

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

RAPHAEL VICTOR FREITAS DE ARAÚJO



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

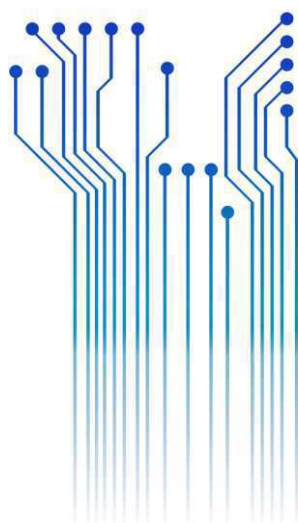
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Sistemas Fotovoltaicos

Zero Grid



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2024

RAPHAEL VICTOR FREITAS DE ARAÚJO

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ZERO *GRID*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel
em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2024

RAPHAEL VICTOR FREITAS DE ARAÚJO

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ZERO *GRID*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel
em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em 09 de outubro de 2024

Professor Jalberth Fernandes, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

RESUMO

O presente relatório tem como propósito uma apresentação e análise de sistemas zero *grid* focando nos casos nos quais o uso destes sistemas é recomendado. Partindo-se dos conceitos básicos de geração distribuída e energia solar serão detalhados os componentes de sistemas fotovoltaicos em suas duas configurações: *on-grid* e *off-grid*. Destacando o que torna os sistemas zero *grid* distintos e fazendo um estudo sobre consumidores reais: residenciais e comerciais. Sendo feito um levantamento sobre os comportamentos das cargas destes consumidores e a partir deste, dimensionando sistemas zero *grid* que atendam suas necessidades. Concluindo-se com uma análise comparativa entre ambos tipos de consumidores e chegando a um perfil de consumo que seja apropriado para o uso destes sistemas.

Palavras-chave: Zero *Grid*, Sistemas Fotovoltaicos, Autoconsumo, Inversão do Fluxo de Potência.

ABSTRACT

This report aims to present and analyze grid zero systems, focusing on cases in which the use of these systems is recommended. Starting from the basic concepts of distributed generation and solar energy, the components of photovoltaic systems in its two configurations: on-grid and off-grid. Highlighting what makes grid zero systems stand out and carrying out a study on real consumers: residential and commercial. An evaluation of the load behaviors of these consumers will be made, and based on the results a grid zero system will be designed meeting those requirements. The conclusion will be focused on deriving a consumption profile that is appropriate for the use of grid-zero systems.

Keywords: Grid Zero, Photovoltaic Systems, On-site Consumption, Reverse Power Flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Infraestrutura de Sistema de Geração Distribuída.....	15
Figura 2 – Irradiação Horizontal Global.....	16
Figura 3 – Matriz Elétrica Brasileira.	17
Figura 4 – Evolução da capacidade instalada de fonte solar fotovoltaica.....	19
Figura 5 – Arquitetura de um sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	20
Figura 6 – Arquitetura de um sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	21
Figura 7 – Curvas típicas I×V e P×V.	22
Figura 8 – Influência da variação de intensidade e temperatura na curva I×V dos módulos.....	23
Figura 9 – Diagrama ilustrando as nomenclaturas utilizadas no setor de energia solar para se referir a um conjunto de módulos fotovoltaicos.....	24
Figura 10 – Possível forma de onda de saída de um inversor C.C-C.A. por modulação de largura de pulso (PWM).....	24
Figura 11 – Sistema FV conectado à rede com controle de exportação de energia (<i>zero grid</i>).....	28
Figura 12 – Sistema FV conectado à rede com controle de exportação de energia (<i>zero grid</i>).....	29
Figura 13 – Sistema FV <i>zero grid</i> instalado no prédio do Ministério da Defesa.	30
Figura 14 – Sistema <i>zero grid</i> híbrido APsystems.	32
Figura 15 – Curva de carga de uma unidade consumidora residencial.....	35
Figura 16 – Valores esperados para a geração do sistema <i>on grid</i> projetado.	37
Figura 17 – Curva de carga durante o período de geração solar (6 h às 18 h).....	37
Figura 18 – Curvas de demanda, geração e consumo para o sistema <i>zero grid</i> residencial.	39
Figura 19 – Curva de carga de uma unidade consumidora comercial.	41
Figura 20 – Valores esperados para a geração do sistema <i>on grid</i> projetado.	42
Figura 21 – Curva de carga durante o período de geração solar (6 h às 18 h).....	43
Figura 22 – Curvas de demanda, geração e consumo para o sistema <i>zero grid</i> comercial.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de bateria para sistemas fotovoltaicos.....	26
Tabela 2 – Levantamento de Carga de uma UC residencial.....	34
Tabela 3 – Levantamento de Carga da residência durante o período de geração solar (6 h às 18 h).....	38
Tabela 4 – Levantamento de Carga de uma UC comercial.	40
Tabela 5 – Levantamento de Carga do comércio durante o período de geração solar.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CBIE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EMUC	Empreendimento de Múltiplas Unidades Consumidoras
GD	Geração Distribuída
HSP	Horas de Sol Pleno
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
INEE	Instituto Nacional de Energia Elétrica
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PCHs	Pequenas Centrais Hidroelétricas
REN	Resolução Normativa
SF	Sistema Fotovoltaico
STC	<i>Standard Testing Conditions</i>
TUSD	Tarifa do Uso do Sistemas de Distribuição
UC	Unidade Consumidora

LISTA DE SÍMBOLOS

C_d	Consumo Médio Diário
C_m	Consumo Médio Mensal
$I_{r_{med}}$	Irradiação Média
I_{sc}	Corrente de Curto Circuito
I_{MP}	Corrente de Máxima Potência
N_{HSP}	Número de horas de sol pleno
P_T	Potência de pico total diária do SF
T_d	Taxa de Desempenho
V_d	Valor Mínimo de disponibilidade
V_{OC}	Tensão de Circuito Aberto
V_{MP}	Tensão de Máxima Potência

SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
1.1	Objetivos.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
1.2	Organização do Relatório.....	12
2	Fundamentação Teórica.....	14
2.1	Geração Distribuída.....	14
2.2	Energia Solar.....	15
2.3	Energia Solar no Brasil.....	16
2.4	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos.....	19
2.4.1	Sistema Fotovoltaico <i>off-grid</i>	19
2.4.2	Sistema Fotovoltaico <i>on-grid</i>	20
2.5	Componentes de um Sistema Fotovoltaico.....	21
2.5.1	Módulos Fotovoltaicos.....	22
2.5.2	Inversores.....	24
2.5.3	Baterias.....	25
2.6	Impactos de Sistemas Fotovoltaicos na Rede Elétrica.....	27
3	Sistemas Zero <i>Grid</i>	28
3.1	Sistemas Zero <i>Grid</i> Híbridos.....	31
3.2	Homologação de Sistemas Zero <i>Grid</i>	32
4	Análises e Discursões.....	34
4.1	Consumidor Residencial.....	34
4.1.1	Dimensionamento do Sistema <i>On-Grid</i>	35
4.1.2	Dimensionamento do Sistema Zero <i>Grid</i>	37
4.2	Consumidor Comercial.....	39
4.2.1	Dimensionamento do Sistema <i>On-Grid</i>	41
4.2.2	Dimensionamento do Sistema Zero <i>Grid</i>	42
5	Conclusão.....	46
6	Sugestões para trabalhos futuros.....	46
	Referências.....	47

1 INTRODUÇÃO

A rápida expansão da demanda energética mundial pressiona os países para realizarem maiores investimentos no crescimento das suas matrizes energéticas de forma a suprir estas imposições. Em paralelo aos investimentos públicos o mercado privado também vem como oportunidade o crescimento energético e por meio do desenvolvimento de novas tecnologias capitalizam este setor.

Neste sentido tem-se uma aceleração no número de sistemas de geração privados voltados tanto para os consumidores residenciais como para as indústrias, essa descentralização da produção de energia dá origem ao fenômeno da geração distribuída. Dentre as mais diversas fontes a compõem, a geração fotovoltaica é sem dúvidas a que mais cresce tanto no Brasil, quanto no mundo, constatação corroborada pelo estudo da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) que concluiu que em 2023 cerca de 73% da expansão do setor de energia renováveis mundial é proveniente da energia solar (TAPIA, 2024).

O mundo apressa-se para reduzir suas emissões de carbono com o objetivo de reduzir os impactos do aquecimento global. Entretanto os sistemas de potência que formam a base dos sistemas elétricos dos países, em muitos casos, não foram projetados para suportar esta mudança de paradigma. Como consequência diversos efeitos podem ser sentidos nos sistemas elétricos de potência.

Um grande problema está relacionado a injeção excessiva de energia elétrica na rede, podendo criar uma inversão do fluxo de potência nestes sistemas. Podendo vir a ocasionar danos as linhas de distribuição geridas pelas concessionárias de energia.

Os sistemas *zero grid* surgem como uma solução para este problema, aplicando estratégias de controle que atuam na geração de forma a controlar a inserção de potência na rede. São sistemas relativamente novos, porém estão despertando interesse em pesquisas sobre as diferentes aplicações destas técnicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

- O principal objetivo do trabalho é apresentar os sistemas zero *grid* versando sobre a sua composição, particularidades e uso.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Introduzir como a expansão dos sistemas fotovoltaicos tem levado a problemas de inversão de fluxo de potência na rede elétrica;
- Abordar como os sistemas zero *grid* surgem como solução para o problema de inversão de fluxo de potência;
- Traçar perfis de consumo para consumidores residenciais e comerciais;
- Analisar quais perfis de consumo se enquadram para a utilização de sistemas zero *grid*.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O trabalho está estruturado em 5 capítulos, incluindo este introdutório, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 1 foi apresentada uma breve introdução, os objetivos do trabalho e uma descrição da estrutura de organização do relatório.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica sobre os principais temas relacionados aos sistemas zero *grid*, como os aspectos teóricos sobre sistemas fotovoltaicos, seus componentes e alguns aspectos normativos que baseiam o entendimento deste trabalho.

No Capítulo 3, aprofunda-se sobre o tema central do trabalho: sistemas zero *grid*. Abordando seus componentes, estruturação, variações e normativas pertinentes ao tópico.

No Capítulo 4, serão apresentadas análises sobre diferentes tipos de consumidores, explorando seus hábitos de consumo e avaliando a viabilidade técnica da utilização de sistemas zero *grid* para estes perfis.

No Capítulo 5 é apresentada a conclusão versando sobre a viabilidade e importância do uso de sistemas zero *grid* no contexto dos problemas que estes podem solucionar

Finalmente, no Capítulo 6 são dadas sugestões para trabalhos futuros sobre o tema de forma a dar continuidade ao trabalho realizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De acordo com o Instituto Nacional de Energia Elétrica (INEE, 2024) a Geração Distribuída (GD) é caracterizada pela proximidade da geração de energia aos consumidores finais desta, independente da potência, tecnologia ou fonte de energia. Dessa forma tem-se uma justaposição com o modelo convencional centralizado da geração, onde grandes usinas geradoras em locais distantes dos consumidores são responsáveis pelo fornecimento de energia.

Entretanto é necessário voltar no tempo e nos atentarmos que nem sempre este modelo foi regra, nos primórdios do uso da energia elétrica no século XX tinham-se usinas geradoras próximas as cargas de forma a suprir a demanda local, sendo assim comum que indústrias possuíssem geradores locais, visto que a carga era consideravelmente menor considerando os parâmetros atuais.

Com os avanços tecnológicos que levaram a melhorias técnicas nos transformadores e nas linhas de transmissão e que geradores fossem mais eficientes fez-se possível a mudança desse paradigma (SANTOS e SANTOS, 2008). De forma que ficou cada vez mais viável a implementação das grandes usinas em locais convenientes para a geração e, em sua grande maioria, distantes dos centros urbanos.

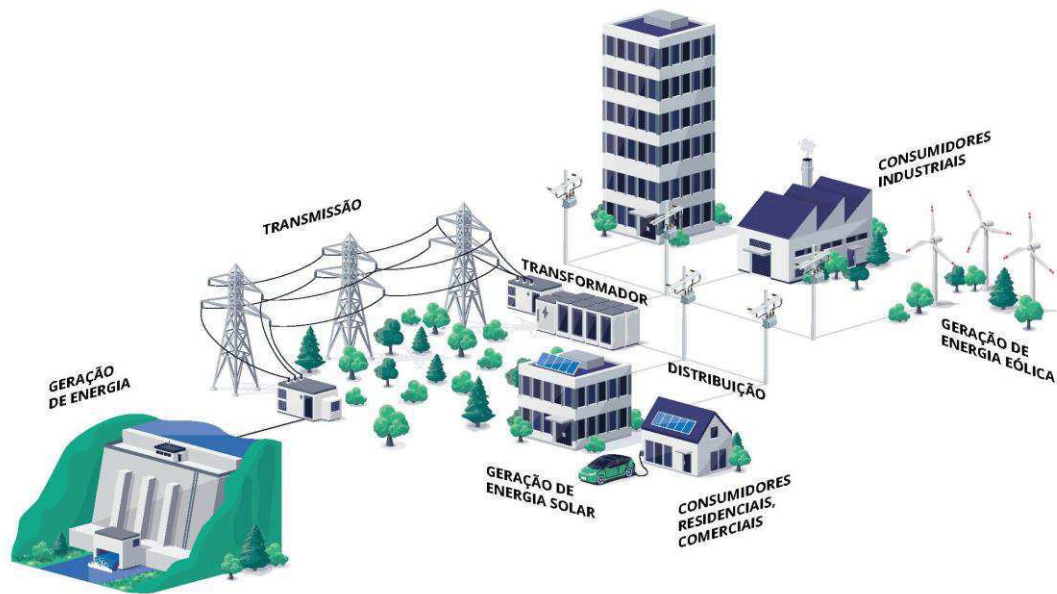
Nessa configuração centralizada o estado assume papel protagonista na expansão da capacidade geradora das nações, visto que estas grandes usinas exigem um aporte de capital considerável para serem instauradas.

O crescimento exponencial da demanda mundial de energia tem sido visto como um obstáculo para o sistema centralizado, visto que a velocidade do crescimento da demanda coloca em xeque a velocidade em que é possível planejar e executar obras com o objetivo de aumentar a capacidade de geração.

Esse desafio associado ao crescente clamor por fontes alternativas de energia, juntamente com o barateamento dos custos para a instalação de pequenas unidades geradoras, criou um ambiente propício para um renascimento da geração distribuída. Inicialmente com pequenas centrais hidroelétricas (PCHs) ou pequenos geradores movidos à combustão, evoluindo para geradores eólicos e a utilização da energia fotovoltaica.

Tem-se então o contexto atual dos sistemas elétricos atuais onde a geração centralizada existe concomitantemente com a geração distribuída, elevando o nível de complexidade da rede, exemplificado pelo sistema mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Infraestrutura de Sistema de Geração Distribuída.



Fonte: Centro Brasileiro de Infraestrutura - CBIE, 2024.

2.2 ENERGIA SOLAR

O Sol é visto como uma fonte de energia inesgotável, em escala humana, e não poluente. Sabendo-se que a energia solar total que incide na superfície terrestre é mais do que o suficiente para suprir as necessidades energéticas mundiais (CRESESB, 2006), entretanto é necessário saber usufruir dessa energia.

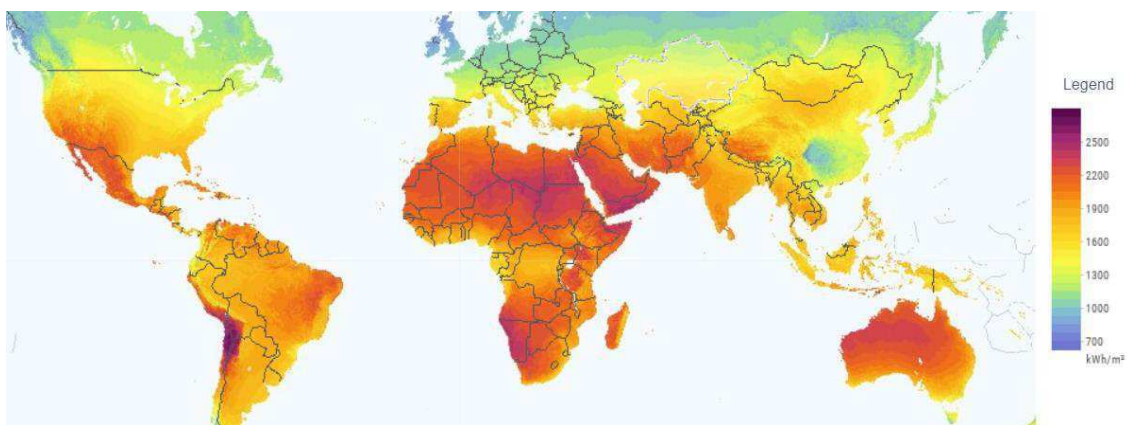
Desde a antiguidade o ser humano tem aproveitado a energia solar térmica para aquecimento, entretanto com o advento da modernidade e a descoberta do efeito fotovoltaico foi possível converter a energia solar diretamente energia elétrica, abrindo assim uma nova era no aproveitamento da energia solar.

Inicialmente inviáveis economicamente, devido ao alto custo, os sistemas de geração de energia elétrica solar têm se tornado cada vez mais competitivos devido aos avanços

tecnológicos que vem tornando o custo de produção dos componentes dos sistemas cada vez menor.

O Brasil possui um papel de destaque na geração de energia solar, devido à alta incidência de irradiação solar sobre o território nacional exemplificada nos altos níveis de irradiação solar mostrados na Figura 2. Entretanto o principal fator que desperta interesse nesse setor são os incentivos fiscais e as linhas de crédito que são disponibilizadas aos interessados.

Figura 2 – Irradiação Horizontal Global.



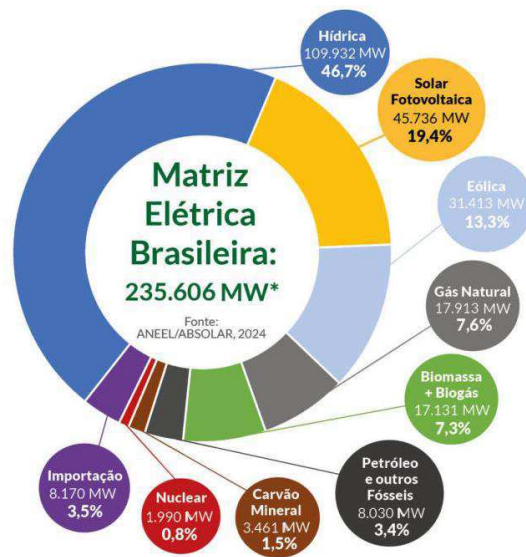
Fonte: THE WORLD BANK GROUP, 2019.

Como o Brasil sofre uma crise hídrica já há alguns anos é de extremo interesse governamental que haja a proliferação de outras fontes de energia no país (IEMA, 2021), visto que nos períodos de estiagem é necessário o acionamento de usinas termoeletricas o que acaba elevando as taxas de energia para a população. Desta forma, é cada vez mais atrativo para o consumidor investir em sistemas fotovoltaicos para amenizar o gasto com energia elétrica.

2.3 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

A presença da energia solar na matriz energética brasileira está em crescimento e já é a segunda maior fonte geradora de energia elétrica, perdendo apenas para as hidroelétricas (PORTAL SOLAR, 2024). Sendo responsável por 19,4% da capacidade instalada, correspondendo a 45,7 GW, como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Matriz Elétrica Brasileira.



Fonte: ABSOLAR, 2024.

Apesar de ser tão dominante na matriz brasileira sua expansão começou somente em 2012 quando a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) promulgou a Resolução Normativa N° 482/2012 (REN 482/2012) regulamentando no território brasileiro a geração distribuída.

A REN 482/2012 obriga as concessionárias de energia elétrica a criarem meios para que seus clientes possam gerar a sua própria energia, incluindo um sistema que os bonifique por essa geração. É criado então o sistema de compensação, onde a energia injetada na rede pelo consumidor é transformada em créditos de energia que podem ser utilizados para reduzir os valores das contas de energia, tornando a geração fotovoltaica um investimento atrativo.

Em 2015 é lançada a Resolução Normativa N° 687/2015 (REN 687/2015) visando ampliar as oportunidades no setor de geração distribuída. Vários conceitos definidos na REN 482/2012 são atualizados e novos são introduzidos, merecendo destaque os seguintes pontos:

- **Microgeração:** o valor limite de potência da microgeração é reduzido de 100 kW, para 75 kW. Entretanto é expandido para todas as fontes de energia renováveis e cogeração qualificada.
- **Minigeração:** os limites passam de 100 kW até 1 MW, para de 75 kW até 5 MW, também ampliando para todas as fontes de energia renovável.
- **Autoconsumo Remoto:** permite que unidades consumidoras que estejam sobre o mesmo nome, ou pessoa jurídica, participem do sistema de compensação. Os créditos excedentes da unidade principal são redistribuídos seguindo porcentagens estabelecidas pelo consumidor.

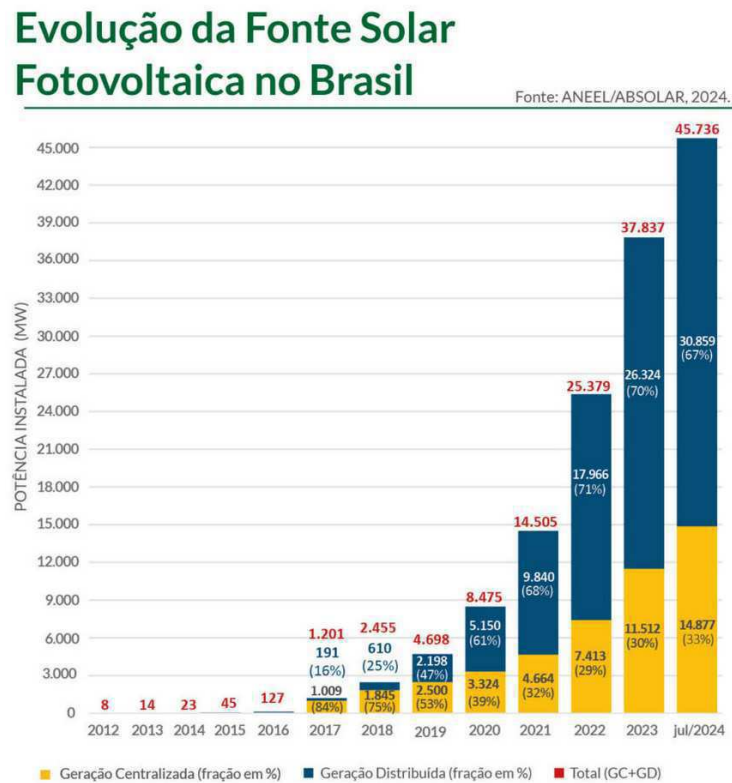
- **Geração Compartilhada:** permite aos consumidores a possibilidades de se unir em cooperativas ou consórcios e estabelecer uma unidade consumidora geradora cuja a energia excedente será compensada nas faturas dos membros de acordo com porcentagens estabelecidas pela associação.
- **Empreendimento de Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC):** permite que moradores de condomínios verticais, ou horizontais, se unam e estabeleçam a unidade de uso comum como sendo geradora. Nela será instalada a geração distribuída e o excedente será compensado de forma preestabelecida entre os condôminos.
- **Validade dos Créditos:** os créditos de energia passam a ter sua validade estendida de 36 meses para 60 meses

Em 2022 por meio da Lei 14.300 foi instituído o chamado Marco Legal da Geração Distribuída, visando estabelecer estabilidade jurídica para o setor de energia solar, que temia mudanças repentinas vinda da ANEEL. Entidade esta que em 2019 propôs mudanças a REN 482, visando alterar o sistema de compensação, prevendo o fim da paridade tarifária e sugerindo que a compensação fosse feita apenas em cima de um percentual dos créditos gerados (PORTAL SOLAR, 2024).

Foi então decidido que estas alterações deveriam partir do congresso nacional e começou a tramitação de um projeto de lei, que em 2022 viria a se tornar a Lei 14.300. A grande mudança para o setor foi o acréscimo de uma componente tarifária à Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), chamada de fio B. Reivindicação das distribuidoras de energia para os consumidores fossem cobrados por ocupar as redes de redistribuição ao injetar potência nelas (MARQUES, 2022). Clientes com sistemas já instalados gozariam de direito adquirido até 2045, e novas instalações após a lei contariam com uma regra de transição dependendo do tempo desde a promulgação da lei.

Essa taxação tem sim um impacto na viabilidade financeira dos projetos, entretanto está longe de inviabilizar a maioria dos projetos. Fato comprovado pela continuação na tendência de crescimento exponencial de novas instalações no Brasil, mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Evolução da capacidade instalada de fonte solar fotovoltaica.



Fonte: ABSOLAR, 2024.

2.4 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos utilizados e regulamentados no país: sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas conectados à rede (*on-grid*).

2.4.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO *OFF-GRID*

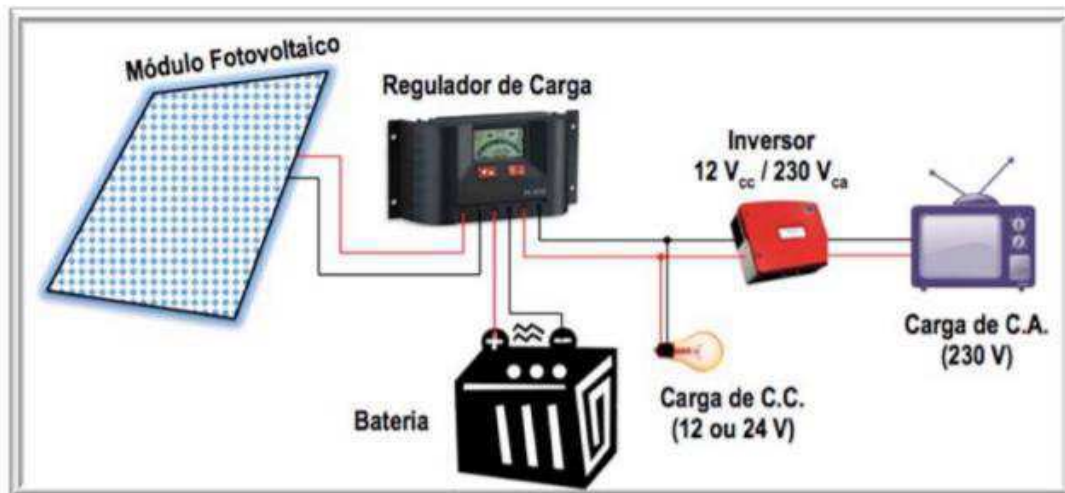
Sistemas fotovoltaicos *off-grid* são sistemas nos quais, por escolha, ou por razões técnicas o consumidor não está conectado à rede de distribuição de uma concessionária.

Nestes sistemas a demanda do consumidor é suprida de forma totalmente independente da rede. Entretanto, para que isso seja possível se faz necessário o uso de um sistema de armazenamento de energia, visto que a produção de energia depende da irradiação solar, sendo esta ínfima no período noturno.

Desta forma é necessário na arquitetura de sistemas *off-grid* o uso de bancos de baterias que realizam o armazenamento da energia gerada durante o dia e servem como fonte de energia no período noturno. É fundamental também a utilização de um controlador de

carga que será responsável por comandar os diferentes fluxos de energia no sistema, atuando para garantir que o processo de carga e descarga do banco de baterias ocorra de forma segura, não comprometendo a útil das mesmas. Todo o esquema de ligação destes componentes é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Arquitetura de um sistema fotovoltaico *off-grid*.



Fonte: CARNEIRO, 2009.

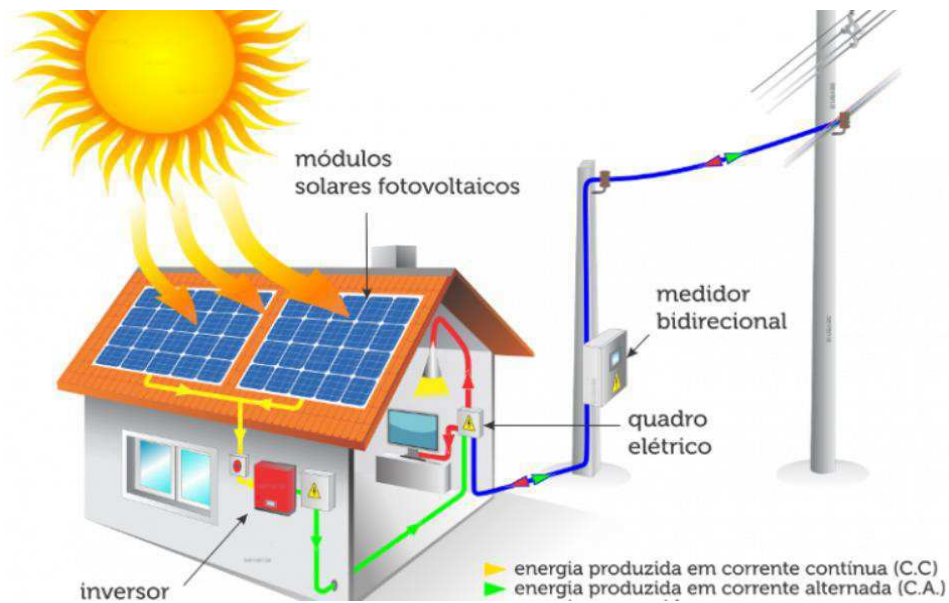
É um sistema com um custo elevado, visto que as baterias do sistema além de terem um alto custo, possuem vidas úteis, relativamente, baixas, em torno de 3 a 5 anos. Tornando-se economicamente inviável na grande maioria dos casos. Sendo utilizada, na grande maioria das vezes, em regiões remotas onde a ligação com a rede da concessionária não é possível.

2.4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO *ON-GRID*

Nos sistemas fotovoltaicos *on-grid* o consumidor está conectado com a rede elétrica da concessionária, eliminando assim a necessidade de um sistema armazenador de energia. Visto que nos momentos que a geração solar não é suficiente para cobrir a demanda, a concessionária irá suprir esse déficit.

Estes sistemas compartilham os componentes básicos dos sistemas *off-grid*: painéis fotovoltaicos e inversor. Entretanto um componente essencial nestes sistemas é medidor bidirecional, o qual é capaz de medir a energia injetada na rede pelo sistema de geração, nos momentos de alta produção, e a energia fornecida pela concessionária, nos momentos de baixa produção. O esquema de conexão entre estes componentes é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Arquitetura de um sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: SEBRAE, 2021.

Tem-se assim que durante os períodos no qual a produção é maior que consumo o excesso é injetado direto na rede e graças a medição bidirecional é possível quantificar e realizar um acúmulo de créditos junto a concessionária de energia.

Esse é o sistema mais utilizado atualmente, visto que a desobrigação do uso de baterias reduz consideravelmente o preço. E a necessidade de conexão com a rede da concessionária não é algo proibitivo, visto que na grande maioria dos casos os clientes que procuram instalar um sistema fotovoltaico, já estão recebendo energia de alguma concessionária.

2.5 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

As células fotovoltaicas não são a única parte de um sistema fotovoltaico, para que a energia produzida seja de fato aproveitada pelo consumidor é necessário componentes que convertem a energia gerada em algo utilizável e componentes para a proteção do sistema com incidentes.

Os componentes essenciais de um sistema fotovoltaicos são:

1. Módulos Fotovoltaicos;
2. Inversores;
3. Baterias.

Outros componentes também podem ser utilizados, porém estes são os essenciais, podendo ser utilizados em ambos sistemas *on-grid* e *off-grid*.

2.5.1 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

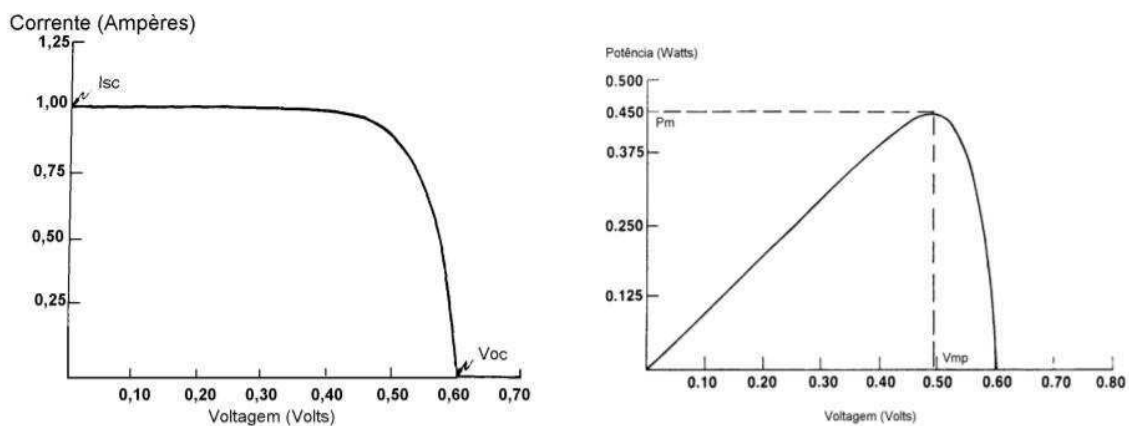
Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como placas fotovoltaicas, são associações de células fotovoltaicas de forma a se conseguir um valor de potência relevante para utilização (BLUESOL, 2016). As células individuais são sensíveis e necessitam de proteção, logo os módulos possuem uma estrutura rígida de vidro responsável pela sua proteção mecânica.

Existem diversos modelos no mercado, variando de acordo com a potência do módulo, tecnologia e material utilizados na construção das placas. Os módulos mais comumente encontrados são feitos à base de silício dopado, podendo estes serem mono ou policristalinos.

De acordo com Peruzzo (2021), os módulos policristalinos são comumente mais utilizados por possuírem preços mais baixos, entretanto são menos eficientes, logo necessitam de uma área maior para a geração. Já os monocristalinos devido a sua estrutura molecular performam melhor em condições de luminosidade reduzida, ou incidência de sombras, mas possuem um processo de fabricação mais complexo e oneroso, o que torna sua fabricação mais difícil o que é refletido em seu preço mais elevado.

Uma característica importante dos módulos fotovoltaicos são suas curvas $I \times V$ e $P \times V$, como as mostradas na Figura 7, nelas é possível prever como este se comportará para diferentes intensidades de irradiação solar.

Figura 7 – Curvas típicas $I \times V$ e $P \times V$.



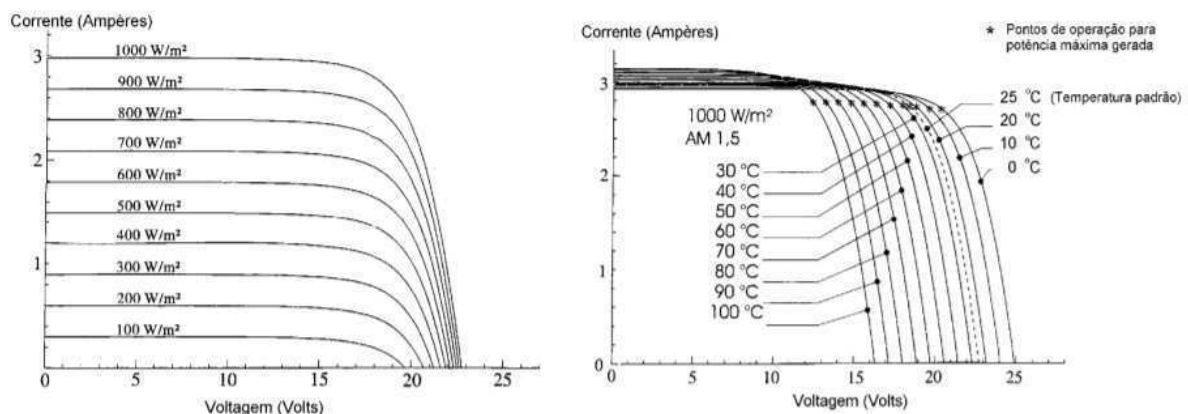
Fonte: CRESESB, 2006.

Essas curvas são levantadas em laboratório sob condições controladas e com elas é possível determinar os principais parâmetros do módulo, segundo VILLALVA (2019), sendo eles:

1. Corrente de Curto Circuito (I_{SC}) – Máxima corrente fornecida pelo módulo quando os terminais se encontram em curto circuito;
2. Tensão de Circuito Aberto (V_{OC}) – Máxima tensão fornecida pelo módulo quando há ausência de carga;
3. Corrente de Máxima Potência (I_{MP}) – Corrente produzida pelo módulo no ponto de máxima potência;
4. Tensão de Máxima Potência (V_{MP}) – Tensão na qual o módulo opera no ponto de máxima potência;
5. Máxima Potência ou Potência de Pico (P_{MAX}) – Maior potência que pode ser extraída do módulo, sob determinada condição.

O ponto de máxima potência é o ponto máxima da curva P-V e possui um valor diferente para diferentes níveis de irradiação solar, sendo sensível também a mudanças de temperatura, como é mostrado na Figura 8. Os valores nominais dos módulos vendidos comercialmente são para as condições STC (*Standard Testing Conditions*), onde a irradiância é de 1000 W/m e sob uma temperatura de 25 °C.

Figura 8 – Influência da variação de intensidade e temperatura na curva I×V dos módulos.

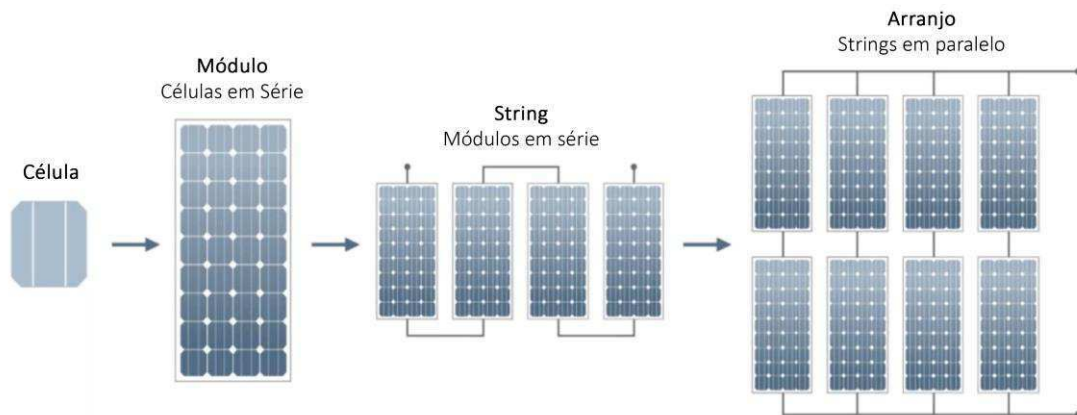


Fonte: CRESESB, 2006.

Em situações práticas dificilmente essas condições poderão ser replicadas, desta forma os painéis instalados operam com valores de potência menores que os nominais publicizados pelos fabricantes.

É importante atentar para as nomenclaturas utilizadas no setor de energia solar para se referir a associações de módulos. Como já foi dito um conjunto de células fotovoltaicas formam o módulo fotovoltaico; módulos fotovoltaicos associados em série são chamados de *strings*; o conjunto total de strings em um projeto é denominado arranjo fotovoltaico, na Figura 9 são ilustrados estes conceitos.

Figura 9 – Diagrama ilustrando as nomenclaturas utilizadas no setor de energia solar para se referir a um conjunto de módulos fotovoltaicos.

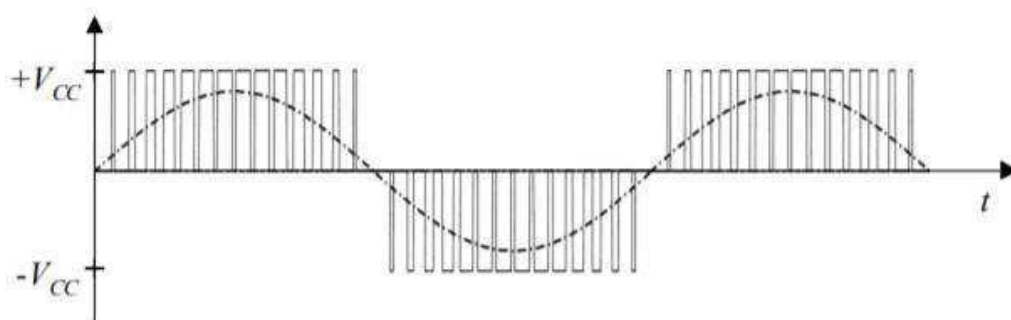


Fonte: MASCARELLO, 2017.

2.5.2 INVERSORES

Como os módulos fotovoltaicos produzem corrente contínua é necessário um dispositivo que realize a conversão desta em corrente alternada para ser de fato utilizada. Esse dispositivo é o inversor, que por meio de circuitos de eletrônica de potência realizam chaveamentos da entrada de forma a produzirem uma saída mais próxima possível de uma onda senoidal, um exemplo é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Possível forma de onda de saída de um inversor C.C-C.A. por modulação de largura de pulso (PWM).



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

Os inversores modernos também possuem uma importante funcionalidade denominada Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*). O MPPT observa constantemente as modificações na curva I-V e atua na eletrônica do inversor de modo a mantê-lo na tensão correspondente a de máxima potência, maximizando a transferência de potência e reduzindo as perdas (PINHO; GALDINO, 2014).

Em sistemas conectados à rede o inversor também é responsável pela sincronização do sinal gerado, com o sinal da concessionária, garantindo assim que não haverá interferência com o sinal da rede.

As características elétricas do inversor utilizado servem como condições de contorno na hora de definir o arranjo fotovoltaico que será utilizado. O inversor possui um valor máximo de potência de entrada que limita o número total de módulos fotovoltaicos que podem ser empregados no arranjo; um valor máximo de tensão por entrada, que delimita o número máximo de módulos fotovoltaicos que podem ser colocados na string e um valor de corrente máxima que limita o número de strings em paralelo por entrada.

2.5.3 BATERIAS

Nos sistemas fotovoltaicos as baterias são utilizadas para armazenar a energia gerada e que não é consumida imediatamente pela carga. Em sistemas *off-grid* são componentes essenciais sem os quais os sistemas não funcionariam, dada a característica intermitente da geração solar é necessário armazenar energia para a utilização desta em períodos onde a geração é insuficiente, ou inexistente.

Baterias podem também ser utilizadas em sistemas *on-grid*, nestes casos tem-se que estas servirão para diminuir a dependência da rede. Uma vez que mesmo que haja falta de fornecimento de energia pela rede é possível suprir a demanda da carga com a energia armazenada. São utilizados em casos em que existem cargas críticas que não devem ter ser fornecimento de energia cortado.

Em sistemas fotovoltaicos é preferencial a utilização baterias estacionárias visto que esta foram desenvolvidas para suportar diversos ciclos de uso, sendo então compatíveis com a característica de carga e descarga diária nos sistemas fotovoltaicos.

Quanto a tecnologia disponível no mercado existem 3 grandes tipos utilizados: chumbo-ácido, níquel-cádmio e íons de lítio. Dentre estas é necessário atentar para três características importantes: eficiência, capacidade e profundidade de descarga.

Baterias de chumbo-ácido são as mais antigas e utilizadas no mundo tendo como base a reação entre o dióxido de chumbo e ácido sulfúrico. Tem como principal vantagem ser uma tecnologia madura com um custo reduzido quando compara com as demais, entretanto possui uma densidade energética baixa, baixa profundidade de carga e um número mais limitado de ciclos de carga (OLIVEIRA, 2021).

As baterias de níquel-cádmio apresentam uma estrutura física semelhante às de chumbo-ácido, com um cátodo de hidróxido de níquel e um ânodo de óxido de cádmio e hidróxido de potássio como eletrólito. Possuem uma maior resiliência quanto a ciclos de carga e descarga, entretanto possuem um custo mais elevado e sua composição de materiais tóxicos torna o seu descarte e possível acidentes no manejo mais prejudiciais a saúde humana (FREITAS, 2008).

As baterias de íons de lítio possuem grande destaque no setor por terem uma elevada eficiência e densidade energética, bem como um grande número de ciclos de carga e descarga, tornando então a que apresenta melhor performance no mercado (OLIVEIRA, 2021). A sua grande desvantagem se encontra no preço que chegou a ser de 1.400 dólares/kWh em 2010. Entretanto de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) o grande investimento mundial no setor de carros elétricos que utilizam este tipo de bateria, tem tido impactos positivos em relação ao preço que atualmente pode chegar a ser menor que 140 dólares/kWh no mercado internacional (CASARIN, 2024).

Feita uma busca dos modelos disponíveis no mercado selecionou-se os mais populares e estes são mostrados na Tabela 1, nela é possível perceber os modelos que dominam o mercado são de lítio e chumbo-ácido. Sendo que as baterias de lítio divulgam ter uma resistência maior a ciclos de carga e descarga, em uma média de 4 vezes mais. Entretanto percebe-se que os valores destas ainda são expressivamente maiores que as de chumbo-ácido.

Tabela 1 – Modelos de bateria para sistemas fotovoltaicos.

Tecnologia	Modelo	Capacidade (Ah)	Nº de Ciclos	Valor (R\$)
Lítio	ZTROON ZTS48105P	105	6000	7.899,00 ¹
Lítio	Unipower UPLFP48	100	6000	8.060,00 ¹
Lítio	Moura 48MLS100	100	6000	10.440,00 ²
Chumbo-Ácido	Freedom DF2000	115	1500	1000,00 ¹
Chumbo-Ácido	Unipower UPMF12105	105	1500	601,00 ²
Chumbo-Ácido	Moura	111	1500	774,00 ²

Fonte: ¹ NeoSolar e ² Minha Casa Solar, 2024.

2.6 IMPACTOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NA REDE ELÉTRICA

Visto que a grande maioria dos sistemas fotovoltaicos está conectada à rede é necessária uma avaliação sobre os impactos que decorrem desta configuração. Neste sentido é possível realizar uma abordagem por vários ângulos: impactos econômicos, sociais e técnicos. Este trabalho objetiva-se em focar na análise dos aspectos técnicos.

Sendo assim, sabendo-se que os sistemas elétricos foram concebidos sob uma ótica em que o fluxo de energia deveria fluir dos grandes geradores, passando pelo sistema de transmissão e distribuição, chegando então ao consumidor final onde é aproveitada.

A inserção de vários pontos de geração fotovoltaica próximos aos consumidores pode vir a alterar características da rede como: fluxo de potência, níveis de tensão, frequência, inserção de harmônicos e até mesmo alterar a confiabilidade da rede, devido a sua característica estocástica.

Desses problemas o que mais tem impactado o sistema elétrico brasileiro é a questão da inversão do fluxo de potência. Começando em meados de 2022, várias concessionárias de energia, em diferentes estados, começaram a recusar novas instalações de sistemas fotovoltaicos em centros urbanos alegando que estes causariam inversão no fluxo de potência (ARAÚJO, 2023).

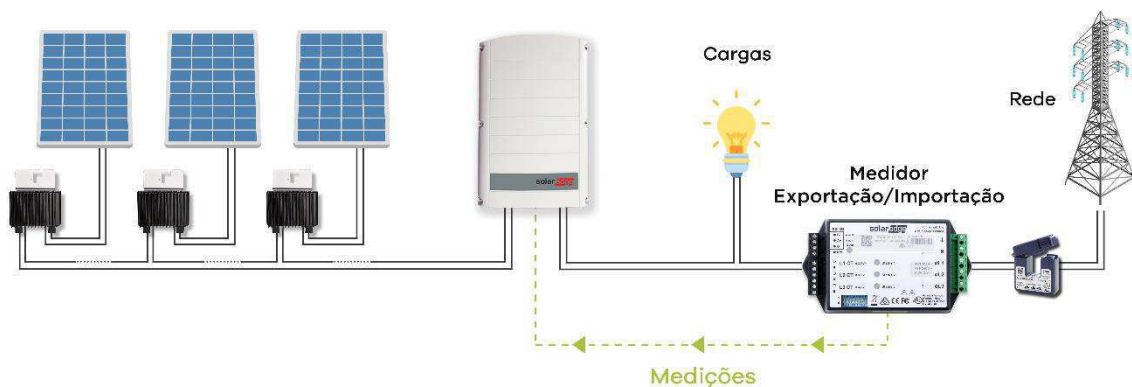
É neste contexto que os chamados sistemas *Zero Grid* estão ganhando espaço, uma vez que apesar de estarem conectados a rede de distribuição prometem um controle sobre a potência injetada nesta.

3 SISTEMAS ZERO GRID

Os sistemas zero *grid* são uma novidade no setor das energias renováveis, e nada mais são que sistemas conectados à rede (*on-grid*) que por meio de uma malha de controle atuam no inversor de forma a controlar a potência gerada pelo sistema. Sendo assim possível zerar a potência injetada na rede. Tem-se então que o principal objetivo desses sistemas é suprir a demanda local no momento que ela é requisitada, também chamado de autoconsumo.

Esses sistemas utilizam inversores capazes de controlar a potência de geração e que possam se comunicar com instrumentos de medição, os quais são encarregados de avaliar constantemente o consumo da carga. A partir da Figura 11 é possível entender a dinâmica entre os componentes de um sistema zero *grid*, o medidor é colocado entre a rede e a carga, monitorando o consumo, esses dados são enviados para o inversor. Inversor este que deve ser capaz de atuar para igualar a geração ao consumo medido.

Figura 11 – Sistema FV conectado à rede com controle de exportação de energia (zero *grid*).



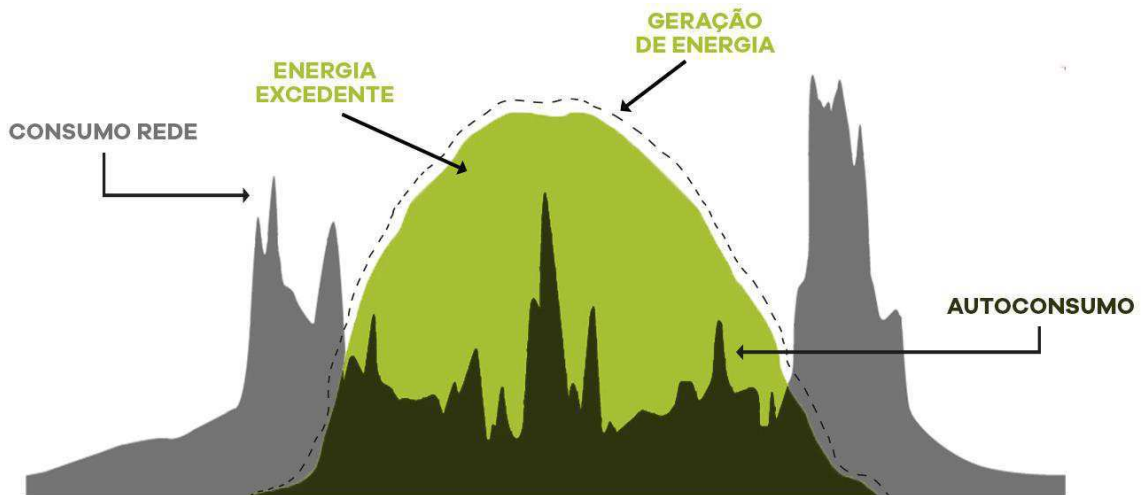
Fonte: SOUZA, 2022.

Para melhor exemplificar o funcionamento dos sistemas zero *grid* observa-se a Figura 12, nela são mostradas curvas referentes ao consumo e geração de um sistema que utiliza a estratégia de controle zero *grid*. Identificam-se 4 regiões, sendo:

1. Curva Pontilhada: Representa o potencial de geração de energia do sistema instalado;
2. Área Verde Escuro: Representa o autoconsumo, ou seja, toda a demanda que é instantaneamente suprida pela geração fotovoltaica;

3. Área Cinza: Representa o consumo suprido pela rede de distribuição, dado que ele ocorre em um momento onde a geração é nula ou insuficiente;
4. Área Verde Claro: Representa a energia excedente, a qual em um sistema sem capacidade de armazenamento de energia será desperdiçada, visto que o sistema não irá injeta-la na rede.

Figura 12 – Sistema FV conectado à rede com controle de exportação de energia (zero *grid*).



Fonte: SOUZA, 2022.

A priori pode-se pensar que o sistema não parece ser útil para o consumidor, visto que o grande atrativo para os investidores em energia solar é a possibilidade do acúmulo de créditos junto à concessionária, créditos estes que são utilizados para cobrir o consumo durante o período de não geração.

Entretanto este sistema de controle é fundamental para que projetos inviáveis por questões técnicas e/ou financeiras possam ser realizados, podendo-se destacar os seguintes casos:

- **Projetos negados devido à inversão de potência:** Como descrito na seção anterior projetos são negados pelas concessionárias sob a justificativa de inversão de fator de potência e estes são os que mais se beneficiam dessa estratégia de controle. Visto que dado que não há injeção de potência no sistema de distribuição não se tem nenhum empecilho técnico para a implementação desses empreendimentos, direto assegurado pela REN 1098/2024 que textualmente dispensa a análise de inversão de potência para sistemas que não injetam na rede de distribuição;

- **Projetos em locais cuja rede de distribuição não suporta injeção de potência:** Existem sistemas de distribuição nos quais os dispositivos de controle e proteção da rede não aceitam de forma alguma qualquer injeção de potência na rede. É o caso das redes reticuladas, presentes no Brasil em alguns centros urbanos que requerem uma alta confiabilidade no serviço de energia. Sendo particularmente prejudicial em redes reticuladas exclusivas (*spot network*) presente na capital do país: Brasília (SOUZA, 2022). Um exemplo de instalação viabilizada por um sistema zero *grid* é a usina instalada no prédio do Ministério da Defesa, vista na Figura 13;

Figura 13 – Sistema FV zero *grid* instalado no prédio do Ministério da Defesa.



Fonte: ECORI, 2022.

- **Consumidores que operam no Mercado Livre de Energia:** O sistema de compensação de energia por meio de créditos não está disponível para consumidores do mercado livre de energia, logo para este setor realizar o aproveitamento da energia excedente é necessário o enquadramento na categoria de autoprodutor. Entretanto nem sempre esses projetos são viáveis economicamente, dada as taxas que são impostas sob a energia injetada. Os sistemas zero *grid* podem viabilizar projetos para estes consumidores focando somente no autoconsumo, sem qualquer injeção na rede (MAGALHÕES, 2024)

- **Projetos de aumento de carga que seriam inviáveis devido aos altos custos em obras:** Não é incomum encontrar consumidores que tenham uma necessidade de aumentar a sua carga instalada, porém encontram como barreira os altos investimentos necessários para realizar obras de rede/ampliação para se adequar as exigências das concessionárias. Em alguns casos estes custos podem ser proibitivos para o seguimento do projeto. É possível que um sistema zero *grid* seja a solução, entretanto é necessário um estudo minucioso da curva de carga do empreendimento garantindo que em hipótese alguma haverá uma demanda que não possa ser atendida (MAGALHÕES, 2024).

Dado as diferentes situações mostradas é possível perceber que os sistemas zero *grid* possuem uma grande flexibilidade quanto a sua aplicação. Entretanto a principal desvantagem deste é o não aproveitamento da energia gerada que não é consumida pela carga, uma possível solução seria a utilização de bancos de bateria para armazenar este excesso.

3.1 SISTEMAS ZERO *GRID* HÍBRIDOS

Uma estratégia para aproveitar a energia excedente em um sistema zero *grid* é a utilização de um banco de baterias, de forma que nos momentos em que a produção excede a demanda é possível realizar o carregamento das baterias. Para que em um momento onde a geração é nula seja possível utilizar essa energia armazenada, aumentando assim a eficiência do sistema.

Um outro fator positivo dessa configuração é a diminuição, podendo chegar a zero, do uso da energia da concessionária. Em um caso extremo seria possível reduzir o gasto com a conta de luz para somente a taxa de utilização relacionada ao tipo de ligação de energia (mono, bi ou trifásica).

Haveria então uma geração livre de qualquer taxa governamental, visto que não há utilização da rede, logo não é possível que a concessionária realize a medição desta geração. Devido a este sonho este tipo de sistema foi visto como uma resposta para o Marco Legal da Geração Distribuída, que instituiu taxas sobre a injeção de potência na rede para os sistemas fotovoltaicos. Entretanto na realidade os custos associados a instalação de banco de baterias ainda são proibitivos, o que limita uma adoção mais generalizada destes sistemas.

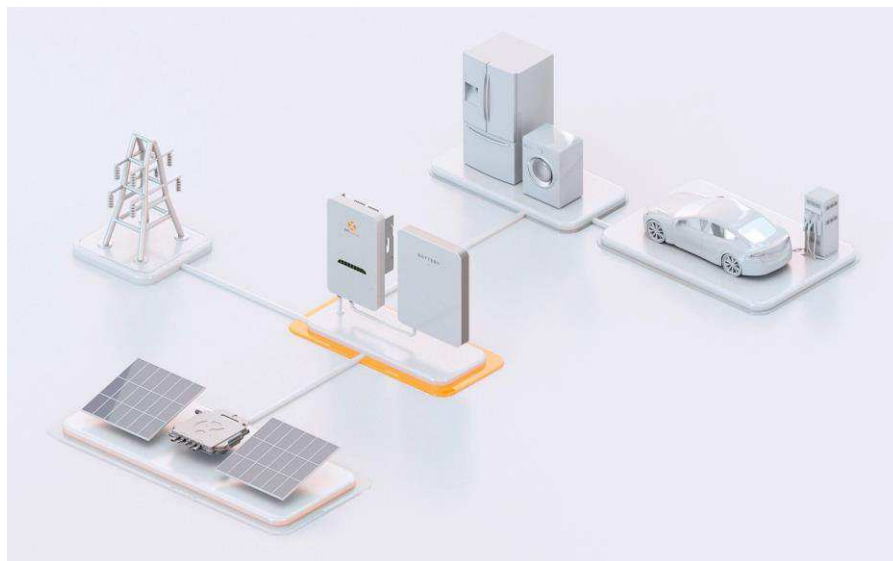
Da mesma forma que em sistemas *off-grid* é necessária a utilização de um controlador de cargas, o qual irá gerenciar o processo de carga e descarga das baterias, os sistemas

híbridos também devem dispor destes dispositivos, um possível esquema de ligação de um sistema zero *grid* híbrido é visto na Figura 14, solução proposta pela empresa APsystems.

Nestes sistemas os controladores costumam possuir uma robustez maior nas suas funções, sendo possível definir horários para a carga e descarga dos bancos de bateria, um sistema de prioridade sobre o excedente de energia, possibilidade de limitar a energia injetada na rede e a possibilidade de realizar a recarga das baterias direto da rede elétrica. As possibilidades de controle são muito mais abrangentes em um sistema com tantas funcionalidades.

Sendo sistemas que podem ser utilizados para: sistemas de *backup*, cobertura do horário de ponta (*time shifting*), controle de demanda (*peak shaving*), dentre outros (SILVEIRA, 2024). Sendo possível, se bem dimensionado, a utilização de mais de uma dessas estratégias.

Figura 14 – Sistema zero *grid* híbrido APsystems.



Fonte: APSYSTEMS, 2022.

3.2 HOMOLOGAÇÃO DE SISTEMAS ZERO *GRID*

Uma dúvida frequente sobre estes sistemas está relacionada à necessidade de homologação destes junto à concessionária, visto que não será injetada energia na rede. A ANEEL no seu Ofício nº 149/2022 nos diz:

Quanto à conexão do sistema zero *grid* nas unidades consumidoras, é preciso que o interessado comunique e interaja com a distribuidora local, devendo-se garantir que não haja injeção de energia na rede e que não sejam provocados distúrbios ou danos ao sistema elétrico ou às pessoas. A injeção de energia à revelia da distribuidora

impõe riscos às pessoas e equipamentos, estando submetidas as disposições do art. 44 e do art. 355 da Resolução normativa nº 1000/2021. (ANEEL, 2022)

A priori exigindo somente à comunicação as distribuidoras, entretanto recentemente em seu Ofício nº188/2024:

Ressaltamos ainda que, conforme art. 655-A da Resolução normativa nº 1000/2021, a conexão dos sistemas “grid zero” deve obedecer aos procedimentos, prazos e condições estabelecidos pelo Capítulo II do Título I da referida Resolução e no Módulo 3 do PRODIST. (ANEEL, 2024)

Com esta comunicação fica claro que os sistemas zero *grid* devem seguir o mesmo rito de homologação que os demais sistemas fotovoltaicos, sendo submetidos às mesmas regras de conformidade com as diretrizes definidas pelas concessionárias de energia locais e pelas regras impostas pela ANEEL.

4 ANÁLISES E DISCURSÕES

Sistemas zero *grid* são úteis, porém requerem um cuidado extra para verificar se se adequam as necessidades dos consumidores. É necessário explorar o perfil da curva de carga do consumidor para identificar se é uma solução pertinente. Para isso serão examinados dois consumidores típicos: consumidores residenciais e consumidores comerciais.

4.1 CONSUMIDOR RESIDENCIAL

Uma parte significativa dos consumidores interessados na instalação de um sistema fotovoltaico são consumidores residenciais. Para encontrar o tipo de sistema que atende as necessidades destes usuários é necessário realizar um levantamento da quantidade de energia gasta pelo cliente, bem como uma análise de como este gasto é feito.

Para este estudo foi escolhida para análise uma unidade consumidora residencial (UC) localizada no centro da cidade de Campina Grande. Por meio de uma inspeção da unidade e uma entrevista com os moradores foi possível realizar o levantamento de carga. Com base nos dados obtidos foi construída a Tabela 2. Nesta são descritas as naturezas das cargas, sua potência, uma estimativa do tempo de acionamento diário, bem como a energia total consumida. Com base nisto foi extrapolado o consumo total mensal da residência.

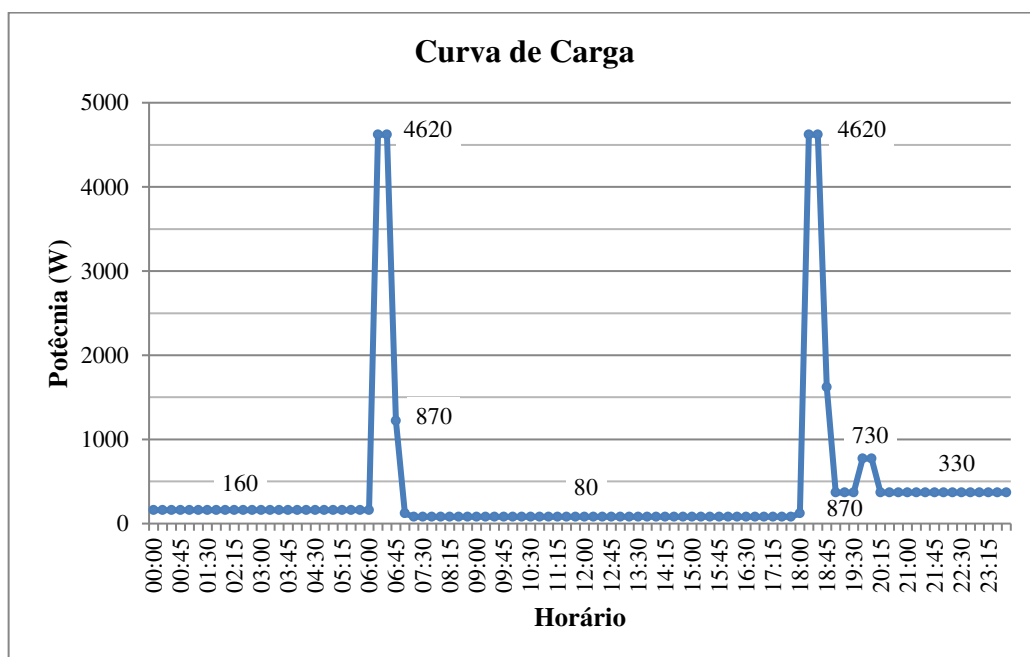
Tabela 2 – Levantamento de Carga de uma UC residencial.

Levantamento de carga			
Carga	Potência (W)	Tempo (h)	Consumo (Wh)
Geladeira	80	24	1920
Air Fryer	1500	1/2	750
Micro-ondas	1100	1/8	137,5
Chuveiro Elétrico	4500	1/2	3750
Televisão	150	2	300
Notebook	100	5	500
Ventilador	80	6	480
Máquina de lavar	400	1/2	200
Iluminação (6 lâmpadas)	40	8	320
Consumo Diário (kWh)			8,35
Consumo Mensal (kWh)			250,72

Fonte: Próprio autor.

Com base nos dados levantados e de acordo com o perfil de uso de cada carga foi construída uma estimativa da curva de carga da UC vista na Figura 15. Tiveram-se como base os hábitos diários dos moradores: um casal que sai para trabalhar no início da manhã e somente retorna para casa, aproximadamente, às 18 h. Quando a partir deste horário utilizam com mais intensidade seus eletrodomésticos. É importante salientar que a curva de carga seria diferente quando analisada nos finais de semana, devido ao uso mais intensivo dos aparelhos eletrônicos. Entretanto para a abordagem deste trabalho foram considerados somente os dias úteis da semana, dado que estes representam a maioria dos dias do mês.

Figura 15 – Curva de carga de uma unidade consumidora residencial.



Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que a rotina desses moradores na semana se assemelha a grande parte dos consumidores residenciais, de forma que é possível utilizá-los como base para uma análise se sistemas zero *grid* trariam benefícios para consumidores com este perfil de consumo.

Para realizarmos esta análise é preciso realizar o dimensionamento de um sistema zero *grid* que atenda a demanda desta UC, bem como de um sistema fotovoltaico convencional *on-grid*, o qual servirá de base para realizarmos comparações.

4.1.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA *ON-GRID*

Para o dimensionamento de um sistema *on-grid* utiliza-se das equações agrupadas por SILVA, 2022:

$$C_d = \frac{C_m - V_d}{30} \quad (1)$$

$$P_T = \frac{C_d/T_d}{N_{HSP}} \quad (2)$$

Sendo:

C_d = Consumo diário médio (kWh)

C_m = Consumo mensal médio (kWh)

V_d = Valor mínimo de disponibilidade (kWh)

P_T = Potência de pico total diária do SF (Wp)

T_d = Taxa de desempenho (adimensional)

N_{HSP} = Numero de horas de sol pleno (h)

Onde nesse caso específico extrai-se da Tabela 2 que o consumo mensal é de: $C_m = 250,72$ kWh, admitindo uma taxa de desempenho de 0,8 e sabendo-se tratar de uma unidade consumidora atendida por rede monofásica ($V_d = 30$ kWh). Ainda de acordo com SILVA, 2022 é possível considerar uma irradiância padrão de 1 kW/m^2 e admitir que:

$$N_{HSP} = I_{r_{med}}$$

Sendo:

$I_{r_{med}}$ = Irradiação média (kWh/m²),

Os valores de irradiação são medidos e disponibilizados pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB). Considerando a localidade de Campina Grande, tem-se que $N_{HSP} = I_{r_{med}} = 5,25$ h.

Assim é possível prosseguir com o dimensionamento utilizando as equações 1 e 2, de forma que:

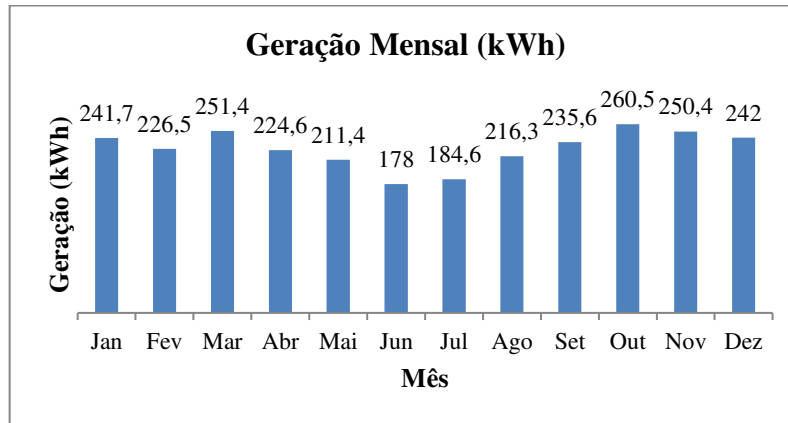
$$C_d = \frac{C_m - V_d}{30} = \frac{250,72 - 30}{30} = 7,36 \text{ kWh}$$

$$P_T = \frac{C_d/T_d}{N_{HSP}} = \frac{7,36/0,8}{5,25} = 1,75 \text{ kWp}$$

Tem-se então que um sistema com potência instalada de 1,75 kWp é capaz de suprir a demanda. Entretanto é necessário se atentar que uma instalação real é limitada pelos módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado, desta forma optou-se pelo painel solar da Trina Solar TSM-370DE08M, com potência de 370 Wp por ser bastante utilizado em instalações de pequeno porte. Desta forma o sistema final possuiria cinco destes módulos, totalizando um sistema com 1,85 kWp.

Com o sistema dimensionado é possível utilizar o site *Global Solar Atlas* (2024) para obter os valores médios esperados para a geração durante o ano, esses dados estão compilados na Figura 16. Na qual é possível perceber que o projeto supre as necessidades da UC.

Figura 16 – Valores esperados para a geração do sistema *on grid* projetado.

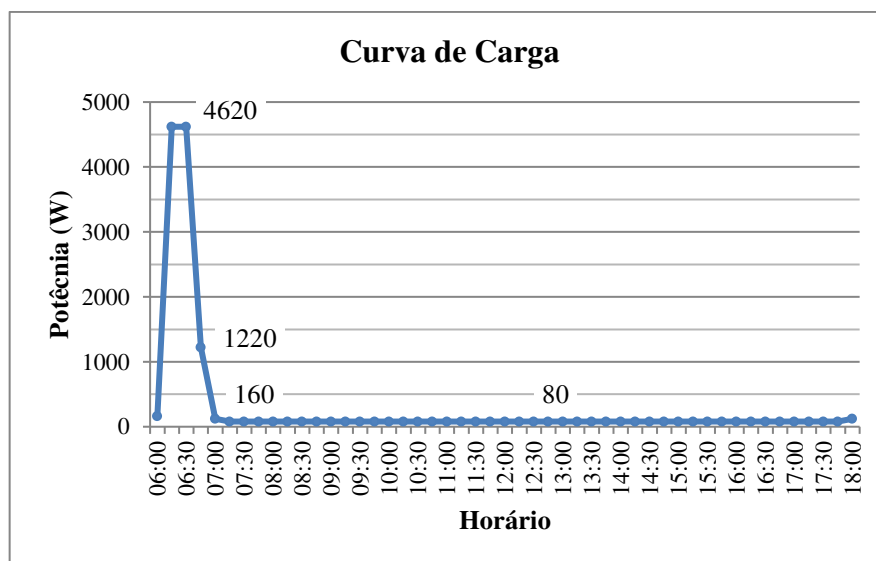


Fonte: Próprio autor.

4.1.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ZERO *GRID*

Para o dimensionamento de um sistema *zero grid* deve-se sempre lembrar que o principal objetivo deste é atender a demanda de forma instantânea, visto que qualquer geração em excesso não será injetada na rede para acúmulo de créditos. Logo na fase de dimensionamento atenta-se somente para a carga durante o horário de geração solar (das 6 h às 18 h), esta está isolada abaixo na Figura 17.

Figura 17 – Curva de carga durante o período de geração solar (6 h às 18 h).



Fonte: Próprio autor.

Com base nesta nova curva de carga, calcula-se o consumo durante este período, demonstrado na Tabela 3. Com base nesta conclui-se que o consumo diário neste período é de 2,94 kWh, e é em cima deste valor que realizam-se os cálculos para o dimensionamento do sistema de geração.

Tabela 3 – Levantamento de Carga da residência durante o período de geração solar (6 h às 18 h).

Levantamento de carga			
Carga	Potência (W)	Tempo (h)	Consumo (Wh)
Geladeira	80	12	960
Air Fryer	1500	1/4	375
Chuveiro Elétrico	4500	1/4	1125
Iluminação (6 lâmpadas)	40	12	480
Consumo Diário (kWh)			2,94

Fonte: Próprio autor.

Ainda é possível utilizar o conjunto de equações 1 e 2 mostrados anteriormente para realizar o dimensionamento, entretanto com o valor diário encontrado na Tabela 3, limita-se ao uso da equação 2, sendo:

$$P_T = \frac{C_d/T_d}{N_{HSP}} = \frac{2,94/0,8}{5,25} = 700 \text{ Wp}$$

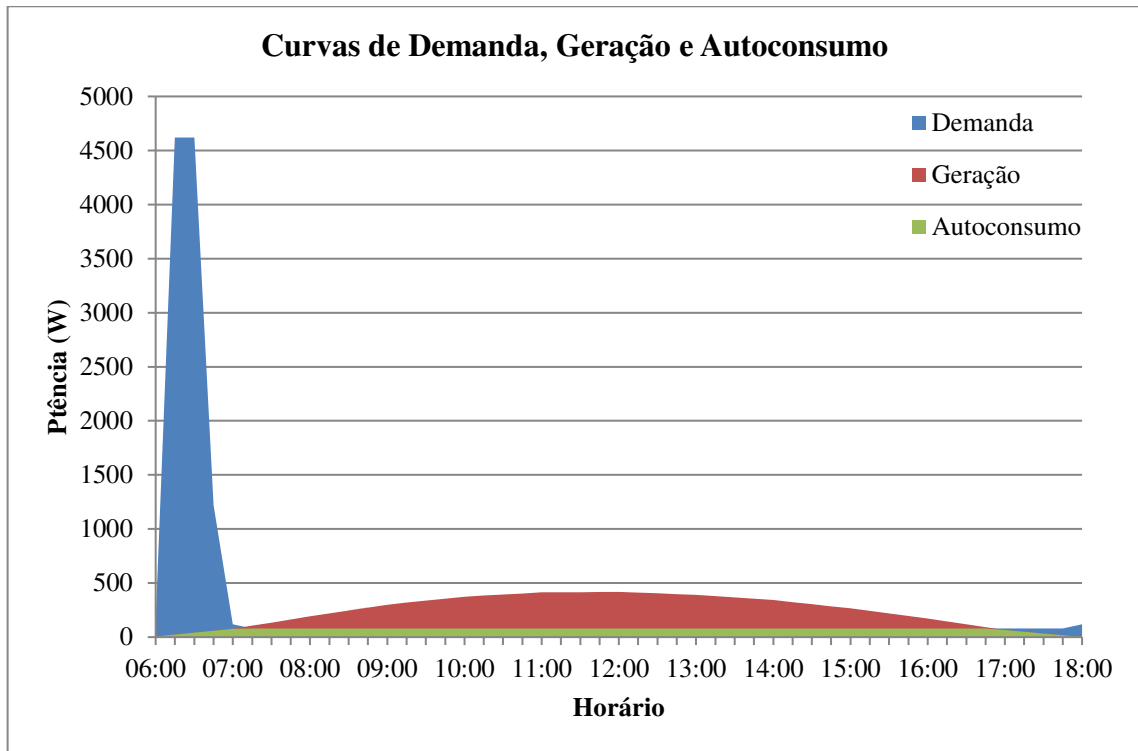
Conclui-se que sistema 700 Wp é suficiente para suprir a demanda de autoconsumo. Como esta potência deve ser um múltiplo do módulo fotovoltaico escolhido (TSM-370DE08M), chega-se a um sistema com potência instalada de 740 Wp, composto por dois módulos. Observa-se então que, nesta condição, o projeto almeja suprir aproximadamente 40% da demanda atendida pelo sistema *on-grid*.

Utilizando o site *Global Solar Atlas* (2024) é possível estimar a curva de geração, de posse desta é montado um gráfico detalhando as curvas de demanda, geração e autoconsumo, como é visto na Figura 18. A área verde no gráfico representa o autoconsumo, ou seja, demanda suprida de forma instantânea pela geração. A área vermelha corresponde a toda a geração que não está sendo aproveitada, pois não há demanda para utiliza-la. Finalmente tem-se que a área azul representa a demanda que será suprida pela rede da concessionária.

É evidente pelo gráfico que esta curva de carga não é apropriada para um sistema zero *grid*, visto que a maior parte do consumo ocorre durante o início da manhã, e em contraste tem-se que a maior geração ocorre durante o período do meio dia, característica básica de sistemas geradores a base de energia solar. Na prática este sistema atende somente a demanda de consumo da geladeira, cerca de 960 Wh, o que corresponde a 11,5% da demanda total

diária tendo como referência a Tabela 2. Estes valores tornam inviável economicamente o uso deste sistema para este consumidor, visto o tempo de retorno do investimento seria alto, e a conta de energia do consumidor não teria uma redução significativa.

Figura 18 – Curvas de demanda, geração e consumo para o sistema zero *grid* residencial.



Fonte: Próprio autor.

Ainda é possível extrair do gráfico que em uma situação ideal, para realizar o aproveitamento máximo da energia gerada, a maior parte da demanda dever ser concentrada no período próximo ao meio dia (10 h às 14 h).

O sistema poderia ser implementado, porém, se fosse utilizado um sistema zero *grid* híbrido, de forma que fosse possível armazenar a energia excedente. Neste caso deveria ser considerada toda a energia consumida durante o período inteiro para realizar este dimensionamento, o que foge do escopo escolhido para este trabalho.

4.2 CONSUMIDOR COMERCIAL

Outra parte significativa dos consumidores interessados na instalação de sistemas de geração fotovoltaica são pequenos e médios empreendedores, que possuem comércios locais e almejam uma economia na conta de luz.

Para esta análise foi escolhida uma pequena loja de comércio de roupas localizada no centro de Campina Grande que fica aberta no período das 9 h às 12 h e 14 h às 18 h, pois esta possui comportamento similar à várias outras na cidade, podendo então servir de referência para uma análise geral destes consumidores.

A análise se inicia do mesmo ponto de partida: fazendo um levantamento da carga alocada no estabelecimento. A Tabela 4 descreve os resultados, mostrando a natureza da carga, tempo de uso, potência e consumo diário.

Tabela 4 – Levantamento de Carga de uma UC comercial.

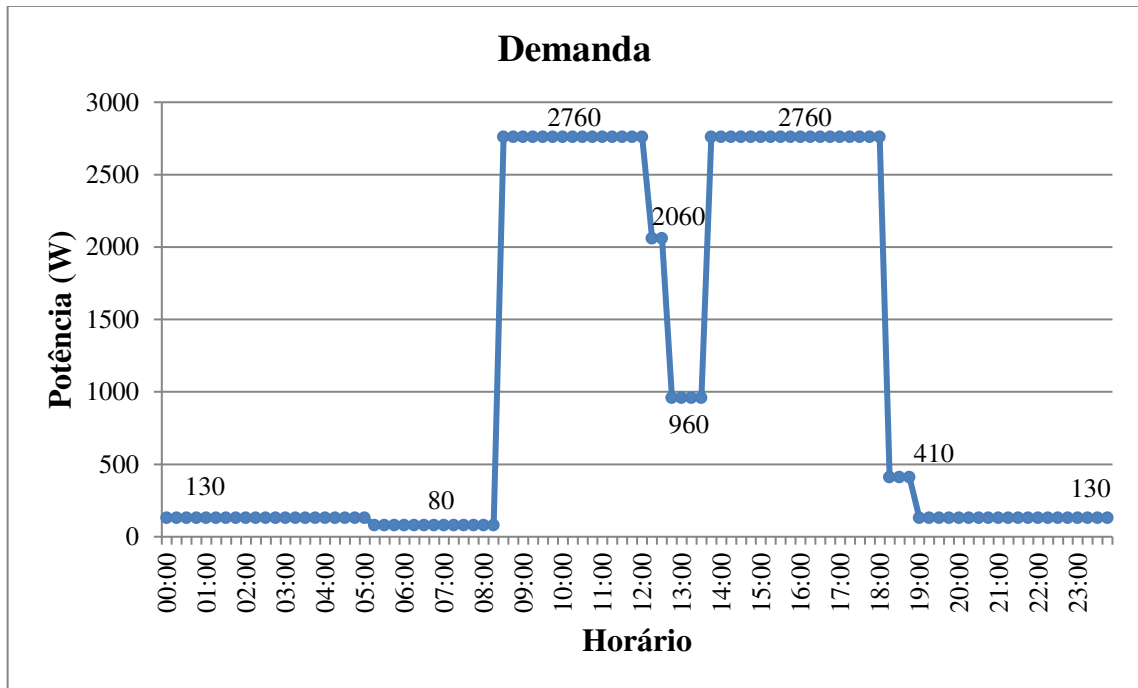
Levantamento de carga			
Carga	Potência (W)	Tempo (h)	Consumo (Wh)
Geladeira	80	24	1920
Micro-ondas	1100	1/2	550
Ventilador	160	9	1440
Ar-Condicionado 15000 BTUs	1800	9	16200
Iluminação Diurna	120	9	1080
Iluminação Noturna	50	11	550
3 Computadores	600	9	1200
Consumo Diário (kWh)			22,94
Consumo Mensal (kWh)			688,2

Fonte: Próprio autor.

Como forma de complementar a análise também foi levantada a curva de carga da UC compilada na Figura 18. Estes dados foram levantados por meio do levantamento dos hábitos de consumo dos funcionários e da chefia. Destaca-se o hábito de desligar o ar-condicionado durante o horário de almoço, objetivando economia de energia.

É importante atentar que da mesma forma que consumidores residenciais a curva de carga também sofre alterações nos finais de semana, visto que nos sábados a loja funciona em meio expediente e nos domingos ela é fechada. De qualquer forma para as análises deste trabalho foi levado em consideração somente os dias úteis de funcionamento.

Figura 19 – Curva de carga de uma unidade consumidora comercial.



Fonte: Próprio autor.

Novamente para compararmos as soluções *on grid* e *zero grid*, realiza-se o dimensionamento dos sistemas que se instalados atenderiam as necessidades desta unidade consumidora.

4.2.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA *ON-GRID*

Assim como no caso de consumidores residências utilizam-se as equações 1 e 2 já apresentada anteriormente e os dados da Tabela 4. Sendo assim o consumo mensal é de: $C_m = 688,2$ kWh, utilizando uma taxa de desempenho de 0,8 e sabendo-se tratar de uma unidade consumidora atendida por rede trifásica ($V_d = 100$ kWh). Sendo o sistema instalado também em Campina Grande, sabe-se que $N_{HSP} = 5,25$ h.

Prossegue-se para o dimensionamento utilizando as equações 1 e 2:

$$C_d = \frac{C_m - V_d}{30} = \frac{688,2 - 100}{30} = 19,61 \text{ kWh}$$

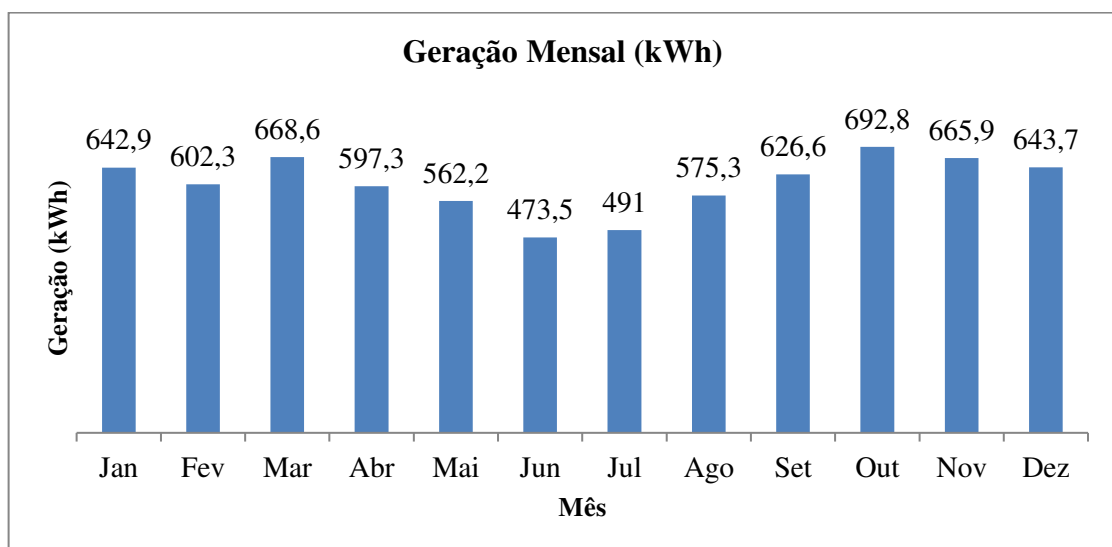
$$P_T = \frac{C_d / T_d}{N_{HSP}} = \frac{19,61 / 0,8}{5,25} = 4,67 \text{ kWp}$$

Chega-se então a um sistema com potência instalada de 4,67 kWp capaz de suprir a demanda. Como já discutido é necessário atentar para a potência dos painéis disponíveis no mercado, neste caso por se tratar de um sistema com uma potência maior, opta-se pelo

módulo da Canadian Solar CS3W-410P, com potência de 410 Wp. Foi escolhido, pois além de também ser encontrado facilmente no mercado, sua potência maior reduz a quantidade de painéis que deveriam ser instalados. Tendo-se então que para este dimensionamento seriam utilizados 12 módulos, totalizando uma potência instalada de 4,92 kWp.

Com o sistema dimensionado é possível utilizar o site *Global Solar Atlas* (2024) para obter os valores médios esperados para a geração durante o ano, esses dados estão compilados na Figura 20.

Figura 20 – Valores esperados para a geração do sistema *on grid* projetado.



Fonte: Próprio autor.

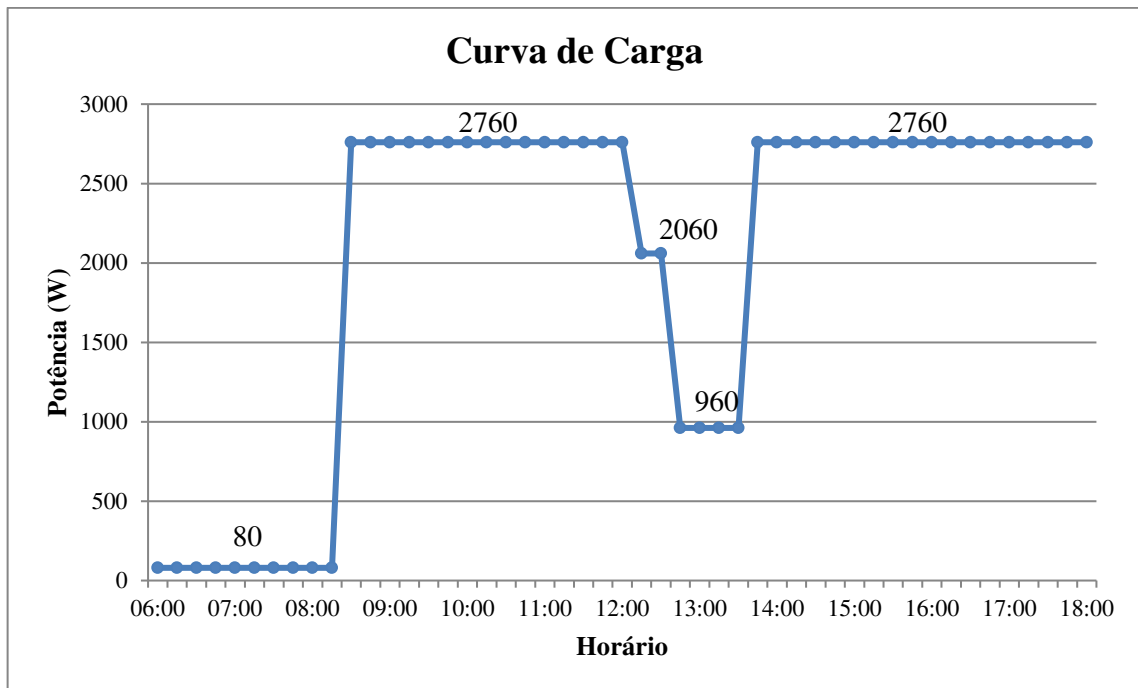
Em um primeiro momento uma análise dos números de geração na Figura 19 podem nos levar que o sistema não será capaz de suprir a demanda de 688,2 kWh mensais, entretanto é preciso lembrar que como a UC é atendida por uma rede trifásica o valor mínimo de disponibilidade é 100 kWh o que é bastante significativo.

Este valor já foi levado em consideração nos cálculos de dimensionamento logo o valor de projeto da demanda é de 588,2 kWh, e os valores da Figura 20 estão consistentes com o dimensionamento realizado, atendendo assim a demanda total do consumidor.

4.2.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ZERO *GRID*

Novamente para o dimensionamento do sistema zero *grid* leva-se em consideração a curva de carga da UC somente durante o período de geração solar, na Figura 21 temos esta parte da curva isolada.

Figura 21 – Curva de carga durante o período de geração solar (6 h às 18 h).



Fonte: Próprio autor.

Com base nesta nova curva de carga, é possível calcular o consumo durante este período, descrito na Tabela 5. Chega-se então a um valor de 22,39 kWh, valor quase idêntico ao obtido durante o dimensionamento do sistema *on grid*. Isso se dá pelo fato que a demanda está concentrada no horário em que há geração. Dado este resultado não é necessário realizar o dimensionamento do sistema zero *grid*, visto que este terá a mesma potência instalada de 4,92 kWp.

Tabela 5 – Levantamento de Carga do comércio durante o período de geração solar.

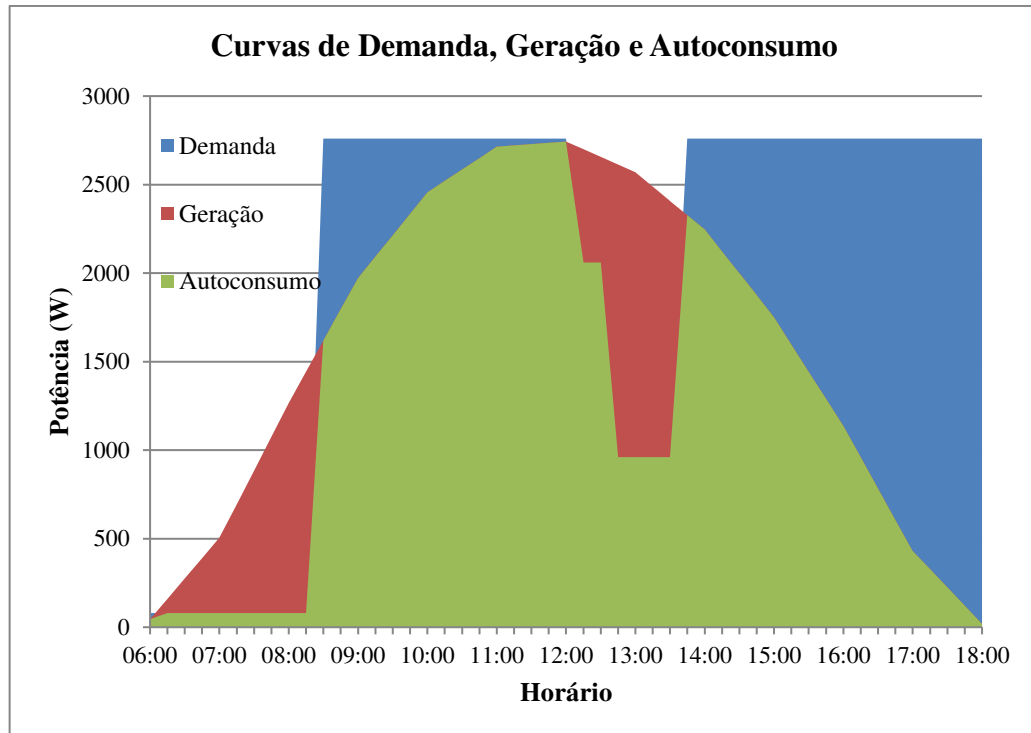
Levantamento de carga			
Carga	Potência (W)	Tempo (h)	Consumo (Wh)
Geladeira	80	12	1920
Micro-ondas	1100	1/2	550
Ventilador	160	9	1440
Ar-Condicionado 15000 BTUs	1800	9	16200
Iluminação Diurna	120	9	1080
3 Computadores	600	9	1200
Consumo Diário (kWh)			22,39

Fonte: Próprio autor.

Entretanto ainda é útil utilizar o site *Global Solar Atlas* (2024) para obter dados de geração desse sistema, a partir deles foi construído o gráfico da Figura 22 que mostra as curvas de demanda, geração e autoconsumo. Foi seguido o mesmo padrão de legenda

utilizado na análise anterior: a área verde corresponde ao autoconsumo, a azul representa a demanda suprida pela rede e a vermelha representa o potencial de geração não aproveitado devido a escolha de não injetar potência na rede.

Figura 22 – Curvas de demanda, geração e consumo para o sistema zero *grid* comercial.



Fonte: Próprio autor.

Quando comparado com o gráfico relacionado ao consumidor residencial da Figura 18 é perceptível que para este consumidor comercial o sistema zero *grid* é algo que, caso necessário, possui viabilidade técnica. Visto que o uso de grande parte da carga coincide com o período de geração.

É importante destacar que apesar ser viável o sistema zero *grid* neste caso só seria recomendado em um caso que realmente não fosse possível fazer o uso de um sistema *on grid*. Dado que o investimento necessário seria bem próximo, somente com uma diferença no valor adicional do sistema de medição que deve ser adicionado para comunicar ao inversor os valores instantâneos da demanda.

Isto se dá, pois, grande parte dos inversores disponíveis no mercado possuem de fábrica a função de limite de exportação (zero *grid*). Esta função está disponível pois estes inversores também são comercializados em outros países, nos quais é comum encontrar limites para a injeção de energia na rede, como em alguns países da Europa. Em países como as Filipinas esta injeção é proibida.

O sistema *zero grid* não seria capaz de aproveitar toda a energia gerada pelos módulos, sendo então categoricamente inferior a um sistema *on grid*. Uma vez que não seria possível acumular junto à concessionária créditos. Entretanto um sistema *zero grid* híbrido poderia ser uma saída em caso de impossibilidade técnica da instalação de um sistemas *on-grid*.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou apresentar os sistemas zero *grid* aprofundando-se nas suas particularidades e características. Estudando situações nas quais o seu uso poderia ser considerado.

Conforme foi apresentado é possível concluir que a utilização destes sistemas não é trivial e requer um nível maior de análise do perfil de uso energético dos clientes. Não sendo então um sistema que se adequa a qualquer situação. Visto que o perfil que mais se encaixa com a utilização destes sistemas são consumidores com um alto grau de simultaneidade, ou seja, concentrem seu consumo no período de geração. Perfil compatível com de consumidores varejista, porém em conflito com consumidores residenciais que, normalmente, trabalham em período integral e somente retornam às suas casas a noite.

Entretanto é preciso salientar que existem diversos casos nos quais a utilização destes sistemas é de extrema necessidade para a execução de projetos. Em particular, situações onde seria tecnicamente é inviável a utilização de sistemas *on-grid* simples, por limitações técnicas da rede. Nestes casos seria possível considerar a utilização de sistemas zero *grid* híbridos, para que os sistemas de armazenamento possam fazer proveito da energia gerada e excesso.

Desta forma os sistemas zero *grid* são uma novidade que tem se mostrado fundamental para a viabilização de projetos que por limitações técnicas, ou econômicas não poderiam ser realizados. Sendo assim uma grande ferramenta para ser considerada no momento da realização de projetos no setor de energia fotovoltaica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Estudo de consumidores residenciais que façam uso do trabalho remoto de forma a estudar um perfil de consumo não abordado neste trabalho;
- Estudo de consumidores comerciais de grande porte;
- Aumento do escopo das análises incluindo os finais de semana;
- Dimensionamento de sistemas zero *grid* híbridos.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. (2024). Disponível em < <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em 30/09/2024.

ANEEL. (2012). Resolução Normativa N° 482, 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 30/09/2024.

ANEEL. (2015). Resolução Normativa N° 687, 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 30/09/2024.

ANEEL. (2022). Ofício n° 0149/2022 – SRD/ANEEL. Disponível em < <https://energes.com.br/grid-zero/>>. Acesso em: 30/09/2024.

ANEEL. (2024). Ofício n° 188/2024 – SRD/ANEEL. Disponível em: < <https://energes.com.br/grid-zero/>>. Acesso em: 30/04/2024.

ANEEL. (2012). Resolução Normativa N° 1098, 23 de julho de 2014. Aprimora a Resolução Normativa n° 1000, de 7 de dezembro de 2021, em função da publicação da lei n° 14.620, de 2023, que dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida e dá outras providências. Disponível em: < <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20241098.pdf>>. Acesso em: 30/09/2024.

ARAÚJO, E. Reprovação de projetos: inversão do fluxo de potência é de fato um problema?. Canal Solar, 02/08/2023. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/reprovacao-de-projetos-a-inversao-de-fluxo-de-potencia-e-de-fato-um-problema/>>. Acesso em: 30/09/2024.

BLUESOL. (2016). Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica. Livro digital de Introdução aos Sistemas Solares. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/edisonsilva/materiais-eletricos/material-de-apoio/celulas-solares/Livro-Digital_Sistemas-Solares-BLUESOL.pdf/view>. Acesso em: 30/09/2024.

CARNEIRO, J. (2009). Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos. Universidade do Minho, Portugal. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16965/1/DIMENSIONAMENTO%20DE%20SISTEMAS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>>. Acesso em: 30/09/2024.

CASSARIN, R. (2024). Baterias de lítio têm redução de 90% nos custos entre 2010 e 2023. Portal Solar, 30/04/2024. Disponível em < <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/armazenamento/baterias-de-litio-tem-reducao-de-90-nos-custos-entre-2010-e-2023>>. Acesso em: 30/09/2024.

CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura. Micro e Minigeração Distribuída. Disponível em < <https://cbie.com.br/micro-e-minigeracao-distribuida/>>. Acesso em: 30/09/2024.

CRESEB. (2006). Energia Solar – Princípio e Aplicações. CEPEL, Sistema Eletrobrás. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 30/09/2024.

FREITAS, S. S. A. (2008). Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Instituto Politécnico de Bragança – Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Disponível em <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/2098>>. Acesso em: 30/09/2024.

IEMA. (2021). Crise hídrica, termoelétricas e renováveis – Considerações sobre o planejamento energético e seus impactos ambientais. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/09/IEMA_crisehidricatermeletricas.pdf>. Acesso em: 30/09/2024.

INEE. (2024). O que é Geração Distribuída. Disponível em <https://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em 30/09/2024.

MAGALHÕES, M. (2024). Sistemas Zero-Grid: Mitos e Dúvidas Frequentes. Win Solar, 07/02/2024. Disponível em <<https://www.win.com.br/sistemas-grid-zero-mitos-e-d%C3%BAvidas-frequentes>>. Acesso em: 30/09/2024.

MARQUES, R. (2022). Entendendo a tarifação do fio B previsto na lei 14300. Canal Solar, 18/02/2022. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/tarifacao-do-fio-b-previsto-na-lei-14-300/>>. Acesso em: 30/09/2024.

MASCARELLO, M. C. (2017). Análise da viabilidade técnica e financeira de instalação fotovoltaica em indústria. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/169300/001046323.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 30/09/2024.

OLIVEIRA, P. R. S. (2021). Estimativa de Remuneração Anual de um Parque Solar Fotovoltaico com Baterias no Âmbito do MIBEL. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/135235>>. Acesso em: 30/09/2024.

PERUZZO, E. S. (2021). Qual a diferença entre o módulo monocristalino e o policristalino. Disponível em: <<https://blog.solarinove.com.br/qual-a-diferenca-entre-o-modulo-monocristalino-e-o-policristalino/>>. Acesso em: 30/09/2024.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (2014). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>. Acesso em: 30/09/2024.

PORTAL SOLAR, (2024). Energia Solar no Brasil. Portal Solar, 2024. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em: 30/09/2024.

SANTOS, F. A. C. M; SANTOS, F. M .S .M. (2008). Geração Distribuída Versus Centralizada. Portugal: Instituto Politécnico de Viseu, novembro de 2008. Disponível em <https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/350/1/Geracao_distribuida_versus_centralizada.pdf>. Acesso em: 30/09/2024.

SEBRAE. (2021). Energia Solar: Qual a Diferença entre sistemas On Grid e Off Grid?. Disponível em: <<https://respostas.sebrae.com.br/energia-solar-qual-a-diferenca-entre-sistemas-on-grid-e-off-grid/>>. Acesso em: 30/09/2024.

SILVEIRA, G. (2024). Sistemas híbridos zero grid com bateria e fator de simultaneidade. Canal Solar, 25/04/2024. Disponível em < <https://canalsolar.com.br/dimensionamento-hibridos-zero-grid-baterias-fator-simultaneidade/>>. Acesso em: 30/09/2024.

SOUZA, J. P. (2022). Grid-Zero – Como funciona – suas aplicações e homologação na distribuidora de energia elétrica. ECORI, 13/08/2022. Disponível em: < <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/grid-zero---como-funciona---suas-aplicacoes-e-homologacao-na-distribuidora-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 30/09/2024.

TAPIA, F. (2024). Mundo tem crescimento recorde de renováveis gerido pela solar em 2023. Canal Solar, 02/04/2024. Disponível em <<https://canalsolar.com.br/liderado-pela-solar-mundo-tem-crescimento-recorde-de-renovaveis-em-2023/>>. Acesso em: 08/10/2024.

THE WORLD BANK GROUP. (2019). Global Solar Atlas. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/>>. Acesso em: 30/09/2024.

VILLALVA, M. (2019). Entendendo as curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 30/09/2024.