre outros. Na Figura 7, está representado um diagrama de blocos do sistema fotovoltaico *on-grid*.

Figura 7 Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico *off-grid*



Fonte: Tonolo, 2017

2.2.6.1. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico *Off-grid* pelo método do mês crítico

O sistema fotovoltaico *off-grid* deve ser dimensionado considerando o mês do ano em que o valor de irradiação solar é menor, garantindo que a demanda de consumo da carga seja atendida em todos os meses do ano. Para chegar-se aos dados de radiação solar, pode-se obter através de várias bases de dados que estão disponíveis de forma gratuita, sendo uma delas a nível nacional *SunData* do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito – CRESESB.

Figura 8 Base *SunData* v 3.0

Fonte: *SUN DATA*, 2018

Nesta base, para definir a irradiação solar no mês crítico, utiliza-se as coordenadas geográficas do local e verifica-se o valor de irradiação correspondente a latitude mais 1.

A estimativa do consumo de energia deve ser feita a partir da soma do consumo nominal de todos os equipamentos que constituem a carga multiplicado pelo tempo de utilização diário conforme a equação a seguir:

$$L_{CC} = P_e \times N_d \quad (2.3)$$

Em que L_{CC} é o consumo de energia em corrente contínua em Wh/dia por dia, P_e é a potência nominal da carga em *Watts* e N_d é o número de horas diárias de utilização da carga.

Para dimensionamento do banco de baterias, utiliza-se a energia consumida pela carga para que este possa acumular a energia que será utilizada em horas do dia com pouca ou nenhuma insolação, como períodos de

chuva e pela noite. Através da seguinte equação é possível calcular a quantidade de energia que terá de ser armazenada pelo banco de baterias:

$$CBI_{C20}(Ah) = \frac{\frac{L \times N}{P_d}}{V_{sistema}} \quad (2.4)$$

Em que CBI_{C20} é a capacidade do banco de baterias em Ah para o regime de descarga em 20 horas, L é a quantidade de energia diária consumida, N é o número de dias de autonomia, P_d é a profundidade de descarga e $V_{sistema}$ é a tensão no sistema DC.

Em seguida é necessário determinar a quantidade de baterias que podem ser colocadas em paralelo e série. Essa quantidade é definida a partir da tensão nominal do sistema, ou seja, em sistemas em que a tensão nominal é igual a tensão nominal da bateria, não pode-se colocar baterias em série. Além disso, a quantidade de baterias em paralelo será definida pela relação entre a capacidade demandada pelo banco de baterias e a capacidade da bateria em Ah.

Portanto:

$$NBS = \frac{V_{sistema}}{V_{bateria}} \quad (2.5)$$

$$NBP = \frac{CBI_{C20}}{CBI_{C20(bateria)}} \quad (2.6)$$

Para a escolha do controlador de carga, em seu dimensionamento deve-se considerar a configuração de painéis de acordo com os seus limites de corrente e tensão de entrada. Em um sistema DC não se faz necessário o dimensionamento de inversores, já que a carga a ser alimentada pelo sistema será também de corrente contínua.

3. Metodologia

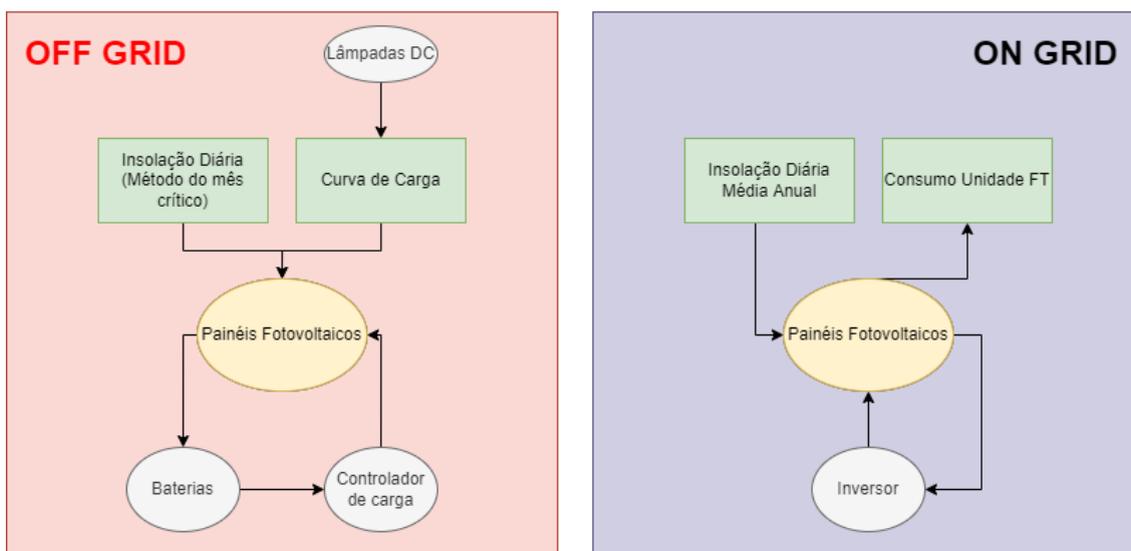
Este capítulo tem como finalidade apresentar os passos tomados para dimensionamento dos sistemas *off-grid* e *on-grid*, bem como a escolha de painéis para cada sistema.

Nele define-se primeiramente os componentes para o sistema *off-grid* que irá alimentar a rede DC composta por luminárias DC em ambientes de circulação na FT. Nesse sistema utilizam-se painéis do tipo de célula monocristalina, verifica-se a demanda da carga e assim, definem-se componentes desse sistema: baterias e controladores de carga.

Em seguida, é dimensionado o sistema *on-grid* ligado à rede da concessionária, a fim da diminuição do custo da energia elétrica. Normalmente, o dimensionamento desse tipo de sistema parte do consumo de energia da unidade, porém, neste trabalho tem-se a área como fator limitante para instalação dos painéis, por esse motivo, primeiramente verificou-se a quantidade de painéis a partir da área, em seguida calculou-se a energia gerada pelo sistema e seu percentual sobre o total da energia consumida. Para esse sistema são projetados 3 subsistemas com as tecnologias de painéis de células policristalinas, *half-cell* e bifaciais.

Para o desenvolvimento deste capítulo utilizou-se a sequência de passos do fluxograma da Figura 9 e que serão detalhados nas seções a seguir.

Figura 9 Fluxograma da metodologia



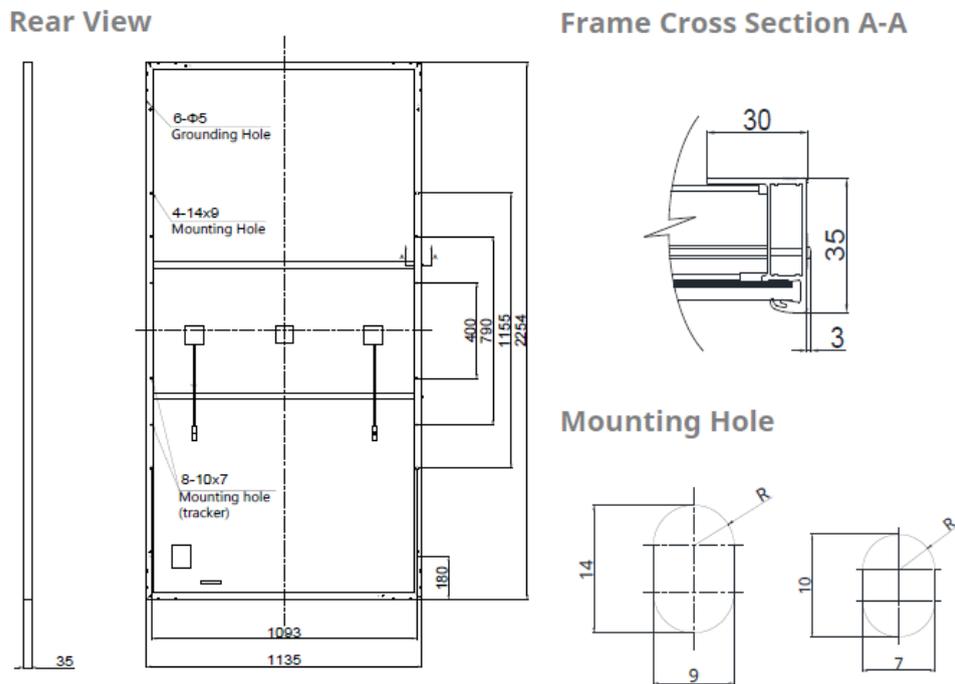
Fonte: Própria, 2022

3.1. Módulos fotovoltaicos

Inicialmente, foram estabelecidos os módulos fotovoltaicos a serem utilizados no projeto. O método de escolha desses módulos foi avaliar se a fabricante é nacional, valorizando o mercado nacional e facilitando a possível implementação do projeto e que ambos tivessem uma potência média próxima a 500W. Além disso, foram determinados quatro tipos de módulos com tecnologias diferentes, a fim de se obter o acesso dos discentes e docentes da Faculdade de Tecnologia a pesquisa e desenvolvimento. Dessa forma os painéis escolhidos foram os os modelos descritos a seguir, das marcas *Canadian* e *BYD*.

- ***Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS***

Na Figura 10 tem-se o diagrama com dimensões em milímetros e fixação inferior da placa solar *HiKu6 Mono CS6W-545MS* da fabricante *Canadian*.

Figura 10 Desenho técnico do módulo *HiKu6 Mono CS6W*

Fonte: *Canadian*, 2020

De forma geral, as placas solares têm seus parâmetros elétricos anunciados no datasheet segundo condições STC (*Standard Test Conditions*, em português condições de teste padrão), com irradiância de 1000 W/m^2 , espectro AM 1,5 e temperatura da célula de 25°C , dados estes que serão utilizados no dimensionamento. Os dados utilizados serão os mostrados na tabela de dados elétricos do datasheet desta placa na Tabela 2.

Tabela 2 Dados elétricos do módulo *HiKu6 Mono CS6W*

ELECTRICAL DATA STC*					
CS6W	525MS	530MS	535MS	540MS	545MS
Nominal Max. Power (Pmax)	525 W	530 W	535 W	540 W	545 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.4 V	40.6 V	40.8 V	41.0 V	41.2 V
Opt. Operating Current (Imp)	13.00 A	13.06 A	13.12 A	13.18 A	13.23 A
Open Circuit Voltage (Voc)	48.6 V	48.8 V	49.0 V	49.2 V	49.4 V
Short Circuit Current (Isc)	13.75 A	13.8 A	13.85 A	13.9 A	13.95 A
Module Efficiency	20.5%	20.7%	20.9%	21.1%	21.3%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C				
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)				
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 61730) or CLASS C (IEC 61730)				
Max. Series Fuse Rating	25 A				
Application Classification	Class A				
Power Tolerance	0 ~ + 10 W				

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

Fonte: *Canadian*, 2020

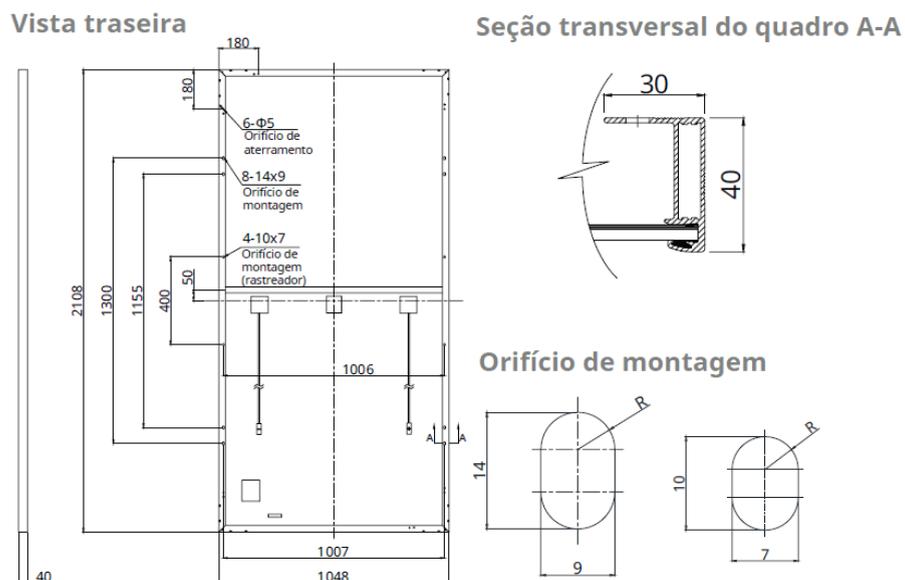
São estes:

- Potência máxima (P_{max})(STC): 545 W
- Tensão de máxima potência (V_{mp})(STC): 41,2 V
- Corrente de máxima potência (I_{mp})(STC): 13,23 A

Como descrito também em datasheet, esse painel é formado por células do tipo Monocristalina, com dimensões de 2254 x 1135 x 35 em milímetros e massa de 29 kg.

- ***Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P***

Neste caso, foi utilizado um painel de 440W, pois o fator de fabricação nacional foi priorizado, já que entre as fabricantes nacionais o painel escolhido foi o que ofereceu maior potência. A seguir tem-se o diagrama com dimensões em milímetros e fixação inferior da placa solar *HiKu PERC POLY CS3W-440P* da fabricante *Canadian* na Figura 11.

Figura 11 Desenho técnico do módulo *HiKu PERC POLY CS3W*

Fonte: *Canadian*, 2020

Os dados utilizados serão os mostrados na tabela de dados elétricos do *datasheet* desta placa na Tabela 3.

Tabela 3 Dados elétricos do módulo *HiKu PERC POLY CS3W*

DADOS ELÉTRICOS | STC*

CS3W	425P	430P	435P	440P
Máx. Potência Nominal (P _{max})	425 W	430 W	435 W	440 W
Opt. Tensão de Operação (V _{mp})	39,7 V	39,9 V	40,1 V	40,3 V
Opt. Corrente de Operação (I _{mp})	10,71 A	10,78 A	10,85 A	10,92 A
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc})	48,2 V	48,4 V	48,6 V	48,7 V
Corrente de Curto-Circuito (I _{sc})	11,29 A	11,32 A	11,35 A	11,4 A
Eficiência de Módulo	19,2%	19,5%	19,7%	19,9%
Temperatura de Operação	-40°C ~ +85°C			
Máx. Tensão de Sistema	1500V (IEC/UL) ou 1000V (IEC/UL)			
Desempenho antichamas do módulo	TIPO 1 (UL 1703) ou CLASSE C (IEC 61730)			
Máx. valor nominal do fusível de série	20 A			
Classe da aplicação	Classe A			
Tolerância de potência	0 ~ + 10 W			

* Sob condições de teste padrão (STC) de irradiância de 1000 W/m², espectro AM 1.5 e temperatura de célula de 25°C.

Fonte: *Canadian*, 2020

São estes:

- Potência máxima (P_{max})(STC): 440 W

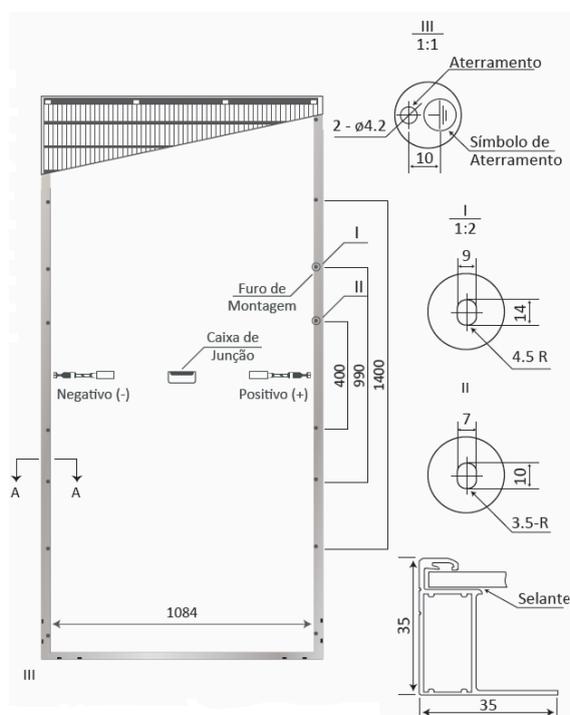
- Tensão de máxima potência (V_{mp})(STC): 40,3 V
- Corrente de máxima potência (I_{mp})(STC): 10,92 A

Como descrito também em *datasheet*, esse painel é formado por células do tipo Policristalina, com dimensões de 2108 x 1048 x 40 em milímetros e massa de 24,9 kg.

- **BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W**

A seguir tem-se o diagrama com dimensões em milímetros e fixação inferior da placa solar *MLTK-36 BIFACIAL* de 540W da fabricante *BYD* na Figura 12.

Figura 12 Desenho técnico do módulo *MLTK-36 BIFACIAL*



Fonte: BYD, 2017

Os dados utilizados serão os mostrados na tabela de dados elétricos do *datasheet* desta placa na Tabela 4.

Tabela 4 Dados elétricos do módulo *MLTK-36 BIFACIAL*

DADOS ELÉTRICOS (STC*)		Condições de teste padrão (STC): irradiância de 1000 W/m ² , espectro AM 1,5 e temperatura da célula de 25°C				
Tipo do Módulo	520 MLK-36	525 MLK-36	530 MLK-36	535 MLK-36	540 MLK-36	
Taxa de Máx. Potência (P _{max}) [W]	520Wp	525Wp	530Wp	535Wp	540Wp	
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc}) [V]	48.52V	48.82V	49.12V	49.42V	49.72V	
Corrente de Curto Circuito (I _{sc}) [A]	13.37A	13.41A	13.45A	13.49A	13.53A	
Tensão de Máx. Potência (V _{mp}) [V]	41.17V	41.39V	41.61V	41.83V	42.05V	
Corrente de Máx. Potência (I _{mp}) [A]	12.64A	12.69A	12.74A	12.79A	12.84A	
Eficiência do Módulo [%]	20.32%	20.51%	20.71%	20.90%	21.10%	

Fonte: BYD, 2017

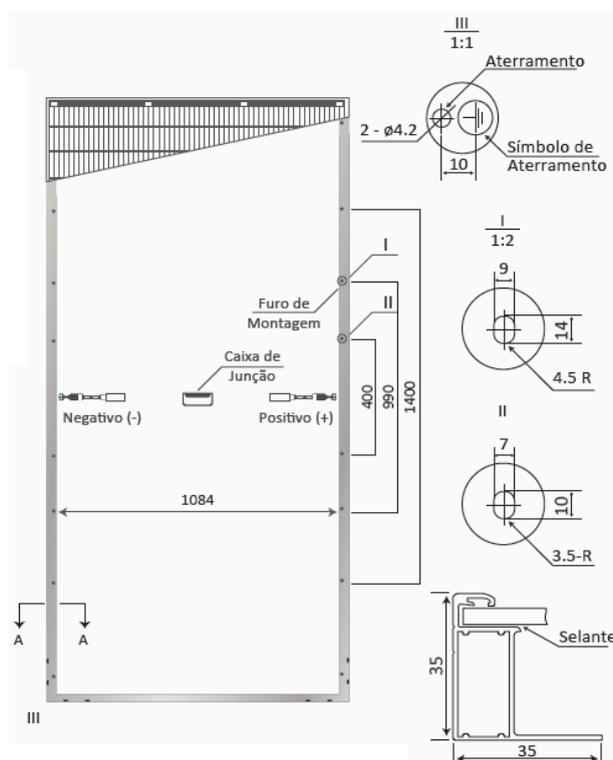
São estes:

- Potência máxima (P_{max})(STC): 540 W
- Tensão de máxima potência (V_{mp})(STC): 49,72 V
- Corrente de máxima potência (I_{mp})(STC): 13,53 A

Como descrito também em *datasheet*, esse painel é formado por células do tipo Monocristalina, produzido com tecnologia bifacial e micro-gaps entre as células, com dimensões de 2256 x 1133 x 35 em milímetros e massa de 29 kg podendo variar 5% para mais ou para menos.

- **BYD MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell 540W**

A seguir tem-se o diagrama com dimensões em milímetros e fixação inferior da placa solar *MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell* de 540W da fabricante *BYD* na Figura 13.

Figura 13 Desenho técnico do módulo *MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell*

Fonte: BYD, 2017

Os dados utilizados serão os mostrados na tabela de dados elétricos do *datasheet* desta placa na Tabela 5.

Tabela 5 Dados elétricos do módulo *MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell*

DADOS ELÉTRICOS (STC*)

Tipo do Módulo	520 MLK-36	525 MLK-36	530 MLK-36	535 MLK-36	540 MLK-36
Taxa de Máx. Potência (P _{max}) [W]	520Wp	525Wp	530Wp	535Wp	540Wp
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc}) [V]	48.52V	48.82V	49.12V	49.42V	49.72V
Corrente de Curto Circuito (I _{sc}) [A]	13.37A	13.41A	13.45A	13.49A	13.53A
Tensão de Máx. Potência (V _{mp}) [V]	41.17V	41.39V	41.61V	41.83V	42.05V
Corrente de Máx. Potência (I _{mp}) [A]	12.64A	12.69A	12.74A	12.79A	12.84A
Eficiência do Módulo [%]	20.32%	20.51%	20.71%	20.90%	21.10%

Fonte: BYD, 2017

São estes:

- Potência máxima (P_{max})(STC): 540 W
- Tensão de máxima potência (V_{mp})(STC): 49,72 V
- Corrente de máxima potência (I_{mp})(STC): 13,53 A

Como descrito também em *datasheet*, esse painel é formado por células do tipo Monocristalina *half-cell*, com dimensões de 2256 x 1133 x 35 em milímetros e massa de 29 kg podendo variar 5% para mais ou para menos.

3.2. Dimensionamento do Sistema Solar Fotovoltaico *Off-grid*

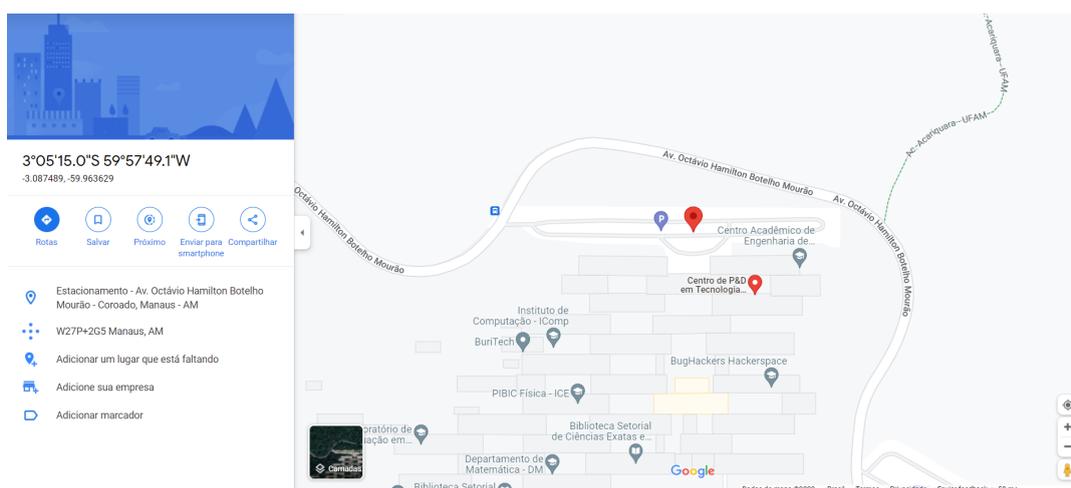
O sistema solar fotovoltaico *off-grid* será dimensionado para gerar energia em corrente contínua para alimentar as lâmpadas das áreas de circulação da FT. Esse sistema é formado por painéis solares, controladores de carga, baterias e cargas elétricas, neste caso as lâmpadas. Nas seções seguintes serão dimensionados cada um dos elementos desse sistema. O painel solar escolhido para esse sistema foi o *Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS*.

3.2.1. Insolação Diária

Ao buscar-se as coordenadas correspondentes a localização do estacionamento da FT no *Google Maps* encontram-se os seguintes dados mostrados na Figura 14.

Sendo estas suas coordenadas: -3.087489° S, -59.963629° W (*Google Maps*, 2022).

Figura 14 Coordenadas do Estacionamento da Faculdade de Tecnologia



Fonte: *Google Maps*, 2022

Utilizando a base *SunData*² busca-se através das coordenadas os dados referentes a irradiação solar diária de todos os meses do ano, tendo a vantagem da análise desses dados a partir do ângulo do plano inclinado.

Tabela 6 Irradiação solar média

Estação: Manaus
Município: Manaus, AM - BRASIL
Latitude: 3,101° S
Longitude: 59,949° O
Distância do ponto de ref. (3,0875° S; 59,963639° O): 2,2 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	3,97	4,11	4,13	3,94	3,96	4,48	4,49	5,03	5,06	4,89	4,71	4,23	4,42	1,12
✓	Ângulo igual a latitude	3° N	3,91	4,07	4,13	3,97	4,02	4,59	4,58	5,09	5,07	4,85	4,64	4,15	4,42	1,19
✓	Maior média anual	4° N	3,89	4,06	4,13	3,98	4,04	4,62	4,61	5,11	5,08	4,84	4,61	4,12	4,42	1,23
✓	Maior mínimo mensal	1° N	3,95	4,10	4,13	3,95	3,98	4,52	4,52	5,05	5,06	4,88	4,69	4,20	4,42	1,12

Fonte: *SunData*, 2022

Com ele pode-se estabelecer a insolação diária utilizando o método do mês crítico, ou seja, mês em que a irradiação solar diária é menor. Os painéis solares devem estar voltados para o norte geográfico com uma inclinação de no mínimo a latitude, porém, intempérie, chuva, sujeira deslocada pelo vento, etc, podem deixar resíduos em placas com uma inclinação muito pequena, dessa forma, utilizam-se na Tabela 6 os dados referentes a inclinação de 4°N que é maior dentre as inclinações oferecidas e identifica-se o mês crítico sendo este janeiro, com irradiação solar diária de 3,89 kWh/m².dia.

Para transformar irradiação solar diária para insolação diária utiliza-se a seguinte relação:

$$\frac{\frac{kWh}{m^2 \times dia}}{\frac{1000W}{m^2}} = \frac{h}{dia} \quad (3.1)$$

Portanto a insolação diária obtida será de 3,89 h/dia.

3.2.2. Curva de Carga

Para realizar o dimensionamento da carga a ser alimentada pelo sistema solar fotovoltaico *off-grid*, primeiramente escolheram-se lâmpadas tubulares de LED DC de 48V para substituição das lâmpadas das áreas de circulação da FT.

² O programa *SunData* destina-se ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional. É disponibilizado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB). O programa é baseado nos valores médios de irradiação horizontal solar sobre o solo do Centro de Estudos de la Energia Solar (CENSOLAR), contendo valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes.

Essa substituição é proposta devido ao sistema *off-grid* que alimentará uma rede DC, conseqüentemente não necessitando-se de inversores no sistema.

Dessa forma, foi encontrado o modelo CP-T812-18W mostrado na Figura 15 vendido pela CNPRO.

Figura 15 Lâmpada CP-T812-18W



Fonte: ALIBABA, 2022

A seguir, na Tabela 7, pode-se verificar os dados elétricos da lâmpada, com a observação de seu comprimento ser o mesmo das lâmpadas que atualmente são utilizadas nos corredores da FT, podendo assim serem aproveitadas suas luminárias, gerando menor custo na implementação. Mas com a observação de que será necessária a retirada do reator e a passagem de um novo cabeamento, exclusivo para a rede DC exclusiva das lâmpadas. Lembrando que as lâmpadas atuais da unidade são da rede AC da concessionária e não funcionam na nova rede DC proposta.

Tabela 7 Dados elétricos lâmpada CP-T812-18W

Número do modelo	CP-T812-18W
Comprimento	1200 mm(4ft)
Watts	18w
LED chip	Epistar SMD2835*96pcs
CRI	> 80
Eficiência em Lumens	110lm/w
Tensão de entrada	12 V24 V36 V48 V100 – 240 V50Hz/60Hz

Fonte: ALIBABA, 2022

Considerando que o estacionamento da FT também é uma área de circulação de pessoas, foi escolhido um modelo de lâmpada para substituição de três das luminárias indicadas na Figura 16.

Figura 16 Área de circulação do estacionamento da Faculdade de Tecnologia



Fonte: *Google Maps*, 2022

Dessa forma, foram escolhidas luminárias de LED para iluminação de ruas de 48V DC modelo PRDSSL vendidas pela *Pride LED*. Este modelo possui lâmpada e luminária conjugados em uma única peça, e de funcionamento em tensão DC apenas.

Figura 17 Luminária PRDSSL



Fonte: *INDIAMART*, 2022

A seguir tem-se a tabela de especificações do produto representada na Tabela 8. Nela pode-se identificar sua potência máxima, que é de 200W, sendo esse seu consumo.

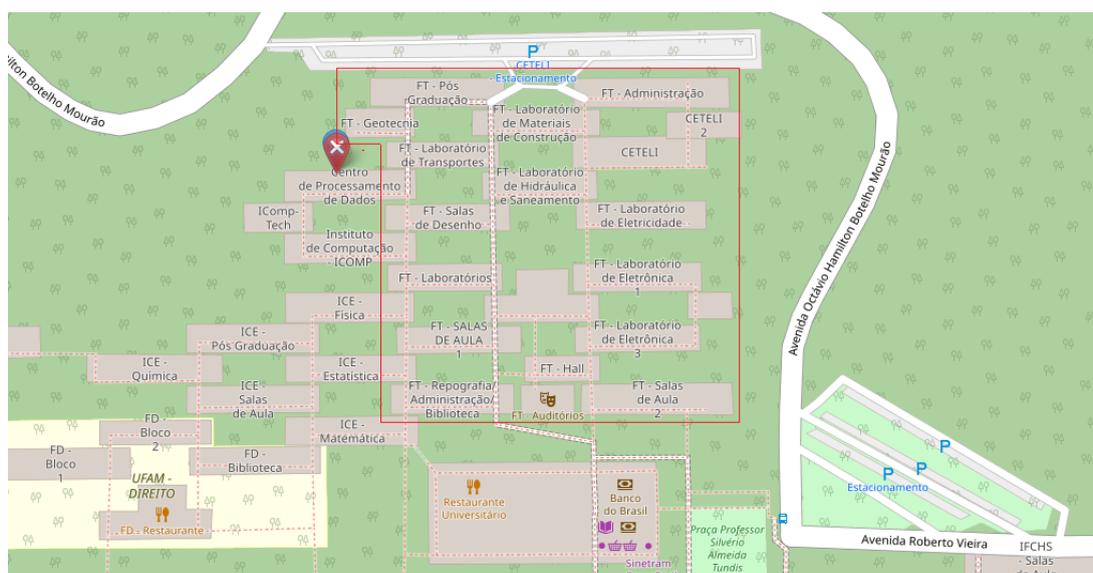
Tabela 8 Dados elétricos luminária PRDSSL

Tipo de Luz	LED
Grau IP	IP66
Fonte de energia	Solar, Fonte DC
Temperatura de cores	3000 K – 6500 K
Cor da iluminação	Branca
Tensão	DC
Potência	9 – 200 W
Eficiência	90%
Quantidade mínima do pedido	10

Fonte: INDIAMART, 2022

Assim, foi contabilizada a quantidade de lâmpadas utilizadas em todas as áreas de circulação da FT, seguindo a planta baixa da Figura 18, onde é delimitada a área correspondente a FT.

Figura 18 Área da Faculdade de Tecnologia



Fonte: UFAM, 2022

Utilizando o *Excel*, foi montada a Tabela 9 com a quantidade de lâmpadas em cada bloco da FT, considerando também os corredores que interligam os blocos e as 3 luminárias que serão substituídas no estacionamento.

Tabela 9 Quantidade de lâmpadas por bloco da FT

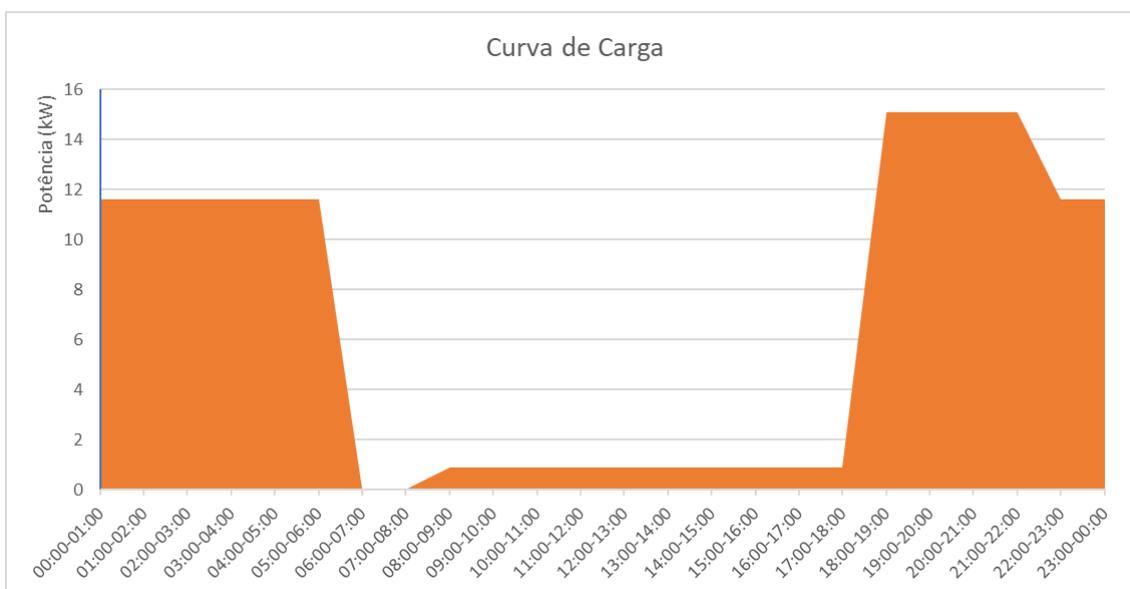
Bloco	Pontos de Iluminação	Qnt. De Lâmpadas	Potência por bloco (Wh/dia)
FT - Pós-graduação	24	48	7200
FT - Administração	35	70	15264
FT - Geotecnia	12	24	3456
FT - Laboratório de Materiais de Construção	11	22	4752
CETELI 2	21	42	5040
FT - Laboratório de Transportes	8	16	3456
CETELI	29	58	10152
FT - Laboratório de Hidráulica e Saneamento	11	22	4752
FT - Salas de Desenho	10	20	4320
FT - Laboratório de Eletricidade	12	24	5184
FT - Laboratórios	10	20	4320
FT - Laboratório de Eletrônica I	17	34	7344
Hall - Restaurante	58	116	25056
Laboratório de Automação	3	6	1296
FT - Salas de Aula 1	10	20	4320
FT - Design	16	32	6912
FT - Reprografia/Administração /Biblioteca	15	30	5904
FT - Hall	20	40	8640
FT - Salas de Aula 2	37	74	9072
Corredores	43	86	18576
Estacionamento	3	3	7200
Total	405	807	162216

Fonte: Própria, 2022

Considerando a potência das lâmpadas e fazendo uma estimativa de uso desta carga ao longo de 24 horas, plotou-se em um gráfico a curva de carga que é representada na Figura 19.

Assim, calculou-se a energia diária demandada pela iluminação das áreas de circulação através da soma acumulada da potência demandada em cada hora de um dia, sendo esta de 162,216 kWh/dia. Pode-se considerar esse valor como sendo a potência máxima que pode ser demandada pelo sistema.

Figura 19 Curva de carga da FT



Fonte: Própria, 2022

3.2.3. Bateria

Algumas características devem ser consideradas ao se escolher uma bateria para determinado sistema, uma delas está associada ao conceito de DOD (*Depth of Discharge* em português profundidade de descarga) e SOC (*State of charge* em português estado de carga).

Para um sistema de geração solar fotovoltaico deve-se utilizar baterias estacionárias. No mercado brasileiro, baterias de chumbo-ácido acabam sendo as mais comuns, por terem um valor relativamente baixo se for comparado aos valores de outros tipos de baterias, porém, considerando a vida útil, que gira em torno de 4 anos, e que a DOD máxima desse tipo de bateria gira em torno de 20%, pode-se considerar que baterias de chumbo-ácido não seriam o ideal para o presente sistema. Dessa forma, foram escolhidas baterias de íons de lítio, do tipo estacionárias, produzidas pela *Unipower*, uma marca do grupo Unicoba, que possui fabricação nacional. Seu modelo é o UPLFP48-100-3U e está representado na Figura 20.

Figura 20 Bateria UPLFP48-100-3U



Fonte: UNIPOWER, 2022

A seguir, na Tabela 10 são representadas as tabelas de especificações e condições operacionais que se encontram em seu *datasheet*. É importante destacar que a tensão nominal das baterias deve ser correspondente a tensão das lâmpadas, dessa forma, ambas possuem a tensão de 48V.

Tabela 10 Especificações e Condições Operacionais bateria UPLFP48-100-3U

Especificações	Specifications
Tensão Nominal Nominal Voltage	48 V
Capacidade Nominal (C5) Nominal Capacity (C5)	100 Ah
Dimensões (C x L x A) mm Dimensions (L x W x H) mm	442 x 480 x 140
Peso aproximado Weight approx.	±4% 44 Kg
Terminal	DSTB22-2-2-M6
Tensão de operação Operation voltage	42 V ~ 54 V
Tensão de carga Charge voltage	53,5 V ~ 54,0 V
Corrente máxima de recarga Max. Continue charge current	100 A
Corrente máxima de descarga - contínua Max. Continue discharge current	100 A
Corrente máxima de curto circuito short circuit current	200 A
Tensão de corte Cut-off voltage	42 V

Condições Operacionais	Operating conditions
Vida útil cíclica 80% DOD (0.2C, 25 °C) Cycle life at 80% DOD (0.2C, 25 °C)	6000 ciclos
Eficiência de recarga (%) Round trip efficiency (%)	98%
Temperatura de operação Operating temperature	Descarga: -20 °C ~ 55 °C Recarga: 0 °C ~ 55 °C
Temperatura de armazenamento Storage temperature	- 20 °C ~ 55 °C
Tempo de armazenamento Storage duration	12 meses a 20 °C
Padrão de segurança Safety standard	UL1642 nível célula

Fonte: *UNIPOWER, 2022*

3.2.3. Controlador de Carga

O controlador de carga precisa ser escolhido seguindo as limitações de corrente e tensão de sua entrada e as características de saída desejadas conforme a tensão no barramento DC, neste caso 48V e a configuração das baterias que será definida posteriormente.

O modelo escolhido foi o MPPT 100 600 da *Schneider Electric*, o qual é mostrado na Figura 21.

Figura 21 Controlador de Carga MPPT 100 600



Fonte: *Schneider Electric, 2022*

Na Tabela 11 é apresentada a tabela de especificações técnicas que se encontra em seu *datasheet*.

Tabela 11 Especificações elétricas controlador de carga MPPT 100 600

	MPPT 80600	MPPT 100600
Especificações Elétricas		
Tensão máxima de circuito aberto fotovoltaico por array	600 V	600 V
Intervalo de Tensão MPPT	195 a 510 VDC	195 a 510 VDC
Tensão de operação fotovoltaica por array	195 a 550 V	195 a 550 V
Corrente máxima de curto circuito fotovoltaico por array em STC	28 A	35 A
Corrente de entrada em operação máxima	23 A	29 A
Máxima potência de saída	4800 W	6000 W
Tensão nominal da bateria	24 e 48 VDC	24 e 48 VDC
Intervalo de tensão de operação da bateria	16 e 67 VDC	16 e 67 VDC
Máxima corrente de carga de saída	80 A	100 A
Método de regulação do carregador	Três estágios (volume, absorção, flutuação) mais equalização manual Dois estágios (volume, absorção) mais equalização manual	Três estágios (volume, absorção, flutuação) mais equalização manual Dois estágios (volume, absorção) mais equalização manual
Tipos de bateria suportados	Inundado, GEL, AGM, Íon de Lítio, Personalizado	Inundado, GEL, AGM, Íon de Lítio, Personalizado
Eficiência	95% (nominal 48 V), 92% (nominal 24 V)	95% (nominal 48 V), 92% (nominal 24 V)

Fonte: *Schneider Electric, 2022*

3.2.4. Energia corrigida

Para dimensionamento do sistema, primeiramente deve-se corrigir a energia consumida para compensar a eficiência dos equipamentos – baterias e controladores de carga – dessa forma, utilizaram-se os valores de eficiência de cada um dos equipamentos encontrados em seus *datasheets* apresentados na Tabelas 10 e 11 respectivamente.

$$\eta_{bateria} = 0,98 \quad (3.2)$$

$$\eta_{controlador} = 0,95 \quad (3.3)$$

Para calcular-se a energia corrigida, utiliza-se a potência levantada na Seção 3.2.2.

$$E_{CONSUMIDA} = 162,216 \text{ kWh/dia} \quad (3.4)$$

Dessa forma calcula-se a energia corrigida a partir da seguinte relação:

$$E_{CORRIGIDA} = \frac{E_{CONSUMIDA}}{\eta_{bateria} \times \eta_{controlador}} \quad (3.5)$$

Portanto:

$$E_{CORRIGIDA} \approx 174,2384 \text{ kWh/dia} \quad (3.6)$$

3.2.5. Potência demandada

Para estimar a potência total demandada dos painéis solares para atender a demanda, deve-se considerar as perdas dos painéis, incluindo perdas por efeito *Joule* que é determinado pela literatura em 20%, independente do tipo de módulo fotovoltaico e sua tecnologia. Assim, pode-se determinar o fator de perda:

$$20\% = \frac{1}{1-0,2} = 1,25 \quad (3.7)$$

Com esse valor pode-se determinar a potência mínima demandada pelos painéis utilizando a insolação diária obtida na Seção 3.2.1, a energia corrigida obtida na Seção 3.2.4 e o fator de perda do painel obtido anteriormente, através da seguinte relação:

$$P_{min, painéis} = \frac{1,25 \times E_{CORRIGIDA}}{Insolação\ diária} \quad (3.8)$$

Portanto, a potência mínima dos painéis solares será:

$$P_{min, painéis} = 55989,2030W \quad (3.9)$$

3.2.6. Quantidade de Painéis Solares, Controladores de Carga e Baterias

Para definir a quantidade de painéis mínima para a demanda de potência calculada anteriormente utilizou-se a seguinte relação:

$$Q_{Painéis} = \frac{P_{min, painéis}}{P_{máx}} \quad (3.10)$$

Em que:

$$P_{máx} = 545W \quad (3.11)$$

Como visto na Tabela 2 referente ao *datasheet* do modelo de painel escolhido.

Dessa forma, a quantidade mínima de painéis será de:

$$Q_{Painéis} = 102,7324 = 103\ painéis \quad (3.12)$$

Para definir-se a quantidade final de painéis ideal para esse projeto deve-se considerar a configuração dos painéis de acordo com o controlador de carga escolhido. Para isso, primeiramente, deve-se verificar a tensão de máxima potência (V_{mp})(STC) e a corrente de máxima potência (I_{mp})(STC) do modelo de painel escolhido, que são respectivamente 41,2 V e 13,23 A. Visto isso, agora é possível identificar no *datasheet* do controlador de carga

escolhido (Tabela 11) seus valores de tensão máxima e corrente máxima, sendo estes respectivamente 600 V e 35 A.

Para definir-se a quantidade de painéis que podem estar em série seguindo as especificações do controlador de carga, dividiu-se o valor da tensão máxima do controlador de carga pela tensão de máxima potência do painel:

$$NPS = \frac{600}{41,2} \approx 14,5631 = 14 \text{ painéis em série} \quad (3.13)$$

Para definir-se a quantidade de painéis que podem estar em paralelo, dividiu-se o valor da corrente máxima do controlador de carga pela corrente de máxima potência do painel:

$$NPP = \frac{35}{13,23} \approx 2,6455 = 2 \text{ painéis em paralelo} \quad (3.14)$$

Dessa forma, utilizando a configuração de painéis solares em 14S-2P, para chegar à quantidade mínima de painéis definida – 103 painéis – precisa-se de 4 controladores de carga.

$$Q_{\text{controlador}} = 4 \text{ controladores de carga} \quad (3.15)$$

Assim, pode-se chegar ao valor final da quantidade de painéis do modelo *Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS*:

$$Q_{\text{painéis mono}} = 112 \text{ painéis} \quad (3.16)$$

Para se chegar à quantidade de baterias necessárias nesse sistema primeiramente deve-se utilizar a fórmula da capacidade de armazenagem das baterias:

$$\text{Capacidade de Armazenagem} = \frac{\text{Autonomia mínima (dias)} \times E_{\text{CORRIGIDA}}}{DOD_{\text{máx}} \times \eta_{\text{bateria}}} \quad (3.17)$$

A autonomia mínima do sistema é de 2 dias, de acordo com a Resolução Normativa 493, de 5 de junho de 2012 (ANEEL, 2012) e a $DOD_{\text{MÁX}}$ da bateria escolhida é de 80% para garantir uma vida útil de 6000 ciclos,

conforme a Tabela 10. Dessa forma, como se têm a energia corrigida e a eficiência da bateria pode-se encontrar a capacidade de armazenagem:

$$\text{Capacidade de Armazenagem} = 444,4857 \text{ kWh} \quad (3.18)$$

Em seguida, calcula-se a capacidade do banco de baterias a partir da fórmula a seguir:

$$\text{Capacidade do Banco de Baterias} = \frac{\text{Capacidade de Armazenagem}}{V_{\text{sistema}}} \quad (3.19)$$

Como definido anteriormente, a tensão no sistema será de 48V, portanto não se coloca mais de uma bateria em série (NBS = 1). Calculando a capacidade do banco de bateria, tem-se:

$$\text{Capacidade do Banco de Baterias} = 9260,1190 \text{ Ah} \quad (3.20)$$

Ainda de acordo com a Tabela 10 pode-se verificar que a capacidade nominal da bateria escolhida é de 100 Ah, portanto se pode chegar no número de baterias em paralelo (NBP) dividindo a capacidade do banco de baterias pela capacidade nominal da bateria:

$$NBP = \frac{\text{Capacidade do Banco de Baterias}}{\text{Capacidade Nominal da Bateria}} \approx 92,6012 = 92 \text{ baterias} \quad (3.21)$$

Como são 4 controladores de carga, utiliza-se cada um desses controladores como um circuito independente, dessa forma, arredonda-se o número de bateria para menos, sendo então 92 baterias. Isto é feito devido a corrente de todas as 92 baterias em paralelo ser muito alta e perigosa, dificultando a escolha de disjuntores DC adequados para esta corrente.

Portanto, tem-se 4 controladores de carga, os quais serão ligados cada um a 23 baterias em paralelo e cada saída de controlador de carga é um circuito elétrico diferente, saindo um par de cabos para luminárias específicas.

3.3. Dimensionamento do Sistema Solar Fotovoltaico *On-grid*

O sistema solar fotovoltaico *on-grid* será dimensionado para gerar energia a fim de atender parte da demanda do consumo de energia da FT, diminuindo assim

o valor da fatura de energia. Esse sistema é formado por painéis solares e inversores. Nas seções seguintes serão dimensionados cada um dos elementos desse sistema. Os painéis solares que serão utilizados nesse sistema serão os modelos *Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P*, *BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W* e *BYD MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell 540W*.

3.3.1. Insolação Diária Média Anual

Utilizando os dados utilizados como referência para se obter a insolação diária na seção 3.2.1, pode-se obter a média anual da insolação diária:

$$\text{Insolação diária média} = 4,42 \text{ h/dia} \quad (3.22)$$

3.3.2. Consumo Médio

Para estudo do consumo médio da unidade da FT é necessário que se haja dados referentes a medição feita pela concessionária de energia, dados estes que são conseguidos normalmente na conta de energia elétrica. Porém, no caso da FT, não há um medidor que delimite o consumo apenas dessa unidade.

Portanto, recorreu-se a dados referentes a uma medição realizada nos bornes do secundário do transformador da subestação da FT em 2017. A subestação da FT é composta por 2 transformadores, cujas potências são de 225kVA com um volume de 250 L de óleo e 500 kVA com um volume de 438L de óleo, respectivamente, conforme as Figuras 22 e 23. A referência de medição feita foi no transformador de 500 kVA, portanto, considerando que $\frac{2}{3}$ da energia consumida pela unidade provavelmente deve ser deste trafo, o projeto visa diminuir em $\frac{2}{3}$ a conta mensal da unidade de energia elétrica e, por conseguinte, 66,6% a menos de emissão de CO₂ equivalente na atmosfera, já que a solução é 100% de energia limpa e de fonte renovável.

Figura 22 Transformador 225kVA



Figura 23 Transformador 500kVA



Utilizando dados referentes à medição realizada em 2017, pôde-se obter o valor da potência ativa média, como é visto na Tabela 12.

Tabela 12 Medição de potência do transformador da subestação da FT

Potência Ativa Total [kW]		Potência Reativa Total [kVAr]		Potência Aparente Total [kVA]	
Mínimo	16,78	Mínimo	1,43	Mínimo	17,07
Médio	90,43	Médio	34,74	Médio	101,25
Máximo	233,49	Máximo	267,78	Máximo	283,35

Fonte: Oliveira, 2017

Dessa forma, através da potência ativa média (90,43 kW) (Oliveira, 2017), pode-se chegar ao valor de aproximadamente $\frac{2}{3}$ do consumo mensal. Para converter potência em energia aplicou-se a Equação 3.23.

$$Energia\ mensal = P_{ativa} \times 24 \times 30 = 65.109,6\ kWh/mês \quad (3.23)$$

Utilizando o valor da média anual de insolação diária, pode-se chegar ao número de placas solares necessárias para gerar potência a fim de atender o consumo da FT em um dia, por esse motivo, se faz necessária a conversão da energia mensal para energia diária, conforme Equação 3.24.

$$Energia\ diária = \frac{Energia\ mensal}{30} = 2.170,32\ kWh/dia \quad (3.24)$$

Vale ressaltar que neste projeto há o fator limitante de área, ou seja, não se terá área suficiente para implantação da quantidade de painéis necessária para atender a demanda de consumo da FT. Portanto, o cálculo da energia mensal consumida pela unidade será utilizado como referência para verificação da economia de energia gerada pelo sistema de geração solar fotovoltaico dimensionado neste capítulo.

3.3.3. Potência Diária Demandada

Para calcular-se a potência diária demandada divide-se a energia diária pelo valor médio anual da insolação diária, utilizou-se a equação 3.25.

$$Potência\ diária\ demandada = \frac{Energia\ diária}{Insolação\ diária\ média} = 491,0226\ kW \quad (3.25)$$

Assim como no sistema *off-grid*, deve-se corrigir a demanda de potência para compensar as perdas no sistema. A literatura indica que as perdas do sistema, incluindo as perdas por efeito *Joule* devem ser consideradas em 20%. Portanto, para calcular a potência demandada corrigida aplicou-se a Eq. 3.26.

$$Potência\ demandada\ corrigida = Potência\ diária\ demandada \times \frac{1}{1-0,2} \quad (3.26)$$

Assim, tem-se que $\frac{2}{3}$ da potência demandada corrigida será:

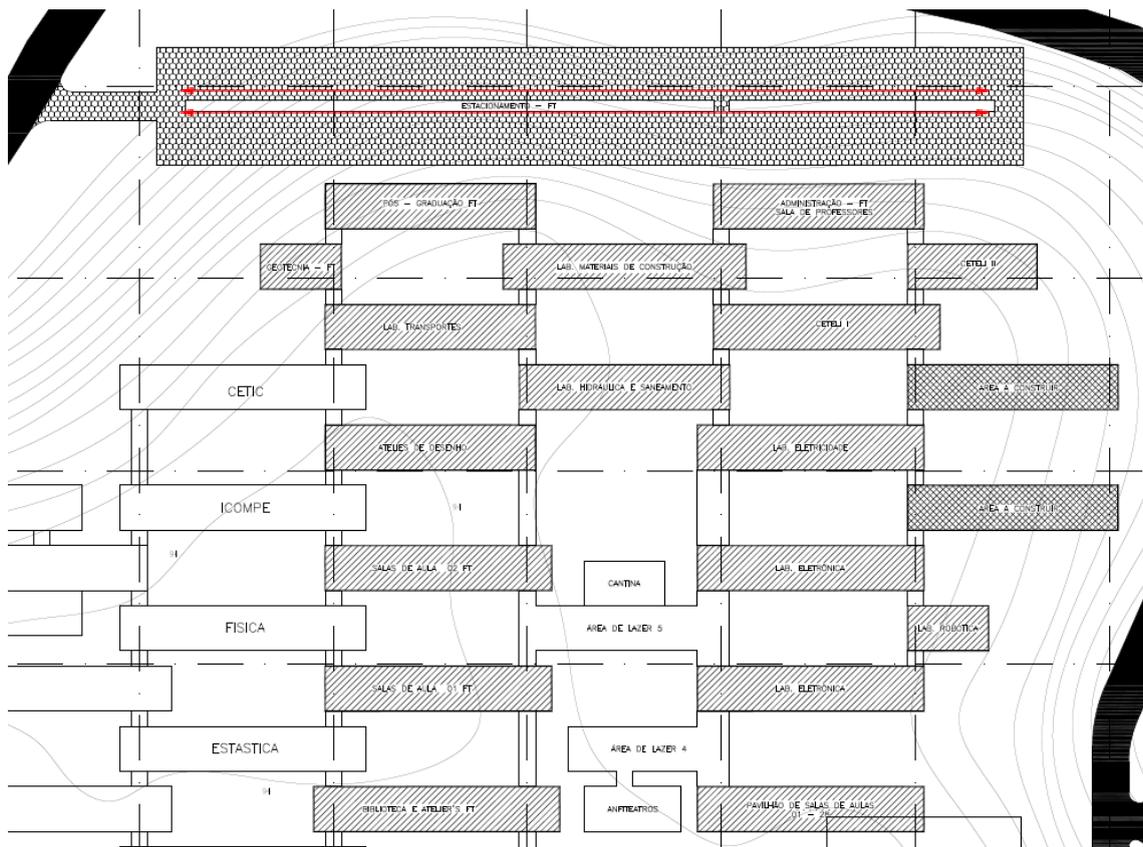
$$Potência\ demandada\ corrigida = 613,7782\ kW \quad (3.27)$$

3.3.4. Quantidade de Painéis Solares

Para definir o número de painéis solares de cada modelo utiliza-se a planta com curvas de nível do setor norte da UFAM disponibilizada pela direção da FT em arquivo executável em *software AutoCAD*, onde constam todos os pavilhões da FT e seu estacionamento com suas respectivas cotas.

Utilizando o *software AutoCAD* mediu-se o comprimento correspondente às vagas de estacionamento para verificar-se a área útil para construção de estruturas de sombreamento para vagas e assim se calcular a quantidade de painéis solares que a área comporta. Essa medição foi feita na área de estacionamento superior e inferior, como mostrado na Figura 24. Chegou-se então ao valor de 225 metros de comprimento na área superior e 225 metros de comprimento na área inferior.

Figura 24 Planta baixa da FT



Para verificar a quantidade de painéis que poderiam ser colocados no espaço do estacionamento, considera-se a largura de cada modelo de painel solar. Os painéis ficarão posicionados em 2 de forma latitudinal considerando

que seu comprimento médio é de 2 metros, com algumas variações para mais ou para menos e considerando que a estrutura para sombreamento das vagas de estacionamento precisa ter no mínimo 4 metros de comprimento.

Considerando que parte dessa área será ocupada pelos painéis solares do sistema solar fotovoltaico *off-grid* já dimensionado, recorre-se às dimensões do modelo *Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS* citadas na Seção 3.1, em que tem-se sua largura no valor de 1135 milímetros (em metros 1,135). Portanto, o comprimento ocupado por esses painéis será dado pela Equação 3.28.

$$L_{\text{painéis mono}} = 1,135 \times 112 = 127,12 \text{ metros} \quad (3.28)$$

O comprimento que restará para os demais modelos de painéis que farão parte do sistema solar fotovoltaico *on-grid* será 322,88 metros. Levando em conta as dimensões dos modelos *Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P*, *BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W* e *BYD MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell 540W* citadas na Seção 3.1, chega-se à quantidade de cada modelo de painel de acordo com o comprimento útil restante (Eq. 3.29 a 3.31).

$$Q_{\text{painéis poli}} = 232 \text{ painéis} \quad (3.29)$$

$$Q_{\text{painéis bifacial}} = 232 \text{ painéis} \quad (3.30)$$

$$Q_{\text{painéis half-cell}} = 232 \text{ painéis} \quad (3.31)$$

Utilizando os valores de potência dos painéis citados na Seção 3.1, pode-se chegar à demanda de potência total dos sistemas (*mini-grids*) formados pelos painéis de cada modelo, utilizando-se as Eq. 3.32 a 3.34.

$$P_{\text{painéis poli}} = 232 \times 440 = 102.080W \quad (3.32)$$

$$P_{\text{painéis bifacial}} = 232 \times 540 = 125.280W \quad (3.33)$$

$$P_{\text{painéis half-cell}} = 232 \times 540 = 125.280W \quad (3.34)$$

3.3.5 Inversor

O inversor escolhido deve atender a demanda de potência dos painéis de acordo com sua configuração, além disso, como esse inversor será ligado ao sistema *on-grid*, ou seja, será ligado à rede AC da concessionária, ele precisa ser do tipo *grid-tie*. Foi escolhido o modelo MAC 36KTL3-XL da fabricante *Growatt* mostrado na Figura 25.

Figura 25 Inversor MAC 36KTL3-XL



Fonte: *Growatt*, 2020

A seguir, na Tabela 13 é apresentada a tabela de especificações técnicas que se encontra em seu *datasheet*.

Para definir-se a quantidade de inversores para o *minigrd* composto pelos painéis do modelo *Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P* volta-se aos valores de potência, tensão e corrente citados na seção 3.1, são estes:

- Potência máxima (P_{max})(STC): 440 W
- Tensão de máxima potência (V_{mp})(STC): 40,3 V
- Corrente de máxima potência (I_{mp})(STC): 10,92 A

Tabela 13 Ficha de dados inversor MAC 36KTL3-XL

Ficha de dados	MAC 15KTL3-XL	MAC 20KTL3-XL	MAC 22KTL3-XL	MAC 25KTL3-XL	MAC 30KTL3-XL	MAC 36KTL3-XL
Dados de entrada						
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	19500W	26000W	28600W	32500W	39000W	46800W
Máxima tensão CC	1100V					
Tensão de partida	250V					
Tensão nominal	360V					
Faixa de tensão MPP	200V-1000V					
Número de rastreador MPP	3					
Número de strings fotovoltaicas por MPPT	4/4/4					
Máx. corrente de entrada por rastreador MPP	52A/52A/52A					
Máx. corrente curto-circuito por rastreador MPP	55A/55A/55A					
Saída (CA)						
Potência nominal de saída	15000W	20000W	22000W	25000W	30000W	36000W
Potência aparente máxima de CA	1.6600VA@220VAC	2.2200VA@220VAC	2.4400VA@220VAC	2.7800VA@220VAC	3.3300VA@220VAC	3.6000VA@220VAC 3.9200VA@240VAC
Tensão nominal de saída(Faixa)	127V/220V(101.6-139.7V)					
Frequência de rede CA(Faixa)	50/60 Hz(46-54/56-64Hz)					
Corrente nominal de saída CA	39.4A	52.5A	57.7A	65.6A	78.8A	94.5A
Máx. Corrente de saída	43.6A	58.3A	64.0A	73.0A	87.4A	94.5A
Fator de potência	> 0.99					
Fator ajustável de potência	0.8i-0.8c					
THDI	<3%					
Tipo de conexão CA	3W+N+PE					
Eficiência						
Máx. Eficiência	98.8%					
Euro-eta	98.2%					

Fonte: Growatt, 2020

Em seguida, identificam-se a potência de saída do inversor, a tensão máxima de entrada e a corrente máxima por MPPT (*Maximum Power Point Tracking* em português rastreamento do ponto de máxima potência) através dos dados da tabela encontrada em seu *datasheet* (Tabela 13). Este inversor possui 3 MPPT.

- Potência nominal de saída (P_{INV}): 36000 W
- Tensão máxima de entrada (V_{INV}): 1100 V
- Corrente máxima de entrada por MPPT (I_{INV}): 52 A

Dividindo o valor da potência demandada no sistema formado pelos painéis de modelo *Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P*, chega-se à quantidade de inversores para esse sistema, conforme Eq. 3.35.

$$Q_{inv\ poli} = \frac{P_{\text{painéis poli}}}{P_{inv}} \approx 2,8355 = 3 \text{ inversores} \quad (3.35)$$

Pode-se calcular a quantidade máxima de painéis por inversor através da razão da potência nominal do inversor pela potência máxima do painel, conforme Eq. 3.36.

$$Q_{\text{painéis poli por inversor}} = \frac{P_{\text{inv}}}{P_{\text{poli}}} \approx 81,8181 = 81 \text{ painéis} \quad (3.36)$$

Para definir-se a configuração dos painéis verifica-se a quantidade de painéis que podem ficar em série dividindo o valor da tensão máxima de entrada do inversor pela tensão de máxima potência do painel (Eq. 3.37).

$$NPS = \frac{V_{\text{inv}}}{V_{\text{poli}}} = 27 \text{ painéis em série} \quad (3.37)$$

Como o inversor possui 3 MPPTs, pode-se definir uma configuração de 27 painéis em série em cada MPPT, totalizando assim, painéis em dois dos inversores utilizados. O terceiro inversor desse sistema receberá uma configuração de painéis de 23 em série em 2 MPPTs e 24 em série no MPPT restante.

Para definir-se a quantidade de inversores para os *minigrids* compostos pelos painéis dos modelos *BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W* e *BYD MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell 540W* volta-se aos valores de potência, tensão e corrente citados na Seção 3.1, são estes:

- Potência máxima (P_{max})(STC): 540 W
- Tensão de máxima potência (V_{mp})(STC): 49,72 V
- Corrente de máxima potência (I_{mp})(STC): 13,53 A

Dividindo o valor da potência demandada no sistema formado pelos painéis dos modelos *BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W* e *BYD MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell 540W*, chega-se à quantidade de inversores para esses sistemas, conforme Equações 3.38 e 3.39.

$$Q_{\text{inv bifacial}} = \frac{P_{\text{painéis bifacial}}}{P_{\text{inv}}} = 3,48 = 4 \text{ inversores} \quad (3.38)$$

$$Q_{inv\ half-cell} = \frac{P_{painéis\ half-cell}}{P_{inv}} = 3,48 = 4\ inversores \quad (3.39)$$

Pode-se calcular a quantidade máxima de painéis por inversor através da razão da potência nominal do inversor pela potência máxima dos painéis, conforme demonstrado nas Equações 3.40 e 3.41.

$$Q_{painéis\ bifacial\ por\ inversor} = \frac{P_{inv}}{P_{bifacial}} \approx 66,6666 = 66\ painéis \quad (3.40)$$

$$Q_{painéis\ half-cell\ por\ inversor} = \frac{P_{inv}}{P_{half-cell}} \approx 66,6666 = 66\ painéis \quad (3.41)$$

Para definir-se a configuração dos painéis verifica-se a quantidade máxima de painéis que podem ficar em série dividindo o valor da tensão máxima de entrada do inversor pela tensão de máxima potência dos painéis (Equações 3.42 e 3.43).

$$NPS_{bifacial} = \frac{V_{inv}}{V_{bifacial}} = 26\ painéis\ em\ série \quad (3.42)$$

$$NPS_{half-cell} = \frac{V_{inv}}{V_{half-cell}} = 26\ painéis\ em\ série \quad (3.43)$$

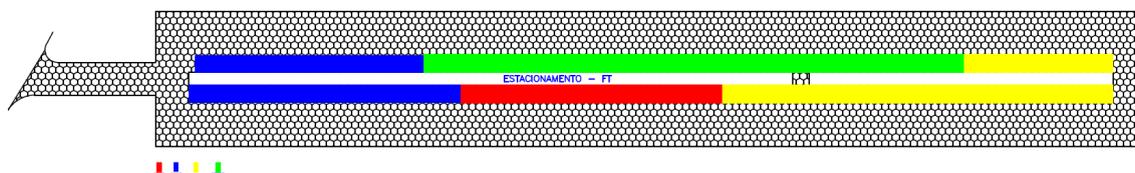
Como o inversor possui 3 MPPTs, pode-se definir uma configuração de painéis de 19 em série em 2 MPPTs e 20 em série no MPPT restante para ambos os sistemas – de painéis do tipo *half-cell* e bifacial.

4. Resultados

4.1. Projeto

Utilizando o *software AutoCAD* foi definida a disposição dos painéis na área do estacionamento da UFAM conforme a Figura 26. Nele, os painéis do modelo *Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS* são representados pela cor vermelha, os painéis do modelo *Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P* são representados pela cor azul, os painéis do modelo *BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W* são representados pela cor amarela e os painéis do modelo *BYD MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell 540W* são representados pela cor verde.

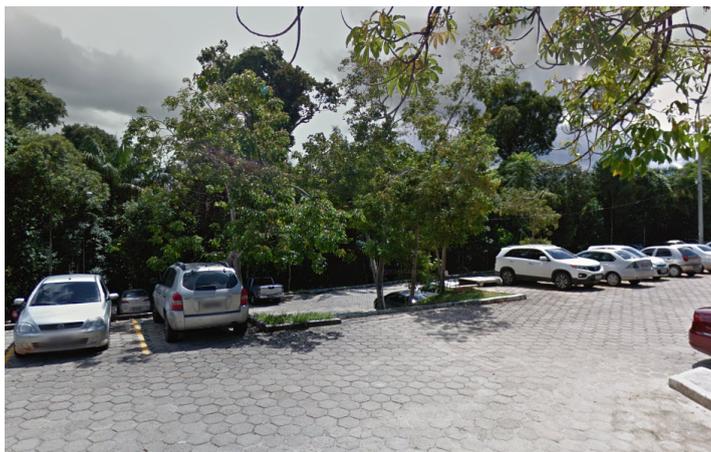
Figura 26 Planta baixa do estacionamento da FT com disposição de módulos fotovoltaicos: painéis do modelo *Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS* em vermelho, painéis do modelo *Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P* em azul, painéis do modelo *BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W* em amarelo e painéis do modelo *BYD MLK-36 MONOFACIAL PERC half-cell 540W* em verde.



Fonte: Própria, 2022

Nesta disposição, para maior aproveitamento da área disponível, será preciso que algumas árvores que se encontram na área da rampa de descida do estacionamento sejam retiradas do espaço, como mostra a Figura 27.

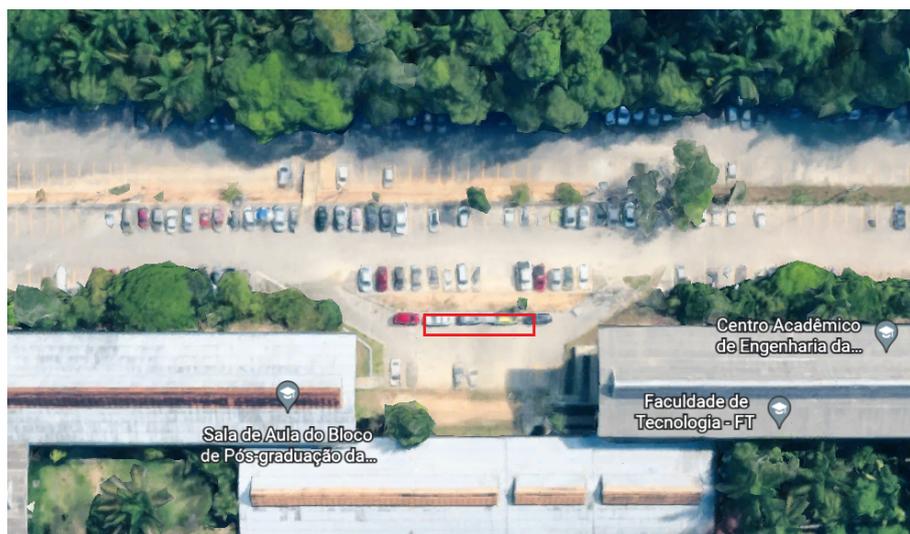
Figura 27 Rampa de acesso ao estacionamento da FT



Fonte: *Google Maps*, 2022

Neste caso, se faz necessário um programa de compensação ambiental conforme art. 36 da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, regulamentada pelos arts. 31 a 34 do Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002 a fim de compensar a sociedade e o meio ambiente como um todo, pelo uso autorizado de recursos naturais por empreendimento de significativo impacto ambiental (Ministério do Meio Ambiente, 2021).

A disposição dos painéis do modelo *Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS* foi escolhida a partir da posição do banco de baterias, já que estes devem se localizar o mais próximo possível das baterias. Neste caso escolheu-se a localização mostrada na Figura 28 para colocação de *container* que abrigará o banco de baterias e inversores dos sistemas.

Figura 28 Posição de *container*

Fonte: *Google Maps*, 2022

O modelo de container escolhido está representado na Figura 29, sendo este um reservatório de energia solar refrigerado com dimensões de 11590 x 2294 x 2554 mm.

Figura 29 *Container reefer 40ft*

Fonte: ALIBABA, 2022

4.1.1. Cortes

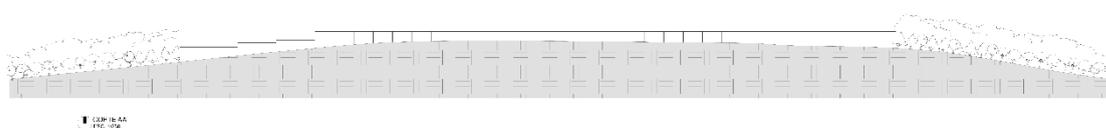
Considerando a locação das placas solares na Figura 26, pode-se verificar os seus cortes. Nos cortes transversal e longitudinal percebe-se a relação das alturas dos painéis com a topografia do estacionamento, além de que é possível perceber que no corte longitudinal (AA') que os apoios das placas das pontas seriam bem mais altos, pois pela topografia do terreno e para que os

painéis fiquem todos alinhados, sem prejudicar a máxima captação da luz solar, é imprescindível que eles fiquem todos na mesma altura, sem que um sobreponha o outro. Dessa forma, apresentam-se duas propostas de cortes longitudinais:

- Proposta 1

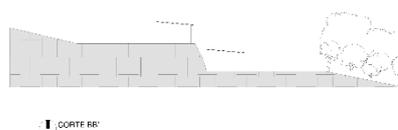
A altura no ponto mais alto do terreno seria de 2,30m e nas pontas a altura da estrutura chega a 4,40m.

Figura 30 Corte AA' - Proposta 1



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a) Francieny Marinho

Figura 31 Corte BB'



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

- Proposta 2

A altura no ponto mais alto do terreno seria de 2,30m e nas pontas segue a topografia do terreno com altura média de 2,4m. Esta proposta foi descartada devido ao menor aproveitamento da luz solar.

Figura 32 Corte AA' - Proposta 2



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

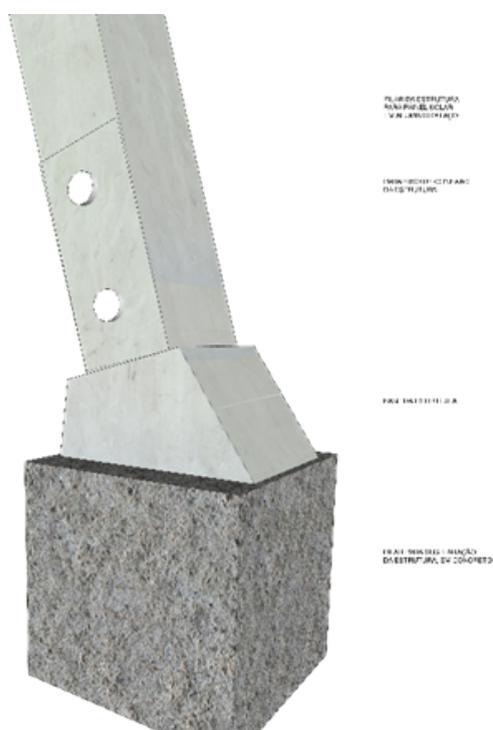
4.1.2. Estrutura

Apesar de já existir uma estrutura para estacionamento solar no mercado chamada *carport*, estrutura essa projetada para instalação rápida e fornecimento de uma montagem segura para módulos fotovoltaicos fabricada

em aço galvanizado, realizou-se o projeto estrutural proposto para o sistema apresentado neste trabalho a fim de valorizar o trabalho de discentes da FT.

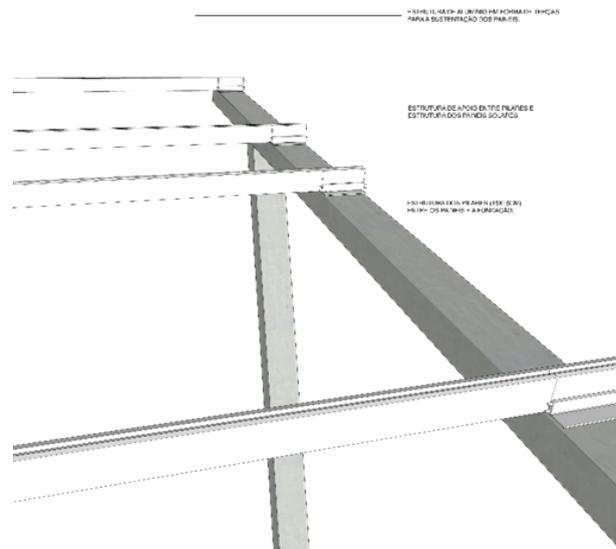
Os materiais utilizados na estrutura para os painéis foram o alumínio/aço e o concreto, para as fundações que seriam do tipo rasa – sapata, seria utilizado concreto, com uma coluna base de 30cm de altura, com dimensões de 20x20cm, para no centro de cada uma delas se posicionar a estrutura para os painéis, estrutura essa que seria parafusada no concreto para conseguir mais estabilidade.

Figura 33 Detalhamento da base



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 34 Detalhamento da parte superior



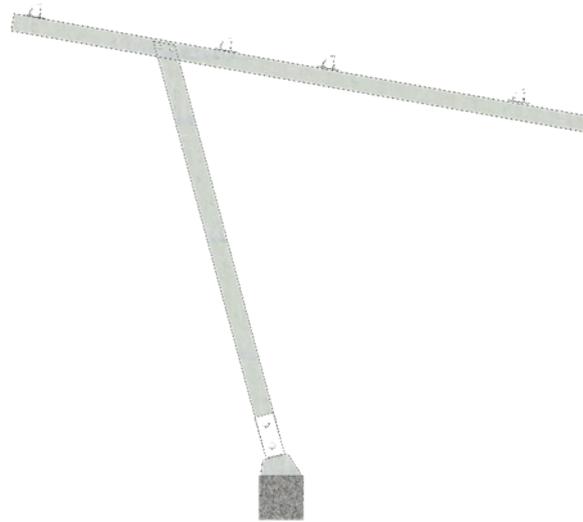
Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 35 Vista de um módulo da estrutura para painéis solares



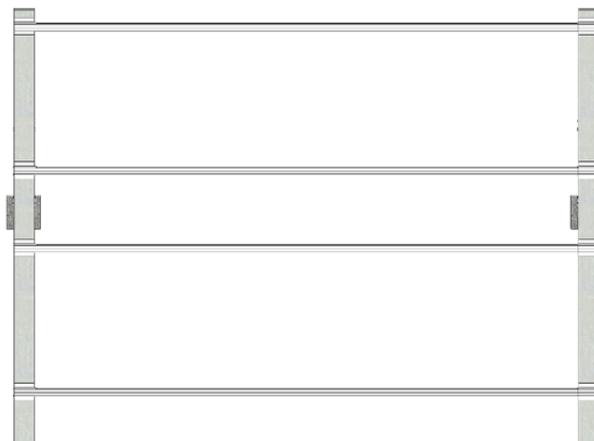
Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 35 Corte/vista lateral dos módulos



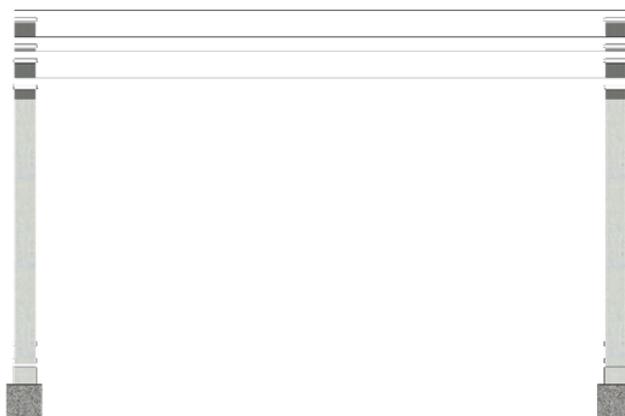
Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 37 Vista superior dos módulos



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 38 Vista frontal dos módulos



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 39 Vista de um módulo com os painéis implantados



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

4.1.3. *Renders*

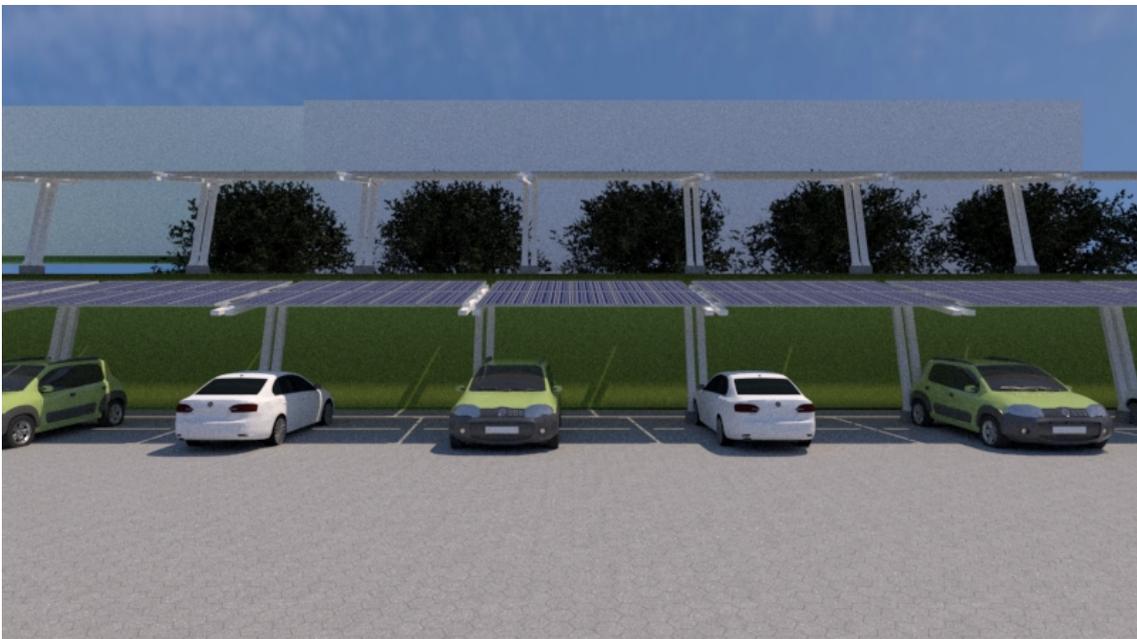
Com as imagens renderizadas, pode-se perceber melhor como ficaria a aplicação dessa estrutura em módulos no estacionamento da FT.

Figura 40 Imagem do estacionamento da faculdade de tecnologia às 12:00hrs



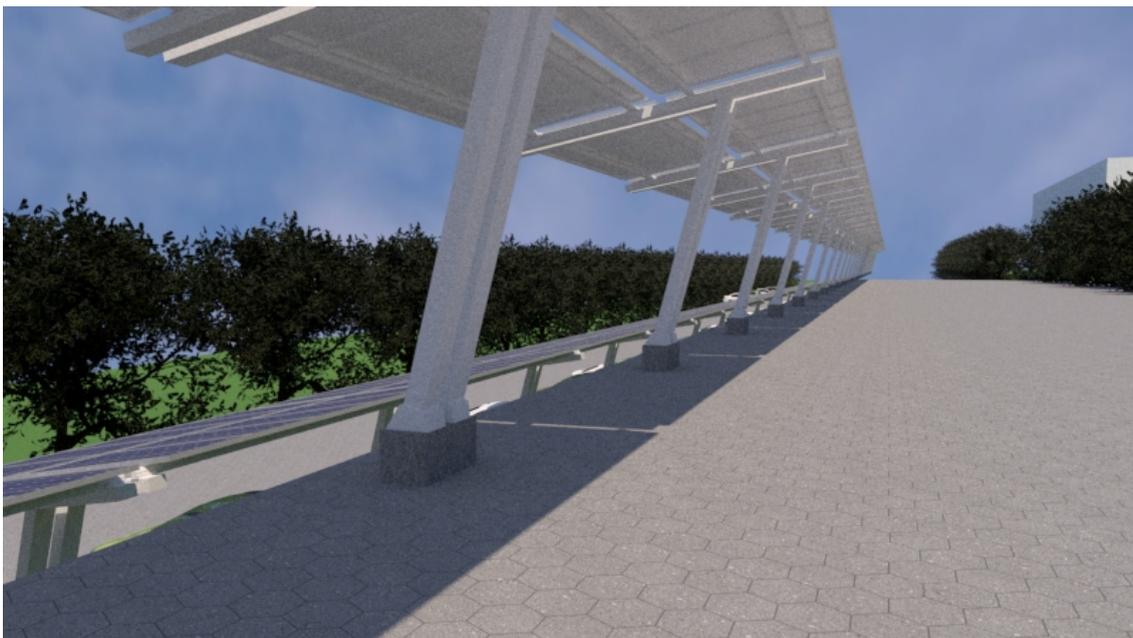
Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 41 Imagem do estacionamento da faculdade de tecnologia depois de 12:00hrs



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 42 Imagem da área superior do estacionamento da faculdade de tecnologia



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

Figura 43 Imagem geral do estacionamento da faculdade de tecnologia



Fonte: Elaborado pela autora Francieny Marinho

4.2. Cálculo de Queda de tensão DC

Para seguir-se com um projeto, é preciso dimensionar os condutores utilizados, sendo estes os cabos. Os critérios para esse dimensionamento estão nos

fatores de capacidade de condução de corrente e no cálculo da queda de tensão. Utilizando a norma NBR 16690 para instalações fotovoltaicas pode-se destacar a seção 4.3.10 tópico c) que fala sobre a queda de tensão nos condutores em circuitos de corrente contínua: “O dimensionamento dos condutores do arranjo fotovoltaico afeta a queda de tensão sob condições de carga. Esta queda de tensão pode ser particularmente significativa em arranjos fotovoltaicos com baixa tensão e alta corrente de saída. Sob condições de carga máxima, recomenda-se que a queda de tensão verificada não seja superior a 3% da tensão do arranjo fotovoltaico em seu ponto de máxima potência (nas STC)”.

Pode-se calcular a queda percentual de tensão a partir da fórmula a seguir:

$$\Delta V (\%) = \frac{\Delta V}{U} \quad (4.1)$$

Em que:

$$\Delta V = r * C * I \quad (4.2)$$

O valor de U será correspondente a tensão da fonte, r é a resistência por unidade de comprimento, valor encontrado em catálogo de fabricante do cabo, C será o comprimento total do circuito - a distância considerada será entre o módulo fotovoltaico mais distante até o controlador de carga e vice-versa - e I a corrente.

Utilizou-se cabos de 6 mm² para possibilitar o uso dos conectores para conexão das *strings* dos painéis fotovoltaicos aos controladores de carga.

Para obter-se os valores de resistência por unidade de comprimento deve-se verificar a tabela de características técnicas do cabo. Sendo assim, utilizando cabos da marca Cortox Solar/Cordeiro verifica-se na Tabela 14 de dados técnicos em que obtém-se o valor de 3,39Ω/km para cabos de 6mm².

Tabela 14 Dados elétricos de cabos Cortox Solar/Cordeiro

SEÇÃO	Nº DE CONDUTORES	ESPESSURA ISOLAÇÃO NOMINAL	ESPESSURA COBERTURA NOMINAL	Ø EXTERNO MÁXIMO	RESISTENCIA MÁXIMA A 20 °C	MASSA NOMINAL
		mm	mm	mm	Ω / KM	Kg / Km
1,50 mm ²	1	0,7	0,80	5,40	13,7	34
2,50 mm ²	1	0,7	0,80	5,90	8,21	47
4,00 mm ²	1	0,7	0,80	6,60	5,09	61
6,00 mm ²	1	0,7	0,80	7,40	3,39	83
10,0 mm ²	1	0,7	0,80	8,80	1,95	128
16,0 mm ²	1	0,7	0,90	10,10	1,24	190
25,0 mm ²	1	0,9	1,00	12,50	0,785	291
35,0 mm ²	1	0,9	1,10	14,00	0,565	390

Fonte: Cordeiro Soluções em Energia, 2020

Utilizando o *software AutoCAD* mede-se a distância do painel mais distante da localização do controlador de carga - localizado no *container*, que será nossa casa de força - e chega-se a uma distância de aproximadamente 61,5681 metros (ou 0,06156 quilômetros), contudo multiplica-se essa distância por 2. Além disso, utiliza-se a referência de máxima potência em STC conforme NBR-16690 para definir a tensão e corrente. Sendo assim, considerando que a configuração dos painéis é 14S-2P pode-se chegar ao valor de tensão e a corrente no ponto de máxima potência:

$$U = 41,2 * 14 = 576,8 V \quad (4.3)$$

$$I = 13,23 * 2 = 26,46 A \quad (4.4)$$

Dessa forma, pode-se então calcular a queda de tensão:

$$\Delta V \approx 11,0437 V \quad (4.5)$$

Percentualmente chega-se ao valor indicado pela equação 4.6.

$$\Delta V (\%) = 1,9146\% \quad (4.6)$$

Portanto, o valor da queda de tensão nos condutores segue a recomendação da norma.

4.3. Orçamento

Após o dimensionamento de todos os componentes dos sistemas *off-grid* e *on-grid* propostos, foi realizado o orçamento aproximado do custo total do

projeto. Alguns componentes não possuíam opções de fabricantes nacionais, portanto, nesses casos foi aplicada uma taxa de 30% a mais do valor convertido em real, considerando que o valor de câmbio é variável. Esses componentes importados estavam em dólar e rupias e seus valores foram convertidos para real utilizando a cotação do dia 9 de setembro de 2022. Isto está expresso na Tabela 15.

Tabela 15 Orçamento dos componentes dos sistemas *on-grid* e *off-grid*

	Luminária CP-T812-18 W	Luminária PRDSSL	Bateria UPLFP48-10 0-3U	Cont. de Carga MPPT 100 600	Inversor MAC 36KTL3-XL	<i>Container reefer 40ft</i>
Qnt.	804	3	92	4	11	1
Valor (R\$)	20.600,892	383,539	1.223.600,00	10.683,881	241.879,00	344.387,68

Como os módulos fotovoltaicos foram escolhidos a partir de marcas de fabricação nacional, podemos ter os valores em real em seu orçamento, conforme Tabela 16.

Tabela 16 Orçamento dos módulos fotovoltaicos

Painéis solares	<i>Canadian HiKu6 Mono CS6W-545MS</i>	<i>Canadian HiKu PERC POLY CS3W-440P</i>	<i>BYD MLTK-36 BIFACIAL 540W</i>	<i>BYD MLK-36 half-cell 540W</i>
Qnt.	112	232	232	232
Valor (R\$)	122.358,88	206.248,00	336.400,00	336.400,00

Dessa forma, pode-se chegar ao custo total estimado do empreendimento, desconsiderando o custo de estrutura, proteção, comando e

cabeamento que não foram orçados neste trabalho, conforme apresentado na Equação 4.7.

$$Custo\ total = R\$ 2.842.941,87 \quad (4.7)$$

4.4. Economia gerada

Considerando que o sistema *on-grid*, ou sistema ligado a rede, irá interferir diretamente no consumo da energia da concessionária, pode-se calcular a potência que será produzida por esse sistema e assim a energia que será economizada na conta de energia da FT.

Dessa forma, considerando a quantidade de painéis definida na Seção 3.3.4 pode-se chegar ao valor de energia gerada mensal somando a potência pico gerada pelos painéis - conforme Equações 3.32, 3.33 e 3.34 - e multiplicando esse valor a insolação diária média anual e por 30 dias. Deve-se considerar o fator de perdas mostrado na Equação 3.7 no total calculado, portanto, a energia gerada pelo sistemas *on-grid* será:

$$E = \frac{(P_{\text{painéis poli}} + P_{\text{painéis bifacial}} + P_{\text{painéis half-cell}})}{1,25} \times 4,42 \times 30 \quad (4.8)$$

Assim:

$$E = 37.408,0512 \text{ kWh/mês} \quad (4.9)$$

Considerando que $\frac{2}{3}$ do consumo da unidade da FT correspondem ao valor mostrado na Equação 3.23 e que a iluminação do corredor será alimentada pelo sistema *off-grid*, o que corresponde a cerca de 162,216 kWh/dia (ou 4.866,48 kWh/mês) conforme Seção 3.2.2, pode-se concluir que com a implementação do projeto do sistema solar fotovoltaico apresentado neste trabalho pode-se diminuir em aproximadamente 43,28% o consumo direto mensal da concessionária de energia conforme Equação 4.9, reduzindo o valor pago de energia pela unidade e contribuindo para a implementação de

uma fonte de energia renovável. O cálculo percentual da energia economizada está na Equação 4.10.

$$E(\%) = \frac{E+4866,48}{\frac{65109,6}{2/3}} \times 100 = 43,28\% \quad (4.10)$$

5. Conclusão

Neste trabalho de conclusão de curso, foi proposto um sistema de energia solar fotovoltaica, com ambas modalidades *on-grid* e *off-grid*, para fornecimento de energia elétrica ao estacionamento da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas e energização do sistema de iluminação dos corredores da unidade, considerando a utilização de 4 tecnologias de painéis solares. Para tal, foram dimensionados os subsistemas de cada modalidade, visando prioritariamente a diminuição do consumo de energia elétrica da unidade, e a alimentação da iluminação dos corredores em situações de queda de energia, respectivamente.

O resultado do trabalho é o dimensionamento e orçamento de um sistema de energia solar fotovoltaico completo, cujos painéis e casa de força - composta por baterias, controladores de carga e inversores - tiveram sua disposição definida a partir do uso do *software AutoCAD*. Constando também seu memorial descritivo estrutural de forma que a área do estacionamento é de grande potencial para geração de energia solar fotovoltaica, gerando também uma área de sombreamento para carros estacionados no local.

Para projetos futuros é importante reconhecer a necessidade de dimensionamento da parte de proteção e comando - disjuntores, quadros elétricos, dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e aterramento - não dimensionados neste projeto. Além disso, é importante considerar que a queda de tensão deve ser considerada também nos circuitos com as cargas DC - lâmpadas - substituídas, portanto em projetos de instalação elétrica dessas cargas deve-se considerar o circuito mais longo entre as baterias e as lâmpadas para avaliar-se a queda de tensão conforme NBR 5410.

O projeto apresentado nesta monografia tem o potencial de diminuir em 43,28% a conta mensal da unidade de energia elétrica e, por conseguinte, 43,28% a menos de emissão de CO₂ equivalente na atmosfera, já que a solução apresentada neste trabalho é 100% de energia limpa e de fonte renovável. Ademais, o laboratório vivo construído com a disponibilização de 4 tecnologias disponíveis no mercado da energia solar possibilitará aos discentes e docentes da FT pesquisas e desenvolvimento na área.

Referências

A. YUSUFOGLU, Ufuk et al. **Analysis of the Annual Performance of Bifacial Modules and Optimization Method**. IEEE Journal of Photovoltaics. Estados Unidos, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6960821>. Acesso em: 3 ago. 2022.

ABNT. **NBR 16690 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos**. Brasil, julho. 2019. Disponível em: <https://www.solarize.com.br/downloads/manual-energia-solar/NBR-16690-2019-consulta-publica.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2022.

AHMED HUSSEIN, Muawya; LEAL FILHO, Walter. **Analysis of energy as a precondition for improvement of living conditions and poverty reduction in sub-Saharan Africa**. Scientific Research and Essays, [S. l.], v. 7, p. 2656-2666, 2 ago. 2012. DOI 10.5897/SRE11.929. Disponível em: <http://www.academicjournals.org/SRE>. Acesso em: 7 jun. 2022.

ALIBABA. **High quality dc 12v 24v 36v 48v t8 led tube 4ft 1200mm 18w 20w 22w led tube for indoor lighting**. Guangdong, China, 2022. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/High-quality-dc-12v-24v-36v_60678999882.html. Acesso em: 18 fev. 2022.

ANEEL. **Expansão na matriz elétrica foi de 200 MW em abril, com acréscimos em cinco estados: Usinas eólicas e solares equivalem a 75% dos 1.551 MW liberados para operação comercial em 2022**. Brasil, 6 maio. 2022. Disponível em: <https://www.natgeo.pt/meio-ambiente/2017/06/tres-motivos-para-acreditar-no-boom-das-energias-renovaveis-na-china>. Acesso em: 19 ago. 2022.

ANEEL. **Matriz energética cresce 383,66 MW em março e 682,61 MW no primeiro trimestre de 2021**. 2021. Disponível em: <bit.ly/3utCA8Q>. Acesso em: 26 de Janeiro de 2022.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 493**. Brasil, 8 de junho. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

ASGHARZADEH, Amir et al. **A Sensitivity Study of the Impact of Installation Parameters and System Configuration on the Performance of Bifacial PV Arrays**. IEEE Journal of Photovoltaics. Estados Unidos, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8340958>. Acesso em: 3 ago. 2022.

AUGUSTO TONOLO, Édwin. **Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR Campus Curitiba**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4664/1/CT_PPGSE_M_Tonolo%2C%20%C3%89dwin%20Augusto_2019.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.

AYALA PELAEZ, Silvana. **Bifacial Solar Panels System Design, Modeling, and Performance**. The University of Arizona. Estados Unidos, 2019. Disponível em: <https://repository.arizona.edu/handle/10150/631283>. Acesso em: 3 ago. 2022.

BARBOSA DE MELO , Karen et al. **Study of energy improvement with the insertion of bifacial modules and solar trackers in photovoltaic installations in Brazil**. Renewable Energy Focus, Elsevier, Campinas, 4 feb. 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.02.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755008422000084>. Acesso em: 8 ago. 2022.

BYD. **BYD MLK-36 Monofacial: 520W ~ 540W**. Brasil, 2017. Disponível em: https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/02/MLK-36-Datasheet-V.03_2022-30-Modulos_compressed.pdf. Acesso em: 12 fev. 2022.

BYD. **BYD MLTK-36 Bifacial: 520W ~ 540W**. Brasil, 2017. Disponível em: https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/02/MLTK-36-Datasheet-V.03_2022-30-Modulos_compressed.pdf. Acesso em: 12 fev. 2022.

CANADIANSOLAR. **Hiku Módulo Perc Poly Super Alta Potência: 425W ~ 440W**. Guelph, Maio 2020. Acesso em: 10 jan. 2022.

CANADIANSOLAR. **Hiku6 Mono**: 525W ~ 545W. Guelph, Julho 2020. Acesso em: 15 jan. 2022.

CNN. **EUA x China: que país emite mais gases causadores do efeito estufa?**: Juntas, potências mundiais emitem quase 40% desses gases; Brasil também está entre os maiores emissores do planeta. Brasil, 29 out. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/eua-x-china-que-pais-emite-mais-gases-causadores-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 3 jun. 2022.

CORDEIRO SOLUÇÕES EM ENERGIA. **Cabo Cortox Solar (0,6 / 1kV)**. Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.cordeiro.com.br/cabos-eletricos/cabo-cortox-solar-06-1kv/>. Acesso em: 5 set. 2022.

ELETROTRAFO. **PAINEL SOLAR CS6W-545MS 144 CELULAS MONO 545W - CANADIAN**. Cornélio Procópio, Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.eletrotrafo.com.br/painel-solar-canadian-cs6w-545ms-144-celulas-mono-545w-03820510/p>. Acesso em: 5 set. 2022.

EUROPEAN COUNCIL (Europa). General Secretariat of the Council. **2030 Climate and Energy Policy Framework**, Brussels, 24 set. 2014. Disponível em: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/en/pdf>. Acesso em: 23 jun. 2022.

FORÇA & LUZ. **Painel Solar HiKu CS3W-425P Canadian Solar 425W POLI**. São Paulo, Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.forcaeluzeletrico.com.br/energia-solar/painel-solar-canadian-425w-poli>. Acesso em: 5 set. 2022.

GARDINER, Beth. **Três Motivos para Acreditar no Boom das Energias Renováveis na China**: O país sofre de um nível atroz de poluição atmosférica. Tem receio das alterações climáticas. E quer ser um "monstro da produção" também no setor das energias renováveis. National Geographic. Estados Unidos, 9 nov. 2017. Disponível em:

<https://www.natgeo.pt/meio-ambiente/2017/06/tres-motivos-para-acreditar-no-bloom-das-energias-renovaveis-na-china>. Acesso em: 10 jul. 2022.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Dados Solarimétricos**. Alemanha, março. 2021. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=50.694249.9.211467.5&s=51.133481.10.018343&m=site>. Acesso em: 2 ago. 2022.

GOOGLE MAPS. **Estacionamento da Faculdade de Tecnologia - UFAM**. Brasil, 2022. Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/tAeheogAXfFLt5th8>. Acesso em: 17 jan. 2022.

GRAFMAN, Lonny; PEARCE, Joshua. **To Catch the Sun**. Humboldt State University Press. California, 2021. ISBN 978-1-947112-62-9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356192238_TO_CATCH_THE_SUN. Acesso em: 31 mar. 2022.

GROWATT. **MAC 15~36KTL3-XL**. China, 2020. Disponível em: <https://www.ginverter.pt/upload/file/contents/2020/06/5ed77e2ca4f03.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

HANIFI , Hamed et al. **Reduced shading effect on half-cell modules - Measurement and Simulation**. 31^o European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Alemanha, sep. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283488492_REDUCED_SHADING_EFFECT_ON_HALF-CELL_MODULES_-_MEASUREMENT_AND_SIMULATION. Acesso em: 8 ago. 2022.

INDIAMART. **12V DC /24V DC /36V DC / 48V DC Operated Street /Flood Light**. Gujarat, India, 2022. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/12v-dc-24v-dc-36v-dc-48v-dc-operated-street-flood-light-19780613012.html>. Acesso em: 18 fev. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. Europa, 2019. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. Europa, 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Future of solar photovoltaic**. Abu Dhabi, Novembro 2019. ISBN 978-92-9260-156-0. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>. Acesso em: 11 ago. 2022.

KREININ, Lev et al. **PV module power gain due to bifacial design. Preliminary experimental 23 and simulation data**. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Estados Unidos, 2010, p. 2171–2175. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5615874>. Acesso em: 3 ago. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Compensação ambiental**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Brasil, dez. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/compensacao-ambiental#:~:text=A%20compensa%C3%A7%C3%A3o%20ambiental%20consiste%20na,a%20unidade%20de%20conserva%C3%A7%C3%A3o%20benefici%C3%A1ria>. Acesso em: 26 abril. 2022.

MOHANTY, Parimity. **Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification**. Springer. Suíça, 2016. ISBN 978-3-319-14663-8. Disponível em: <https://www.springer.com/series/8059>. Acesso em: 31 mar. 2022.

MONTEIRO DE OLIVEIRA, Paulo. **Estudo de Energia Reativa da Subestação da Faculdade de Tecnologia**. Universidade Federal do Amazonas - UFAM. Manaus, nov. 2017.. Acesso em: 27 jan. 2022.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Acesso à eletricidade avança, mas desigualdade ainda é obstáculo para cumprir meta de energia para todos**. Brasília, 7 jun. 2021. Disponível em:

<https://brasil.un.org/pt-br/130381-acesso-eletricidade-avanca-mas-desigualdade-e-ainda-e-obstaculo-para-cumprir-meta-de-energia#:~:text=Enquanto%20mais%20de%20um%20bilh%C3%A3o,30%20milh%C3%B5es%2C%20principalmente%20na%20%C3%81frica>. Acesso em: 27 fev. 2022.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Comparison of modeling methods and tools for bifacial PV performance**. National Renewable Energy Laboratory, University of Iowa. Estados Unidos, 2018. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1484158>. Acesso em: 3 ago. 2022.

SCHNEIDER ELECTRIC. **MPPT PV Optimization: 600 Vdc Solar Charge Controllers**. São Paulo, Brasil, 2017. Disponível em: <https://solar.se.com/us/wp-content/uploads/sites/7/2021/10/MPPT-100-600-and-MPPT-80-600-Datasheet.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

SIGA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Brasil, 2 agosto. 2022. Disponível em: <https://www.natgeo.pt/meio-ambiente/2017/06/tres-motivos-para-acreditar-no-boom-das-energias-renovaveis-na-china>. Acesso em: 2 ago. 2022.

SOLARIZE. **Módulos bifaciais: entenda os ganhos para decidir onde usar com vantagem**. Rio de Janeiro, Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.solarize.com.br/site-content/11-blog/460-modulos-bifaciais-entenda-os-ganhos-para-decidir-onde-usar>. Acesso em: 2 ago. 2022.

SUN DATA. **Potencial Solar - SunData v3.0**. Brasil, 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 30 abril. 2022.

TAVARES PINHO, João; ANTONIO GALDINO, Marco. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL - CRESESB. Rio de Janeiro, mar. 2014. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/manual-de-engenharia-para-sistemas-fotovoltaicos-2014/>. Acesso em: 24 fev. 2022.

TEIXEIRA COELHO , Suani et al. **Biomass Residues as Electricity Generation Source in Low HDI Regions of Brazil**. The XI Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission - CLAGTEE, São José

dos Campos, v. CLAGTEE Proceedings and Book of Abstracts, 2 nov. 2015. p. 10-20. DOI 10.13140/RG.2.1.2747.7208. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283091874_Biomass_Residues_as_Electricity_Generation_Source_in_Low_HDI_Regions_of_Brazil. Acesso em: 20 abril. 2022.

UFAM. **Centro de Tecnologia da Informação e Comunicação - CTIC - UFAM**. Brasil, 2022. Disponível em: <https://ctic.ufam.edu.br/localizacao.html>. Acesso em: 20 fev. 2022.

UNEP. **Investimentos em energia renovável alcançarão US\$ 2,5 trilhões nessa década**. Quênia, Setembro 2019. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/press-release/investimentos-em-energia-renovavel-alcancarao-us-25-trilhoes>. Acesso em: 7 mar. 2022.

UNIPOWER. **UPLFP48-100-3U**: Bateria Lítio Ferro Fosfato - LiFePO₄. São Paulo, Brasil. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom/upload/File-1628882661.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

WOLF TECHNOLOGY. **Modulo fotovoltaico 535 Watts – MLTK-36 BIFACIAL 520W – 540W**. Nova Lima, Brasil, 2022. Disponível em: <https://wolftechnology.com.br/produto/modulo-fotovoltaico-535-watts-mltk-36-bifacial-520w-540w/>. Acesso em: 5 set. 2022.