



METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA EM UMA PEQUENA INDUSTRIA DE ALIMENTOS

Carlos Eduardo de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Belém
Dezembro de 2021

**METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA USINA
FOTOVOLTAICA EM UMA PEQUENA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

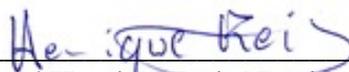
Carlos Eduardo de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



Prof. Jandecy Cabral Leite, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



Prof. Manoel Henrique Reis Nascimento, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



Prof. David Barbosa de Alencar, Dr.
(UNIP-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

DEZEMBRO DE 2021

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA**

Oliveira, Carlos Eduardo de, 1975-
Metodologia para implementação de uma usina fotovoltaica
em uma pequena indústria de alimentos / Carlos Eduardo de
Oliveira - 2021.

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal
do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Processos, 2021.

1. Geração de Energia 2. Usina Fotovoltaica 3. Energia
Fotovoltaica I. Título

CDD 670.42

*Dedico este trabalho à minha esposa,
aos meus filhos, Carmem Helena, João e
Carlos Eduardo os quais são a razão de
minhas vitórias e desejo deixar o que há
de melhor em mim através de meus
exemplos de dignidade, honestidade e
perseverança!*

AGRADECIMENTOS

Para realização deste Trabalho de Conclusão de Mestrado sou grato primeiramente a Deus, pela força que me concede a cada dia para superar todas as adversidades da vida, pelo fortalecimento e sabedoria com que proveu nestes momentos difíceis em minha vida.

À minha esposa Leila, por sua capacidade de acreditar no meu potencial, e a maneira paciente com que me ajudou após cada batalha.

Agradeço também a todos os professores do Curso de Mestrado em Engenharia de Processo, que contribuíram em mais esta etapa acadêmica, em especial ao Professor Jandecy Cabral Leite por sua orientação sempre dedicada e repleta de conhecimentos.

Aos companheiros de turma por mais esta etapa vencida na vida, por sempre contar com ajuda de todos e o companheirismo existente no grupo de trabalho.

Ao Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM) e a Universidade Federal do Pará (UFPA), por promoverem a criação deste curso, possibilitando meu crescimento profissional, acadêmico e intelectual nesta transformação dos meus sonhos em realidade.

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito”

(Sir Issac Newton)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UMA USINA FOTOVOLTAICA EM UMA PEQUENA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Carlos Eduardo de Oliveira

Dezembro/2021

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Área de Concentração: Engenharia de Processos

O Brasil necessita aumentar a oferta de energia sustentável e renovável como a solar e eólicas, principalmente na região norte, onde possui a maior tarifa de energia elétrica do país. A região se distingue das demais regiões do país pela existência de diversos sistemas isolados, a maior parte deles de pequeno porte com baixa confiabilidade e qualidade de serviços com custos elevadíssimos, tendo em vista a necessidade de geração térmica a diesel e a óleo combustível, como montante representa cerca de 92% de todo o combustível previsto para ser utilizado no Brasil na geração de energia termelétrica, sinalizando um custo com combustível em 2021 que supera os R\$ 2 bilhões de reais, que é superado em grande parte, pelas transferências de recursos obtidos através da Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC). Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para a produção de on grid de energia fotovoltaica a fim de ser integrada na rede de concessionária como referência na geração de energia. É uma grande alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica, e o Brasil tem as condições necessárias para aproveitar tais tecnologias. Entretanto esta ação estratégica deve ser integrada, de forma a desenvolver a sociedade nas áreas econômica, social e ambiental. O desenvolvimento do trabalho proporcionou a geração de resultados econômicos, técnicos e ambientais sobre a utilização da energia solar em regiões que possuem altos custos de geração de energia, deste modo capacitamos as técnicas e estruturas para beneficiar, inclusive pequenas indústrias e comércios com uma captação de recursos energéticos. O objetivo geral é avaliar os

resultados da implementação de um sistema fotovoltaico on grid de 40 Kwp Energia Solar na Empacotadora Amazonas, com a finalidade de reduzir os custos operacionais e os impactos ambientais.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

STUDY OF THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY OF A PHOTOVOLTAIC PLANT IN A SMALL FOOD INDUSTRIA

Carlos Eduardo de Oliveira

December/2021

Advisor: Jandecy Cabral Leite

Research Area: Process Engineering

Brazil increases the supply of sustainable and renewable energy such as solar wind and wind, mainly in the northern region, where it has the highest electricity tariff in the country. The region is distinguished from other regions of the country by the existence of several possible systems, most of them small with low reliability and quality of services with very high costs, in view of the need for thermal generation using fuel oil, as an amount represents approximately 92% of all fuel planned to be used in Brazil in the generation of thermoelectric energy, signaling a cost of fuel in 2021 that exceeds R\$ 2 billion reais, which is largely surpassed by Available resources through the Fossil Fuels Consumption Account (CCC). This work aims to develop a methodology for the production of photovoltaic energy grid in order to be integrated into the utility grid as a reference in power generation. It is a great alternative to reduce electricity consumption, and Brazil is able to meet the necessary conditions for such technologies. However, this strategic action must be integrated, in order to develop a society in the economic, social and environmental areas. The development of the work provides the generation of economic, technical and environmental results on the use of energy in solar regions that have high energy generation costs, in this way we train the techniques and structures for beneficiaries, including small industries and businesses with a capture of energy resources. The general objective is to evaluate the results of the implementation of a photovoltaic system in the 40 Kwp Solar Energy grid at Empacotadora Amazonas, with the reduction of operating costs and environmental impacts.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 - OBJETIVOS.....	6
1.3.1 - Objetivo geral.....	6
1.3.2 - Objetivos específicos.....	6
1.4 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	6
1.5 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	6
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	8
2.1 - A ENERGIA SOLAR.....	8
2.2 - SISTEMA FOTOVOLTAICO (FV).....	19
2.3 - REDUÇÃO DE CUSTOS ECONÔMICOS COM O USO DA ENERGIA SOLAR.....	21
2.4 - GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DA REDE ELÉTRICA.....	26
2.5 - DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	31
2.6 - INDICADORES FINANCEIROS.....	33
2.6.1 - Pay Back Solar.....	33
2.6.2 - Valor Presente Líquido (VPL).....	34
2.6.3 - Taxa Interna de Retorno (TIR).....	34
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 - MATERIAIS.....	36
3.1.1 - Descrição dos equipamentos.....	36
3.1.1 - Inversor fotovoltaico trifásico.....	36
3.2 - TIPO DE FIXAÇÃO DOS MÓDULOS.....	37
3.2.1 - Estruturas de suporte dos módulos fotovoltaicos.....	37
3.3 - MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	38
3.4 - PROTEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICAS.....	39
3.4.1 - Cabeamento elétrico de CC e CA.....	40
3.4.2 - Fluxograma da metodologia aplicada.....	41
3.5 - MÉTODOS.....	41
3.5.1 - Procedimentos.....	41

3.5.2 - Delimitação.....	42
3.5.3 - Limitação da pesquisa.....	42
3.5.4 - Procedimento de análise.....	43
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 - DEFINIÇÃO DA ZONA DE ESTUDO E USO DE ENERGIA.....	45
4.2 - DETALHAMENTO DE PROJETO NA EMPACOTADORA AMAZONAS-AM.....	45
4.3 - IDENTIFICAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA.....	47
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	57
5.1 - CONCLUSÕES.....	57
5.2 - SUGESTÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Custo de produção de energia elétrica.....	4
Figura 2.1	Leitura da irradiação solar.....	10
Figura 2.2	Distribuição mundial da irradiação solar anual média (kWh/m ²)	11
Figura 2.3	Mapa de irradiação solar média no território brasileiro.....	13
Figura 2.4	Composição do painel solar.....	16
Figura 2.5	Módulo de silício policristalino.....	16
Figura 2.6	Exemplo de sistema fotovoltaico On Grid.....	20
Figura 2.7	Progressão mensal de gastos entre o sistema térmico e o fotovoltaico.....	21
Figura 2.8	Matriz energética elétrica brasileira.....	21
Figura 2.9	Uso de energia fotovoltaica no mundo.....	23
Figura 2.10	Evolução mundial da capacidade instalada de energia FV.....	27
Figura 2.11	Evolução mundial em percentuais da capacidade instalada de energia FV.....	27
Figura 2.12	Estrutura On Grid.....	30
Figura 2.13	Gráfico horário de picos de irradiação.....	32
Figura 3.1	Esquema de fornecimento de energia.....	39
Figura 3.2	Fluxograma da metodologia aplicada.....	41
Figura 4.1	Mapa da região.....	45
Figura 4.2	Área empacotadora Amazonas.....	46
Figura 4.3	Dados climáticos.....	46
Figura 4.4	Consumo x Geração do projeto.....	47
Figura 4.5	Indicadores de custo de geração por matriz.....	50
Figura 4.6	Resumo.....	50
Figura 4.7	Viabilidade financeira do projeto.....	51
Figura 4.8	Análise de fluxo de caixa.....	51
Figura 4.9	Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico.....	52
Figura 4.10	Imagem das placas fotovoltaicas.....	52
Figura 4.11	Montagem do inversor e proteções.....	53
Figura 4.12	Geração de energia em dia de verão.....	53
Figura 4.13	Geração de energia em dias de inverno amazônico.....	54

Figura 4.14	Diagrama de geração de energia mês julho (verão).....	54
Figura 4.15	Diagrama de geração de energia mês novembro (inverno).....	54
Figura 4.16	Comparativo de consumo e geração de energia.....	55
Figura 4.17	Reduções climáticas.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Estimativas iniciais de custo.....	36
Tabela 4.1	Parâmetros elétricos AT STC.....	47
Tabela 4.1	Datasheet x Growatt 33000TL3-S.....	48

NOMENCLATURA

ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
BOS	BALANCE OF THE SYSTEM
FV	FOTOVOLTAICA
GCH	GRANDE CENTRAL HIDRELÉTRICA
GN	GÁS NATURAL
MIGDI	MICROSSISTEMA ISOLADO DE GERAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
PCH	PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA
SIGFI	SISTEMA INDIVIDUAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM FONTE INTERMITENTE
TIR	TAXA INTERNA DE RETORNO
VPL	VALOR PRESENTE LIQUIDO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - MOTIVAÇÃO

A necessidade por energia elétrica mais acessível, trouxe também a busca por outras formas de produção, de modo a minimizar os impactos ambientais e suprir demanda necessária. Então foram intensificados os estudos e as aplicações das ditas fontes alternativas com a finalidade de tentar gerar energia através de recursos naturais renováveis como biomassa, luz solar entre outras, então neste trabalho será realizado um estudo sobre implantação um Sistema fotovoltaico (SILVA, 2017).

O sol é a principal fonte de energia do nosso planeta, a superfície da terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar nas formas de energia e calor. A classificação de energia solar pode ser definida como todo tipo de captação de energia luminosa, energia térmica proveniente do sol, que ao ser transformada, produz a força combustível utilizável pelo homem, seja esta usada como forma de aquecimento de água ou ainda como energia elétrica ou energia térmica, apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada (RAMACHANDRA, 2007).

A energia que uma onda pode transmitir está associada à sua frequência. Quanto maior a frequência, maior a energia transmitida. As ondas eletromagnéticas vindas do sol podem produzir efeitos diversos sobre os objetos e os seres vivos. Todo o espectro de radiação, incluindo as ondas visíveis ao olho humano e as não visíveis, transportam energia que pode ser captada na forma de calor ou energia elétrica (GENUIS, 2008; BATOOL, 2019). Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiância, chamada geralmente de radiação, expressa em W/m^2 . Quanto a Terra executa o seu movimento de translação ao redor do Sol, a Terra é exposta a $1353 W/m^2$ de energia, medição feita numa superfície normal com o Sol a irradiância de $1000 W/m^2$ é adotada como padrão na indústria fotovoltaica para especificação e avaliação de células e módulos fotovoltaicos. Deste volume de energia, aproximadamente 19% apenas é absorvido pela atmosfera e, aproximadamente 35% dessa energia é refletida através das nuvens.

Quando a esta energia passa pela atmosfera terrestre, a maior parte dela está na forma de luz visível e luz ultravioleta (PAULESCU, 2012; KALOGIROU, 2013).

A energia oriunda da radiação solar, complementada com outros recursos secundários de alimentação, como por exemplo a energia eólica e das ondas, hidroeletricidade e biomassa, são responsáveis por grande parte da energia renovável disponível na terra. Porém, apenas uma minúscula fração da energia solar disponível é utilizada (TWIDELL, 2015; AVTAR, 2019).

A irradiação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de um determinado intervalo de tempo.

Sua unidade é o Wh/m², o watt hora é uma unidade de energia física de energia e o watt hora por metro quadrado expressa a densidade de energia por área.

A partir de avaliações sobre o clima, irradiação solar, incidência de chuvas, custo de compra de energia elétrica com alto nível de tarifa, o qual tem grande impacto nos custos de produção, foi considerado o projeto de implantação de uma usina fotovoltaica. A qual terá a capacidade de gerar energia para o próprio consumo desta empacotadora, baixando custo muito elevados e contribuindo com meio ambiente (DEMARTINO *et al.*, 2020).

1.2 - JUSTIFICATIVA

A Região Amazônica concentra a maioria dos sistemas isolados e, apesar de possuir um grande potencial para a geração local de energia elétrica, seja pelo uso da hidreletricidade, da geração térmica a gás natural, da biomassa e da energia solar fotovoltaica, o suprimento de energia elétrica é precário, de baixa qualidade e com elevado custo de operação. Assim, os principais problemas dos sistemas isolados são decorrentes da:

- Dispersão geográfica na região;
- Baixa densidade demográfica do mercado de energia elétrica;
- Geração térmica com óleo diesel suprimindo motor de combustão interna;
- Dificuldade na logística com transporte do óleo diesel para alimentação dos geradores;
- Dependência de operadores para controle operacional das usinas de pequeno porte;
- Falta de investimento da concessionária da região.

No ano de 2015, as despesas com combustíveis alcançaram o patamar de R\$ 7,6 bilhões. O óleo diesel é o combustível mais utilizado nas usinas térmicas dos pequenos sistemas isolados.

Torna-se crucial pesquisas em energéticas sustentáveis, com foco em particular para o suprimento de energia elétrica à população amazônica, claramente de grandes demandas na região com significativa importância ecológica (MANYARI *et al.*, 2007). Na busca por soluções energéticas, deve-se levar em conta o tamanho e a complexidade dos seus problemas, pois, uma das principais falhas na análise do desempenho dos sistemas isolados é considerá-los como uniformes em seu tamanho e disponibilidade de recursos.

Os grandes projetos de geração de energia elétrica para a região mostraram-se pouco eficazes para o seu desenvolvimento e, assim, uma solução que hoje se vislumbra é a geração próxima ao consumidor, utilizando-se tecnologia adequada às potencialidades energéticas de cada lugar (SHAIKH, 2015).

Em termos de preços de energia elétrica no Brasil em 2020, mostra-se na Figura 1.1 gráfico de custos de produção de energia elétrica (R\$/MWh) das principais fontes energéticas tais como fotovoltaica (FV), diesel, eólica, gás natural (GN), nuclear, carvão, grande central hidrelétrica (GCH), pequena central hidrelétrica (PCH) e biomassa. Por outro lado, para se ter uma ideia de valores de investimentos em fontes de energia renováveis.

Uma análise comparativa de preços entre algumas fontes renováveis, considerando-se o tempo de retorno do investimento (pay-back), do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR), tanto sem incentivo, como considerando recursos da CCC e repasse do VN conforme estabelecido na Resolução ANEEL 233 (COSENTINO, 2012).

Custos de Kw por fonte de Energia

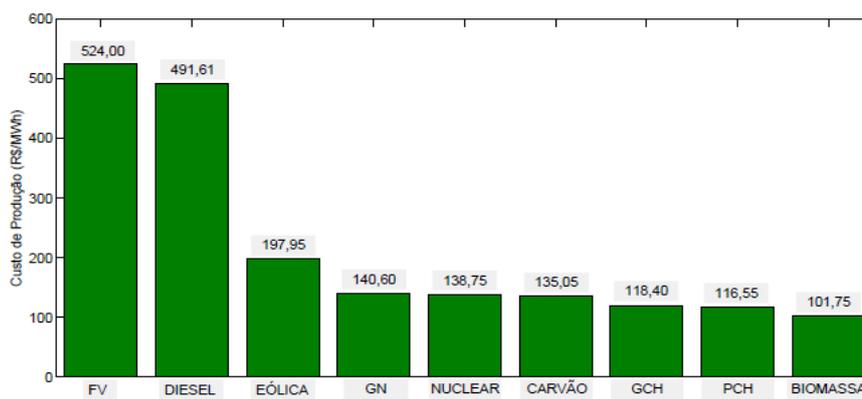


Figura 1.1 - Custo de produção de energia elétrica.
Fonte: ANEEL (2020).

Em de 2012, CHIA-HUNG *et al.* (2012) publicaram um estudo que considera a inserção de uma geração fotovoltaica como GD, em um alimentador do sistema elétrico de distribuição da cidade de Taipower (Taiwan), cuja finalidade foi realizar a avaliação horária e anual da geração fotovoltaica, considerando-se a curva de irradiação solar e temperatura do módulo solar, cuja preocupação dos autores decorreu da intermitência da fonte primária.

Em termos de padrões técnicos, o IEEE publicou no ano 2000 o documento IEEE Std 929-2000, no qual são apresentadas recomendações técnicas e operacionais para a integração de GFVs nos sistemas elétricos de distribuição, cujas potências dos geradores sejam menores ou igual a 10 kW, incluindo recomendações de segurança de pessoas, ilhamento e não-ilhamento, condições operacionais de inversores, qualidade da energia elétrica, além de definir diversos termos relacionados a GD provida por GFVs, através de inversores com faixa de tensão de 106 V a 132 V, tensão nominal de 120 V e frequência de 60 Hz.

No Brasil, em termos de regulamentação da GD, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece por meio da Resolução 482, emitida em 17/04/2012 e publicada em 19/04/2012, as regras para a interligação de GDs na rede elétrica, podendo ser fonte de base hídrica, solar, eólica, biomassa e baseada na cogeração, com descrição dos procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída incentivada. Os geradores distribuídos poderão ser interligados ao sistema de distribuição na baixa tensão, rede monofásica com potência menor que 10 kW, na rede trifásica com potências entre 10 kW e 500 kW e na rede de média tensão com potências entre 500 kW a 1 MW (YANG, 2013).

A ANEEL define microgeração distribuída como sendo um gerador com potência igual ou menor que 100 kW e minigeração com potência superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW e, ainda, estabelece os requisitos mínimos dos geradores em função de suas potências e providos com dispositivos para desconexão, proteções contra sub e sobretensão, com relé de sincronismo, sistema anti-ilhamento e com medidores de energia gerada, dentre outras especificações (YAN, 2018).

Outras resoluções e documentos publicados pela ANEEL que tratam da GD são:

- Resolução 481: Nessa resolução, emitida em 17/04/2012 e publicada em 20/04/2012, são estabelecidas as regras do desconto de 50% para 80% nas tarifas de uso dos sistemas de distribuição e transmissão (TUSD e TUST) para usinas com fonte solar para os empreendimentos que entrarem em operação comercial até dezembro de 2017, sendo o desconto válido nos dez primeiros anos de operação da usina.
- Resolução 493: Emitida em 05/06/2012 e publicada em 08/06/2012, estabelece os procedimentos técnicos e as condições de fornecimento de energia elétrica por meio de Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI).

O custo de investimento em sistemas FVs pode ser decomposto em três itens principais: os módulos solares, o inversor de linha e o sistema composto por materiais acessórios e mão-de-obra, conhecido como balance of the System (BoS), tais como estruturas mecânicas de sustentação, equipamentos elétricos auxiliares, cabos elétricos, conexões e a engenharia necessária para a adequação dos componentes do sistema, bem como os custos gerais de instalação e montagem (TURCHI e CENGIZ, 2015).

A motivação deste trabalho consiste em contextualizar a atual situação da energia fotovoltaica no estado do Amazonas, além de atualizar as informações que regulam a geração distribuída conectada na rede elétrica. Apesar do enorme potencial de geração de energia por meio de sistemas FVs, a sua presença ainda não é expressiva na matriz energética no estado. Entretanto, a quantidade de energia produzida vem crescendo a cada ano, impulsionada pelas atualizações normativas que incentivaram a geração distribuída, como a geração remota e o aumento no tempo de validade dos créditos solares. Além disso, a maior parte dos estados já isenta do ICMS a energia produzida pelo micro gerador, desde que a energia consumida seja feita em propriedades do mesmo titular.

1.3 - OBJETIVOS

1.3.1 - Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia para implementação de usinas fotovoltaicas para pequenas industriais empacotadoras do grupo B.

1.3.2 - Objetivos específicos

- Projetar uma usina de 40Kwp na empresa EMPACOTADORA AMAZONAS em Manaus -AM;
- Avaliar os custos anuais com a energia consumida da concessionaria AMAZONAS ENERGIA e compará-los aos custos após implantação do sistema com sistema fotovoltaico.

1.4 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho apresenta a utilização de energia fotovoltaica em pequenos e médios comércios e indústrias em Manaus. Na questão específica da Empacotadora Amazonas, justifica-se por ser a possibilidade mais viável de reduzir custos econômicos, financeiros e ambientais e com isto implementar a reprodução da estrutura energética para outros comércios e pequenas industriais da região de Manaus e municípios vizinhos, através do fornecimento de energia fotovoltaica ligados a rede da concessionaria.

Esta pequena indústria fica localizada no centro comercial de Manaus, onde existe várias do mesmo processo de empacotar alimentos. Necessitando assim, baixar custos para sobreviver no concorrido mercado sendo uma solução econômica e ambiental, com viabilidade sustentável.

1.5 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 5 (cinco) capítulos.

O Capítulo 1 exibe uma introdução geral, o breve conhecimentos sobre geração distribuída, a contextualização implementações e os objetivos da dissertação, assim como a organização deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma introdução a energia solar e o dimensionamento de geradores fotovoltaicos.

O capítulo 3 apresenta a metodologia analítica para alocação e dimensionamento de geradores fotovoltaicos a serem integrados às redes elétricas.

O Capítulo 4 trata dos experimentos numéricos realizados com as redes de teste, aplicando-se a metodologia desenvolvida no Capítulo 3 e, com os resultados obtidos, são feitas as análises e conclusões.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - A ENERGIA SOLAR

Atualmente a energia solar no Brasil é utilizada em pequenos sistemas isolados em lugares não atendidos pela rede elétrica, lugares de difícil acesso, onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não tem viabilidade econômica. O potencial de exploração dessa energia é extremamente enorme para aplicação de mini e microssistemas de geração fotovoltaica, o planeta Terra recebe aproximadamente 174 petawatts (GT) de radiação solar (insolação) na zona superior da atmosfera. Dessa radiação, cerca de 30% são refletidas para o espaço, enquanto o restante é absorvido pelas nuvens, mares e massas terrestres. O espectro da luz solar na superfície da Terra é mais difundido em toda a gama visível e infravermelho e uma pequena gama de radiação ultravioleta.

Afirmado por (BOYLE, 2012) *apud* (CABRAL *et al.*, 2015), em seu texto sobre energias renováveis, onde foi indicado que mantidas as atuais tendências a população mundial deverá ter um aumento em torno de 50%, o que por si só já levanta um grito de alerta, mas que pelo menos já é consenso pelo mundo que as fontes de energia devem gerar impactos nas mudanças climáticas irrisórios.

Em uma série denominada “Sustentabilidade”, manifesta-se de várias formas que a demanda energética mundial ainda continua sendo o petróleo, mesmo com todas as inversas opiniões sobre sua utilização e a solar ocupando o singelo 9º lugar participando com 11% dessa demanda e afirmar categoricamente que o governo é omissos em um assunto de tamanha importância deixando de lado até os discursos realizados na Rio+20 (CABRAL, 2015).

Assim, quando o ar atinge uma altitude elevada, onde a temperatura é baixa, o vapor de água condensa-se, formando nuvens, que posteriormente provocam precipitação sobre a superfície da Terra, completando o ciclo da água. O calor latente de condensação de água aumenta a convecção, produzindo fenômenos atmosféricos, como o vento, ciclones e anticiclones. A luz solar absorvida pelos oceanos e as massas de terra mantém a superfície a uma temperatura média de 14° C (MENDONÇA e BARBIRATO, 2007).

Diferentemente dos sistemas solares térmicos, que são empregados para realizar aquecimento ou para produzir eletricidade a partir da energia térmica do Sol, os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir corrente elétrica.

Essa corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica.

Dentre as energias renováveis que vem apresentando um efetivo crescimento mundial nas últimas décadas, está a energia solar fotovoltaica, por possibilitar a geração de energia elétrica de forma distribuída, não necessitando, portanto, de extensas linhas de transmissão e distribuição, por ser uma fonte silenciosa, que possibilita a instalação de sistemas de diferentes potências e ainda por integrar-se às edificações no meio urbano, sem necessitar de áreas extras para sua instalação (DOS SANTOS, 2020).

O uso desta fonte tem sido incentivado principalmente em países pertencentes à União Europeia, através da adoção de programas governamentais, lançados com o propósito de estimular o aumento no número de instalações, criando assim ganhos de escala, que conseqüentemente reduzem os custos e contribuem para o aumento da competitividade da indústria fotovoltaica em relação às fontes de energia convencionais. Nestes países, o crescimento da capacidade instalada se dá principalmente em sistemas conectados à rede elétrica, já sendo mais de 69 GW instalados a nível mundial até 2011, o que representa uma produção de 85 TW/h de eletricidade por ano (NAJAFI e HOSSAIN, 2016).

O emprego das fontes de energia solar e eólica em todo o mundo nos últimos anos. No ano 2000 o mundo tinha menos de 5 GW (gigawatts) ou 5.000 MW (megawatts) de capacidade de geração de eletricidade com sistemas fotovoltaicos. Esta capacidade pulou para cerca de 40 GW em **200** e não para de crescer (VILLALVA, 1983).

Esse crescente consumo energético atual pode causar sérios danos à saúde humana e à natureza, particularmente devido ao dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa liberados pela queima de combustíveis fósseis, os quais ameaçam causar mudanças sem precedentes no clima da Terra, com conseqüências das mais adversas (SHAHSAVARI, 2019). Além disso, se as tendências atuais continuarem, a população mundial deverá aumentar a demanda de energia primária mundial poderá aumentar em torno de 50%, o que representa para os envolvidos com a questão

energética. Pelo menos, agora existe um amplo consenso de que o mundo deve mudar para fontes de energia de baixa emissão, ou zero carbono, para que os impactos das mudanças climáticas sejam mitigados (PALMER, 2013). Na Figura 2.1 temos o diagrama de irradiação completo. A radiação solar é um termo utilizado para se referir à forma de transferência da energia vinda do sol através da propagação de ondas eletromagnéticas. A quantidade de radiação solar que chega em cada ponto da Terra depende dos obstáculos que tais ondas encontram na atmosfera.

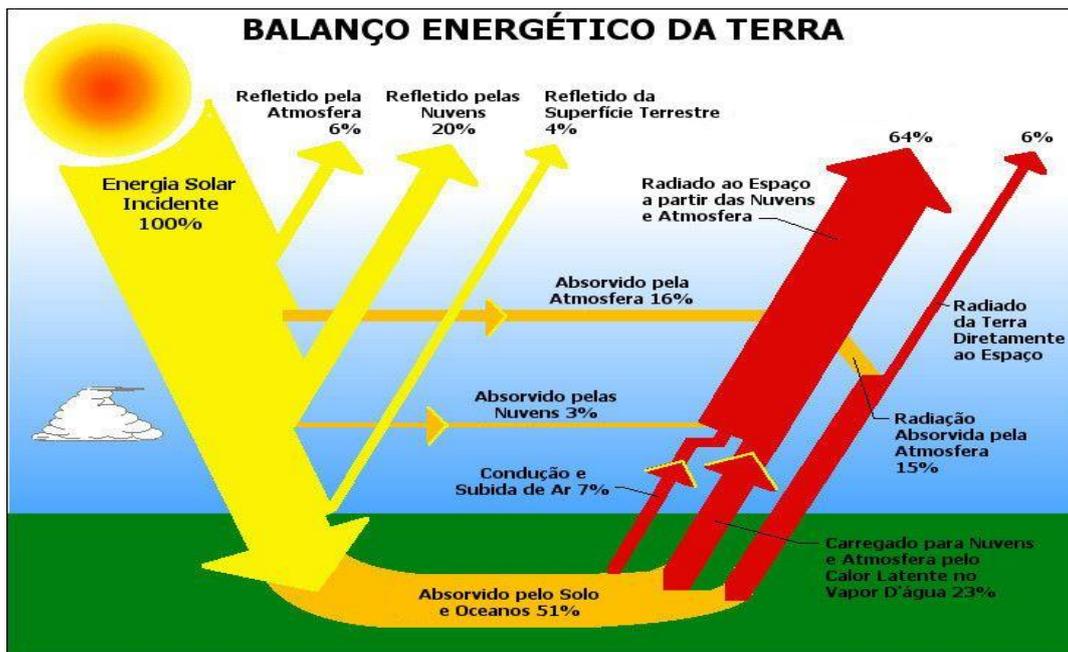


Figura 2.1 - Leitura da irradiação solar.
Fonte: CORREA (2007).

Porém, a radiação que chega a qualquer ponto do topo da atmosfera é constante e conhecida como "Constante Solar" (ROGELJ, 2015). A captação do calor solar é a transformação da energia eletromagnética em energia térmica pelos corpos e materiais que recebem sua radiação. Quando as ondas eletromagnéticas incidem sobre um corpo que tem a capacidade de absorver radiação, a energia eletromagnética é transformada em energia cinética e transmitida para as moléculas e átomos que compõem esse corpo. Esse processo corresponde à transmissão de calor ou energia térmica.

A radiação visível corresponde a aproximadamente 43% do total de energia emitida pelo Sol, a região da radiação infravermelha corresponde a aproximadamente 49% da energia emitida, a região do ultravioleta com emissão em torno de 7% e

aproximadamente 1% da radiação solar corresponde a emissões de raios X, raios gama e ondas de rádio.

A radiação solar, após atingir o topo da atmosfera, sofre processos de absorção e espalhamento ao longo do seu percurso e aproximadamente 25% dessa radiação incide na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera, sendo o restante absorvido ou espalhado em direção à superfície da Terra ou em direção ao espaço (SEM e WALD, 2009).

A radiação eletromagnética de onda curta corresponde a radiação emitida pelo Sol com comprimentos de onda inferiores a $4 \mu\text{m}$ e a radiação de onda longa é a radiação emitida pela Terra com comprimentos de onda superiores a $4 \mu\text{m}$.

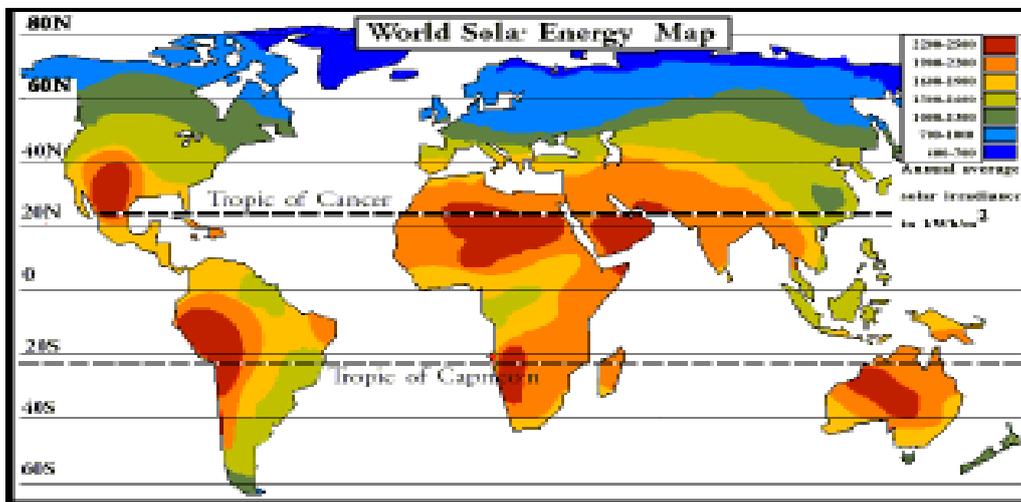


Figura 2.2 - Distribuição mundial da irradiação solar anual média (kWh/m²).
Fonte: SEM e WALD (2009).

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um sanduíche de materiais semicondutores. Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles (RYU e MARGETA, 2019).

Os constituintes atmosféricos absorvem de maneira diferente os diversos comprimentos de onda da radiação solar e da radiação terrestre, alterando o espectro da radiação à medida que se propaga na atmosfera. Na absorção da radiação solar, as moléculas de gases, como o CO₂ e o O₃, adquirem energia, a qual é transformada em

movimento molecular interno, resultando em aquecimentos que são transmitidos para a atmosfera (GOODY e PIERREHUMBERT, 2011).

A constante solar é estimada em 1.366 W/m². Ao chegar à superfície da Terra, ela alcança no máximo 1000 W/m². Assim, se a eficiência de determinado painel solar é de 10%, isso significa que ele será capaz de captar no máximo 100 W/m². Conforme apresentado na Eq. (2.1) de irradiação.

$$\frac{4,4397 \times 10^{16} \cdot 60}{1,278 \times 10^{14} \cdot 1000} = 20,84 \text{ min} \quad (2.1)$$

Em comparação com outros países, o Brasil é muito privilegiado para a exploração da energia fotovoltaica, conforme valores de irradiação média apresentados anteriormente. A Alemanha, que é o país que mais usa a energia fotovoltaica, conta com uma capacidade instalada maior do que 20 GW, a qual supera à de todos os outros países juntos, representando aproximadamente 4% de toda a energia elétrica produzida naquele país (ROSAS-FLORES e GIL, 2020).

A irradiação solar na Alemanha está em torno de 3500 Wh/m² por dia, disponível apenas em uma pequena parte ao sul do seu território. O Brasil recebe uma irradiação média diária de 2,5 a 7,5 kWh/m²/dia (ou 9 a 27 MJ/m²), dependendo do local e da época do ano, latitude do local, além de outras ocorrências, como nuvens, aerossóis atmosféricos e gases que compõem a atmosfera, tendo uma distribuição média de irradiação solar por regiões do Brasil da ordem de:

- Norte: 5462 Wh/m²;
- Nordeste: 5688 Wh/m²;
- Centro-Oeste: 5630 Wh/m²;
- Sudeste: 5478 Wh/m²;
- Sul: 5015 Wh/m².

Na Figura 2.3, mostra-se um mapa de irradiação solar média no território brasileiro, de até na cidade de Manaus, sendo que 100% de irradiação corresponde a 5,09 kWh/m²/dia ou 1195 kWh/m²/ano.

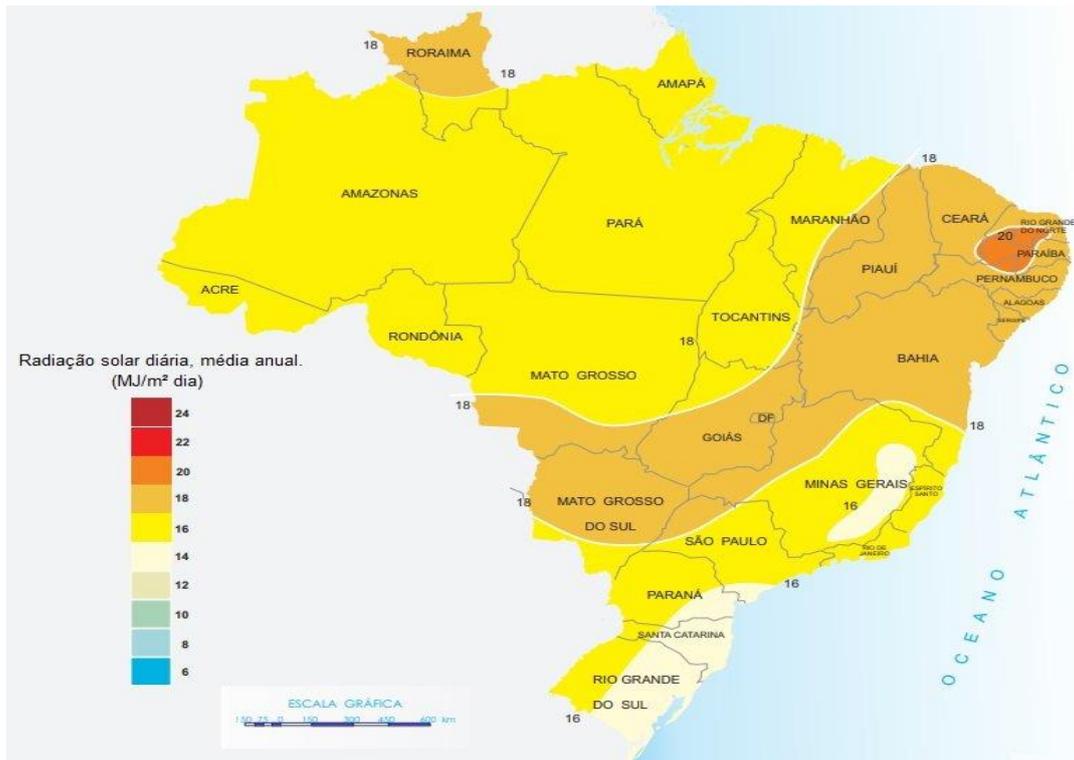


Figura 2.3 - Mapa de irradiação solar média no território brasileiro.
Fonte: ATLAS SOLAR DO BRASIL (2019).

Para maior compreensão deste assunto, ao se relatar a potência possível obtida, cabe definir a medida de potência que é o Watt-pico (Wp), normalmente associada com células fotovoltaicas. A unidade mais correntemente usada são os múltiplos do Wp, como o kWp ou o MWp. Dado que as condições de produção de energia elétrica dependem bastante de fatores externos à célula, o valor da potência dado em Wp é um valor obtido em condições ideais específicas. Assim, o valor de Wp de um determinado sistema fotovoltaico que funcione em corrente contínua é a potência medida, quando este sistema é irradiado por uma luz que simula a luz solar com a potência de 1000 W/m², à temperatura de 25°C. O watt (símbolo: W) é a unidade de potência do Sistema Internacional de Unidades (SI). É equivalente a um joule por segundo (1 J/s).

A unidade watt recebeu este nome em homenagem a James Watt, pelas suas contribuições para o desenvolvimento do motor a vapor, e foi adotada pelo segundo congresso da associação britânica para o avanço da ciência em 1889. E resulta da Eq. (2.2) de unidade watt estruturada por James Watt e Eq. (2.3).

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad (2.2)$$

$$1 W = \frac{1J}{s} \quad (2.2)$$

Onde:

- J unidade de potência mecânica;
- W unidade de potência elétrica.

A radiação solar sofre a influência do ar atmosférico, das nuvens e da poluição antes de chegar ao solo e poder ser captada por células e módulos fotovoltaicos. A radiação global é a soma da radiação direta e da radiação difusa. A radiação direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do Sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal com uma inclinação que depende do ângulo zenital do Sol (LOSHKAREV, 2019).

Em termos de energia eletromagnética, Albert Einstein postulou em 1905, estendendo uma sugestão feita dois anos antes por Planck, que um feixe de luz consiste em pequenos pacotes de energia, denominados de quanta de luz ou fótons. A energia de um fóton, E , é proporcional à sua frequência f , a qual, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ (Js) é a constante de Planck e f em c/s ou Hz. A luz propaga-se com uma velocidade constante no vácuo do espaço extraterrestre, tendo-se a expressão apresentada a seguir, que relaciona a frequência f , o comprimento da onda eletromagnética e sua velocidade, a qual, $c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo e λ (m) é o comprimento da onda.

Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiância, geralmente chamada também de irradiação, expressa na unidade de W/m^2 (watt por metro quadrado).

Trata-se de uma unidade de potência por área. Como se sabe, a potência é uma grandeza física que expressa a energia transportada durante um certo intervalo de tempo, ou a taxa de variação da energia com o tempo. Quanto maior a potência da radiação solar, mais energia ela transporta em um determinado intervalo de tempo (MARTIENSSEN e SMIL, 2015).

Os sensores de radiação solar mostrados nas páginas anteriores fornecem medidas de irradiância. Na superfície terrestre a irradiância da luz solar é tipicamente em torno de $1000 W/m^2$.

A irradiância de $1000 W/m^2$ é adotada como padrão na indústria fotovoltaica para a especificação e avaliação de células e módulos fotovoltaicos. Assim como a

massa de ar AM1 5, a irradiância de 1000 W/m^2 é mencionada em praticamente todos os catálogos de fabricantes de dispositivos fotovoltaicos (LORENZO e HAMADANI, 2020).

A medida da irradiância em W/m^2 é muito útil para avaliar a eficiência dos dispositivos e sistemas fotovoltaicos. Com o valor padrão de 1000 W/m^2 as eficiências das células e módulos fotovoltaicos de diversos fabricantes podem ser especificadas e comparadas com base numa condição padrão de radiação solar (MAKRIDES, 2012 e VEMULA, 2013).

A insolação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de um intervalo de tempo. Sua unidade é o Wh/m^2 (watt-hora por metro quadrado) (EFFAT 2016 e NELSON, 2020). O watt-hora é uma unidade física de energia e o watt-hora por metro quadrado expressa a densidade de energia por área. A medida de insolação em Wh/m^2 é muito útil para fazer o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, como veremos posteriormente (EFFAT, 2015 e TAHA, 2016). Na prática encontramos tabelas e mapas de insolação que fornecem valores diários expressos em $\text{Wh/m}^2/\text{dia}$ (watt hora por metro quadrado por dia). Estações meteorológicas com sensores de radiação solar são empregadas para fazer o levantamento da insolação em vários pontos do globo terrestre. Um enorme conjunto de dados de insolação mundiais é disponibilizado gratuitamente pelo projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), do Núcleo de Programas Ambientais das Nações Unidas, no website swera.unep.net.

A temperatura tem influência na tensão que o módulo fornece em seus terminais e por consequência na potência fornecida. Em temperaturas mais baixas as tensões são maiores ocorrendo também o inverso com temperaturas altas, a corrente do módulo não se altera com a temperatura do módulo. Já que o módulo se aquece pela exposição à irradiação solar, diminuindo a eficiência (SUKAMONGKOL, 2002).

Não será o foco deste trabalho a eficiência solar, deste modo veremos outros elementos responsáveis pela caracterização exata dos níveis de geração, merecendo um estudo a parte, já que este tema não é o foco do presente trabalho. Vamos apenas observar a relação que existe entre os níveis de radiação e de geração, mas que também existem outros fatores que podem alterar os níveis de geração, conforme mostra as Figuras 2.4 e 2.5.



Figura 2.4 - Composição do painel solar.
 Fonte: PORTAL SOLAR (2021).

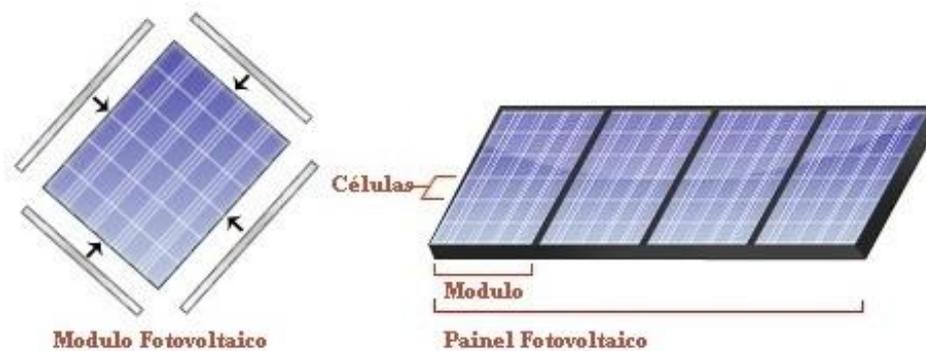


Figura 2.5 - Módulo de silício policristalino.
 Fonte: PORTAL SOLAR (2021).

No ano 2000 o mundo tinha menos de 5 GW (gigawatts) ou 5.000 MW (megawatts) de capacidade de geração de eletricidade com sistemas fotovoltaicos. Esta capacidade pulou para cerca de 40 GW em 2010 e não para de crescer (MEISEN e WANG, 2010).

O crescimento da geração de eletricidade com sistemas eólicos também cresceu muito, partindo de cerca de 25 GW em 2001 e pulando para mais de 200 GW em 2010 com um crescimento bastante expressivo.

Existe muito espaço para o crescimento da energia solar fotovoltaica no País. Mais do que uma fonte alternativa, a energia fotovoltaica é uma opção viável e promissora para complementar e ampliar a geração de eletricidade. Os sistemas fotovoltaicos podem gerar eletricidade em qualquer espaço onde for possível instalar um painel fotovoltaico. Telhados e fachadas de prédios e residências poderão gerar eletricidade em áreas urbanas e usinas de eletricidade poderão ser construídas em áreas abertas de qualquer dimensão, próximas ou distantes dos centros de consumo.

Dadas as dimensões territoriais e as elevadas taxas de irradiação solar brasileiras, é razoável esperar para o Brasil um potencial de geração fotovoltaica pelo menos dez vezes superior à capacidade instalada na Alemanha atualmente. Isso representaria 200 GW de eletricidade a partir da luz do Sol, ou seja, o dobro de toda energia elétrica que produzimos hoje.

A melhor insolação da Alemanha é cerca de 3500 Wh/m² (watt-hora por metro quadrado) por dia, disponível apenas em uma pequena parte ao sul do seu território. A maior parte do território alemão não possui mais do que 3500 Wh/m² diários de energia solar. Para comparação, o Brasil apresenta valores de insolação diária entre 4500 e 6000 Wh/m² (DARCOVICH e HILLER, 2014).

Atualmente a Alemanha é o país que mais usa a energia solar fotovoltaica. Sua capacidade instalada é cerca de 20 GW, superior à de todos os outros países juntos. Isso representa aproximadamente 4% de toda a eletricidade produzida naquele país.

A redução de emissão de gases de estufa conseguida por esta fonte de energia limpa foi de 489.000 toneladas por ano, superando inclusive sua meta inicial de 400 000 toneladas. Em outro ponto, em março de 2013, foi inaugurada nos Emirados Árabes Unidos a maior central fotovoltaica no mundo, com uma capacidade de 100 megawatts e um custo de 600 milhões de dólares, permitindo fornecer energia a 20.000 casas.

Destaca ainda, que a energia vinda do sol é tão grande que três semanas de energia solar recebida na Terra equivalem a todas as reservas de combustíveis fósseis da terra.

A presença de um enorme potencial hidrelétrico ainda não explorado no País também é um fator negativo para a inserção da energia fotovoltaica em nossa matriz energética. A existência desse potencial torna menos atraente o investimento em outras fontes de energia. Entretanto, quando se levam em conta as dificuldades para construir usinas hidrelétricas, relacionadas aos licenciamentos ambientais e ao enfrentamento da opinião pública acerca dos impactos causados pela construção de barragens, outras fontes de energia, incluindo a fotovoltaica, tornam-se mais vantajosas (GÜR e STRIELKOWSKI, 2019).

Em abril de 2012 foi aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a minuta da resolução normativa nº 482, que permite a microgeração e a minigeração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e alternativas com sistemas de geração distribuída conectados às redes elétricas de baixa tensão. A publicação desta resolução constitui um marco regulatório em nosso País, beneficiando a população e

obrigando as concessionárias de energia elétrica a adaptar-se à entrada de sistemas de geração distribuída com fontes alternativas, dentre elas a fotovoltaica, em suas redes de distribuição de baixa tensão (DOILE, 2021).

A resolução nº 482 da ANEEL estabelece que cada cidadão brasileiro ou empresa poderá ter em seu telhado uma usina fotovoltaica produzindo eletricidade para a complementação do consumo próprio ou para a exportação de energia (neste caso complementando a necessidade de energia de outra localidade, de acordo com as regras da ANEEL). Em linhas gerais, a resolução estabelece as condições para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e cria o sistema de compensação de créditos de energia elétrica para autoprodutores de energia. Quando instalado em uma região urbana e ligado diretamente à rede elétrica de baixa tensão, o sistema fotovoltaico produz eletricidade a um custo muito competitivo e pode ser empregado para reduzir a conta de eletricidade do consumidor. Os sistemas fotovoltaicos tornam-se ainda mais vantajosos se considerarmos a inflação do preço da energia elétrica. Uma residência ou empresa que instala um sistema fotovoltaico em seu telhado fica imune aos aumentos de preços e garante o abastecimento de eletricidade por pelo menos 25 anos, que é o tempo mínimo de vida útil de um sistema fotovoltaico, e consegue pagar o investimento em poucos anos com a energia produzida (DEAMBI, 2011 e CHIRAS, 2016).

Além do aumento da disponibilidade de eletricidade e dos benefícios ambientais do uso de uma fonte renovável, a inserção da energia solar fotovoltaica no país vai impulsionar o desenvolvimento tecnológico, criar empregos e mover a economia nacional.

No Estado do Amazonas a maior parte da energia gerada utiliza combustíveis fósseis que envolvem a emissão de dióxido de carbono e é prejudicial ao ambiente e ao esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis (LE QUÉRÉ *et al.*, 2021). O excessivo preço dos combustíveis adicionou uma grande preocupação sobre o seu uso sustentável para as necessidades energéticas. Deste modo para diminuir a degradação do meio ambiente durante o processo de produção de energia e principalmente devido às emissões de gases nocivos, a utilização de fontes de energias renováveis se apresenta como o uso correto dos recursos naturais e tem a marcante característica de serem classificadas como energia limpa e sustentável (DINCER *et al.*, 2014).

2.2 - SISTEMA FOTOVOLTAICO (FV)

A empresa de pesquisa divulgou um estudo sobre a expectativa para o setor fotovoltaico no primeiro trimestre de 2021, indicando que serão instalados, no mínimo, 160 GW de solar neste ano. Levando em conta as projeções da atuação marcante na China e na Índia, na conjuntura mais otimista, o volume alcançará 209 GW de solar.

Mesmo com essa velocidade de crescimento, a empresa reduziu a preocupação ligada à pouca disponibilidade de matéria-prima, voltando a atenção para grandes expansões destinadas à capacidade produtiva de vidro, silício policristalino e wafers. Acordos foram firmados e novas fábricas foram apresentadas, visando responder à demanda do setor. Apesar da permanência de alguns empecilhos na cadeia de silício policristalino, espera-se que o preço da matéria-prima se mantenha em cerca de US\$ 12 quilo neste ano.

Os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir corrente elétrica. Essa corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada ou utilizada em sistemas conectados à rede elétrica (KELLY *et al.*, 2017).

Existe dois tipos de geração fotovoltaica utilizados, geração centralizada e geração distribuída. O primeiro, em locais não atendidos pela rede elétrica pública e o segundo o sistema de geração inclui pequenos parques de geração conectados ao sistema elétrico da concessionária de distribuição.

Em aplicações na área residencial, poderá ocorrer uso em escala de geração para a rede, utilizando filmes finos e, possivelmente, tecnologias novas podem surgir, a exemplo de materiais FVs mais eficientes. O mercado da energia fotovoltaica é artificial, com subsídios em todos os casos, tendo-se incentivos para sistemas conectados à rede, principalmente no Japão e Alemanha, os quais foram de grande importância e, no ano 2000, 40% da potência instalada em sistemas FVs foi para conexões à rede, tendo-se os custos atualmente de cinco a dez vezes maiores que os da rede comercial, mas com grandes perspectivas de redução a curto/médio prazos e as combinações adequadas de incentivos/nichos de mercado devem promover a entrada em larga escala dessas tecnologias (AZADIAN, 2013 e RATURI, 2016).

O sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica opera em paralelismo com a rede da concessionária, o sistema conectado é utilizado apenas onde existe uma rede de

distribuição existente. Tendo como objetivo gerar eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou eliminar o consumo da rede pública. Conforme Figura 2.6.

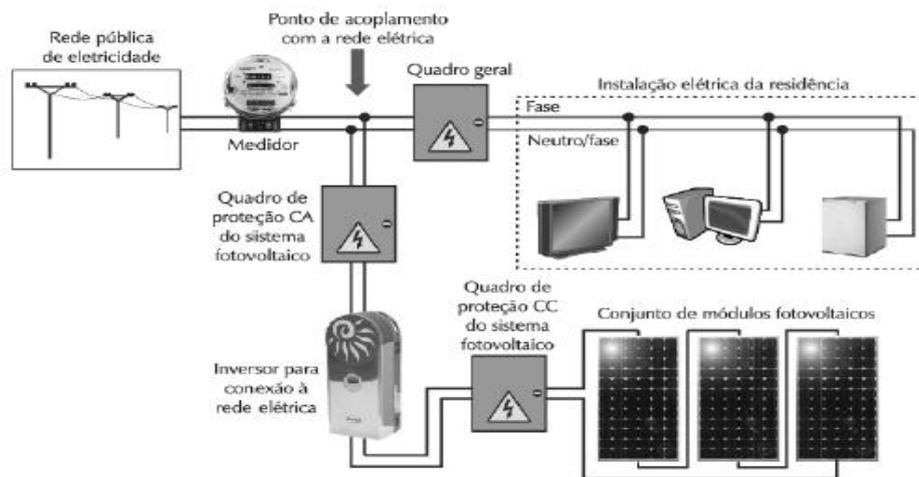


Figura 2.6 - Exemplo de sistema fotovoltaico On Grid.
Fonte: EUDORA SOLAR (2012).

Os sistemas fotovoltaicos conectados podem ser centralizados, constituindo usinas de geração de energia elétrica, como mostramos na Figura 2.6 ou micro e minissistemas descentralizados instalados em qualquer tipo de consumidor.

De acordo com a ANEEL os sistemas conectados à rede podem ser classificados de três formas:

- Microgeração;
- Minigeração;
- Usinas de Eletricidade.

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do sol em energia elétrica através de uma diferença de potencial, sobre uma célula formada por um sanduiche de materiais semicondutores (GUNEY, 2016; SAMPAIO, 2017). Conforme apresentado na Figura 2.7 e Figura 2.8.

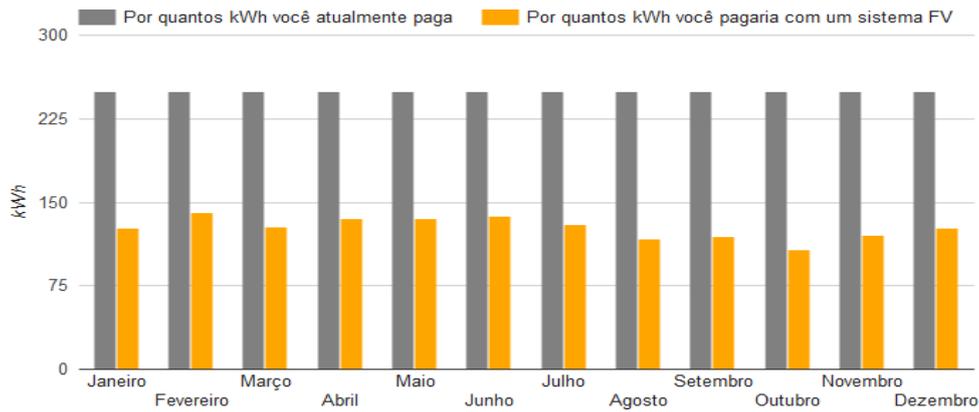
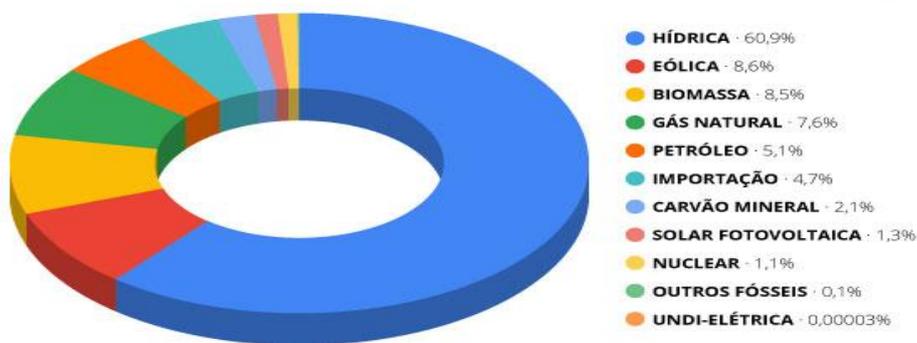


Figura 2.7 - Progressão mensal de gastos entre o sistema térmico e o fotovoltaico.
 Fonte: ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL (2015).

A Matriz Elétrica Brasileira em 2019



Fonte: ANEEL

Figura 2.8 - Matriz energética elétrica brasileira.
 Fonte: ANEEL (2019).

É possível perceber que o uso da energia solar nem se quer aparecer na matriz energética brasileiro, em contrapartida, a principal fonte de energia é a esgotável, que é a fóssil, o que deve necessitar de uma grande reflexão mundial sobre esta questão.

2.3 - REDUÇÃO DE CUSTOS ECONÔMICOS COM O USO DA ENERGIA SOLAR

Um recente estudo do custo da implantação de sistemas fotovoltaicos, publicado em 2005, analisou o preço de 47 sistemas isolados de 100 a 6600 W, de 1987 até 2004, indicando que esses sistemas apresentam uma tendência de redução de preços de aproximadamente 1 U\$/W ao ano, com custos variando entre 7 e 10 U\$/W (HEGEDUS e OKUBO, 2005). Outro estudo, publicado pelo Programa de Sistemas Fotovoltaicos de Potência da Agência Internacional de Energia, confirma que os preços estão reduzindo ano após ano, e indica que os sistemas isolados tendem a custar aproximadamente o

dobro quando comparados com sistemas conectados à rede, por não necessitaram de baterias e demais componentes associados. Em 2004, sistemas isolados de até 1 kW apresentam variação de preço de 9 a 25 U\$/W, sendo que o valor típico se encontra em torno de 13 U\$/W. Sistemas maiores de 1 kW apresentam variação semelhante e preços ligeiramente menores.

Outro mercado que merece destaque é o norte-americano. Nesse país, de acordo com levantamento realizado no ano de 2011, foram obtidos dados em mais de 150000 sistemas FVs instalados, obtendo-se preço médio de 6,13 \$/W para sistemas residencial e comercial, considerando potência igual ou menor do que 10 kW, preço de 4,87 \$/W para sistema comercial com capacidade maior do que 100 kW (potência média de 281 kW).

No caso de sistema FV para conexão à rede, potência média de 18,3 MW, o preço obtido foi de 3,42 \$/W [60], de acordo com dados apresentados na Figura 2.8. Nesta figura, além dos preços de sistemas instalados, são apresentados os preços de sistemas FV modelados, obtendo-se o preço de 5,90\$/W para sistema residencial de 4,9 kW, preço de 4,74 \$/W para sistema comercial de 217 kW e preço de 3,93 \$/W para sistema integrado à rede com potência de 187,5 MW.

Se a energia for obtida de forma descentralizada, todas as regiões passam a ter igual acesso à eletricidade, permitindo que diversas áreas rurais prosperem, aumentando a necessidade de mão-de-obra e consequentemente, reduzindo os problemas sociais das cidades. Por isso, o sistema de energia renovável híbrida (HRES) combina duas ou mais fontes de energia renováveis, como a energia eólica e a solar para manter os níveis de confiabilidade adequados a demanda (KHARE *et al.*, 2016).

Outra conta que costuma ser realizada quando essa comparação é feita é a capacidade de geração de energia em um dia. Um sistema dotado de fonte no intermitente pode gerar energia durante 24 horas por dia, enquanto um sistema solar de mesma potência instalada pode gerar, dependendo de sua localização geográfica, uma média de 6 horas equivalentes de potência nominal ao longo do dia. Logo, para que o sistema fotovoltaico possa produzir a mesma quantidade de energia em um dia, ele deve ter sua potência aumentada em 4 vezes o sistema fotovoltaico (PV) integrado, não só reduz a exigência de área, mas também reduz os custos de material e infraestrutura e, portanto, cumpre o impulso técnico para requisitos de construção inteligentes. Estes sistemas integrados consideram não apenas a energia elétrica, mas também a energia térmica, para ter nível de desempenho adequado e promissor para a maioria das

aplicações da vida real, especialmente, em que ambas as formas de energia são necessárias simultaneamente (PANDEY, *et al.*, 2016).

Tornou-se imperativo para os engenheiros olhar para as fontes de energia renováveis, como a solar, eólica, geotérmica, ondas e biomassa como alternativas sustentáveis e rentáveis, a vantagem de serem amigáveis para o meio ambiente e para as fontes de energia convencionais. No entanto, a falta de disponibilidade desses recursos renováveis de energia o tempo todo ao longo do ano, considerou que os sistemas híbridos têm custo-benefício mais relevantes (SEM *et al.*, 2019).

Muitas pesquisas foram executadas com o intuito de otimizar, operação e controle dos sistemas de energia renováveis. Com certeza é evidente que essa área ainda existe um vasto campo de pesquisa e desenvolvimento de trabalhos científicos e profissionais. O desenvolvimento na investigação sobre a modelagem de recursos de energias renováveis e sistemas fotovoltaicos com unidades de condicionamento de energia conversores MPPT, conversores Buck/Boost, carregadores de bateria. Conforme apresentado na Figura 2.9.



Figura 2.9 - Uso de energia fotovoltaica no mundo.

Fonte: ANEEL (2019).

Desde 2012, cerca de 1,3 bilhão de pessoas, ou 18,41% da população do mundo, ficaram sem eletricidade eventualmente. Muitas dessas pessoas vivem em áreas remotas onde a geração descentralizada é o único método de eletrificação. A maioria das minis-redes são energizadas por geradores a diesel, mas novos sistemas híbridos, incorporando fontes de energia renováveis, estão se tornando um método eficiente na redução do

custo total do sistema diesel. Estações solares híbridas com a propriedade GridStability System ("GSS") maximiza a entrada de energia solar à rede sem interferir com os sistemas de controle de gerador a diesel existentes, maximizando assim a economia de combustível. Os dados do sistema instalado foram utilizados para validar as capacidades e desempenho GSS (CHAUDHARY *et al.*, 2014).

A sensibilização do público para a necessidade de reduzir o aquecimento global e o aumento significativo dos preços das fontes de energia convencionais têm encorajado muitos países para fornecer novas políticas energéticas que promovem as aplicações das energias renováveis. Tais fontes de energia renováveis, como a eólica, solar, energias com base hídrica, etc., (SEM *et al.*, 2019). São ambientes amigáveis e tem potencial para ser mais amplamente utilizado.

A combinação destas fontes de energia renováveis com unidades de back-up para formar um sistema híbrido pode fornecer uma oferta econômica atraente e de maior grau de confiabilidade, gerando um ambiente de energia elétrica em todas as condições de carga de demanda em relação ao uso único de tais sistemas (WANG *et al.*, 2018). Uma das questões mais importantes neste tipo de sistema híbrido é otimizar a utilização dos componentes do sistema híbrido como suficiente para cumprir todos os requisitos de carga com possíveis custos mínimos de investimento e de operação. Existem muitos estudos sobre a otimização e dimensionamento de sistemas de energias renováveis híbridos desde a recente utilização popular de fontes de energia renováveis (ERDINC e UZUNOGLU, 2012).

Exemplos como o caso do Irã, ao qual quase todas as aldeias que consistem em mais de 20 famílias no Irã já estão se conectando à rede de recursos renováveis com o forte Plano de Desenvolvimento econômico de cinco anos proposto pelo governo Iraniano (2005-2010). No entanto, há muitas comunidades isoladas com menos de 20 famílias que ainda necessitam de eletrificação. Atualmente, a única tecnologia que fornece energia elétrica para essas comunidades é geradora a diesel, que não só causam problemas ambientais e de saúde humana, mas também alto custo na manutenção e custos operacionais (GHASEMI *et al.*, 2013).

Sistemas de energia renovável híbrida, combinando vários tipos de tecnologias, têm demonstrado capacidades relativamente elevadas para resolver problemas de confiabilidade e reduziram desafios de custo. O uso de tecnologias de produção de eletricidade / armazenamento híbridos como sistemas de fora da rede stand-alone é razoável para superar deficiências relacionadas. Energia solar e eólica são as fontes

renováveis que têm precedência em comparação com os outros tipos. Com base na radiação solar e mapas de velocidade média do vento, sistemas de tecnologias economicamente otimizadas são concebidos através da simulação de comportamento de várias combinações de sistemas de energias renováveis com dimensionamento diferente, incluindo turbina eólica (WT), fotovoltaica (PV), célula de combustível (FC), e bancos de bateria (HOSSEINALIZADE *et al.*, 2016).

Uma busca moderna para o desenvolvimento de energia renovável (RE), as condições ideais para a produção e utilização de sistema de energia são consideradas como um recurso econômico indispensável para os custos de energia. Este é um fato de racionalização levando em consideração o aumento do preço da energia para o desenvolvimento socioeconômico (MOHAMMED *et al.*, 2014).

A área de atuação utilizando a energia solar é bastante ampla, valendo ressaltar algumas aplicações mais conhecidas, tais como:

- Eletrificação - Utiliza-se para eletrificação de residências, escolas, comércio, fazendas, cercas, estradas, indústrias, estações e postos avançados de vigilância e de radiodifusão.
- Telecomunicações – Telefonia rural, torres e retransmissores, estações terrestres, radiotelefonia e radiocomunicações.
- Sinalização aérea e náutica – Faróis náuticos, sinalização em antenas de transmissão de energia elétrica e de radiodifusão, sinalização em portos e aeroportos.
- Sinalização rodoferroviária – painéis de mensagens randômicas e variáveis, para sinais luminosos e na iluminação de placas de sinalização.
- Tele vigilância – Depósitos e silos, tráfego rodoviário, rios, e pontos sujeitos a enchente.
- Refrigeradores e freezer.
- Bombeamento de água.
- Aquecimento de água (PALZ, 2002).

De acordo com AMARAL (2006) um sistema de armazenamento solar instalado corretamente pode economizar até 40% da energia elétrica consumida por unidade de consumo. Essa proporção, entretanto, depende do correto dimensionamento do equipamento para atender o nível de necessidade pretendida pelos usuários.

Estudos da Companhia Energética de Minas Gerais S.A., que é uma das principais concessionárias de energia elétrica do Brasil, tendo sede na cidade de Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais - CEMIG (2015) indica que a maioria das falhas deve-se a erros no projeto de armazenamento solar é de 44%; Projetos arquitetônicos inadequados respondem pelo mau funcionamento de 33% dos sistemas de aquecimento solar e erros no próprio sistema, como a instalação errada ou placas de má qualidade respondem por apenas 11% das falhas. Contudo, de acordo com a Cemig, quando bem instalado, o sistema de armazenamento solar é surpreendentemente eficiente, atingindo a marca de 78% a 86% de sua capacidade.

Em termos técnicos, para um melhor aproveitamento dos coletores solares, os mesmos devem estar voltados para a face norte e se não for possível, para o noroeste ou nordeste. Caso se utilize a face leste ou oeste da estrutura deve-se acrescentar mais 25% de área de coletor solar (AMBIENTEBRASIL, 2015).

Deve-se observar também a inclinação do coletor, que deve ser igual à latitude local + 5 graus. Quando isso não for possível, deve ser considerada uma inclinação de 15 graus. Um desnível de 60 cm entre o nível inferior da placa e a saída de distribuição da casa deve ser considerado, para que a convecção natural aconteça, no caso de sistemas de circulação natural (CEMIG, 2015).

2.4 - GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DA REDE ELÉTRICA

Deve-se destacar dois setores impulsionadores da tecnologia FV, o espacial, para o suprimento energético de satélites, e as primeiras aplicações dessa tecnologia foi para o suprimento de potência à consumidores não atendidos pela rede elétrica convencional, assim como para atender estações de telecomunicações, estação repetidora de sinais, bombeamento de água (ACKER *et al.*, 2011). O programa japonês de incentivo aos pequenos geradores FVs conectados à rede (PV Roofs) foi um dos responsáveis pelo rápido crescimento da indústria fotovoltaica, assim como, posteriormente, os programas de incentivos alemão e americano. Conforme Figura 2.10 e Figura 2.11.

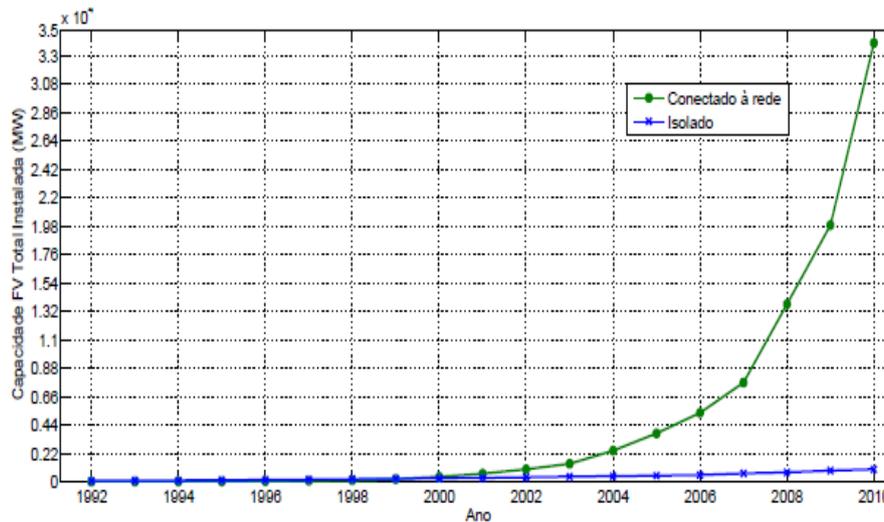


Figura 2.10 - Evolução mundial da capacidade instalada de energia FV.
 Fonte: ACKER *et al.* (2011).

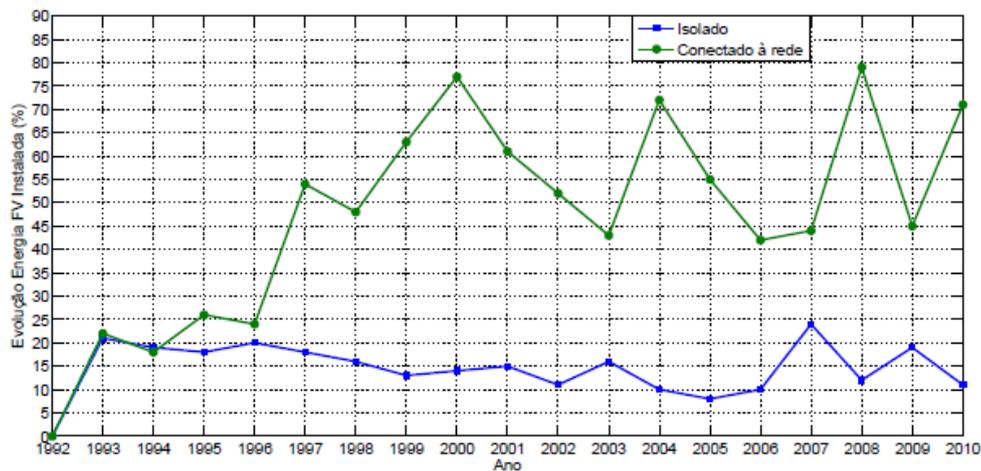


Figura 2.11 - Evolução mundial em percentuais da capacidade instalada de energia FV.
 Fonte: OCAK *et al.* (2010).

Atualmente, além dos citados setores, as classes residencial, comercial e industrial utilizam a energia solar FV, o que totalizou uma capacidade acumulada de energia FV instalada de quase 35 GW até o final de 2010, sendo que 69% dos sistemas instalados estão na Alemanha e Itália e 18% desse total distribuído nos EUA, Japão e França. Assim, no período de 2009 a 2010, a taxa de crescimento na capacidade FV acumulada instalada foi de 68%, com a grande maioria dos sistemas FVs para integração à rede (Figura 2.11) (OCAK *et al.*, 2010).

Estes sistemas estão sendo bastante utilizados por causa da eficiência em integrar sistemas novos ou já utilizados. A complementação é um dos pontos principais, pois no sistema nos dias em que o céu estiver nublado e a obtenção de energia da placa

fotovoltaica for reduzida o gerador a diesel continua sua produção sem interferência e sustenta o sistema.

Um sistema híbrido pode operar diretamente conectado à carga, que pode ser utilizada para bombeamento de água e aplicações que não exijam estabilidade e eficiência, por exemplo. Novamente citando o sistema eólico/solar não se pode armazenar ventos e luz, por isso durante os períodos de baixa geração e para a utilização posterior, o método convencional de armazenamento são as baterias. Tecnicamente, a retenção e passagem de energia, os geradores podem operar de acordo com as associações em série ou paralelo, no entanto, para a “geração”, é usual a associação em paralelo, pois a corrente gerada pelas diferentes fontes de energia é somada à rede elétrica, elevando a potência total.

Uma comparação da energia gerada no estado do Amazonas e distribuída pela concessionária entre a energia solar pode ser feita, utilizando exclusivamente critérios técnicos, desconsiderando efeitos ambientais, sociais e demais fatores cuja valorização o possa ser considerada subjetiva (ZERRIFFI,2010).

A seguinte metodologia é utilizada:

Comparação utilizando o preço da energia gerada, ao invés da potência instalada. Como a energia solar fotovoltaica possui custo de operação e manutenção desprezível, principalmente por não necessitar de combustível para operar e nem ter peças moveis para sofrer manutenção complexa, seu investimento de instalação é diluído por toda a sua vida útil, correspondente energia gerada;

Comparação com o preço da energia entregue pela distribuidora que é paga pela unidade consumidora, após o sistema de transmissão e distribuição ao invés do valor contabilizado após implantação da usina fotovoltaica. O sistema fotovoltaico utilizado na geração distribuída produz energia diretamente na alimentação do consumidor, sendo utilizado o próprio telhado desta unidade para geração da energia. Logo o valor que deve ser utilizado como referência foi o valor do consumo em Kw/h cobrado pela distribuidora de energia local;

Tornou-se imperativo para os engenheiros olhar para as fontes de energia renováveis, como a solar, eólica, geotérmica, ondas e biomassa como alternativas sustentáveis e rentáveis, a vantagem de serem amigáveis para o meio ambiente e para as fontes de energia convencionais. No entanto, a falta de disponibilidade desses recursos renováveis de energia o tempo todo ao longo do ano, considerou que os sistemas híbridos têm custo-benefício mais relevantes. O desenvolvimento na investigação sobre

a modelagem de recursos híbridos de energia (sistemas fotovoltaicos), sistemas de energia de backup (célula de combustível, bateria, Ultra-capacitor, Diesel Gerador), unidades de condicionamento de energia (conversores MPPT, conversores Buck/Boost, carregadores de bateria) e técnicas de energia.

Desde 2012, cerca de 1,3 bilhão de pessoas, ou 18,41% da população do mundo, ficaram sem eletricidade eventualmente. Muitas dessas pessoas vivem em áreas remotas onde a geração descentralizada é o único método de eletrificação. A maioria das minis-redes são energizadas por geradores a diesel, mas novos sistemas híbridos, incorporando fontes de energia renováveis, estão se tornando um método eficiente na redução do custo total do sistema diesel. Estações solares híbridas com a propriedade GridStability System ("GSS") maximiza a entrada de energia solar à rede sem interferir com os sistemas de controle de gerador a diesel existentes, maximizando assim a economia de combustível. Os dados do sistema instalado foram utilizados para validar as capacidades e desempenho GSS (CHAUDHARY *et al.*, 2014).

A sensibilização do público para a necessidade de reduzir o aquecimento global e o aumento significativo dos preços das fontes de energia convencionais têm encorajado muitos países para fornecer novas políticas energéticas que promovem as aplicações das energias renováveis. Tais fontes de energia renováveis, como a eólica, solar, energias com base hídrica etc., são ambientes amigável e tem potencial para ser mais amplamente utilizado. A combinação destas fontes de energia renováveis com unidades de back-up para formar um sistema híbrido pode fornecer uma oferta econômica atraente e de maior grau de confiabilidade, gerando um ambiente de energia elétrica em todas as condições de carga de demanda em relação ao uso único de tais sistemas. Existem muitos estudos sobre a otimização e dimensionamento de sistemas de energias renováveis híbridos desde a recente utilização popular de fontes de energia renováveis (ERDINCE e UZUNOGLU, 2012).

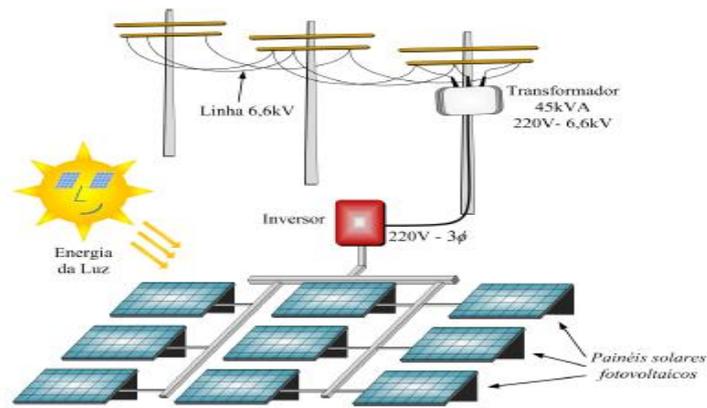


Figura 2.12 - Estrutura On Grid.
 Fonte: CLAUDIO GONÇALVES (2013).

Exemplos como o caso do Irã, ao qual quase todas as aldeias que consistem em mais de 20 famílias no Irã já estão se conectando à rede de recursos renováveis com o forte Plano de Desenvolvimento econômico de cinco anos proposto pelo governo iraniano (2005-2010). No entanto, há muitas comunidades isoladas com menos de 20 famílias que ainda necessitam de eletrificação. Atualmente, a única tecnologia que fornece energia elétrica para essas comunidades é geradora a diesel, que não só causam problemas ambientais e de saúde humana, mas também alto custo na manutenção e custos operacionais (GHASEMI *et al.*, 2013).

Sistemas de energia renovável, combinando vários tipos de tecnologias, têm demonstrado capacidades relativamente elevadas para resolver problemas de confiabilidade e reduziram desafios de custo. O uso de tecnologias de produção de eletricidade / armazenamento híbridos como sistemas de fora da rede *stand-alone* é razoável para superar deficiências relacionadas. Energia solar e eólica são as fontes renováveis que têm precedência em comparação com os outros tipos. Com base na radiação solar e mapas de velocidade média do vento, sistemas de tecnologias economicamente otimizadas são concebidos através da simulação de comportamento de várias combinações de sistemas de energias renováveis com dimensionamento diferente, incluindo turbina eólica (WT), fotovoltaica (PV), célula de combustível (FC), e bancos de bateria (HOSSEINALIZADEH *et al.*, 2016).

Um recente estudo do custo da implantação de sistemas fotovoltaicos, publicado em 2005, analisou o preço de 47 sistemas isolados de 100 a 6600 W, de 1987 a 2004, indicando que esses sistemas apresentam uma tendência de redução de preços de aproximadamente 1 U\$/W ao ano, com custos variando entre 7 e 10 U\$/W (HEGEDUS e OKUBO, 2005).

Outro estudo, publicado pelo Programa de Sistemas Fotovoltaicos de Potência da Agência Internacional de Energia, confirma que os preços estão reduzindo ano após ano, e indica que os sistemas isolados tendem a custar aproximadamente o dobro quando comparados com sistemas conectados à rede, por não necessitarem de baterias e demais componentes associados. Em 2004, sistemas isolados de até 1 kW apresentam variação de preço de 9 a 25 U\$/W, sendo que o valor típico se encontra em torno de 13 U\$/W.

Considerando o valor típico de 13 U\$/W para sistemas fotovoltaicos isolados, este número, por si só, mostra-se extremamente antieconômico e não competitivo quando comparado com o custo da implantação das demais fontes. Os valores típicos de instalação, tanto informados pela Agência Nacional de Energia Elétrica quanto publicados em um estudo da CESP e IMT. Outra conta que costuma ser realizada quando essa comparação é feita é a capacidade de geração de energia em um dia. Um sistema dotado de fonte não intermitente pode gerar energia durante 24 horas por dia, enquanto um sistema solar de mesma potência instalada pode gerar, dependendo de sua localização geográfica, uma média de 6 horas equivalentes de potência nominal ao longo do dia. Logo, para que o sistema fotovoltaico possa produzir a mesma quantidade de energia em um dia, ele deve ter sua potência aumentada em 4 vezes, o que eleva seu custo de implantação para 52 U\$/WPICO ($13 * 4$).

2.5 - DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A Radiação solar varia durante o dia e tem sua maior intensidade ao meio-dia-solar. A partir do momento em que o sol aparece no horizonte até o ocaso, a radiação solar vai do mínimo ao máximo (ao meio-dia-solar), e de volta ao mínimo. As nuvens influenciam a Irradiância Direta, fazendo com que mesmo ao meio-dia-solar possamos captar menos energia que no começo da manhã ou final da tarde.

Se colocarmos em um gráfico a variação da Irradiância em um dia médio, podemos observar as horas do dia em que a Irradiância é próxima ou igual a 1000 W/m² (Figura 2.13).

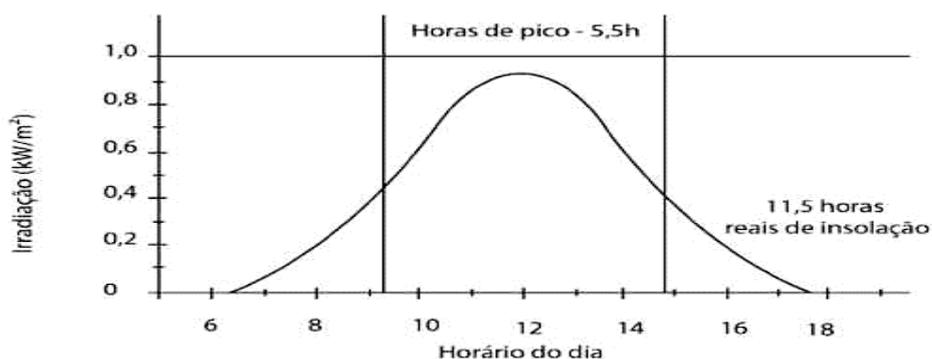


Figura 2.13 - Gráfico horário de picos de irradiação.
Fonte: BLUE SOL (2016).

Ângulo de Incidência (γ): é formado entre os raios solares e a normal à superfície de captação. Quanto menor esse ângulo, mais energia será captada.

Ângulo Azimutal de Superfície (a_w): Entre a projeção da normal à superfície do painel solar e a direção norte-sul. Para o hemisfério sul o azimute é o norte e, portanto, o deslocamento angular será a partir deste ponto cardeal, sendo positivo em sentido horário (leste) e negativo no sentido anti-horário (oeste). O ângulo Azimutal de Superfície estará entre: $-180^\circ \leq a_w \leq 180^\circ$. Internacionalmente convencionou-se o azimute 0° como sendo o Sul, e o Norte tem ângulo azimutal de 180° .

Ângulo Azimutal do Sol (a_s): é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Tem as mesmas convenções que o Ângulo Azimutal de Superfície.

Altura Solar (α): ângulo entre os raios solares e sua projeção sobre um plano horizontal.

Inclinação (β): ângulo entre o painel solar e o plano horizontal. Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular (ω): é o deslocamento angular do sol, no sentido Leste-Oeste, a partir do meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra. A Terra dá uma volta completa (360°) em torno de si mesma em 24 horas. Portanto, cada hora corresponde a um deslocamento de 15° .

Ângulo Zenital (θ_z): é o ângulo formado entre os raios solares e a vertical (Zênite). O ângulo zenital é o inverso da altura solar. O sol só alcança o Zênite nas localidades entre os trópicos (zona tropical). Fora dos trópicos, em nenhuma localidade haverá, ao meio-dia solar, ângulo zenital igual a zero. A potência produzida por um GFV depende de fatores, como perdas de tensão no cabeamento elétrico, diferenças

entre as células que constituem os módulos solares, mas os dois fatores principais que afetam a potência de saída do GFV (MACEDO, 2006). são:

- Radiação solar incidente no plano dos módulos solares que compõem o GFV;
- Temperatura de operação das células dos módulos solares.

Neste trabalho, o GFV será utilizado para suprir alimentação para um inversor CC/CA, o qual será uma unidade fotovoltaica para integração à rede.

No dimensionamento da potência ativa do GFV (ZILLES *et al.*, 2010) foram usados os dados do módulo solar modelo PLUTO245-Wde, cujas especificações técnicas principais são na descrição de materiais. Os dados de radiação solar e temperatura ambiente, ambas horária, foram obtidos no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2012). Como exemplo de características técnicas de inversor trifásico para integração à rede são descritos na descrição dos equipamentos utilizados os dados técnicos principais de um inversor com potência nominal de 40 kW.

2.6 - INDICADORES FINANCEIROS

Conforme citado, existem diversos métodos de análise para viabilidade econômica de sistemas, um deles é o Payback descontado, no qual o modelo do Payback simples tem como conceito que o tempo necessário para que as entradas de caixa do projeto se igualem ao valor a ser investido, ou seja, o tempo de recuperação do investimento realizado. Assim, o método payback descontado possui basicamente este mesmo conceito, mas considera-se o valor do dinheiro no tempo. É verificado um número exato de períodos para a recuperação do investimento. Juntamente a este método, é levado em consideração o Valor Presente Líquido (VLP), que é uma fórmula matemática financeira que leva em conta o valor do dinheiro no tempo. O mesmo corresponde à diferença entre o valor presente das entradas líquidas de caixa associadas ao projeto e o investimento inicial necessário (MACKEVIČIUS,2010).

2.6.1 - Pay Back Solar

Investir em um sistema de energia solar fotovoltaica vem se tornando uma solução mais atraente e viável para os brasileiros. Com os ganhos já conhecidos como poder usufruir de uma energia limpa e renovável, além de maior controle sobre os gastos com a energia, o consumidor também tem a vantagem de saber o quão rentável é investir em geração solar distribuída e o

prazo para o retorno desse investimento, o chamado **payback**, cálculo que prevê quando o consumidor começará a ter retorno sobre o investimento no sistema.

O payback é o período necessário para que o custo de instalação se pague e, a partir de então, comece a “dar lucro”. Esse cálculo deve levar em consideração o investimento total realizado e a geração média mensal do sistema fotovoltaico.

A economia na conta de energia já no primeiro mês de instalação é um bom indicativo do quanto o sistema fotovoltaico é rentável. De acordo com especialistas, ele pode gerar uma economia de até 95% na conta do consumidor. E segundo análises da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), o tempo de retorno de um sistema residencial de geração distribuída está estimado em até quatro anos.

2.6.2 - Valor Presente Líquido (VPL)

O valor de presente líquido é um *indicador* que faz uma análise relacionada com o valor presente do fluxo de caixa que são gerados pelo projeto durante a sua vida útil. No VPL são considerados lançamentos positivos e/ou negativos, descontando a uma taxa de juros apropriada de acordo com a situação. Para se realizar o cálculo do VPL, é necessário desenvolver um fluxo de caixa, indicando toda entrada e cada saída durante o período no qual aquele projeto será executado. Depois de construir esse fluxo de caixa, para calcular então o valor presente líquido, deve-se descontar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de cada uma dessas entradas e saídas, pelo período daquele projeto. A (TMA) representa a taxa mínima na qual o cliente quer investir para ter um retorno mínimo do investimento.

2.6.3 - Taxa Interna de Retorno (TIR)

Outro indicativo para verificar a viabilidade de um projeto com sistemas fotovoltaicos é a Taxa Interna de Retorno (TIR). A TIR é uma taxa que, quando utilizada como taxa de desconto aplicada ao fluxo de caixa, resulta em VPL igual a zero. Lembrando, como vimos anteriormente, que quando o VPL é igual a zero, isso indica que não faz diferença investir financeiramente naquele projeto.

Esse método é das formas de medir a rentabilidade do fluxo de caixa, com a finalidade de encontrar uma taxa intrínseca de rendimento. De forma resumida, matematicamente, quando você calcula o fluxo de caixa, para um VPL igual a zero, irá

encontrar um valor da taxa “ i ” de desconto. Na prática, após se calcular a TIR ela é comparada com a TMA. Assim, se a TIR for maior que a TMA, isso implica que o projeto é viável financeiramente.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAIS

Sistema fotovoltaico é um sistema composto por um conjunto de placas solares também conhecidos por módulos fotovoltaicos, que são responsáveis por captar a luz do sol através de uma composição de células de silício, suas características de tensão e corrente variam com a irradiância solar coletada pelo módulo e com a temperatura que as células operam. Um aparelho conhecido por inversor solar, recebe esta tensão e corrente gerada pelas células solares em corrente contínua, converte para corrente alternada deixando a energia gerada na mesma qualidade que a distribuidora de energia.

Por se tratar um estudo de implantação de um sistema fotovoltaico em geral, e não se tratando apenas de um assunto específico relacionado ao mesmo, um dos pontos abordados neste trabalho é a análise financeira de um projeto deste porte para a universidade, e o que representa de economia para a mesma.

Tabela 3.1 - Estimativas iniciais de custo.

EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	PREÇO
Projeto Fotovoltaico	R\$ 15.000,00
Materiais e equipamentos Fotovoltaicos e de Estrutura	R\$ 200.000,00
Mão de obra e instalação de equipamentos	R\$ 50.000,00
TOTAL PARCIAL	R\$ 265.000,00

3.1 - Descrição dos equipamentos

3.1.1 - Inversor fotovoltaico trifásico

O inversor fotovoltaico é um aparelho que recebe a energia em corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos, e converte para corrente alternada, deixando na mesma qualidade que a energia recebida pela rede de distribuição.

Este tipo de aparelho só pode ser utilizado se estiver conforme normas brasileiras ou normas internacionais, de forma que atenda a todos os requisitos de segurança e qualidade Para prevenir o ilhamento, estes aparelhos funcionam apenas se a

energia elétrica da rede de distribuição estiver “ligada”, ou seja, caso a rede da distribuidora seja desligada por alguma falha ou manutenção da mesma, o inversor se desliga e interrompe a distribuição da energia para o consumidor ou para a rede elétrica.

Inversores Trifásicos on grid, marca GROWATT, linha Sunny Island (SMA)

- Modelo: SI 8.0H-10;
- Fabricação: SMA;
- Potência nominal de saída CA: 3,0 kW;
- Tensão nominal de saída CA: 127V;
- Distorção harmônica total: <4%;
- Tensão de entrada CC (bateria): 48V (41 a 63 Vcc);
- Corrente máxima de carga da bateria: 30 A;
- Controlador de carga automático multiestágio, com flutuação automática e carga de equalização;
- Eficiência máxima: 95%;
- Autoconsumo em vazio/*stand-by*: <26W / <4W;
- Proteções eletrônicas contra sobrecarga e curto-circuito na saída CA, fusíveis contra inversão de polaridade na entrada CC, sobre temperatura, descarga profunda da bateria;
- Proteções contra surtos Categoria III (conforme IEC 60664-1);
- Acessórios: sensor de temperatura de bateria, cabos de comunicação;
- Partida automática do gerador integrada;
- Grau de proteção: IP54;
- Temperatura de operação: -25 a +60 °C;
- Dimensões externas: 612 x 467 x 242mm.

3.2 - TIPO DE FIXAÇÃO DOS MÓDULOS

3.2.1 - Estruturas de suporte dos módulos fotovoltaicos

As estruturas de suporte foram fabricadas em cantoneiras e perfis de aço zincado a fogo, e serão montadas em colunas cravadas diretamente no solo. Alternativamente, caso o solo não apresente boas condições.

As Estruturas para Sustentação de Módulos Fotovoltaicos da PHB, em alumínio anodizado é exclusividade da PHB. Sendo de fácil instalação e com alta durabilidade, atendem telhados, superfícies planas (lajes), solos e áreas de estacionamentos. Serão projetadas para resistir a ambientes agressivos e a velocidades de vento até 35 m/s (Região II, conforme NBR 6123).

Para todos os tipos de estruturas para sustentação de módulos fotovoltaicos, a PHB Solar oferece o Sistema de Aterramento Completo via CLIPS e GRAMPOS, o que permite o aterramento da estrutura e módulos fotovoltaicos de maneira segura e prática.

3.3 - MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O painel solar JA de 335W modelo JAM6(K) - 72-335/PR, possui alta eficiência e é classificado pelo INMETRO com classe "A". Ideal para instalações de energia on-grid (conectado à rede) e off-grid (com baterias). Módulos fotovoltaicos de silício policristalino, construídos com células fotovoltaicas de alta eficiência (>17%), encapsuladas entre camadas de EVA, proteção inferior de PVF, cobertura superior de vidro transparente, e moldura externa de alumínio anodizado.

- Quantidade: 120 peças;
- Modelo: JAM6(K) -72-335/PR;
- Fabricação: JA SOLAR;
- Células por módulo: 72;
- Especificações STC (25°C, AM 1.5, radiação 1,0 kW/m²);
- Potência máxima: 335 W;
- Tensão de máxima potência: 37,96 V;
- Corrente de máxima potência: 8,83 A;
- Tensão de circuito aberto: 46,68 V;
- Corrente de curto-circuito: 9,38 A;
- Eficiência: 17,6%;
- Conexões: Cabos c/conectores compatíveis MC-4;
- Dimensões externas (C x L x A): 1956 x 991 x 45 mm;
- Peso aproximado: 26,5 kg;
- Certificações: UL 1703, IEC 61215, IEC 61730, TUV;
- Certificação INMETRO, Classe "A" (mais eficiente).

3.4 - PROTEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICAS

Assim como toda instalação elétrica de baixa ou média tensão, sistemas solares devem conter suas próprias proteções, sistemas estes que devem interromper a geração e e/ou a entrega de energia do sistema caso a rede ou o próprio gerador solar apresente alguma falha. Em geral, os inversores são adaptados para proteger o sistema em si, eles possuem funções para detectar qualquer falha que possa surgir, e assim proteger o sistema.

Mesmo assim, o sistema deve obedecer principalmente a NBR 5410 e possuir dispositivos auxiliares de proteção como a instalação de dispositivos contra surtos tanto para a geração de energia dos painéis (Corrente Contínua), como a conexão dessa energia na unidade consumidora, como o envio da mesma para a rede elétrica (Corrente Alternada). O aterramento dos painéis e de todas as partes metálicas, como estruturas de sustentação dos painéis, bem como o inversor, devem seguir a NBR 5419.

A maioria dos inversores ligados à rede e independentes também contém a função Maximum Power Point Tracking (MPPT). O **Maximum Power Point (MPP)** é a tensão e a corrente ideal para que o conjunto FV funcione no maior ponto de potência em qualquer instante. O MPPT plotado em uma **curva I-V** está no cotovelo da curva onde os valores mais altos para produzir energia são forçados eletronicamente pela entrada do conjunto. A curva I-V plota graficamente a relação da corrente e da tensão. A função MPPT também é encontrada nos controladores de carga em sistemas independentes com armazenamento em bateria. Conforme apresentado na Figura 3.1.

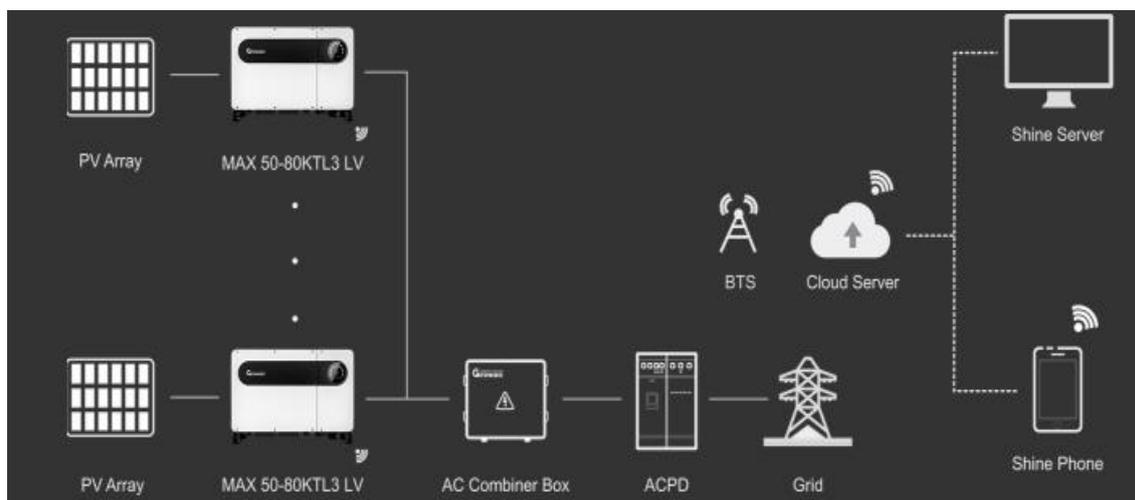


Figura 3.1 - Esquema de fornecimento de energia.
Fonte: GROWATT INVERSORES (2019).

Todo inversor tem uma janela MPPT ligeiramente diferente e limitada, onde vai aceitar a tensão e a corrente DC e convertê-las em uma potência AC. Existem dois fatores a considerar:

- A capacidade máxima de conversão DC e a capacidade do inversor. vai transformar o excesso de potência DC em potência AC.
- A janela de tensão e corrente do Código versus a janela de tensão e corrente MPPT.

Consequentemente, quando projetamos um sistema de alto desempenho ou, pelo menos, de bom desempenho para satisfazer a janela MPPT, nós o fazemos usando a regra dos 80%. Em termos simples, um inversor de 10.000 watts (lembre-se de que o inversor é classificado para saída AC) vai permitir aproximadamente 8.000 watts DC ligados a ele.

Divida a saída de energia do inversor pela energia enviada para o inversor para descobrir a sua eficiência instantânea. Os inversores criam uma pequena quantidade de perda de saída durante o processo de conversão DC para AC. A carga afeta a eficiência do inversor e estima-se que a maioria dos inversores usufrua de uma maior eficiência quando a saída é igual a aproximadamente 30% a 70% de sua capacidade nominal.

3.4.1 - Cabeamento elétrico de CC e CA

Os módulos fotovoltaicos são fornecidos com rabichos de cabos de interligação, dotados de conectores compatíveis com o tipo Multicontact MC-4. As interligações entre módulos fotovoltaicos para formação das “strings” serão feitas através dos cabos de interligação.

3.4.2 - Fluxograma da metodologia aplicada

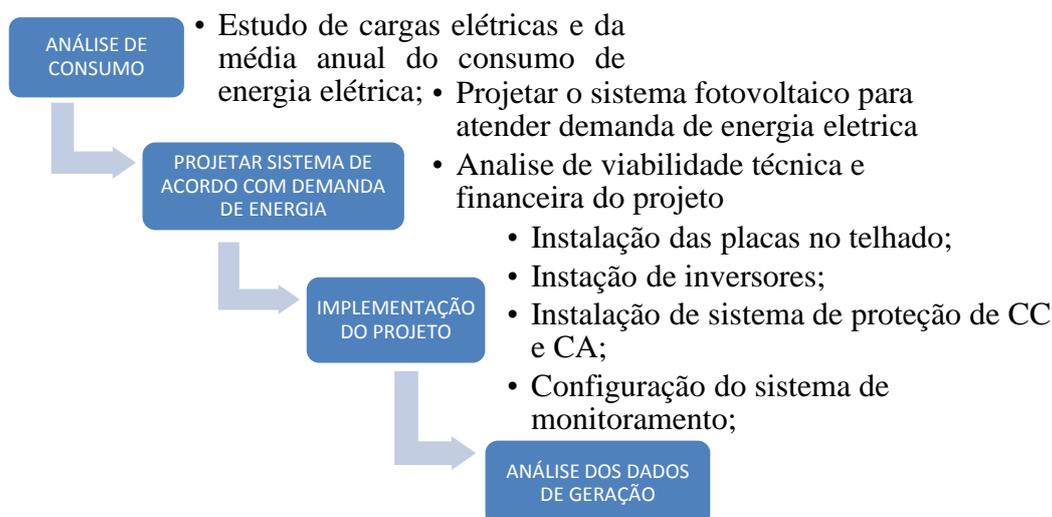


Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia aplicada.

3.5 - MÉTODOS

3.5.1 - Procedimentos

O procedimento utilizado neste estudo foi executado através da análise do consumo de energia elétrica antes da implantação do sistema fotovoltaica, com resultados os quais demonstram no uso de energia fotovoltaica além de reduzir custos econômicos, impactos ambientais e custos financeiros também traz ganhos para a utilização de tipos de geração de energia em comércios e pequenas indústrias da região de Manaus e região metropolitana. O estudo procura uma forma de estabilidade econômica e sustentabilidade ambiental, sendo possível sua aplicação para qualquer unidade que possua este mesmo tipo de atividade econômica.

Outra evidência é o fato de que após a conclusão desse estudo, as pequenas indústrias e comércios de médio porte da região possam se estruturando para implantação de suas usinas de geração de energia fotovoltaica. Para um processo autonomia energética, sustentabilidade ambiental de acordo com as legislações vigentes.

3.5.2 - Delimitação

Esta pesquisa foi aplicada em uma pequena indústria de alimentos no centro de Manaus-AM, tendo a mesma com sua única alimentação de energia a rede da concessionária, aplicado um modelo de energia fotovoltaica *on grid* na tentativa de reduzir custos operacionais, financeiros e impactos ambientais.

Escolheu-se a EMPACOTADORA AMAZONAS, pois se tem semelhanças com as pequenas industriais de embalagem localizadas no município de Manaus-AM com a dificuldade de manter um sistema energético com níveis econômicos aceitáveis, pois nos encontramos com a segunda maior tarifa de energia do Brasil, onde possuímos 80% da geração de energia com geração térmica. Porém, outras unidades da instituição também possuem tarifa bem menores o que revela mais um atrativo do projeto: a possibilidade de reprodução em outras unidades.

A partir deste enfoque, a presente pesquisa tem como delimitação o estudo sobre a utilização da energia solar de uma usina de 40 KWp *on grid*, como substituição à geração de formas combustíveis em grande da região amazônica com as mesmas dificuldades energéticas.

3.5.3 - Limitação da pesquisa

A pesquisa tem como limitação aspectos temporais, de particularidade e de segmento. Como aspectos temporais: os resultados da pesquisa têm validade para o período analisado, excluindo outros fatores influenciadores, tais como clima, demografia e contingenciamento de recursos. Como aspecto de Particularidade: os resultados da pesquisa são restritos à especificidade da unidade operacional a que se destina, ou seja, sua rotina, suas fragilidades, seu desempenho e seu contexto operacional.

Aspectos de segmento: os resultados da pesquisa são provenientes do modelo fotovoltaico experimental para geração de energia de uma pequena residência ribeirinha e um conjunto de luminárias solar, desta forma, as dificuldades no desempenho serão inerentes a unidade operacional em estudo, não tendo a responsabilidade de fechar a questão sobre a eficiência e a eficácia das técnicas utilizadas neste projeto.

3.5.4 - Procedimento de análise

O presente trabalho foi elaborado tendo como principal foco a dificuldade de fornecimento de energia elétrica em comunidades isoladas nas regiões ribeirinhas, buscando inserir alternativas de redução de custos com combustível na geração de energia térmica, única forma de energia disponível hoje nestas comunidades.

A Proposta de implantação de microgeração fotovoltaica como Alternativa Energética em uma pequena indústria de alimentos, que tem como justificativa relevante perante a sociedade, a redução de custos de na geração de eletricidade e o uso correto dos recursos naturais. Como relevância científica, pode-se afirmar que o resultado do estudo servirá de base e exemplo para outras indústrias e comércios na região com mesmas características e venham enfrentando dificuldade com o alto custo com energia, ou seja, compartilhando aspectos organizacionais com fins de contribuir para a solução de problemáticas semelhantes.

Etapa 1: Procedimentos do projeto e critérios de sucesso

- Avaliar os resultados após a implantação da microgeração de energia fotovoltaica e eliminação da compra mensal de energia elétrica, com a finalidade de reduzir os custos operacionais, impactos ambientais e de atender níveis satisfatórios, na geração de energia elétrica para o autoconsumo.

Etapa 2: Critérios de sucesso

- Tudo custo do projeto feito pelo objeto da sem custos de mão-de-obra;
- Planejamento detalhado na execução;
- Procedimento com a qualidade, processos, e utilização de tecnologias para reduzir custos com tempo, gastos financeiros e logísticos.

Etapa 3: Requisitos principais do cliente

- Projeto com desenvolvimento.
- Equipamentos utilizados com tecnologia atualizada;

- Sem custo de logística, pago pelo fabricante do equipamento;
- Localização geográfica de fácil acesso.

Etapa 4: Produto do projeto

Uso de Energia Solar como Alternativa Energética em substituição da energia fornecida pela concessionária. A utilização da energia solar vai diminuir o custo de produção com o impacto financeiro, diminuição na geração de carbono na natureza, pois 60% da geração de energia elétrica no estado do Amazonas vem de geração de térmicas, assim reduzindo a contaminação do meio ambiente com CO₂ e diminuição de produtos provenientes do petróleo.

Etapa 5: Requisitos de aprovação do projeto

O projeto já conta com o espaço físico (telhado do prédio), mão-de-obra contratada com experiência comprovada em outras instalações, tem custo extremamente baixo se relacionado a custo/benefício, e já possui financiamento aprovado por agente financeiro com linha de crédito específica para energia renováveis.

Etapa 6: Principais partes interessadas

As principais partes interessadas identificadas preliminarmente são:

- A própria Indústria relacionada, alunos envolvidos no projeto e comerciantes e indústrias com sistemáticas semelhantes.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - DEFINIÇÃO DA ZONA DE ESTUDO E USO DE ENERGIA

A escolha pela zona de estudo permitiu uma curva de demanda diária com estudo de consumo de energia elétrica de uma pequena indústria de empacotação de alimentos em Manaus, para pequenas habitações características destas localidades, todos com área de telhado para suportar a demanda necessária para a instalação dos painéis fotovoltaicos.

4.2 - DETALHAMENTO DE PROJETO NA EMPACOTADORA AMAZONAS-AM

A região da Empacotadora Amazonas-AM tem Latitude: $0^{\circ} 38' 53.58''$, Longitude $47^{\circ} 13' 39.81''$ e está na zona Bioclimática 1. Conforme Figura 4.1 e Figura 4.2.

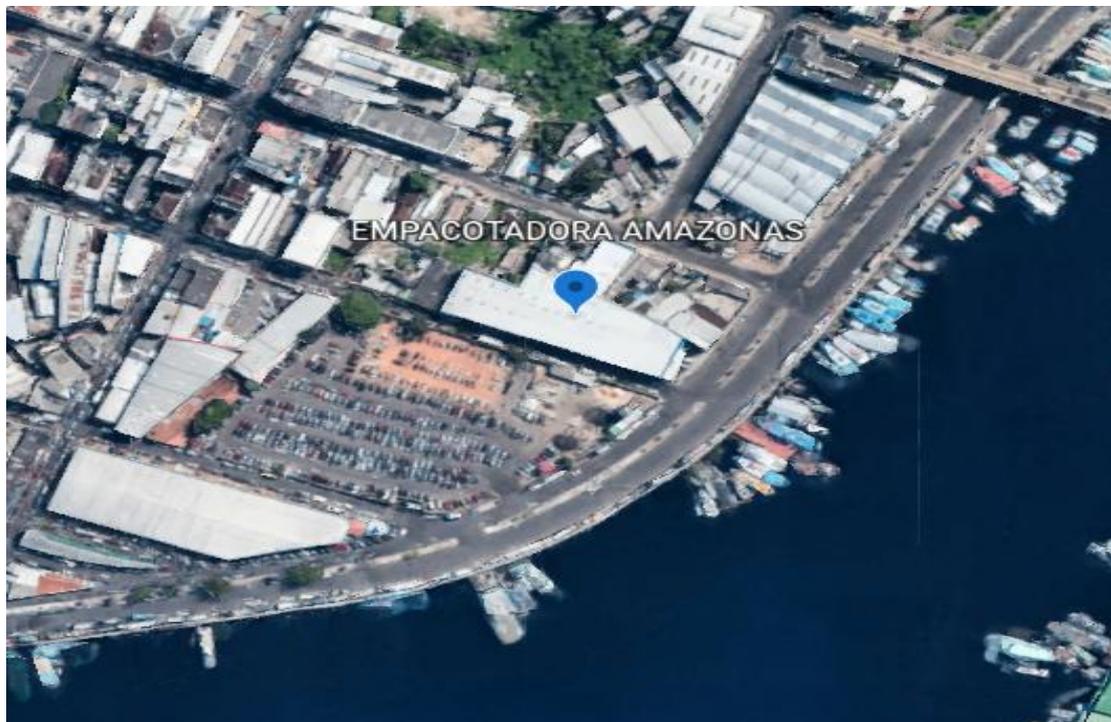


Figura 4.1 - Mapa da região.
Fonte: GOOGLE (2021).



Figura 4.2 - Área empacotadora amazonas.

A partir das observações técnicas de irradiância, utiliza-se programas computacionais que podem auxiliar na consulta aos dados de radiação solar incidente em dada localidade. As bases de dados possuem informações sobre a superfície horizontal, mas os painéis dos SFV são instalados em planos inclinados com diferentes orientações. Além disso, há programas que utilizam algoritmos adequados para sintetizar computacionalmente sequencias de dados meteorológicos que, na ausência de dados sequenciais medidos, podem alimentar programas de simulação de sistemas fotovoltaicos em operação.

O programa RADIASOL2 desenvolvido permite que o usuário defina o ângulo de inclinação e de orientação azimutal do plano dos módulos. O usuário deve entrar com dados de irradiação de área em média mensal sobre um plano horizontal e dados de temperatura em base mensal (ou utilizar dados incorporados na instalação do programa) e selecionar a localização e orientação do plano em estudo.

Local | Dados climáticos

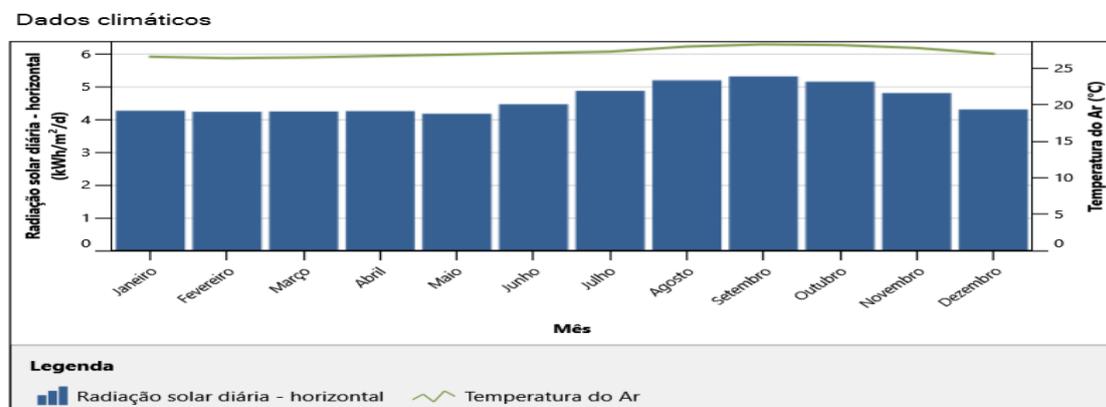


Figura 4.3 - Dados climáticos.

4.3 - IDENTIFICAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA

Como passo importante foi feita análise de consumo, para dimensionamento da usina fotovoltaica necessária de acordo com as características de consumo. Considerando uma média de consumo de energia elétrica de 8 814,57 Kw/ mês.

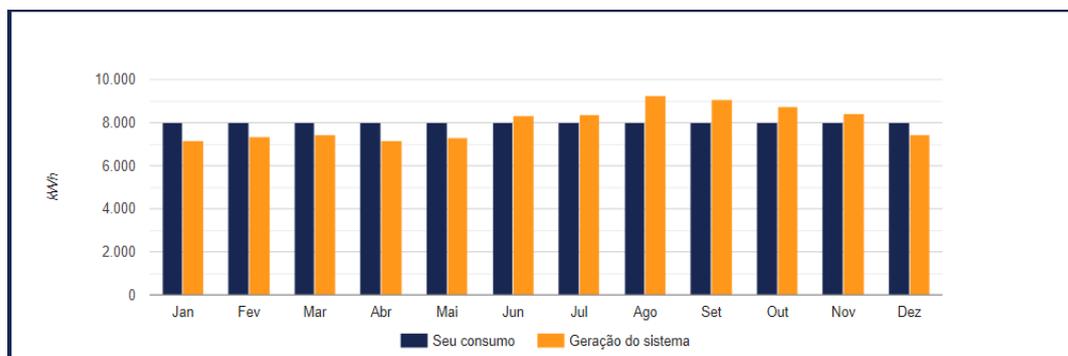


Figura 4.4 - Consumo x Geração do projeto.

Neste trabalho, o GFV será utilizado para suprir alimentação para um inversor CC/CA, o qual será uma unidade fotovoltaica para integração à rede.

No dimensionamento da potência ativa do GFV foram usados os dados do módulo solar modelo JAP72S01 335/SC, cujas especificações técnicas principais são apresentadas na Tabela 4.1. Os dados de radiação solar e temperatura ambiente, ambas horária, foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Como exemplo de características técnicas de inversor trifásico para integração à rede, apresenta a Tabela 4.1 os dados técnicos principais do inversor utilizado, um inversor Growatt 33000TL3-S com potência nominal de 33 kW.

Tabela 4.1 - Parâmetros elétricos AT STC.

TYPE	JAP72S01
Rated Maximum Power(Pmax)	335
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46.7
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	37.86
Short Circuit Current(Isc) [A]	9.35
Maximum Power Current(Imp) [A]	8.87
Module Efficiency [%]	17.2
Power Tolerance	0~+5W
Temperature Coefficient of Isc(α_{Isc})	+0.058%/°C
Temperature Coefficient of Pmax(γ_{Pmp})	-0.400%/°C

Fonte: JASOLAR (2021).

Tabela 4.2 - Datasheet x Growatt 33000TL3-S.

Input Data	
Max. DC power	36300W
Max DC voltage	1000V
Start Voltage	250V
PV voltage range	200V - 1000V
Nominal voltage	580V
Full load MPP voltage range	480V - 800V
Max. input current	36A / 36A
Max. input current per string	12A
Number of MPP trackers / strings per MPP tracker	2/4
Output (AC)	
Rated AC output power	33KW
Max. AC apparent power	33KVA
Max. output current	50A
AC nominal voltage	230V/400V
AC grid frequency	50/60Hz
Power fator	0.8 leading - 0.8 lagging
THDi	<3%
AC grid connection type	3W+N+PE
Efficiency	
Max. efficiency	98.8%
Euro – eta	98.4%
MPPT efficiency	99.5%

Fonte: DATASHEET GROWATT (2019).

Para uma determinada temperatura ambiente, T_a , e irradiância incidente, G_i , a temperatura do módulo solar (ou temperatura da célula), T_c ($^{\circ}\text{C}$), pode ser obtida pela Eq. (4.1).

$$T_c = T_a + (NOTC - 20) \frac{G_i}{800} \quad (4.1)$$

Sendo:

NOTC = Temperatura de operação nominal da célula ou nominal, sob condições de Concentração de 20°C , 800 W/m^2 e velocidade do vento de 1 m/s . Valores médios de NOCT estão em torno de 45 a 46°C .

A potência máxima fornecida por um GFV, P_{mp} , para determinada condição de operação, pode ser obtida através da Eq. (4.2).

$$P_{mp} = P_{GFV} \frac{G_i}{G_0} [1 - \gamma_{mp}(T_c - T_0)] \quad (4.2)$$

Sendo:

$T_0 = 25^\circ\text{C}$ é a temperatura de referência do módulo, $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ é a irradiância de referência e γ_{mp} é um coeficiente que relaciona a potência no ponto de máxima potência com a temperatura do módulo.

A potência nominal do GFV, sob condições de referência, P_{GFV} , pode ser obtida a partir da Eq. (4.3).

$$P_{GFV} = N_{ms} V_{mp} N_{mp} I_{mp} \quad (4.3)$$

Sendo:

N_{ms} = a quantidade de módulos solares em série;

N_{mp} = a quantidade de filas de módulos interligados em paralelo;

V_{mp} = a tensão do ponto de máxima potência;

I_{mp} = a corrente do módulo no ponto de máxima potência.

Fazendo a substituição e considerando $\gamma_{mp} = -0,0040/^\circ\text{C}$, $\text{NOCT} = 45^\circ\text{C}$ e $T_0 = 25^\circ\text{C}$, a potência ativa de saída (W) do GFV pode ser obtida em função da irradiância incidente (W/m^2) e temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$), a partir da Eq. (4.4).

$$P_{mp} = 1.10 \times 10^{-3} P_{GFV} G_i - 1,25 \times 10^{-7} P_{GFV} G_i^2 - 4.0 \times 10^{-6} P_{GFV} G_i T_0 \quad (4.4)$$

A potência ativa (W) de saída do inversor, considerando o seu rendimento η_{inv} , pode ser obtida pela aplicação da Eq. (4.5).

$$P_{OINV} = \eta_{inv} P_{mp} \quad (4.5)$$

Neste trabalho, o inversor CC/CA será a unidade de GD fotovoltaica que será integrada à rede de distribuição primária. Essa unidade será denominada de gerador

fotovoltaico para integração à rede (GDFV), cuja potência de alimentação CC será determinada, de acordo com as diretrizes estabelecidas para o dimensionamento do GFV.

Neste trabalho analisamos os riscos pela escolha de matriz energética de acordo com os valores do kw/mês gerado com cada matriz e constatamos que a mais coerente seria a geração fotovoltaica.

Indicador de referência

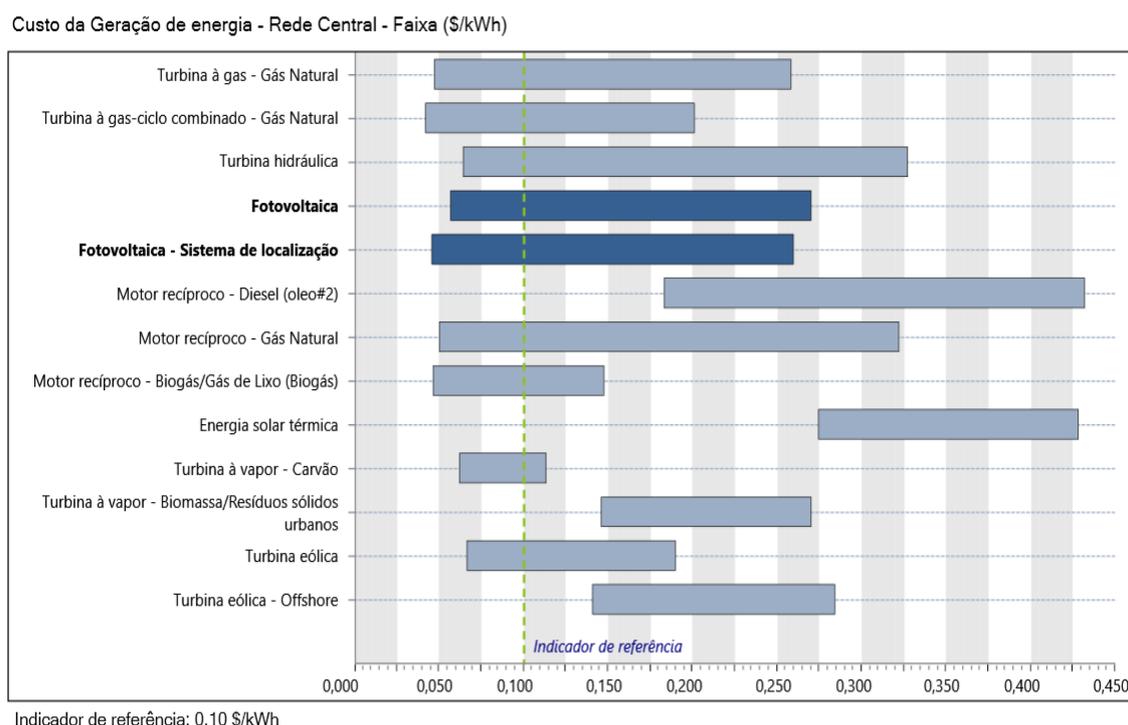


Figura 4.5 - Indicadores de custo de geração por matriz.
Fonte: RETSCREEN (2021).

Para que o projeto se torne viável foi fixado um valor de referência, com a relação de consumo e custo do de implementação da usina fotovoltaica.

Alvo

Resumo

	Eletricidade exportada p/ rede kWh	Receita com eletricidade exportada \$	Redução de emissões dos GEE tCO ₂
Caso proposto	130.926	0	8,9

Figura 4.6 - Resumo.

Traçamos o estudo de viabilidade financeira para verificar se os custos do projeto se integravam com os valores de geração mensal, constatando assim a viabilidade de implementação da usina, de acordo com a Figura 4.7.

Status	Ano	Preço tarifa (R\$/KWh) *	Produção de energia (KWh/ano) **	Produção de energia total (R\$)	Resultado financeiro (R\$)	CDB 130% CDI (R\$) ***	Poupança (R\$) ****
Investimento	0	0,000	0	0,00	-265.000,00	0,00	0,00
Investimento	1	1,250	96.012	120.015,00	-144.985,00	280.158,00	273.347,50
Investimento	2	1,300	95.244	243.832,20	-21.167,80	296.183,04	281.957,95
Lucro	3	1,352	94.482	371.571,86	106.571,86	313.124,71	290.839,62
Lucro	4	1,406	93.726	503.350,62	238.350,62	331.035,44	300.001,07
Lucro	5	1,462	92.976	639.281,53	374.281,53	349.970,67	309.451,10

Figura 4.7 - Viabilidade financeira do projeto.

Após todos os dados e cálculos do sistema, em cima de uma análise financeira e fluxo de caixa da empresa em questão, dimensionamos o projeto para atender as necessidades calculada. Assim seguindo os passos necessários para implementação dele.

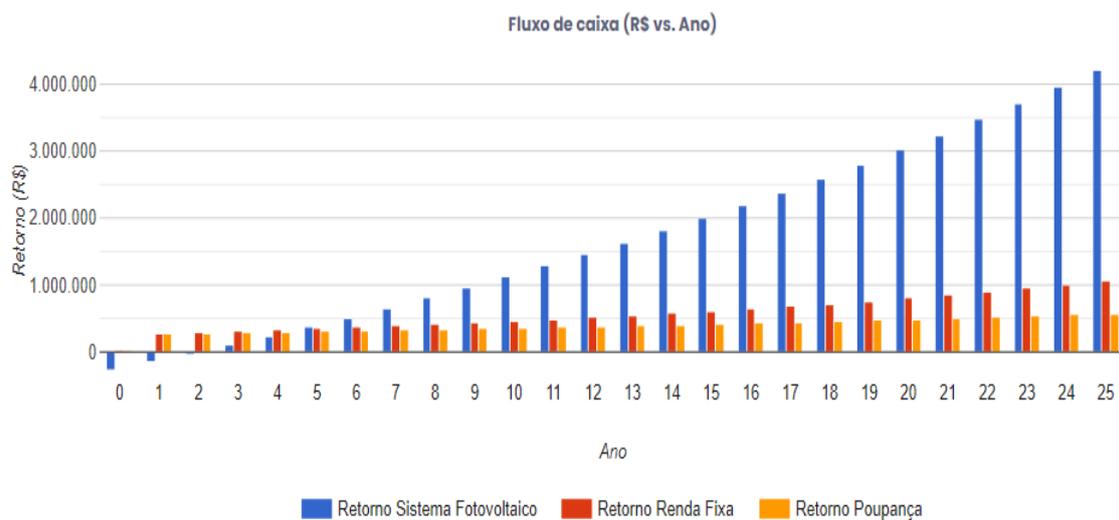


Figura 4.8 - Análise de fluxo de caixa.

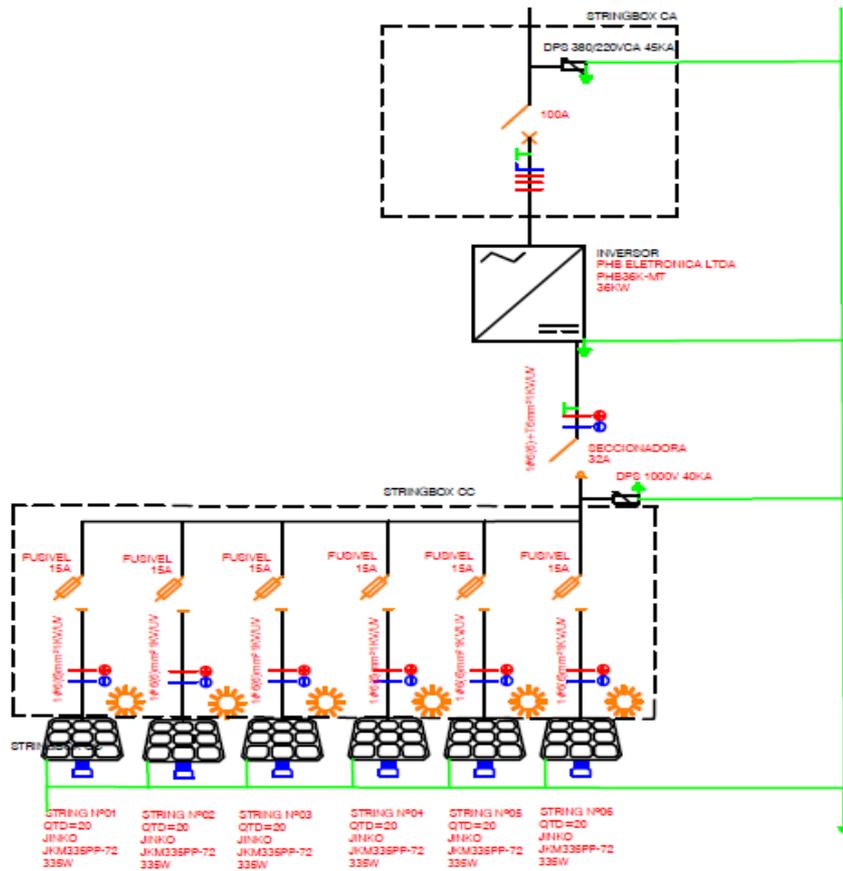


Figura 4.9 - Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico.

De acordo com projeto e diagrama unifilar, foram montadas as placas no telhado da empresa relacionada, sistema de inversores e proteções de acordo com o projeto.



Figura 4.10 - Imagem das placas fotovoltaicas.



Figura 4.11 - Montagem do inversor e proteções.

Após instalação dos equipamentos, começou o acompanhamento do comportamento do sistema para verificar se os cálculos do projeto estavam de acordo com os projetados. Verificamos com a coleta dos dados de geração que existe uma grande diferença nos dias de chuva do inverno amazônico como mostra nas Figuras 4.12 e 4.13.



Figura 4.12 - Geração de energia em dia de verão.

Atesta-se que os dados de geração nos dias de verão sem chuvas os valores se aproximam dos valores nominais, com isso satisfazendo as condições iniciais. Já nos dias de invernos rigoroso da região constatamos uma grande perda de geração.

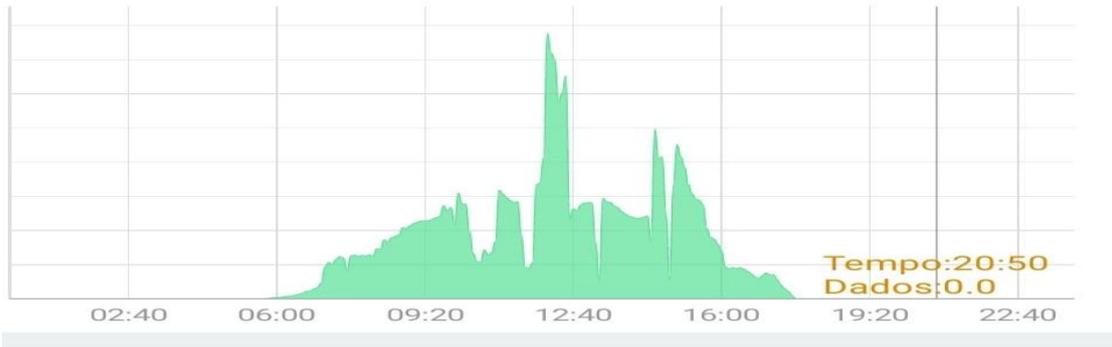


Figura 4.13 - Geração de energia em dias de inverno amazônico.

Aumentou-se o ranger de abrangência para tinta dias e a confiabilidade e exatidão dos dados de geração, com isso podemos configurar a geração para o valor exato dentro das necessidades de consumo conforme mostra a Figura 4.14.

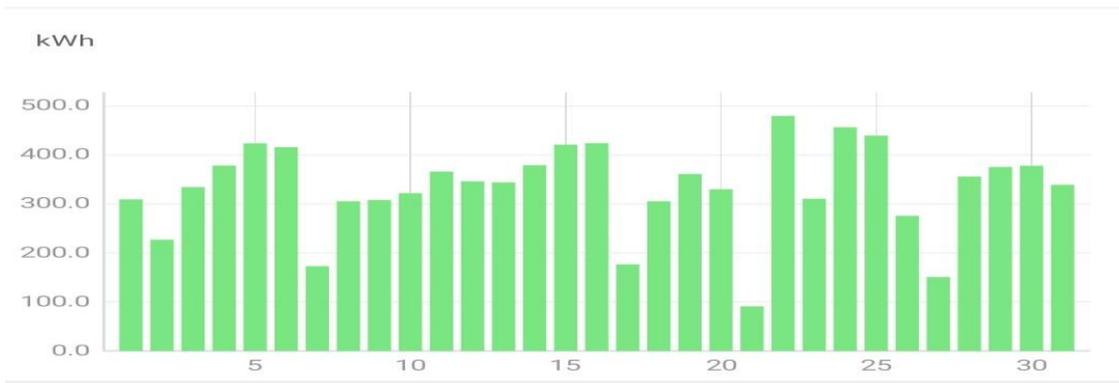


Figura 4.14 - Diagrama de geração de energia mês julho (verão).

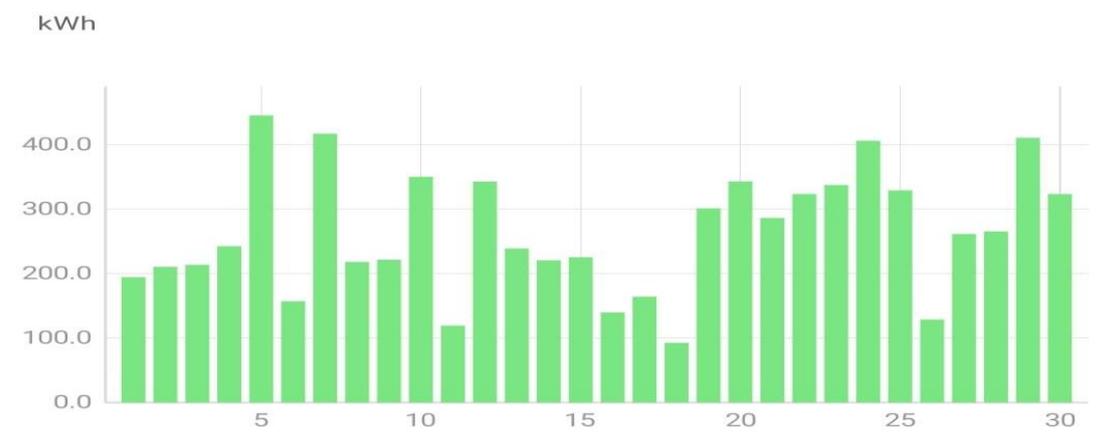


Figura 4.15 - Diagrama de geração de energia mês novembro (inverno).

Verificou-se que o consumo de energia elétrica antes da implementação do projeto, para atender todas as funcionalidades da empresa a média de consumo era de 8814,57 Kw/mês.

Mês	Consumo (kWh)	Geração (kWh)	Crédito do mês (kWh)	Crédito acumulado (kWh)	Fatura sem sistema (R\$)	Fatura com sistema (R\$)
Jan	8.000	7.155	0	0	10.000,00	1.056,81
Fev	8.000	7.345	0	0	10.000,00	818,72
Mar	8.000	7.463	0	0	10.000,00	670,79
Abr	8.000	7.151	0	0	10.000,00	1.061,43
Mai	8.000	7.308	0	0	10.000,00	864,95
Jun	8.000	8.312	312	312	10.000,00	125,00
Jul	8.000	8.384	384	696	10.000,00	125,00
Ago	8.000	9.257	1.257	1.954	10.000,00	125,00
Set	8.000	9.054	1.054	3.007	10.000,00	125,00
Out	8.000	8.745	745	3.752	10.000,00	125,00
Nov	8.000	8.399	399	4.151	10.000,00	125,00

Figura 4.16 - Comparativo de consumo e geração de energia.

Com implementação do projeto, ele foi feito para atender toda a demanda de energia elétrica, após alimentação com a geração fotovoltaica do sistema apenas os custos com iluminação pública, taxa básica de 100 kw/mês e custos com bandeiras tarifárias. Com isto reduzimos o consumo mensal de aproximadamente 8814,57 Kw/mês para 100 kw/mês. Satisfazendo assim as premissas financeiras e econômicas esperadas.

Com isto chega-se ao retorno financeiro esperado, de acordo com a projeção do retorno financeiro calculado e previsto. Além de resultados ambientais dispostos neste trabalho tendo em vista a geração de energia na região amazônica prevalecer termoelétrica.

A descarbonização surge como uma solução para o enfrentamento das questões climáticas e ambientais em voga atualmente. A implementação de cada vez mais sistemas de energia solar no país contribui para a redução de CO₂ na atmosfera.

Segundo Adnan Amin, diretor da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), as fontes renováveis devem representar, até 2050, dois terços de toda energia produzida no planeta, ou seja, o crescimento da ENERGIA SOLAR irá contribuir para descarbonizar, pois não há emissão de gases durante a produção de energia; em 25 anos, a utilização de um sistema fotovoltaico impede que 108.641kg de CO₂ sejam despejados na atmosfera e a economia na conta de luz pode atingir 90%, melhorando a gestão financeira dos lares e dando mais competitividade a indústrias, comércios e serviços, na Figura 4.17 demonstra-se a contribuição deste projeto com a diminuição de CO₂ de acordo com a geração de energia solar e conseqüentemente a quantidade que deixamos de consumir energia termoelétrica.



Figura 4.17 - Reduções climáticas.
Fonte: GROWATT INVERSORES (2021).

A Resolução Normativa 482/12 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) determina as disposições para o sistema de compensação de energia, conhecido como créditos de energia solar. Essa lei, incentiva a produção e o uso da energia fotovoltaica, possibilita que o consumidor que gera a energia solar faça uma espécie de troca com a concessionária de energia elétrica.

Com isto executou-se um estudo de eficiência energética em máquinas e equipamentos da empresa em questão, trocamos lâmpadas antigas, cabearios com dimensionamentos incorretos e motores, diminuindo o consumo e assim transformando uma parte de geração em excedente, podendo assim ser utilizado em outras unidades da empresa.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho, podemos demonstrar que a aplicação de um sistema fotovoltaico *on grid* em pequenos comércios e indústrias podem representar uma redução de custos financeiros, impactos ambientais com uma grande relevância.

Os benefícios não se limitam apenas a pequena indústria citada, mas a todas com mesma semelhança de produção na mesma região e mesmos procedimentos, pois pode obter grandes benefícios econômicos, ambientais, financeiros expressivos ao longo dos meses, sendo esta economia uma alternativa para investir em vários setores da economia.

Os resultados trouxeram resposta contundentes ao problema proposto. A energia solar pode ser utilizada como forma de reduzir os custos e impactos com energia fornecida pela concessionária, com altos custos e com maior parte com geração térmica. Destacando que o intuito deste projeto é basicamente zerar o consumo de energia solicitado pela concessionária local, onde ela distribui, em sua grande parte energia térmica. Pois como a energia solar é considerada uma fonte de energia inesgotável, é relevante substituir o grande consumo de diesel pelas uma geração de energia a qual não traga danos ambientais e com custos baixos.

Além da viabilidade financeira, deve-se ressaltar a grande importância da instalação dos sistemas fotovoltaicos quando avaliados sob o foco da redução de impactos ambientais, pois podemos destacar na categoria de energia limpa, os resultados são mais expressivos pelo seu caráter ambiental.

O método utilizado, mostrou-se adequado para o objetivo do estudo: selecionar o processo para aplicação do Estudo de Caso, conceituar a energia solar e suas possibilidades práticas, traçar planos de aplicação do sistema fotovoltaico, o que evidenciou benefícios, vantagens e impactos financeiros alcançados com a implementação de um projeto como o do sistema fotovoltaico para uma pequena indústria de alimentos.

O presente estudo não só representa um marco econômico e energético para uma unidade, mas também representa uma possibilidade de geração de energia sustentável para comunidades ribeirinhas em toda região amazônica.

Após análise de todo o processo, verificou-se a viabilidade do investimento na geração de energia solar com retorno em médio e longo prazo, pois como os custos do equipamento são considerados altos, porém, de acordo com pesquisa de preços em cotação, em três anos e seis meses os equipamentos de energia solar, com a geração de energia programada, ocorrerão o retorno do investimento.

O presente estudo teve com um divisor em caráter econômico, financeiro e ambiental com uma relação energética em pequenas industriais de alimentos. Existindo também uma possibilidade irreversível na geração de energia de médio porte nesta região que passa por tantas dificuldades e a partir dos custos totais do sistema para cada situação, buscou-se precificá-los e determinar o valor pago pelo usuário por cada quilowatt hora utilizado ao final da vida útil do sistema fotovoltaico utilizados.

Diante do exposto, conclui-se que o investimento no padrão de entrada da energia solar é rentável e benéfico a médio e longo prazo. Pois, como o estado do Amazonas possui a segunda maior tarifa de energia elétrica, uma relação sobre o valor da tarifa e custo do equipamento. A tendência deste mercado é a expansão e a redução do preço do material utilizado, assim, as perspectivas financeiras de economia com a conta de energia são muito favoráveis, inclusive para reprodução do projeto atual de forma parcial ou integral em outras localidades com mesmas características.

5.2 - SUGESTÕES

Como recomendações para empreendimentos e pesquisas a serem executadas as quais terão linha de raciocínio relacionadas com este trabalho, relacionamos algumas sugestões:

- Aplicação dessa mesma metodologia para outros tipos de processos. No caso desse projeto ser reproduzido em outras unidades de processos que enfrentem os desafios geográficos e de isolamento da Região Norte;
- Mais benefícios fiscais para equipamentos fotovoltaicos utilizados na geração de energia para clientes da região amazônica;
- Busca por equipamentos com tecnologia mais avançada dos que usamos no período da pesquisa, com preços mais rentáveis baixando assim o custo-

- benefício do equipamento;
- Buscar maior abrangência territorial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-SHARKH, S. *et al.* As microgrids podem contribuir muito para o fornecimento de energia no Reino Unido? **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 10, n. 2, p. 78-127, 2006.

ACKER, R. H.; KAMMEN, D. M. A revolução silenciosa (energia): analisando a disseminação de sistemas de energia fotovoltaica no Quênia. **Política energética**, v. 24, n. 1, p. 81-111, 1996.

AKURU, U. B. *et al.* Rumo a energia 100% renovável na Nigéria. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 71, p. 943-953, 2017.

AVTAR, R. *et al.* Explorando recursos de energia renovável usando sensoriamento remoto e SIG — uma revisão. **Recursos**, v. 8, n. 3, p. 149, 2019.

AZADIAN, F.; RADZI, M. A. M. Abordagem geral para a construção de sistemas fotovoltaicos integrados e suas barreiras de implementação: Uma revisão. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 22, p. 527-538, 2013.

BARBIRATO, G. M. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. UFAL, 2007.

BATOOL, S. *et al.* Benefícios e riscos de ondas eletromagnéticas, telecomunicações, físicas e biomédicas: uma revisão. **Revisão europeia para ciências médicas e farmacológicas**, v. 23, n. 7, p. 3121-3128, 2019.

BHANDARI, B. *et al.* Otimização de sistemas híbridos de energia renovável: Uma revisão. **Revista internacional de engenharia de precisão e tecnologia verde de fabricação**, v. 2, n. 1, p. 99-112, 2015.

BURAGOHAİN, B.; MAHANTA, P.; MOHOLKAR, V. S. Gaseificação de biomassa para geração descentralizada de energia: A perspectiva indiana. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 14, n. 1, p. 73-92, 2010.

CABRAL, R. P.; PINHEIRO, M. C. A.; LEITE, J. C. Photovoltaic Generation System Applied in isolated Communities in the Amazon. **ITEGAM-JETIA**, v. 1, n. 1, p. 19-28, 2015.

CARRASCO, J. M. *et al.* Sistemas de energia eletrônica para a integração da rede de fontes renováveis de energia: Uma pesquisa. **IEEE Transações em eletrônica industrial**, v. 53, n. 4, p. 1002-1016, 2006.

CENGIZ, M. S.; MAMIŞ, M. S. Relação preço-eficiência para sistemas fotovoltaicos em uma base global. **International Journal of Photoenergy**, v. 2015, 2015.

CHIRAS, D. Poder do sol: Alcançar a independência energética. **New Society Publisher**, 2016.

CORRÊA, C. **Química**. (2007). Porto Editora por Marília Peres 2007/2008.

COSENTINO, V. *et al.* Geração renovável inteligente para um sistema insular. Questões técnicas e econômicas de cenários futuros. **Energia**, v. 39, n. 1, p. 196-204, 2012.

DARCOVICH, K.; ENTCHEV, E.; TZSCHEUTSCHLER, P. **Um levantamento internacional de perfis de carga elétrica e DHW para uso na simulação do desempenho de sistemas residenciais de microcoseração**. Anexo do BCE, v. 54, 2014.

DE DOILE, G. N. D. *et al.* Viabilidade Econômica de Microinserções Fotovoltaicas Conectadas à Rede Brasileira de Distribuição em luz das alterações propostas às regulamentações. **Energias**, 2021, 14, 1529. 2021.

DE MARTINO JANNUZZI, G.; DE MELO, C. A. Fotovoltaica conectada à grade no Brasil: políticas e potenciais impactos para 2030. **Energia para o Desenvolvimento Sustentável**, v. 17, n. 1, p. 40-46, 2013.

DEAMBI, S. Energia solar fotovoltaica: uma perspectiva global. **Instituto de Energia e Recursos (TERI)**, 2011.

DINCER, I. Energia renovável e desenvolvimento sustentável: uma revisão crucial. **Revisões de energia renovável e sustentável**, v. 4, n. 2, p. 157-175, 2000.

DOILE, G. N. D. *et al.* Viabilidade Econômica de Microinstalações Fotovoltaicas Conectadas à Rede Brasileira de Distribuição à luz das alterações propostas às regulamentações. **Energias**, v. 14, n. 6, p. 1529, 2021.

DOS SANTOS, A. S.; VAZQUEZ, G. H. Energia Fotovoltaica: Percepção de Estudantes e a Confecção de um Sistema de Iluminação Sustentável. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 8, n. 55, 2020.

EDENHOFER, O. *et al.* (Ed.). **Fontes de energia renovável e mitigação das mudanças climáticas: Relatório especial do painel intergovernamental sobre mudanças climáticas**. Cambridge University Press, 2011.

EFFAT, H. A. Mapeando zonas potenciais de energia solar, utilizando SRTM e análise espacial, aplicação na região do lago nasser. Egito. **International Journal of Sustainable Land Use and Urban Planning**, v. 3, n. 1, 2016.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Recursos de energia renovável: Status atual, perspectivas futuras e sua tecnologia de habilitação. **Revisões de energia renovável e sustentável**, v. 39, p. 748-764, 2014.

FEARNSIDE, P. M. Emissões de gases de efeito estufa dos reservatórios hidrelétricos amazônicos: O exemplo da barragem de Tucuruí do Brasil em comparação com as alternativas de combustíveis fósseis. **Conservação ambiental**, v. 24, n. 1, p. 64-75, 1997.

FIROZJAEI, H. K. *et al.* Sobre o efeito das condições geográficas, topográficas e climáticas na otimização tarifária de alimentação para geração de eletricidade solar fotovoltaica: Um estudo de caso no Irã. **Energia Renovável**, v. 153, p. 430-439, 2020.

FLANDOLI, H. R. *et al.* Uma avaliação das emissões de gases do efeito estufa e de ruídos na produção e geração de bioeletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar. 2014. Fotovoltaicos (PVSC). **IEEE**, 2013. p. 0724-0728.

GENUIS, S. J. Fielding uma ideia atual: explorar o impacto na saúde pública da radiação eletromagnética. **Saúde Pública**, v. 122, n. 2, p. 113-124, 2008.

GIL, G. M. V. *et al.* Energia fotovoltaica na América do Sul: Regulação atual do estado e da rede para sistemas fotovoltaicos em larga escala e distribuídos. **Energia Renovável**, v. 162, p. 1307-1320, 2020.

GOODY, R. M.; YUNG, Y. L. **Radiação atmosférica: base teórica**. Imprensa da Universidade de Oxford, 1995.

GUNEY, M. S. Energia solar e métodos de aplicação. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 57, p. 776-785, 2016.

GÜR, T. M. Revisão das tecnologias, materiais e sistemas de armazenamento de energia elétrica: desafios e perspectivas para o armazenamento em larga escala da rede. **Ciências Energéticas & Ambientais**, v. 11, n. 10, p. 2696-2767, 2018.

HAMADANI, B. H.; CAMPANELLI, M. B. Caracterização fotovoltaica sob condições artificiais de baixa irradiação usando células solares de referência. **IEEE journal of photovoltaics**, v. 10, n. 4, p. 1119-1125, 2020.

HILLER, C. **Uso sustentável de energia em 40 casas. Estudo de mudanças ao longo de um período de dez anos.** Universidade lund, 2003.

HOSSAIN, M. S. *et al.* Papel da rede inteligente em energia renovável: uma visão geral. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 60, p. 1168-1184, 2016.

INMET. **Dados de medições de insolação.** In: Relatório Medições. Brasil: INMET, 2012.

KALOGIROU, S. A. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas.** Academic Press, 2013.

KELLY, N. A. *et al.* Desenvolvimento de uma economia renovável de hidrogênio: Otimização das tecnologias existentes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 3, p. 892-899, 2010.

KHALIGH, A.; ONAR, O. C. **Colheita de energia: sistemas de conversão de energia solar, eólica e oceânica.** Imprensa CRC, 2017.

LE QUÉRÉ, C. *et al.* **Tendências nas fontes e pias de dióxido de carbono.** *Geociências da Natureza*, v. 2, n. 12, p. 831-836, 2009.

LORENZO, E. Energia coletada e entregue por módulos FOTO. **Manual de ciências e engenharia fotovoltaica**, p. 906-930, 2003.

LOSHKAREV, I. Y.; STERKHOV, A. I.; PETROV, K. A. **Solar Concentrator Engineering Design SWx 700-250.** Destaques atlantis em Ciências Materiais e Tecnologia (AHMST), v. 1, n. Agosto 2019, p.

MACÊDO, W. N. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.** Tese (Doutorado em Energia) — Universidade de São Paulo, 2006.

MAKRIDES, G. *et al.* **Desempenho de fotovoltaica em condições reais de funcionamento.** Terceira geração de fotovoltaica, p. 201-232, 2012.

MACKEVIČIUS, J.; TOMAŠEVIČ, V. **Avaliação de projetos de investimento em caso de conflito entre a taxa interna de retorno e os métodos de valor presente líquido.** Ekonomika, v. 89, n. 4, p. 116-130, 2010.

MANYARI, W. V.; DE CARVALHO JR, O. A. Considerações ambientais no planejamento energético para a região amazônica: efeitos a jusante das barragens. **Política Energética**, v. 35, n. 12, p. 6526-6534, 2007.

MARGETA, J.; GLASNOVIC, Z. Configurações teóricas do sistema de energia fotovoltaica-hidrelétrica para produção de energia sustentável. **Energia solar**, v. 86, n. 3, p. 972-982, 2012.

MARTIENSSEN, W.; WARLIMONT, H. (Ed.). **Manual springer de dados de matéria condensada e materiais.** Springer Science & Business Media, 2006.

MEISEN, P.; HAWKINS, S. Potencial de energia renovável da China: fazer a transição da geração a carvão. **Global Energy Network Institute (GENI)**, San Diego, Califórnia, 2009.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** Oficina de textos, 2017.

MORIARTY, P.; HONNERY, D. A energia renovável pode alimentar o futuro? **Política energética**, v. 93, p. 3-7, 2016.

NAJAFI, G. *et al.* Energia solar no Irã: Estado atual e perspectivas. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 49, p. 931-942, 2015.

NELSON, J. R.; GRUBESIC, T. H. O uso de lidar versus sistemas aéreos não tripulados (UAS) para avaliar o potencial de energia solar no telhado. **Cidades e Sociedade Sustentável**, v. 61, p. 102353, 2020.

OCAK, M. *et al.* Utilização de energia, poluição ambiental e fontes de energia renovável na Turquia. **Conversão e Gestão de Energia**, v. 45, n. 6, p. 845-864, 2004.

PALMER, G. Energia solar doméstica fotovoltaica: fornecedora de redução marginal, ou fonte primária de energia de baixa emissão? **Sustentabilidade**, 2013, 5.4: 1406-1442.

PAULESCU, M. *et al.* **Modelagem meteorológica e previsão de operação de sistemas fotovoltaicos**. Springer Science & Business Media, 2012.

PIERREHUMBERT, R. T. Radiação infravermelha e temperatura planetária. **In: AIP Conference Proceedings**. Instituto Americano de Física, 2011. p. 232-244.

PRICE, S. *et al.* **2008 relatório de mercado de tecnologias solares**. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (Estados Unidos), 2010.

RAGHUWANSHI, S. S.; ARYA, R. Potencial de energia renovável na Índia e agenda futura de pesquisa. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 12, n. 5, p. 291-302, 2019.

RAMACHANDRA, T. V.; SHRUTHI, B. V. Mapeamento espacial do potencial de energia renovável. **Revisões de energia renovável e sustentável**, v. 11, n. 7, p. 1460-1480, 2007.

RATURI, A.; SINGH, A.; PRASAD, R. D. Sistemas FOTOVOLTAIS conectados à grade nos Países das Ilhas do Pacífico. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 58, p. 419-428, 2016.

ROBERT, F. C.; SISODIA, G. S.; GOPALAN, S. Uma revisão crítica sobre a utilização do armazenamento e da resposta à demanda para a implementação de microgrids de energia renovável. **Cidades e sociedade sustentáveis**, v. 40, p. 735-745, 2018.

ROGELJ, J. *et al.* **Transformações do sistema de energia para limitar o aquecimento do fim do século para abaixo de 1,5 C**. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 6, p. 519-527, 2015.

ROSAS-FLORES, J. A.; ZENÓN-OLVERA, E.; GÁLVEZ, D. M. Economia potencial de energia em domicílios urbanos e rurais do México com sistemas solares fotovoltaicos utilizando sistema de informações geográficas. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 116, p. 109412, 2019.

RYU, H.; YOON, Hong-Joon; KIM, Sang-Woo. Colheitadeiras híbridas de energia: para a colheita sustentável de energia. **Materiais Avançados**, v. 31, n. 34, p. 1802898, 2019.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Energia solar fotovoltaica: Estrutura conceitual. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 74, p. 590-601, 2017.

SEN, Z. **Fundamentos da energia solar e técnicas de modelagem: atmosfera, meio ambiente, mudanças climáticas e energia renovável**. Springer Science & Business Media, 2008.

SHAHSAVARI, A.; YAZDI, F. T.; YAZDI, H. T. Potencial de energia solar no Irã para mitigação de dióxido de carbono. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2019, 16.1: 50-524.

SHAIKH, F.; JI, Q.; FÃ, Y. O diagnóstico de uma crise de eletricidade e desenvolvimento de energia alternativa no Paquistão. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 52, p. 1172-1185, 2015.

SMIL, V. **Densidade de energia: uma chave para entender fontes de energia e usos**. Imprensa do MIT, 2015.

STRIELKOWSKI, W. Impactos Sociais das Smart Grids: O Futuro das Smart Grids e o Design do Mercado de Energia. **Elsevier**, 2019.

SUBERU, M. Y.; MUSTAFA, M. W.; BASHIR, N. Sistemas de armazenamento de energia para integração do setor de energia renovável e mitigação da intermitência. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 35, p. 499-514, 2014.

SUKAMONGKOL, Y.; CHUNGAIBULPATANA, S.; ONGSAKUL, W. Um modelo de simulação para prever o desempenho de um sistema solar fotovoltaico com cargas de corrente alternadas. **Energia renovável**, v. 27, n. 2, p. 237-258, 2002.

SZABO, S. *et al.* Soluções energéticas na África rural: mapeamento dos custos de eletrificação da geração distribuída de energia solar e diesel versus extensão da rede. **Cartas de Pesquisa Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 034002, 2011.

TAHA, L. G. El-deen; EFFAT, H. A. Estimativa baseada em GIS de potencial energia solar em telhados planos em Maadi, Cairo, usando True Ortho World View Image e

Digital Surface Model. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, v. 4, n. 1, p. 1092-1108, 2015.

TURCHI, C. S.; HEATH, G. A. Modelo de custo da torre de energia de sal derretido para o modelo de orientador de sistema (SAM). **National Renewable Energy Lab.(NREL)**, Golden, CO (Estados Unidos), 2013.

TWIDELL, J.; WEIR, T. **Recursos de energia renovável**. Routledge, 2015.

VEMULA, M. G. *et al.* Classificação de potência de módulos fotovoltaicos por padrão IEC 61853-1 usando um novo método de teste ao ar livre. **In: 2013 IEEE 39ª Conferência de Especialistas**.

VILLALVA, M. G. Energia Solar Fotovoltaica: Guia del usuário. **Saraiva Educação SA**, 1983.

WALD, L. Energia de radiação solar (fundamentos). Enciclopédia do Sistema de Suporte à Vida (EOLSS), **Eolss Publishers**, Oxford, p. 44-99, 2009.

WANG, Q. Políticas eficazes para energia renovável — o exemplo da energia eólica da China — lições para a energia fotovoltaica da China. **Revisões de energia renovável e sustentável**, v. 14, n. 2, p. 702-712, 2010.

WANG, X.; PALAZOGLU, A.; EL-FARRA, N. H. Otimização operacional e resposta à demanda de sistemas híbridos de energia renovável. **Energia Aplicada**, v. 143, p. 324-335, 2015.

WHITAKER, C. M. *et al.* Effects of irradiance and other factors on pv temperature coefficients. **In: 14th Photovoltaic Solar Energy Conference**. USA: IEEE, 1991. p. 608–613.

X.WANG, P.; YAN. L.Y. An engineering design model of multi-cell series-parallel photovoltaic array and MPPT control. **In: Int. Conf. Model. Ident. Control**. Japão: Proceedings of the Conference, 2010. p. 140–144.

YAN, V. **Sistema Solar ligado à grade**. 2018.

YANG, Y.; BLAABJERG, F.; WANG, H. Pásseio de baixa tensão de inversores fotovoltaicos sem transformadores em fase única. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 3, p. 1942-1952, 2013.

ZERRIFFI, H. **Eletrificação rural: estratégias de geração distribuída**. Springer Science & Business Media, 2010.

ZILLES, R. *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Brasil: Oficina de Textos, 2012.