



CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

William Carpes de Souza

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO
À REDE**

**Santa Cruz do Sul
2024**

William Carpes de Souza

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO
À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Santa Cruz do Sul para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Fabiano Santos Ferreira

Santa Cruz do Sul

2024

RESUMO

O consumo de energia tem aumentado significativamente, impulsionado pelo crescimento econômico e a maior utilização de dispositivos eletrônicos. Esse cenário evidencia a importância dos avanços tecnológicos, que são fundamentais para aprimorar a eficiência energética e desenvolver fontes alternativas de energia. Entre essas fontes, a energia solar destaca-se como uma opção essencial para um futuro mais sustentável. Ao adotar sistemas de energia solar, é possível reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar os impactos ambientais, especialmente as emissões de gases poluentes. Além de contribuir para a preservação do meio ambiente, a energia solar oferece benefícios econômicos, como a redução das contas de luz e a valorização de propriedades. A adoção em larga escala dessa tecnologia é um passo crucial para garantir uma matriz energética mais limpa, eficiente e responsável, que atende às necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações. Este trabalho explora a origem e funcionamento da energia solar, seus principais componentes e a relevância dos sistemas *on-grid*, foco deste TCC, como uma alternativa viável e sustentável de geração de energia.

Palavras-chave: Consumo de energia. Energia solar. Sustentabilidade. Avanços tecnológicos. Eficiência energética

ABSTRACT

The demand for energy has significantly increased, driven by economic growth and the rising use of electronic devices. This scenario underscores the importance of technological advancements, which are crucial for improving energy efficiency and developing alternative energy sources. Among these sources, solar energy stands out as an essential option for a more sustainable future. By adopting solar energy systems, it is possible to reduce dependence on fossil fuels and minimize environmental impacts, particularly greenhouse gas emissions. In addition to contributing to environmental preservation, solar energy offers economic benefits, such as lower electricity bills and increased property values. The large-scale adoption of this technology is a crucial step toward ensuring a cleaner, more efficient, and responsible energy matrix that meets current needs without compromising future generations. This study explores the origins and workings of solar energy, its main components, and the importance of on-grid systems, the focus of this thesis, as a viable and sustainable energy generation alternative.

Keywords: Energy consumption. Solar energy. Sustainability. Technological advancements. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Software PVSOL com a definição dos módulos posicionados a leste.....	26
Figura 2 - Software PVSOL com a definição dos módulos posicionados a oeste.	26
Figura 3 - Software PVSOL apresentação da previsão de rendimento da usina.	27
Figura 4 – Datasheet do módulo.....	28
Figura 5 – Datasheet Inversor S6-GR1P6K-S.....	30
Figura 6 – Imagem da instalação do sistema no local.....	41
Figura 7 – Inversor fotovoltaico.....	42
Figura 8 – Disjuntor e DPS.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Demonstrativo das etapas de tratativa com o cliente	18
Tabela 2: Demonstrativo do consumo mensal do cliente.	20
Tabela 3: - Irradiação solar média mensal em Arroio do Tigre.....	23
Tabela 4: Resumo dos Resultados de Compatibilidade com o Inversor.	33
Tabela 5: Resumo dos Componentes CA do Sistema	39
Tabela 6: Materiais necessários para o sistema solar dimensionado	40
Tabela 7: Economia Líquida no Primeiro Ano (2024)	44
Tabela 8: Economia Líquida Anual com Disponibilidade.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
FDI	Fator de dimensionamento do inversor
GD	Geração Distribuída
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
kV	Quilovolt – Medida de força eletromotriz equivalente a mil volts
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreador de Máximo Ponto de Potência)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 Área e Limitação do tema	4
1.2 Objetivo Geral.....	5
1.2.1 Objetivos Específicos.....	5
1.3 Justificativa	6
2 REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 Energia Solar.....	7
2.2 Origem Da Energia Solar.....	8
2.3 Efeito Fotovoltaico	8
2.4 Módulos Solares	9
2.4.1 Células Fotovoltaicas de Silício: Monocristalino e Policristalino.....	9
2.4.2 Células de Silício Monocristalino	10
2.4.3 Células de Silício Policristalino	10
2.4.4 Componentes de um Módulo Solar.....	10
2.5 Inversores Solares	11
2.5.1 Funcionamento Do Inversor Solar.....	11
2.5.2 Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI)	12
2.5.3 Capacidade de Sobrecarga (<i>Overload</i>).....	13
2.5.4 Entradas MPPT (Maximum Power Point Tracking)	14
2.6 Cenário e Normas da Geração Distribuída	14
2.7 Sistema de Tarifação da Geração Distribuída.....	15
2.7.1 Modelo de Compensação de Energia e ICMS	16
2.7.2 Taxação do Fio B.....	16
2.7.3 Atualizações pela Resolução Normativa nº 1.098/2024.....	16
2.8 Etapas de um Projeto Fotovoltaico.....	17
3 DESENVOLVIMENTO	20
3.1 Coleta de Dados e Análise de Viabilidade	20
3.2 Análise para Implantação da Usina Fotovoltaica.....	21
3.2.1 Conformidade com Normas Vigentes	21
3.2.2 Padrão de Entrada e Conexão On-Grid	22
3.3 Análise de Área Disponível do Telhado.....	22
3.4 Irradiação Solar Média.....	22

3.5 Ângulo dos Módulos e Orientação	24
3.5.1 Análise com Drone e Definição dos Parâmetros de Instalação	24
3.5.2 Orientação Leste-Oeste: Distribuição da Captação Solar	25
3.5.3 Vantagens do Ângulo de Inclinação de 21°	25
3.6 Análise de Geração e Consumo de Energia Residencial	25
3.7 Dimensionamento do Projeto Solar com Entradas MPPT Independentes	27
3.8 Dados do Módulo e Condições de Operação	28
3.9 Dados do Inversor e análise das Condições de Operação	30
3.9.1 Dimensionamento dos Cabos CC e Proteções para o Sistema Fotovoltaico	33
4 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES CA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	36
4.1 Resultados E Discussão	39
4.2 Materiais	39
4.3 Valor de Investimento	40
4.4 Implementação da usina fotovoltaica	40
4.5 Homologação junto a concessionário e inspeção aprovada	43
4.6 Prazo para o retorno do investimento	44
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47
ANEXO 1 – Folha de dados do painel DHN-72X16	49
ANEXO B – Folha de dados do inversor SOLIS S6-GR1P6K-S	51
APÊNDICE A – Diagrama unifilar	53

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil tem sido impulsionado por um crescente interesse em soluções sustentáveis e pela implementação de normas regulatórias que facilitam a geração distribuída. Nesse cenário, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) exerce papel fundamental com a publicação de resoluções que atualizam e disciplinam o setor, permitindo que consumidores residenciais e comerciais integrem sistemas fotovoltaicos à rede elétrica (*on-grid*) e participem do sistema de compensação de energia. O sistema *on-grid* é amplamente adotado por não demandar o uso de baterias, o que reduz os custos e facilita a conexão à rede elétrica pública.

As principais regulamentações para a geração distribuída no Brasil são a Lei nº 14.300/2022, conhecida como o Marco Legal da Geração Distribuída, e a Resolução Normativa nº 1098/2024, que introduz novos critérios técnicos e econômicos para o funcionamento desses sistemas. A Lei nº 14.300 estabelece as diretrizes para o modelo de compensação de energia e define os tipos de geração qualificados para participar do sistema. Ela também prevê uma transição para novas regras tarifárias, que se tornaram obrigatórias para novos projetos a partir de 2023. Já a Resolução Normativa nº 1098/2024 atualiza aspectos técnicos sobre a compensação de energia, especialmente para sistemas de microgeração e minigeração, além de incluir novas orientações sobre a análise de fluxo de energia e autoconsumo local.

A RN 1098/2024 também aborda questões de transparência e estabelece critérios para o orçamento de conexão e análise de fluxo, que visam aumentar a segurança e facilitar o processo de conexão com as concessionárias de energia. Isso é essencial para o desenvolvimento sustentável da infraestrutura de geração distribuída, pois permite que os consumidores tenham mais autonomia na produção de energia e ainda reduzam seus custos com eletricidade. Estudos recentes destacam que essas mudanças normativas têm incentivado o setor solar brasileiro, que é considerado um dos mais promissores do mundo para a energia renovável.

1.1 Área e Limitação do tema

O presente trabalho está inserido no campo das Fontes Sustentáveis de Energia, com foco na Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica. A pesquisa concentra-se na implementação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (*on-grid*), abordando os principais aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. Destaca-se a relevância das

regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), especialmente a Lei nº 14.300/2022 e a Resolução Normativa nº 1098/2024, que estabelecem diretrizes para a conexão e operação desses sistemas no Brasil.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema fotovoltaico *on-grid* em uma residência, levando em consideração o impacto das novas regulamentações estabelecidas pela ANEEL, incluindo a Resolução Normativa nº 1.098/2024 e a Lei nº 14.300/2022. Essas normas introduzem novos critérios tarifários e de compensação de energia para a geração distribuída, influenciando diretamente a viabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Dimensionar um sistema fotovoltaico *on-grid*: Determinar o tamanho ideal e a capacidade do sistema fotovoltaico para atender a uma demanda energética específica. A análise considera tanto o perfil de consumo do cliente quanto a disponibilidade de irradiação solar da localidade.

- Analisar as implicações econômicas: Estimar os custos de instalação, manutenção e operação do sistema fotovoltaico, comparando-os com as economias potenciais na fatura de energia. Esta análise inclui a avaliação de incentivos fiscais disponíveis e do retorno sobre o investimento, visando a viabilidade econômica do projeto.

- Avaliar o impacto das normas da ANEEL: Examinar como as regulamentações atuais, em especial a Resolução Normativa nº 1.098/2024 e a Lei nº 14.300/2022, afetam a implementação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. As novas regras introduzem critérios sobre tarifação e compensação de energia injetada na rede, além de estipularem os requisitos para o autoconsumo remoto e compartilhado, trazendo mais clareza e segurança jurídica aos consumidores.

1.3 Justificativa

A implementação de sistemas fotovoltaicos baseia-se nos inúmeros benefícios econômicos e sustentáveis que essa tecnologia oferece tanto para residências quanto para empresas. Com a elevação das tarifas de energia elétrica e a crescente conscientização ambiental, a energia solar surge como uma alternativa viável e eficiente. A instalação de painéis solares permite uma significativa redução nos custos com eletricidade, uma vez que a energia gerada pelo sistema pode abastecer a demanda energética de uma unidade consumidora, diminuindo a dependência de redes convencionais e mitigando o impacto de aumentos nas tarifas.

Além do benefício financeiro direto, a utilização da energia solar contribui para uma matriz energética mais limpa e diversificada. A energia gerada é renovável e tem baixo impacto ambiental, uma vez que o processo de captação e conversão dos raios solares em eletricidade não gera emissões de gases de efeito estufa nem resíduos poluentes. Em um contexto onde a transição para uma economia mais verde é essencial, adotar sistemas fotovoltaicos possibilita que consumidores residenciais e empresariais participem ativamente na redução de sua pegada de carbono, ao mesmo tempo em que incentivam a expansão de uma infraestrutura energética mais sustentável.

Outro ponto relevante é o avanço tecnológico que tem tornado a energia solar mais acessível. Hoje, os custos dos módulos fotovoltaicos e dos inversores são significativamente mais baixos do que há alguns anos, o que, aliado a possíveis incentivos e linhas de financiamento, favorece um retorno de investimento mais rápido e atrativo. Assim, a energia fotovoltaica não só representa economia e sustentabilidade, mas também um ativo de valorização para o imóvel, agregando valor financeiro a longo prazo. Com esses benefícios, a adoção de sistemas fotovoltaicos é cada vez mais estratégica para consumidores que buscam independência energética e alinhamento com práticas sustentáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho aborda a energia solar fotovoltaica e suas aplicações em sistemas conectados à rede (*on-grid*). A energia solar, fonte limpa e renovável, tem ganhado popularidade globalmente por seu potencial de reduzir custos e impactos ambientais. Desde a descoberta do efeito fotovoltaico, que possibilita a conversão direta de luz solar em eletricidade, a tecnologia fotovoltaica vem evoluindo rapidamente, impulsionando a implementação de sistemas residenciais e comerciais para geração distribuída.

2.1 Energia Solar

A energia solar é uma fonte renovável amplamente estudada por sua capacidade de reduzir o impacto ambiental da geração elétrica e proporcionar autonomia energética. Segundo Pereira e Lima (2019), a energia solar é uma das fontes mais promissoras no Brasil, devido à alta incidência solar que o país possui durante o ano todo. Este recurso é captado por tecnologias fotovoltaicas que convertem diretamente a luz solar em eletricidade, processo que, segundo Boyle (2012), representa uma das formas mais eficientes e sustentáveis de geração distribuída.

No Brasil, a energia solar vem se expandindo rapidamente graças às políticas de incentivo e regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que facilitaram a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (*on-grid*). Para Silva e Martins (2021), o acesso a essas tecnologias, aliado ao potencial solar brasileiro, permite que residências e empresas reduzam seus custos com eletricidade e contribuam para uma matriz energética mais limpa. O sistema fotovoltaico tem se mostrado uma alternativa vantajosa em comparação com outras fontes de energia renovável, especialmente pela facilidade de instalação e manutenção em áreas urbanas.

Além dos aspectos técnicos, autores como Twidell e Weir (2015) destacam os benefícios econômicos e ambientais da energia solar, que incluem a redução de emissões de gases de efeito estufa e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis. A energia solar é, assim, um recurso chave no processo de transição energética para uma economia de baixo carbono, e seu uso se torna cada vez mais relevante tanto para o desenvolvimento sustentável quanto para a autossuficiência energética.

2.2 Origem Da Energia Solar

A origem do uso da energia solar remonta a milhares de anos, quando as civilizações antigas já aproveitavam a luz do sol para aquecer e iluminar seus ambientes. Contudo, foi apenas no século XIX que o potencial da energia solar para geração elétrica começou a ser explorado cientificamente. Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, foi o primeiro a observar o efeito fotovoltaico, fenômeno pelo qual certos materiais semicondutores podem converter luz em eletricidade, estabelecendo as bases da tecnologia solar. Essa descoberta, como descrito por Perlin (2013), marcou o início do desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos modernos.

O avanço na pesquisa sobre energia solar continuou no século XX, impulsionado pelo trabalho de cientistas e engenheiros, como os pesquisadores do Bell Labs, que desenvolveram a primeira célula solar de silício em 1954. Segundo *Green* (1982), esse avanço permitiu que a tecnologia fotovoltaica fosse utilizada em programas espaciais, onde a independência energética era crucial, especialmente em satélites. Já no final do século XX, a crise do petróleo despertou interesse global por fontes alternativas, e a energia solar começou a ganhar mais espaço em aplicações comerciais e residenciais.

Com o passar dos anos, as melhorias tecnológicas e a redução dos custos tornaram a energia solar uma solução viável e acessível. Para Perlin (2013), a história da energia solar é marcada por uma busca constante pela autossuficiência energética e pela redução do impacto ambiental. Atualmente, a energia solar ocupa um lugar central no debate sobre sustentabilidade e representa um dos recursos mais promissores para a transição energética global.

2.3 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o fenômeno fundamental que permite a conversão de luz solar em eletricidade, e foi descoberto pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839. Durante seus experimentos, Becquerel observou que ao expor certos materiais à luz, uma corrente elétrica era gerada. Essa descoberta inicial foi essencial para o desenvolvimento de tecnologias solares e abriu caminho para o estudo da energia solar como uma fonte de eletricidade viável (Perlin, 2013).

O entendimento do efeito fotovoltaico avançou consideravelmente ao longo do século XX, especialmente com a contribuição de Albert Einstein, que explicou o efeito fotoelétrico em 1905, trabalho pelo qual recebeu o Prêmio Nobel em 1921. Einstein demonstrou que a luz é composta de partículas (fótons) e que a energia dos fótons pode ser transferida aos elétrons,

liberando-os de seus átomos. Esse insight tornou-se a base da moderna tecnologia de células fotovoltaicas, e, conforme descrito por *Green* (1982), permitiu que a teoria fosse aplicada na criação de células de silício, usadas até hoje em módulos solares.

Atualmente, o estudo do efeito fotovoltaico continua a evoluir com o desenvolvimento de materiais mais eficientes e de novas tecnologias, como as células de perovskita, que prometem alta eficiência a custos mais baixos (Zhou et al., 2021). Pesquisas contemporâneas também se concentram em melhorar a durabilidade e eficiência das células fotovoltaicas tradicionais, buscando otimizar a captação e conversão de energia para alcançar maior competitividade no mercado energético. Segundo *Boyle* (2012), o aprimoramento contínuo do entendimento e da aplicação do efeito fotovoltaico é essencial para tornar a energia solar mais acessível e eficiente, posicionando-a como uma peça-chave na transição para fontes de energia renovável.

2.4 Módulos Solares

Os módulos solares, também conhecidos como painéis solares, são dispositivos compostos por várias células fotovoltaicas conectadas, projetados para captar a luz solar e convertê-la em eletricidade. Eles representam a unidade básica dos sistemas solares fotovoltaicos, sendo responsáveis por gerar eletricidade de forma eficiente e sustentável. Nos últimos anos, os módulos solares passaram por avanços tecnológicos significativos, melhorando em durabilidade, eficiência e custo-benefício, o que tem ampliado sua adoção em sistemas residenciais, comerciais e industriais (Boyle, 2012; Twidell & Weir, 2015).

2.4.1 Células Fotovoltaicas de Silício: Monocristalino e Policristalino

As células fotovoltaicas de silício são as mais utilizadas em sistemas solares devido à sua confiabilidade e eficiência. Elas se dividem em duas categorias principais: monocristalino e policristalino, cada uma com características específicas que influenciam a escolha para diferentes aplicações.

2.4.2 Células de Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino são produzidas a partir de um único cristal de silício, o que resulta em uma estrutura mais pura e ordenada. Essa organização permite uma movimentação mais eficiente dos elétrons dentro do material, aumentando a eficiência de conversão da luz solar em eletricidade. Em geral, as células monocristalinas possuem eficiência superior a 20%, tornando-as ideais para áreas onde o espaço é limitado e onde se busca obter o máximo de geração de energia em uma área reduzida (Green, 1982). No entanto, o processo de fabricação dessas células é mais complexo e caro, o que eleva seu custo, mas também garante maior durabilidade e desempenho em condições de pouca luz.

2.4.3 Células de Silício Policristalino

Já as células de silício policristalino são feitas a partir de múltiplos cristais de silício, o que gera uma estrutura menos organizada. Esse tipo de célula é mais fácil e rápido de produzir, resultando em um custo menor. A eficiência das células policristalinas é geralmente um pouco menor do que as de monocristalino, situando-se entre 15% e 18%, mas ainda oferece um bom desempenho para a maioria dos sistemas residenciais e comerciais (Twidell & Weir, 2015). Devido ao seu custo mais acessível, as células policristalinas são amplamente utilizadas em projetos onde o espaço não é uma limitação e o orçamento é um fator importante.

2.4.4 Componentes de um Módulo Solar

Células Fotovoltaicas: São o componente ativo do módulo, responsáveis pela conversão da luz solar em eletricidade. A eficiência das células, que pode variar entre monocristalinas e policristalinas, é determinante para a produção energética do módulo como um todo.

Vidro de Proteção: A camada de vidro que cobre o módulo solar protege as células fotovoltaicas contra impactos e intempéries, como granizo e poeira. O vidro é temperado e tratado para ser antirreflexo, maximizando a quantidade de luz que atinge as células, o que ajuda a aumentar a eficiência do módulo.

Encapsulante (EVA): O encapsulante, geralmente feito de um material plástico chamado EVA (acetato-vinílico de etileno), envolve as células fotovoltaicas, isolando-as contra

umidade e impactos mecânicos. Ele garante a integridade estrutural do módulo ao longo do tempo, protegendo as células e mantendo sua posição.

Moldura de Alumínio: A moldura, que circunda o módulo solar, oferece rigidez e facilita a instalação dos painéis em diferentes superfícies, como telhados e suportes no solo. Essa moldura é resistente à corrosão, o que prolonga a vida útil do módulo.

Camada Traseira (*Backsheet*): A camada traseira é uma barreira protetora na parte inferior do módulo, que protege contra umidade e agentes ambientais. Ela também oferece isolamento elétrico, garantindo que o módulo opere de forma segura.

Caixa de Junção: Localizada na parte traseira do módulo, a caixa de junção contém as conexões elétricas e os diodos de *bypass*, que protegem o módulo contra sombreamento parcial e permitem a conexão com outros módulos em série ou paralelo.

Os módulos solares modernos são projetados para suportar condições adversas e apresentam alta durabilidade, com uma vida útil que pode ultrapassar os 25 anos. O avanço desses componentes, especialmente das células fotovoltaicas e dos encapsulantes, tem permitido que a tecnologia solar se torne uma opção cada vez mais atrativa para consumidores em todo o mundo (Green, 1982; Perlin, 2013).

2.5 Inversores Solares

O inversor solar é um dos componentes mais importantes de um sistema fotovoltaico, pois é responsável por converter a energia gerada pelos módulos solares em uma forma que possa ser utilizada na rede elétrica ou nos equipamentos domésticos. Os módulos solares produzem eletricidade em corrente contínua (CC), que precisa ser transformada em corrente alternada (CA) para que possa ser compatível com os padrões das redes elétricas convencionais. Nos últimos anos, os inversores passaram por avanços tecnológicos significativos, tornando-se mais eficientes e com maior capacidade de monitoramento e integração com redes inteligentes (Twidell & Weir, 2015; Hansen, 2018).

2.5.1 Funcionamento Do Inversor Solar

O funcionamento de um inversor solar começa com a recepção da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente contínua (CC). Dentro do inversor, circuitos eletrônicos específicos convertem essa corrente contínua em corrente alternada (CA) por meio de um processo chamado modulação por largura de pulso (PWM). Esse processo transforma a onda

de corrente contínua em uma onda de corrente alternada, que passa a oscilar para se alinhar com os padrões da rede elétrica, geralmente a 60 Hz e 220 V no Brasil. Essa conversão é essencial para que a energia possa ser consumida diretamente nos equipamentos domésticos ou injetada na rede elétrica (Boyle, 2012).

Além da conversão de energia, os inversores modernos também desempenham funções de monitoramento e proteção do sistema. Eles são capazes de ajustar automaticamente sua operação para otimizar a geração de energia, monitorando constantemente fatores como tensão e frequência para garantir que a energia injetada na rede seja compatível com os requisitos de segurança. Outra função essencial dos inversores é a proteção contra "ilhamento", que desliga o sistema em caso de queda de energia na rede, evitando riscos para os técnicos de manutenção e para a própria rede elétrica (Green, 2020).

Esses avanços nos inversores solares, como a inclusão de sistemas de monitoramento remoto, permitem que o proprietário do sistema acompanhe em tempo real a produção de energia e o desempenho dos módulos, otimizando o uso de energia e contribuindo para a eficiência geral do sistema. Inversores híbridos e microinversores são inovações recentes que permitem maior flexibilidade e adaptabilidade para diferentes tipos de instalações solares, oferecendo alternativas com alto desempenho em diferentes ambientes (Hansen, 2018).

2.5.2 Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI)

O Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) é um parâmetro chave para calcular a relação entre a potência do sistema fotovoltaico e a capacidade do inversor. Esse fator é definido pela razão entre a potência nominal do inversor e a potência total instalada dos módulos solares. A fórmula é:

$$\text{FDI} = \frac{\text{Potência Total dos Módulos}}{\text{Potência Nominal do Inversor}}$$

No caso de um sistema com 7,02 kW de módulos solares e um inversor de 6 kW, o FDI seria calculado como:

$$\text{FDI} = \frac{7,02 \text{ kW}}{6 \text{ kW}} = 1,17$$

Esse valor indica que o inversor foi dimensionado para operar com uma capacidade um pouco menor que a potência dos módulos, uma escolha estratégica para maximizar o tempo de

operação próxima ao ponto ótimo, garantindo mais eficiência ao longo do dia. Estudos e práticas de campo indicam que FDI's entre 0,8 e 1,3 são ideais para sistemas residenciais e comerciais, pois equilibram o custo do equipamento com a produção energética (Dunlop, 2012; Fraunhofer ISE, 2021). Com um FDI de 1,17, o sistema está configurado para capturar a maior parte da produção dos módulos, considerando que raramente operarão em sua capacidade máxima devido a fatores climáticos, ângulo de incidência solar e temperatura.

2.5.3 Capacidade de Sobrecarga (*Overload*)

Outro conceito relevante ao projetar sistemas solares é a capacidade de sobrecarga ou *overload* do inversor. Esse termo define a margem extra de potência que o inversor pode suportar acima de sua potência nominal por curtos períodos, permitindo ao sistema lidar com picos de geração ou demanda sem desconexão ou redução forçada da potência.

Para o inversor de 6 kW com *overload* de 1,7, ele é capaz de operar momentaneamente até uma potência máxima de:

$$6 \text{ kW} \times 1,7 = 10,2 \text{ kW}$$

Essa característica é muito útil em sistemas que lidam com variações rápidas de geração, como em dias parcialmente nublados, quando a irradiância aumenta subitamente após o afastamento das nuvens, gerando picos de potência. A capacidade de *overload* permite que o inversor mantenha a estabilidade nesses momentos, mas essa é uma condição temporária; operar constantemente nessa faixa pode reduzir a vida útil do equipamento, devido ao maior aquecimento dos componentes.

Uma margem de sobrecarga de 1,7 indica que o inversor foi projetado para suportar oscilações momentâneas que superem sua capacidade nominal sem falhas. Para projetistas e engenheiros, essa especificação é essencial ao escolher o inversor em ambientes com flutuações frequentes de geração e demanda (Kim et al., 2018; Solar Energy Institute, 2020).

2.5.4 Entradas MPPT (Maximum Power Point Tracking)

A tecnologia MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) é fundamental para o desempenho dos inversores modernos, pois permite maximizar a energia extraída dos módulos solares em tempo real. Cada entrada MPPT possibilita ao inversor ajustar a tensão e corrente para encontrar o ponto de potência máxima de um grupo de módulos solares (chamado de "*string*"). Em um sistema com condições variáveis, como diferentes ângulos de instalação ou sombreamento parcial, entradas MPPT independentes tornam-se essenciais para garantir o máximo aproveitamento energético.

Imagine, por exemplo, que um sistema tenha dois *strings* de módulos solares: um deles recebe mais sombreamento durante a manhã, enquanto o outro é afetado apenas à tarde. Com múltiplas entradas MPPT, o inversor consegue ajustar cada *string* independentemente para obter a máxima potência de cada grupo, mesmo com diferentes condições de irradiância. Isso resulta em um aumento significativo na eficiência do sistema, uma vez que cada *string* contribui com a potência máxima que pode gerar.

A presença de múltiplas entradas MPPT é particularmente vantajosa para sistemas instalados em telhados complexos ou em terrenos com variações de inclinação e orientação, sendo recomendada para sistemas com sombreamento parcial ou configurações complexas (Luque & Hegedus, 2011; NREL, 2019).

2.6 Cenário e Normas da Geração Distribuída

O cenário da geração distribuída (GD) no Brasil vem evoluindo rapidamente, com regulamentações cada vez mais específicas para garantir segurança e eficiência ao setor. A GD permite que consumidores gerem sua própria energia por meio de fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica, e injete o excedente na rede elétrica, compensando o consumo futuro. Este modelo é vantajoso tanto para residências quanto para empresas, reduzindo custos de energia e incentivando o uso de fontes sustentáveis. O crescimento da GD no Brasil se deu especialmente após a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, posteriormente atualizada pela RN nº 687/2015 e mais recentemente pela Lei nº 14.300/2022, conhecida como o Marco Legal da Geração Distribuída (Silva & Martins, 2021).

A Lei nº 14.300/2022 é um marco importante para o setor, pois estabelece uma transição gradual para as novas regras de compensação de energia. A partir de 2023, os novos sistemas de geração distribuída devem contribuir para os custos de distribuição e transmissão de energia,

o que foi uma mudança significativa em relação ao modelo anterior, onde os consumidores de GD eram isentos de grande parte desses encargos. Esse novo modelo busca manter o equilíbrio financeiro das distribuidoras de energia, garantindo que o crescimento da GD não sobrecarregue a rede elétrica nem imponha custos adicionais para consumidores que não utilizam geração própria (Oliveira, 2022).

Outro avanço importante veio com a Resolução Normativa nº 1.098/2024 da ANEEL, que atualizou aspectos técnicos e de segurança para a conexão dos sistemas de GD à rede elétrica. Esta resolução inclui regras para análise de fluxo de energia e processos simplificados para a conexão de sistemas de micro e minigeração distribuída, principalmente em casos de autoconsumo. Agora, consumidores que geram sua própria energia de forma instantânea, sem injetar na rede (sistemas grid zero), têm um processo de conexão ainda mais ágil e com menos exigências técnicas (Pereira & Lima, 2023). A RN nº 1.098 também introduz exigências de transparência para que os estudos de impacto sobre a rede sejam compreensíveis e acessíveis aos consumidores.

O sistema de compensação de energia, que permite que os consumidores gerem créditos na rede com o excedente produzido, continua sendo o pilar da GD. No entanto, para novos sistemas, as normas exigem a inclusão gradual de encargos para garantir a sustentabilidade econômica do setor. Como descrito por Santos e Alves (2023), essa mudança visa equilibrar os benefícios da geração distribuída com a manutenção e operação da rede elétrica, promovendo um crescimento sustentável e justo para todos os envolvidos.

Essas mudanças normativas têm impulsionado o desenvolvimento do setor de geração distribuída no Brasil, criando um ambiente regulatório mais sólido e atraente tanto para consumidores quanto para investidores. A GD, que já mostrou seu potencial para reduzir a dependência de fontes fósseis, agora segue com um direcionamento ainda mais integrado e estruturado para contribuir com a sustentabilidade da matriz energética brasileira.

2.7 Sistema de Tarifação da Geração Distribuída

O sistema de tarifação da Geração Distribuída (GD) no Brasil tem passado por diversas atualizações com o intuito de promover um modelo mais justo e equilibrado para os consumidores que produzem sua própria energia e para as distribuidoras. As mudanças mais recentes, implementadas pela Lei nº 14.300/2022 e a Resolução Normativa nº 1.098/2024 da ANEEL, estabelecem novos critérios para compensação de energia e tarifas, além de exigirem contribuições proporcionais dos usuários de GD para os custos de operação e manutenção da

rede elétrica. A RGE (Rio Grande Energia), concessionária que atende o estado do Rio Grande do Sul, já aplica essas novas diretrizes, incluindo encargos como o ICMS sobre o uso do sistema de distribuição e a taxaço gradual do Fio B, que representa os custos com a rede de distribuição local (Pereira & Souza, 2023).

2.7.1 Modelo de Compensação de Energia e ICMS

O sistema de compensação de energia permite que a energia excedente gerada pelos sistemas de GD seja injetada na rede elétrica, gerando créditos para o consumidor. Esses créditos podem ser utilizados em períodos subsequentes, proporcionando economia na conta de luz. Com a introdução das novas regras, o ICMS voltou a ser cobrado sobre as tarifas de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e de Transmissão (TUST), afetando diretamente os consumidores de GD. A RGE implementa essa cobrança em conformidade com a Lei Complementar nº 194/2022, que estabelece o ICMS como parte essencial para cobrir os custos da operação interna e limita sua alíquota máxima.

2.7.2 Taxação do Fio B

A Lei nº 14.300/2022 também introduziu a cobrança progressiva do Fio B para consumidores de GD que aderiram ao sistema a partir de 2023. Essa taxa representa os custos do uso da rede de distribuição e será aplicada gradativamente, partindo de 15% do valor da TUSD Fio B em 2023 e aumentando até 90% em 2028. Essa cobrança incide somente sobre a energia injetada na rede e não sobre a energia consumida instantaneamente, permitindo que os consumidores continuem economizando ao produzir sua própria energia. Para aqueles que se conectaram até julho de 2023, o valor de 90% será congelado até 2028, garantindo um período de adaptação ao novo modelo tarifário (Silva & Oliveira, 2022).

2.7.3 Atualizações pela Resolução Normativa nº 1.098/2024

A Resolução Normativa nº 1.098/2024, recentemente publicada pela ANEEL, trouxe avanços importantes para facilitar o acesso e promover transparência na geração distribuída. Esta resolução atualiza a RN nº 1.000/2021 e estabelece novos critérios técnicos e operacionais para o autoconsumo e conexão de sistemas GD. Alguns dos principais pontos incluem:

Definição de Autoconsumo Local: Agora, o autoconsumo local é caracterizado pela titularidade de uma pessoa física ou jurídica, com instalação de micro ou minigeração no mesmo local da carga e a compensação integral dos créditos gerados.

Dispensa de Análise de Inversão de Fluxo: A análise de inversão de fluxo é dispensada para sistemas que não injetam energia na rede (grid zero) ou para aqueles que produzem energia instantânea suficiente para o consumo próprio. Esta dispensa facilita o processo de conexão para pequenos consumidores e autoconsumo local até 7,5 kW.

Transparência nos Estudos de Inversão de Fluxo: A resolução exige que os estudos de inversão de fluxo sejam disponibilizados de forma completa e compreensível para os consumidores, permitindo um acesso mais claro às informações e facilitando a tomada de decisão.

Inclusão no Orçamento de Conexão: Os estudos de inversão de fluxo devem agora ser incluídos no orçamento de conexão emitido pela concessionária, como forma de garantir que o consumidor tenha acesso a todas as informações necessárias antes de realizar a instalação.

Essas alterações facilitam o processo de conexão para sistemas de geração distribuída, especialmente para consumidores de pequeno porte, e aumentam a transparência nas interações com as distribuidoras, promovendo um crescimento sustentável do setor. Segundo Santos (2023), o novo modelo tarifário busca um equilíbrio entre os benefícios da GD e a necessidade de manutenção e investimento na infraestrutura elétrica, assegurando que todos os consumidores contribuam de maneira justa para o sistema.

2.8 Etapas de um Projeto Fotovoltaico

A execução de um projeto fotovoltaico bem-sucedido passa por uma série de etapas coordenadas, desde a primeira proposta ao cliente até a inspeção final pela concessionária. Cada uma dessas etapas é essencial para garantir a viabilidade técnica e econômica do sistema, além de assegurar a conformidade com as normas regulatórias. Na tabela 1, apresenta-se essas etapas de forma organizada:

Tabela 1: Demonstrativo das etapas de tratativa com o cliente.

Etapa	Descrição
1. Proposta ao Cliente	Inicia-se com uma proposta personalizada, baseada nos dados de consumo dos últimos 12/13 meses. Esta análise permite calcular o consumo médio mensal, essencial para o dimensionamento adequado do sistema. Durante a proposta, discute-se com o cliente a possibilidade de dimensionar uma margem adicional de geração para atender a possíveis aumentos de consumo no futuro ou a opção de instalar um inversor de maior capacidade para futuras expansões. Isso permite que o sistema seja flexível e atenda às necessidades futuras sem novas instalações significativas.
2. Visita Técnica	Após a aprovação inicial da proposta, uma visita técnica é realizada para validar a viabilidade do projeto no local de instalação. Nessa etapa, são analisadas as condições estruturais do telhado ou da área disponível, como espaço, orientação e inclinação. Além disso, avalia-se o padrão de entrada de energia da unidade para verificar se está de acordo com as normas da concessionária local. Essa verificação é essencial para garantir a segurança e a conformidade do sistema com as exigências da rede elétrica.
3. Contrato de Venda	Com os detalhes técnicos definidos e as condições aprovadas pelo cliente, um contrato de venda é formalizado. Este contrato especifica o escopo do projeto, incluindo os itens que serão instalados, o cronograma de execução, o valor total e as condições de pagamento. A formalização do contrato assegura que todos os aspectos do projeto estejam claros para ambas as partes, permitindo que o desenvolvimento siga conforme o planejado.
4. Homologação do Projeto	O projeto técnico é enviado à concessionária para homologação, garantindo que o sistema fotovoltaico cumpra todas as exigências técnicas e

	regulamentares. A concessionária avalia o projeto e verifica se os requisitos de segurança e compatibilidade com a rede elétrica são atendidos. A homologação é uma etapa fundamental para assegurar que o sistema possa ser integrado à rede pública de forma segura e legal.
5. Instalação do Projeto	Após a homologação pela concessionária, inicia-se a instalação do sistema fotovoltaico, incluindo módulos solares, inversores e cabeamento. Todo o processo é realizado conforme as especificações do projeto, visando garantir a eficiência e segurança do sistema. A instalação deve seguir rigorosamente os padrões técnicos para evitar problemas futuros e otimizar o desempenho do sistema.
6. Inspeção da Concessionária	Finalizada a instalação, a concessionária realiza uma inspeção para garantir que o sistema foi instalado de acordo com o projeto homologado. Nessa etapa, é feito o ajuste final, incluindo a troca do medidor por um bidirecional, que registra tanto a energia consumida quanto a energia injetada na rede. Com a aprovação final, o sistema é autorizado a operar oficialmente, permitindo ao cliente aproveitar os benefícios da geração de energia própria e da compensação de créditos na conta de luz.

Fonte: Autor (2024).

Essas etapas são fundamentais para garantir que o projeto fotovoltaico seja desenvolvido com alta qualidade e em conformidade com as normas técnicas e regulatórias, maximizando os benefícios para o cliente e garantindo a segurança da instalação.

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento de um projeto fotovoltaico é o momento em que o planejamento inicial se torna realidade, com etapas essenciais para garantir um sistema eficiente e seguro. Esse processo começa com a análise do consumo energético e do local de instalação, passa pelo dimensionamento dos componentes e segue até a instalação e aprovação junto à concessionária. Cada fase é realizada com cuidado para que o sistema atenda às necessidades do cliente, gerando energia de forma confiável e econômica. O objetivo é sempre buscar a melhor solução para o cliente, garantindo sustentabilidade e economia.

3.1 Coleta de Dados e Análise de Viabilidade

A etapa de coleta de dados e análise de viabilidade é fundamental para o desenvolvimento de um projeto fotovoltaico eficaz e ajustado às necessidades do cliente. Nessa fase, foi utilizado o histórico de consumo dos últimos 13 meses, fornecido pela concessionária RGE, para calcular uma média de consumo que servirá como base para o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Este levantamento não apenas considera a demanda atual de energia, mas também é ajustado para incluir uma margem de geração adicional, a pedido do cliente, que deseja garantir uma produção excedente de 25%. Esse cuidado com a análise detalhada ajuda a alinhar o projeto à expectativa de economia e autonomia energética do cliente, além de preparar o sistema para futuras expansões.

O histórico de consumo coletado do cliente para os últimos 13 meses mostra variações sazonais típicas e picos de demanda nos meses de verão, quando o uso de aparelhos de ar-condicionado aumenta significativamente. Abaixo, estão os valores de consumo por mês:

Tabela 2: Demonstrativo do consumo mensal do cliente.

Mês	Consumo (kWh)
Mai 23	477
Jun 23	391
Jul 23	441
Ago 23	360
Set 23	456
Out 23	431
Nov 23	477
Dez 23	655
Jan 24	624
Fev 24	878
Mar 24	1076

Abr 24	667
Mai 24	435

Fonte: Autor (2024).

Com base nesses dados, a média de consumo mensal foi calculada em aproximadamente 556 kWh. Esse valor servirá como a referência inicial para o dimensionamento do sistema, garantindo que ele seja dimensionado para cobrir, de forma consistente, o consumo médio anual.

Para atender ao pedido do cliente de incluir uma sobra de geração de 25%, ajustasse o dimensionamento para produzir cerca de 695 kWh de média por mês ao longo do ano. Esse valor excedente permite que o sistema continue suprimindo a demanda do cliente mesmo em períodos de aumento de consumo, seja por novas cargas ou pelo uso mais intenso de aparelhos elétricos. Essa margem extra não apenas proporciona maior tranquilidade ao cliente, mas também pode gerar créditos na rede durante os meses de menor consumo, o que contribui para uma economia ainda maior na conta de luz.

Atendendo à solicitação do cliente para considerar uma possibilidade de expansão futura, opta por um inversor com uma capacidade levemente superior ao exigido para o consumo atual. Isso significa que o inversor escolhido permite uma ampliação mínima sem necessidade de substituição, ideal para o caso de o cliente adicionar novos equipamentos elétricos no futuro. Esse planejamento prévio oferece flexibilidade e evita custos adicionais de troca de componentes, permitindo que o sistema acompanhe o crescimento gradual da demanda de forma prática e econômica.

3.2 Análise para Implantação da Usina Fotovoltaica

A implantação de uma usina fotovoltaica exige uma análise detalhada para assegurar que o sistema esteja em conformidade com as normas técnicas e regulatórias. No caso deste projeto, que foi instalado antes da Resolução Normativa nº 1.098/2024, segue-se as diretrizes da Resolução Normativa nº 482/2012 e sua atualização pela RN nº 687/2015, além do Marco Legal da Geração Distribuída pela Lei nº 14.300/2022.

3.2.1 Conformidade com Normas Vigentes

A ANEEL, através das resoluções 482 e 687, estabelece padrões específicos para a conexão de sistemas de microgeração (até 75 kW), permitindo que o cliente injete o excedente de energia na rede e obtenha créditos para reduzir seu consumo em meses futuros. A Lei nº 14.300/2022 assegura esse direito, além de prever contribuições graduais para a manutenção da rede. Esse modelo de compensação é uma vantagem financeira e permite um retorno sustentável para o cliente (Silva & Almeida, 2022).

3.2.2 Padrão de Entrada e Conexão On-Grid

O projeto segue o padrão de entrada GED 13 estabelecido pela RGE, utilizando o Tipo A4 (monofásico de 63A). Esse padrão permite uma conexão direta e simplificada à rede elétrica pública, facilitando a integração com a infraestrutura da concessionária. Ao atender a esses requisitos, o sistema evita a necessidade de adaptações, garantindo segurança e confiabilidade na conexão e no fornecimento de energia ao cliente.

3.3 Análise de Área Disponível do Telhado

A análise da área disponível no telhado é essencial para planejar um sistema fotovoltaico eficiente. Para este projeto, foi utilizado drones, que permitem uma inspeção rápida, segura e precisa da superfície do telhado. Com o drone, é possível obter imagens detalhadas que nos ajudam a medir o espaço disponível, identificar obstáculos (como antenas ou chaminés) e verificar a orientação do telhado para melhor aproveitamento da luz solar.

Esse método reduz os riscos de inspeções manuais e proporciona maior transparência para o cliente, que pode ver as imagens captadas e entender como o espaço será aproveitado. A análise via drone aumenta a confiança do cliente no projeto e garante que cada módulo solar seja posicionado de forma a maximizar a eficiência e a economia de energia.

3.4 Irradiação Solar Média

A irradiação solar média é um fator essencial no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, pois define a quantidade de energia solar que atinge a superfície ao longo do ano e permite prever a produção de energia do sistema. Para determinar a irradiação solar do local de instalação, utilizou-se o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo

Brito (CRESESB), uma fonte confiável para dados de radiação solar em diversas regiões do Brasil.

Com base nas coordenadas latitude -29.340215 e longitude -53.094824, foram obtidos dados específicos de irradiação solar para a área de estudo. O CRESESB fornece informações mensais detalhadas de irradiação, permitindo que o sistema fotovoltaico seja dimensionado de acordo com o potencial solar do local. A tabela 3, apresenta a média diária de irradiação solar por mês (kWh/m²) para a região analisada:

Tabela 3: - Irradiação solar média mensal em Arroio do Tigre.

Mês	Irradiação Média Diária (kWh/m ²)
Janeiro	5,84
Fevereiro	5,76
Março	5,35
Abril	4,59
Mai	4,03
Junho	3,60
Julho	3,81
Agosto	4,54
Setembro	5,11
Outubro	5,42
Novembro	5,63
Dezembro	5,79

Fonte: CRESESB, 2024.

O cálculo da irradiação média anual do local é realizado somando as médias mensais e dividindo o total pelo número de meses. Dessa forma, chega-se à seguinte estimativa:

$$\begin{aligned}
 &\text{Irradiação Média Anual} \\
 &= \frac{5,84 + 5,76 + 5,35 + 4,59 + 4,03 + 3,60 + 3,81 + 4,54 + 5,11 + 5,42 + 5,63 + 5,79}{12} \\
 &= 4,92 \text{ kWh/m}^2
 \end{aligned}$$

Esse valor, 4,92 kWh/m², representa a média diária anual de irradiação solar, fornecendo uma base para calcular a produção anual de energia do sistema. Durante os meses de verão, como dezembro e janeiro, a irradiação solar é mais alta, o que eleva a produção de energia. Já nos meses de inverno, como junho e julho, a irradiação é menor, porém o sistema pode ser dimensionado para compensar essas variações sazonais, assegurando um fornecimento consistente ao longo do ano.

Esses dados são fundamentais para prever a quantidade de energia que o sistema fotovoltaico poderá gerar e garantir que ele atenderá às necessidades energéticas do cliente. Com a irradiação média anual calculada, é possível determinar o número de módulos necessários e ajustar o sistema para a produção ideal, maximizando a eficiência e os benefícios econômicos.

Para acessar esses dados diretamente no CRESESB, os passos são:

- 1) Acesse o site do CRESESB (<https://cresebsb.cepel.br/sundata/index.php>).
- 2) Vá para a seção "Potencial Energético" e clique em "Potencial Solar".
- 3) Insira as coordenadas latitude -29.340215 e longitude -53.094824.
- 4) Selecione a localidade mais próxima indicada pelo sistema.
- 5) Visualize os valores de irradiação solar média diária para cada mês do ano.

Esse levantamento da irradiação solar média é uma prática essencial para o planejamento de sistemas fotovoltaicos, assegurando que o sistema seja dimensionado para maximizar o aproveitamento solar e oferecer um retorno sustentável ao investimento do cliente.

3.5 Ângulo dos Módulos e Orientação

O ângulo e a orientação dos módulos solares são fatores críticos para maximizar a eficiência de um sistema fotovoltaico, pois influenciam diretamente a quantidade de radiação solar que cada módulo pode captar ao longo do dia e das estações do ano. Para garantir a precisão no posicionamento dos módulos, realizou uma análise detalhada do telhado com o uso de um drone e do software PIX4D, que processou as imagens e forneceu dados exatos sobre o espaço disponível, a orientação e o ângulo de inclinação.

3.5.1 Análise com Drone e Definição dos Parâmetros de Instalação

O levantamento realizado revelou que o telhado possui duas águas com orientações leste e oeste, apresentando um ângulo de inclinação natural de 21°. Essa inclinação foi avaliada como adequada para a captação de radiação solar, especialmente considerando as coordenadas geográficas do projeto. Segundo estudos de dimensionamento, um ângulo próximo de 20° permite uma captação de luz solar eficiente em regiões de baixa latitude, maximizando a produção de energia durante o ano.

3.5.2 Orientação Leste-Oeste: Distribuição da Captação Solar

A orientação leste-oeste foi escolhida para proporcionar uma geração de energia distribuída ao longo do dia. Módulos voltados para o leste captam mais luz solar pela manhã, enquanto aqueles voltados para o oeste maximizam a captação no período da tarde. Embora uma orientação ao norte seja ideal para o pico máximo de produção no hemisfério sul, a disposição leste-oeste foi considerada mais vantajosa para este projeto, pois suaviza a curva de geração, oferecendo uma produção de energia mais constante e alinhada aos horários de consumo do cliente. Isso reduz a dependência de armazenamento e garante maior eficiência do sistema em horários críticos.

3.5.3 Vantagens do Ângulo de Inclinação de 21°

O ângulo de 21°, conforme identificado pelo PIX4D, é adequado para a captação solar ao longo do ano, com especial desempenho nos meses de maior insolação. Esse ângulo permite que a superfície dos módulos seja autolimpante, já que a inclinação facilita o escoamento da água da chuva, evitando o acúmulo de sujeira, poeira e resíduos. Estudos técnicos apontam que essa autolimpeza é fundamental para manter a eficiência dos módulos ao longo do tempo, reduzindo a necessidade de intervenções de manutenção.

3.6 Análise de Geração e Consumo de Energia Residencial

A usina tem em seu projeto atender ao consumo elétrico anual da casa, gerando em média 695 kWh por mês. Essa produção é suficiente para suprir a demanda da residência, cuja média mensal de consumo também é próxima a esse valor, mas apresenta variações sazonais.

Nota-se que os meses de maior consumo são fevereiro e março, com valores que excedem a produção média mensal esperada. Já os meses de menor consumo são junho e julho, períodos em que o consumo fica bem abaixo da média de geração, o que poderá resultar em créditos de energia que podem ser usados para compensar os períodos de consumo mais elevado.

Com base nos cálculos apresentados anteriormente, tem-se a definição da necessidade de 12 módulos fotovoltaicos de 585W para suprir a demanda de energia apresentada pela residência. Assim, os dados da unidade foram lançados em um software chamado PVSOL para realizar o cálculo de geração estimado ao longo dos meses do ano. A Figura 1 apresenta a

definição e o posicionamento dos módulos fotovoltaicos orientados para o leste, enquanto a Figura 2 exibe os módulos orientados para o oeste, demonstrando a distribuição de captação de energia em diferentes períodos do dia.

Figura 1 – Software PVSOL com a definição dos módulos posicionados a leste.

The screenshot shows the PVSOL software interface for configuring a photovoltaic system. The 'Fabricante' (Manufacturer) is set to 'DAH Solar' and the 'Módulo fotovoltaico' (Photovoltaic module) is 'DHN-72X16/DG/FS-585W'. There are checkboxes for 'Seleção somente dos favoritos', 'Photo Plan - Previsão fotográfica da cobertura do telhado', and 'Ocupação gráfica'. The 'Número de módulos' (Number of modules) is 6, resulting in a total power of 3,51 kWp. The 'Situação de montagem' (Mounting situation) is 'Integrado no telhado - sem ven' (Integrated into the roof - no gutter). The 'Rastreamento' (Tracking) is set to 'Nenhum' (None). The 'Inclinação' (Tilt) is 21 degrees and the 'Orientação' (Orientation) is 90 degrees. A compass rose shows the orientation pointing East, with the text 'Azimute 90°' below it.

Fonte: Software PVSOL.

Figura 2 - Software PVSOL com a definição dos módulos posicionados a oeste.

The screenshot shows the PVSOL software interface for configuring a photovoltaic system. The 'Fabricante' (Manufacturer) is set to 'DAH Solar' and the 'Módulo fotovoltaico' (Photovoltaic module) is 'DHN-72X16/DG/FS-585W'. There are checkboxes for 'Seleção somente dos favoritos', 'Photo Plan - Previsão fotográfica da cobertura do telhado', and 'Ocupação gráfica'. The 'Número de módulos' (Number of modules) is 6, resulting in a total power of 3,51 kWp. The 'Situação de montagem' (Mounting situation) is 'Integrado no telhado - sem ven' (Integrated into the roof - no gutter). The 'Rastreamento' (Tracking) is set to 'Nenhum' (None). The 'Inclinação' (Tilt) is 21 degrees and the 'Orientação' (Orientation) is 270 degrees. A compass rose shows the orientation pointing West, with the text 'Azimute -90°' below it.

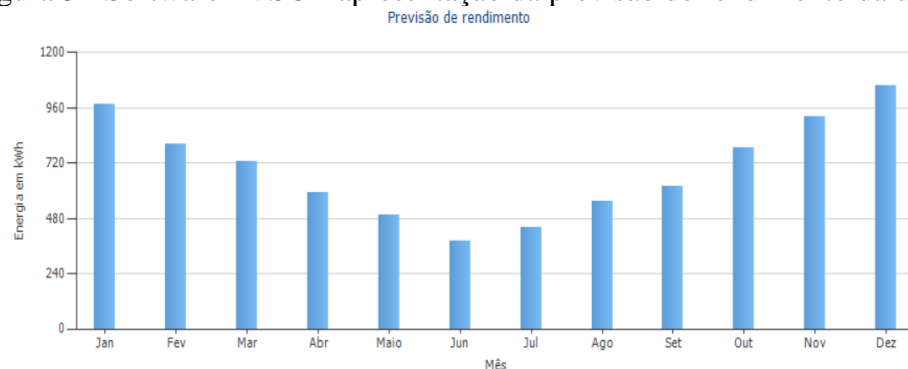
Fonte: Software PVSOL.

Com base nos dados dos módulos fotovoltaicos e do inversor inseridos na ferramenta, foi gerado um gráfico detalhado da produção de energia ao longo dos meses. Esse gráfico apresenta a média mensal de geração de energia, permitindo uma análise clara do desempenho do sistema fotovoltaico ao longo do ano. A visualização da geração mensal possibilita

identificar padrões sazonais, variações decorrentes de fatores climáticos e a eficiência geral do sistema. Essa análise é essencial para verificar se a produção de energia atende à demanda esperada e para ajustar a operação do sistema conforme necessário.

A Figura 3 ilustra a previsão de rendimento da usina gerada pelo software PVSOL, apresentando a produção mensal esperada de energia ao longo do ano. Essa visualização gráfica contribui para avaliar o desempenho projetado e identificar possíveis ajustes necessários para otimizar a geração de energia.

Figura 3 - Software PVSOL apresentação da previsão de rendimento da usina



Fonte: Software PVSOL.

Nota-se que os meses de maior consumo são fevereiro e março, com valores que excedem a produção média mensal esperada. Já os meses de menor consumo são junho e julho, períodos em que o consumo fica bem abaixo da média de geração, o que poderá resultar em créditos de energia que podem ser usados para compensar os períodos de consumo mais elevado.

Esse sistema foi planejado de modo que a geração média anual seja equilibrada em relação ao consumo, mas variações sazonais podem gerar pequenos excedentes ou déficits, que são gerenciados através do sistema de créditos de energia. Essa estratégia permite que a residência alcance uma independência energética quase total, reduzindo significativamente as despesas com eletricidade e contribuindo para a sustentabilidade.

3.7 Dimensionamento do Projeto Solar com Entradas MPPT Independentes

Para o dimensionamento deste projeto solar, foi utilizado um sistema com 12 módulos solares divididos em dois conjuntos independentes de 6 módulos em série, cada um conectado a uma entrada MPPT distinta no inversor. A configuração foi planejada para maximizar a

produção de energia, com um conjunto orientado para o leste e outro para o oeste, o que permite uma captação mais equilibrada ao longo do dia. Essa estrutura ajuda a otimizar a geração de energia, mesmo em condições variáveis de insolação, conforme destacam autores como Santos e Oliveira (2021), que recomendam o uso de entradas MPPT independentes para instalações com diferentes orientações.

3.8 Dados do Módulo e Condições de Operação

Os módulos solares foram selecionados com base nas seguintes especificações em condições padrão de teste (STC), conforme mostrados na Figura 4:

Figura 4 – Datasheet do módulo.

STC-Electrical Characteristics			
Module Type	DHN-72X16		
Maximum Power (Pmax/W)	575	580	585
Open-circuit Voltage (Voc/V)	51.2	51.4	51.6
Maximum Power Voltage (Vmp/V)	43.4	43.6	43.8
Short-circuit Current (Isc/A)	14.08	14.14	14.20
Maximum Power Current (Imp/A)	13.25	13.30	13.36
Module Efficiency (%)	22.26	22.45	22.65

Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

Temperature Coefficient

Temperature Coefficient of Isc (α Isc)	0.046%/°C
Temperature Coefficient of Voc (β Voc)	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of Pmax (γ Pmp)	-0.30%/°C

Fonte: Datasheet DAH (2024).

Para garantir que o sistema opere adequadamente em condições reais, considerando uma faixa de temperatura ambiente entre 2°C e 40°C, ajustando as tensões e correntes operacionais dos módulos com base nesses extremos.

As variações de temperatura influenciam a tensão e a corrente dos módulos, que devem ser ajustadas para garantir a segurança e a eficiência do sistema (Crestani et al., 2020).

Tensão de Circuito Aberto Máxima (Voc_max) a 2°C, com base na fórmula:

$$Voc_max = Voc \times \left(1 + \frac{(Tmin - 25) \times Voc_coef}{100} \right)$$

Onde:

Voc = 51,6 V

Tmin = 2°C

$$Voc_coef = -0,25\%/^{\circ}C$$

Resultado: $Voc_max \approx 54,66$ V por módulo.

Corrente de Curto-Circuito Máxima (Isc_max) a $40^{\circ}C$, Com a fórmula:

$$Isc_max = Isc \times \left(1 + \frac{(Tmax - 25) \times Isc_coef}{100}\right)$$

Onde:

$$Isc = 14,2 \text{ A}$$

$$Tmax = 40^{\circ}C$$

$$Isc_coef = 0,046\%/^{\circ}C$$

Resultado: $Isc_max \approx 14,30$ A por módulo.

Potência Máxima Ajustada ($Pmax_min$) a $40^{\circ}C$, Com a fórmula:

$$P\ max_min = Pmax \times \left(1 + \frac{(Tmax - 25) \times Pmax_coef}{100}\right)$$

Onde:

$$Pmax = 585 \text{ W}$$

$$Tmax = 40^{\circ}C$$

$$Pmax_coef = -0,30\%/^{\circ}C$$

Resultado: $Pmax_min \approx 558,67$ W por módulo.

Corrente de Curto-Circuito Mínima (Isc_min) a $2^{\circ}C$. Para calcular a corrente de curto-circuito em baixas temperaturas:

$$Isc_min = Isc \times \left(1 + \frac{(Tmin - 25) \times Isc_coef}{100}\right)$$

Onde:

$$Tmin = 2^{\circ}C$$

Resultado: $Isc_min \approx 14,04$ A

Esses cálculos foram fundamentados com base em equações de ajuste térmico descritas em Crestani et al. (2020) e garantem que o sistema seja dimensionado para atender a variações reais de temperatura do local de instalação.

Configuração dos Módulos e Resultados por Conjunto (6 Módulos em Série)

Cada conjunto de 6 módulos conectados em série e com sua própria entrada MPPT apresenta as seguintes características:

Tensão Total para Cada Conjunto em Série (6 Módulos):

$$V_{oc_total_max} (2^{\circ}C): 6 \times 54,66 = 327,96 V$$

$$V_{mp_total_min} (40^{\circ}C): 6 \times 41,37 = 248,22 V$$

Corrente Total para Cada Conjunto em Série:

$$I_{sc_max} (40^{\circ}C) = 14,30 A$$

$$I_{mp_max} (40^{\circ}C) = 13,46 A$$

A configuração do sistema, com dois conjuntos de 6 módulos em série conectados a entradas MPPT independentes, permite que o inversor ajuste a operação para otimizar a captação de energia em cada orientação. Essa disposição possibilita uma captação eficiente e equilibrada ao longo do dia, mesmo com as diferenças de insolação nas direções leste e oeste, proporcionando ao cliente um desempenho confiável e alinhado às condições de consumo.

Essas considerações para o dimensionamento garantem que o sistema fotovoltaico opere de forma segura e eficiente ao longo do ano, ajustando-se automaticamente às variações de temperatura e irradiância.

3.9 Dados do Inversor e análise das Condições de Operação

Para assegurar que o inversor escolhido seja adequado para o sistema, será realizada uma análise detalhada das correntes e tensões dos módulos solares, calculadas anteriormente, em relação aos parâmetros do inversor. Com base nas especificações do inversor, conforme a Figura 5, e nos valores de entrada, verifica-se se ele suporta as condições operacionais dos módulos conectados.

Figura 5 – Datasheet Inversor S6-GR1P6K-S.

Folha de Dados		S6-GR1P(2.5-6)K-S						
Modelo	2.5K	3K	3.6K	4K	4.6K	5K	6K	
Entrada CC								
Potência máxima de entrada	4.25 kW	5.1 kW	6.12 kW	6.8 kW	7.82 kW	8.5 kW	10.2 kW	
Tensão máx de entrada	550 V				550 V			
Tensão nominal	250 V				330 V			
Tensão de partida	60 V				100 V			
Intervalo de tensão MPPT	50-550 V				90-550 V			
Corrente máx de entrada				16 A / 16 A				
Corrente máx de curto-circuito				22 A / 22 A				
MPPTs / Número de Entradas				2/2				

Fonte: Datasheet SOLIS 6KW (2024).

Resumo dos Parâmetros dos Módulos

Conforme dimensionado, foram definidos dois conjuntos de 6 módulos em série, cada um conectado a uma entrada MPPT independente no inversor. Os parâmetros de cada conjunto de módulos são:

Tensão Total por Conjunto:

Voc_total_max (2°C): 327,96 V

Vmp_total_min (40°C): 248,22 V

Corrente por Conjunto:

Isc_max (40°C) = 14,30 A

Imp_max (40°C) = 13,46 A

Verificação de Compatibilidade com o Inversor

Agora, será feita a análise de cada parâmetro crítico em relação ao inversor.

Tensão Máxima de Entrada (Voc_total_max vs. Tensão Máxima do Inversor)

A tensão máxima de entrada permitida pelo inversor é de 550 V. Observa-se que:

Voc_total_max para cada conjunto = 327,96 V (menor que 550 V)

Portanto, a tensão de circuito aberto total dos módulos está dentro do limite de 550 V do inversor, garantindo que o inversor possa suportar a tensão em condições de temperatura mínima (2°C).

Intervalo de Tensão MPPT

O intervalo de operação do MPPT do inversor é de 90 V a 550 V, e a tensão nominal é 330 V. As tensões de operação dos conjuntos estão dentro desse intervalo:

Vmp_total_min (40°C) = 248,22 V (está dentro do intervalo de 90-550 V).

Assim, o sistema opera dentro do intervalo de tensão MPPT do inversor, permitindo que o MPPT ajuste a operação para maximizar a eficiência energética.

Corrente Máxima de Entrada

A corrente máxima de entrada do inversor para cada MPPT é 16 A, enquanto a corrente máxima de operação (I_{mp_max}) dos módulos é 13,46 A. Como $13,46\text{ A} < 16\text{ A}$, a corrente de entrada dos módulos em cada MPPT está dentro do limite suportado pelo inversor.

Corrente Máxima de Curto-Circuito (I_{sc_max})

O inversor suporta uma corrente de curto-circuito máxima de 22 A para cada entrada MPPT. Como o I_{sc_max} dos módulos é de 14,30 A, verifica-se que esse valor está bem abaixo do limite, assegurando que o inversor está corretamente dimensionado para suportar a corrente de curto-circuito.

Potência de Entrada e Potência Nominal

A potência de entrada máxima do inversor é 10,2 kW (CC). A potência total dos módulos, considerando o ajuste por temperatura máxima ($P_{max_min} \approx 558,67\text{ W}$ por módulo), resulta em:

$$P_{total} = 12 \times 585 = 7020\text{ W}$$

Essa potência está dentro do limite de 10,2 kW do inversor, considerando as perdas e condições de operação. Com base nesses cálculos e comparações, o inversor escolhido é adequado para os módulos conectados. Todos os parâmetros de tensão, corrente e potência dos módulos solares estão dentro dos limites operacionais do inversor, conforme a Tabela 4. A configuração com duas entradas MPPT independentes permite que o inversor ajuste a operação de cada conjunto de módulos em função da orientação (leste e oeste), maximizando a produção de energia e garantindo a segurança do sistema em todas as condições de operação.

Tabela 4: Resumo dos Resultados de Compatibilidade com o Inversor.

Parâmetro	Módulos	Inversor	Status
Tensão Máxima (Voc_total_max)	327,96 V	550 V	Compatível
Intervalo de Tensão MPPT	248,22 V - 327,96 V	90 - 550 V	Compatível
Corrente de Operação (Imp_max)	13,46 A	16 A	Compatível
Corrente de Curto-Circuito (Isc_max)	14,30 A	22 A	Compatível
Potência Total	7,02 kW	10,2 kW	Compatível

Fonte: Autor (2024).

Esses resultados asseguram que o inversor pode operar com eficiência e segurança com os módulos especificados, garantindo um desempenho confiável e otimizado do sistema fotovoltaico.

3.9.1 Dimensionamento dos Cabos CC e Proteções para o Sistema Fotovoltaico

Neste projeto fotovoltaico, o dimensionamento dos cabos CC e a proteção dos arranjos solares são aspectos críticos para garantir a eficiência e a segurança do sistema. A escolha dos cabos deve atender aos requisitos de corrente e tensão do sistema, bem como respeitar as normas vigentes, assegurando que a instalação funcione de forma confiável e com perdas minimizadas.

Especificações do Cabo Solar Selecionado

Foi escolhido um cabo solar de 6 mm² com isolamento de 1 kV. Esse tipo de cabo é fabricado para suportar as condições severas dos sistemas fotovoltaicos, incluindo exposição direta ao sol e variações de temperatura. De acordo com a NBR 16690:2020 - Instalações Elétricas de Sistemas Fotovoltaicos (FV), os cabos solares devem ser resistentes a UV, temperaturas elevadas e umidade para garantir a durabilidade e a segurança da instalação.

Características do Cabo Solar de 6 mm²

- Tensão Máxima: 1.000 V (1 kV), ideal para a tensão de operação dos arranjos fotovoltaicos.
- Corrente Máxima Suportada: Aproximadamente 36 A (para condições de instalação padrão).

- Resistência a Temperatura: Operação segura entre -40°C e $+90^{\circ}\text{C}$, adequada para ambientes externos e exposição solar.

Cálculo da Corrente e Queda de Tensão nos Cabos CC

Para o dimensionamento do cabo, verificou a corrente de operação do sistema e será calculado a queda de tensão, que deve estar abaixo de 1% para evitar perdas excessivas.

Corrente de Operação

Cada arranjo de 6 módulos em série tem uma corrente de operação de 13,46 A (Imp) e uma corrente de curto-circuito de 14,30 A (Isc). O cabo de 6 mm², com capacidade de corrente superior a 36 A, fornece uma margem de segurança ampla para a corrente de operação e a corrente de curto-circuito do sistema.

Queda de Tensão no Cabo Solar, é calculada pela fórmula:

$$\Delta V = I \times R \times L$$

onde:

- III = Corrente de operação (13,46 A)
- RRR = Resistência do cabo por metro (aproximadamente 0,00509 Ω/m para cabo de cobre de 6 mm²)
- LLL = Comprimento total do cabo (supondo 20 metros)

Substituindo:

$$\Delta V = 13,46 \times 0,00509 \times 20 = 1,368\text{V}$$

Para calcular a queda percentual de tensão:

$$\text{Queda de Tensão}\% = \frac{\Delta V}{V_{op}} \times 100$$

Considerando uma tensão nominal de operação (V_{mp}) de 330 V:

$$\text{Queda de Tensão}\% = \frac{1,368}{330} \times 100 = 0,41\%$$

A queda de tensão de 0,41% está bem abaixo do limite recomendado de 1% para sistemas fotovoltaicos, conforme indicado pela NBR 16690:2020 e outras práticas internacionais, confirmando que o cabo de 6 mm² é adequado para esta aplicação.

Proteção CC no Inversor Solis S6-GR1P6K-S

O modelo de inversor Solis S6-GR1P6K-S possui uma série de proteções internas de CC, eliminando a necessidade de uma *string box* externa para proteção adicional. Isso simplifica a instalação e mantém o sistema seguro sem a necessidade de dispositivos de proteção adicionais para os arranjos solares.

Proteções CC Internas do Inversor

1. Proteção contra Sobrecorrente (*Overcurrent Protection*): O inversor está equipado com dispositivos internos que monitoram e limitam a corrente, protegendo o sistema contra sobrecorrentes e prevenindo danos aos componentes internos.
2. Proteção contra Sobretensão (*Overvoltage Protection*): Este inversor é projetado para desativar automaticamente o sistema caso a tensão de entrada CC ultrapasse o limite de 550 V, evitando possíveis danos ao inversor e aos módulos solares.
3. Proteção contra Surtos (*Surge Protection*): O inversor Solis S6-GR1P6K-S possui proteção contra surtos integrados que absorvem picos de tensão inesperados, garantindo a segurança em situações de descargas atmosféricas ou variações rápidas de tensão.
4. Proteção contra Inversão de Polaridade (*Reverse Polarity Protection*): Caso a polaridade seja invertida acidentalmente durante a instalação, o inversor evita o fluxo de corrente reversa, protegendo os componentes eletrônicos e o arranjo solar.

Essas proteções internas do inversor atendem às recomendações da IEC 62109-1 para inversores fotovoltaicos e permitem uma operação segura do sistema sem a necessidade de uma *string box* externa. A norma IEC 62109-1 estabelece os requisitos gerais de segurança para equipamentos de conversão de energia de sistemas fotovoltaicos, garantindo que o inversor opere dentro dos limites de segurança e confiabilidade.

Portanto, O dimensionamento do cabo de 6 mm² e a presença das proteções CC internas no inversor Solis S6-GR1P6K-S garantem a segurança e a eficiência do sistema fotovoltaico. A resistência do cabo e a queda de tensão dentro dos limites permitidos tornam o cabo adequado para a aplicação. As proteções integradas do inversor simplificam a instalação e eliminam a necessidade de uma *string box*, atendendo aos padrões de segurança exigidos e proporcionando uma operação segura e confiável do sistema em condições variadas de operação.

4 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES CA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para assegurar a segurança e o bom funcionamento do sistema fotovoltaico, é essencial dimensionar corretamente os componentes de corrente alternada (CA), incluindo disjuntores, cabos, aterramento e dispositivos de proteção contra surtos (DPS). Abaixo, será detalhado o dimensionamento de cada componente CA e os cálculos realizados, com base nas normas vigentes, especialmente a NBR 5410 e a NBR 16690.

Especificações do Inversor

O inversor Solis S6-GR1P6K-S tem as seguintes especificações para o lado CA:

Potência Nominal de Saída: 6 kW

Tensão de Saída: 220 V (monofásico)

Corrente Máxima de Saída (CA): 27,3 A

Dimensionamento do Disjuntor CA

Para proteger o circuito de saída CA do inversor, optou-se por um disjuntor de 32 A. O dimensionamento do disjuntor considera a corrente máxima de saída do inversor e inclui uma margem de segurança para evitar disparos indevidos.

Cálculo da Corrente de Saída

A corrente de saída do inversor em condições normais é dada por:

$$I_{ca} = \frac{P_{inversor}}{V_{ca}}$$

Substituindo os valores:

$$I_{ca} = \frac{6000}{220} \approx 27,3A$$

Seleção do Disjuntor

Para suportar essa corrente, optou-se por um disjuntor de 32 A, que está acima da corrente máxima de saída do inversor (27,3 A). Conforme a NBR 5410:2004 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão, o disjuntor deve ser dimensionado para suportar a corrente de operação com uma margem de segurança. A corrente nominal de 32 A para o disjuntor garante

que ele não seja desarmado indevidamente durante a operação normal, oferecendo proteção adequada ao sistema.

Dimensionamento dos Cabos CA

Para o lado CA, utilizou-se um cabo de 6 mm² para fase e neutro, com isolamento de 750 V. O dimensionamento desse cabo segue a NBR 5410:2004, que especifica os critérios de dimensionamento com base na corrente do circuito e no método de instalação. Além disso, foi dimensionado um cabo de 4 mm² para o aterramento, seguindo as tabelas de seção mínima conforme a norma.

Cálculo da Capacidade de Corrente para o Cabo de 6 mm²

De acordo com a NBR 5410, a capacidade de corrente de um cabo depende do método de instalação e da temperatura ambiente. Os seguintes aspectos foram considerados:

Corrente máxima do inversor: 27,3 A

Cabo de cobre com seção de 6 mm²

Temperatura ambiente de 30°C

Método de instalação B1 (cabo em eletroduto em parede, conforme Tabela 36 da NBR 5410)

Conforme a Tabela 36 da NBR 5410, para um cabo de cobre com seção de 6 mm² instalado pelo método B1, a capacidade de corrente é de 32 A. Como a corrente de saída do inversor (27,3 A) está abaixo da capacidade do cabo (32 A), o cabo de 6 mm² é adequado para essa aplicação.

Cálculo da Queda de Tensão

A queda de tensão (ΔV) deve ser limitada a um valor máximo de 1,5% em circuitos finais, conforme recomenda a NBR 5410 para garantir a eficiência do sistema.

A fórmula para calcular a queda de tensão é:

$$\Delta V = I \times R \times L$$

Onde:

$I = 27,3A$

$R = 0,0046\Omega/m$ (resistência para cabo de cobre de 6 mm² a 30°C)

$L = 20m$ (considerando um comprimento médio para o sistema)

Substituindo os valores:

$$\Delta V = 27,3 \times 0,0046 \times 20 = 2,5128 \text{ V}$$

Para calcular a queda percentual de tensão:

$$\text{Queda de Tensão\%} = \frac{\Delta V}{V_{ac}} \times 100$$

Onde $V_{ac} = 220\text{V}$:

$$\text{Queda de Tensão\%} = \frac{2,5128}{220} \times 100 \approx 1,14\%$$

A queda de tensão de 1,14% está dentro do limite recomendado de 1,5%, validando o uso do cabo de 6 mm² para esta aplicação.

Dimensionamento do Cabo de Aterramento

Para o cabo de aterramento, a NBR 5410 especifica que a seção mínima do condutor de proteção deve ser de pelo menos 50% da seção do condutor de fase para seções de até 16 mm², mas não inferior a 4 mm². Portanto, o cabo de aterramento de 4 mm² atende a norma e oferece a proteção necessária para o sistema.

Especificações dos DPS

- Corrente Nominal de Descarga: 15 kA (corrente de descarga para DPS Classe II)
- Tensão de Operação: 220 V CA

De acordo com a NBR 5410 e a NBR 5419-1 a 4:2015 - Proteção contra Descargas Atmosféricas, é obrigatório instalar DPS em sistemas fotovoltaicos para garantir proteção contra surtos transitórios que possam prejudicar o inversor e outros componentes elétricos. O DPS de 15 kA Classe II é adequado para redes elétricas de baixa tensão e é normalmente instalado próximo ao quadro de distribuição.

Tabela 5: Resumo dos Componentes CA do Sistema.

Componente	Especificação	Justificativa
Disjuntor CA	32 A	Corrente de saída do inversor (27,3 A) está abaixo da corrente nominal do disjuntor
Cabo CA (Fase e Neutro)	6 mm ² , 750 V	Atende à capacidade de corrente (32 A) e queda de tensão abaixo de 1,5%
Cabo de Aterramento	4 mm ²	Atende à NBR 5410 para seção mínima
DPS	15 kA, Classe II, 220 V	Proteção contra surtos conforme NBR 5419

Fonte: Autor (2024).

O dimensionamento dos componentes CA foi feito para garantir a segurança e eficiência do sistema. O disjuntor de 32 A, os cabos de 6 mm² para fase e neutro, o aterramento de 4 mm² e os DPS de 15 kA atendem aos requisitos das normas NBR 5410 e NBR 5419. Esses componentes foram selecionados para suportar as condições operacionais e as possíveis sobrecargas e surtos, proporcionando um sistema fotovoltaico seguro e durável.

4.1 Resultados E Discussão

Neste capítulo são apresentados os materiais empregados na execução do projeto fotovoltaico, detalhados conforme a tabela abaixo, abrangendo desde os componentes principais, como módulos solares e inversor, até os itens de fixação e proteção elétrica. São descritos também aspectos gerais do orçamento, incluindo os custos dos materiais e serviços necessários para a instalação, e o processo de homologação junto à concessionária de energia. Por fim, discute-se o prazo estimado para o retorno do investimento, considerando a economia gerada pela redução de custos com eletricidade ao longo do tempo.

4.2 Materiais

Na Tabela 6, demonstra-se os materiais necessários para o projeto fotovoltaico e inclui tanto os componentes elétricos quanto os de fixação e sinalização, facilitando o acompanhamento de itens no contexto do TCC.

Tabela 6: Materiais necessários para o sistema solar dimensionado.

Item	Descrição	Quantidades
Módulos Solares	DAH Solar 585	12
Inversor Solar	Solis S6-GR1P6K-S	1
Par de Conector Macho/Fêmea	MC4	4
Cabo Solar	6mm ² - 1kV, preto	30
Cabo Solar	6mm ² - 1kV, vermelho	30
Perfil de Alumínio	4,80 m	8
Kit de Emendas	Para perfil de alumínio	4
Selante	PU40	6
Parafusos Inox	130mm	48
Placa de Advertência GED 13	13x13 cm	2
Kit Terminal Final	Terminal de fixação final	8
Kit Terminal Intermediário	Terminal de fixação intermediário	20
Disjuntor Monofásico	32A	1
Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS)	15 kA	2
Cabo AC	6mm ² - 750V para fase	20
Cabo AC	6mm ² - 750V para neutro	20
Cabo de Aterramento	4mm ²	35

Fonte: Autor (2024).

4.3 Valor de Investimento

Portanto, o investimento total em engenharia, equipamentos e instalação foi de R\$ 15.900,00 (quinze mil e novecentos reais). Após a assinatura do contrato com o cliente, procedeu-se com a instalação do sistema fotovoltaico conforme o dimensionamento projetado.

4.4 Implementação da usina fotovoltaica

No dia 20/08/2024 é dado início da implementação da usina no telhado, para iniciar a instalação fotovoltaica é fundamental uma avaliação preliminar do local, garantindo que a estrutura seja adequada para suportar o peso dos painéis e que esteja livre de obstruções, como sombras de árvores ou prédios, que possam comprometer a eficiência do sistema.

Após essa etapa, iniciam-se os preparativos para a instalação física dos módulos fotovoltaicos, que são montados em suportes específicos para o telhado. Essa estrutura é fixada

com segurança para suportar condições climáticas adversas e para permitir uma circulação de ar, essencial para a dissipação do calor e o melhor desempenho dos painéis.

Figura 6 – Imagem da instalação do sistema no local.



Fonte: Autor (2024).

Após a instalação dos módulos fotovoltaicos no telhado, o próximo passo é a colocação do inversor solar, que desempenha um papel crucial no sistema fotovoltaico, convertendo a energia de corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA), que é a forma de eletricidade utilizada para alimentar os equipamentos e eletrodomésticos do cliente.

A instalação do inversor é feita em um local abrigado e ventilado, geralmente próximo ao quadro de distribuição de energia, para minimizar perdas de energia e facilitar o acesso para manutenção. É fundamental que o inversor esteja em uma área que proteja o equipamento da exposição direta ao sol, chuva e outras condições climáticas extremas, preservando sua durabilidade e eficiência.

Figura 7 – Inversor fotovoltaico.



Fonte: Autor (2024).

O aterramento do sistema fotovoltaico é uma etapa essencial para garantir a segurança, tanto do equipamento quanto dos usuários. Esse procedimento envolve a criação de um caminho seguro para que correntes de fuga ou descargas elétricas, como raios, sejam direcionadas para o solo, evitando danos aos componentes do sistema e protegendo pessoas contra choques elétricos.

No sistema fotovoltaico, o aterramento inclui todos os módulos, estruturas de suporte, cabos e, especialmente, o inversor solar. Cada componente deve ser devidamente aterrado para garantir uma proteção completa. A estrutura de suporte dos módulos é conectada ao sistema de aterramento, utilizando conectores e cabos específicos para conduzir a energia em casos de descarga elétrica.

O inversor solar, por sua vez, requer um aterramento cuidadoso, pois ele é o ponto central de conversão da energia do sistema. Em sistemas on-grid, o inversor está diretamente conectado à rede elétrica, o que aumenta a importância do aterramento para evitar qualquer possibilidade de retorno de corrente perigosa em caso de falhas. A conexão do aterramento do inversor ao sistema deve ser feita de acordo com as especificações do fabricante e as normas de segurança.

A instalação de um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) é fundamental para a proteção do inversor solar e de todo o sistema fotovoltaico. Esse dispositivo atua como uma

defesa eficaz contra surtos elétricos, que podem ocorrer devido a descargas atmosféricas (raios) ou a variações de tensão na rede elétrica. Ao implementar o DPS, reduz-se o risco de danos permanentes ao inversor e aos demais componentes do sistema, que podem ser altamente sensíveis a esses picos de tensão.

Figura 8 – Disjuntor e DPS.



Fonte: Autor (2024).

Para finalizar, um eletrodo de aterramento, como uma haste de cobre, é enterrado no solo e conectado ao sistema, criando um ponto de dispersão seguro para correntes indesejadas. Esse eletrodo é essencial para reduzir a resistência à terra, permitindo que as descargas fluam de maneira eficiente. Com o aterramento completo, o sistema fotovoltaico fica mais seguro, preservando o funcionamento dos equipamentos e garantindo a proteção do cliente e do local.

4.5 Homologação junto a concessionário e inspeção aprovada

A homologação do projeto solar com a RGE foi realizada com sucesso, seguindo todos os requisitos técnicos necessários para garantir a segurança e a qualidade do sistema. Toda a documentação exigida foi cuidadosamente preparada e enviada, e o padrão de entrada do sistema, com acesso livre para inspeção, estava dentro das normas da concessionária.

Durante a inspeção, foi verificado que o sistema atendia a todas as especificações, o que permitiu uma aprovação rápida e sem complicações. Com isso, o sistema foi oficialmente autorizado a operar conectado à rede elétrica, concluindo o processo de homologação e cadastrando o cliente como micro gerador de energia, apto para usufruir da compensação de créditos com a RGE.

4.6 Prazo para o retorno do investimento

Foi realizada uma análise da viabilidade financeira do sistema fotovoltaico instalado, levando em conta os custos iniciais e os benefícios econômicos ao longo do tempo. O cálculo da Tabela 7, do retorno, inclui a economia mensal proporcionada pela geração de energia solar, descontando taxas como o ICMS, o fio B conforme a norma 14300/2022, e a taxa mínima de disponibilidade. Com essa análise detalhada, é possível prever o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado, proporcionando ao cliente uma visão clara e precisa do valor econômico agregado pelo sistema ao longo dos anos.

Será considerado o custo mensal de ICMS, Fio B e disponibilidade mínima nos cálculos.

Tabela 7: Economia Líquida no Primeiro Ano (2024)

Custo	Valor Mensal (R\$)
Economia Bruta Ajustada	598,50
ICMS (417 kWh x R\$0,09)	37,53
Fio B (30% x 417 kWh x R\$0,27)	33,77
Taxa de Disponibilidade (30 kWh)	27,00
Economia Líquida Mensal (2024)	500,20

Fonte: Autor (2024).

Tabela 8: Economia Líquida Anual com Disponibilidade.

Ano	Custo Anual do Fio B (R\$)	Custo Anual do ICMS (R\$)	Custo Anual de Disponibilidade (R\$)	Economia Anual Líquida (R\$)
2024	405,24	450,36	324,00	6.002,40
2025	607,92	450,36	324,00	5.744,04
2026	810,84	450,36	324,00	5.485,80
2027	1.013,88	450,36	324,00	5.227,52
2028	1.216,80	450,36	324,00	4.969,32

Fonte: Autor (2024).

Com o investimento inicial de R\$ 15.900,00, o ROI será ajustado com a economia anual média nos primeiros cinco anos, incluindo a taxa de disponibilidade.

Calculando a média anual de economia nos primeiros cinco anos:

$$\text{EcoAnualMédia} = \frac{6.002,4+5.744,04+5.485,80+5.227,52+4.969,32}{5} = 5.485,82$$

Onde teremos o cálculo do ROI:

$$\text{ROI} = \frac{15.900,00}{5.485,82} \approx 2,9 \text{ anos}$$

Esse cálculo fornece uma visão abrangente sobre os custos mensais e o ROI de em torno de 2,9 anos, considerando a evolução do Fio B, o custo fixo de ICMS por kWh resgatado e a tarifa mínima de disponibilidade, proporcionando ao cliente uma análise financeira completa e realista para o projeto fotovoltaico.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada uma análise detalhada sobre a instalação e a viabilidade de um sistema fotovoltaico on-grid, abordando desde a escolha e dimensionamento dos componentes até o processo de homologação e retorno financeiro para o cliente. Através de cálculos técnicos, cada etapa do sistema – incluindo módulos solares, inversor, cabos e proteções – foi definida em conformidade com as normas e diretrizes vigentes, como a NBR 5410 e a 14300/2022, que regulamentam o uso do fio B e garantem segurança e eficiência. Ao longo do processo, a homologação junto à concessionária RGE destacou a importância do alinhamento com as exigências técnicas para garantir ao cliente o benefício da compensação de créditos energéticos como. Além disso, a análise do retorno do investimento revelou que, mesmo com as taxas de ICMS, fio B e a taxa de disponibilidade, o sistema oferece uma recuperação de capital em poucos anos, com significativa economia mensal, o que torna o investimento atraente e sustentável.

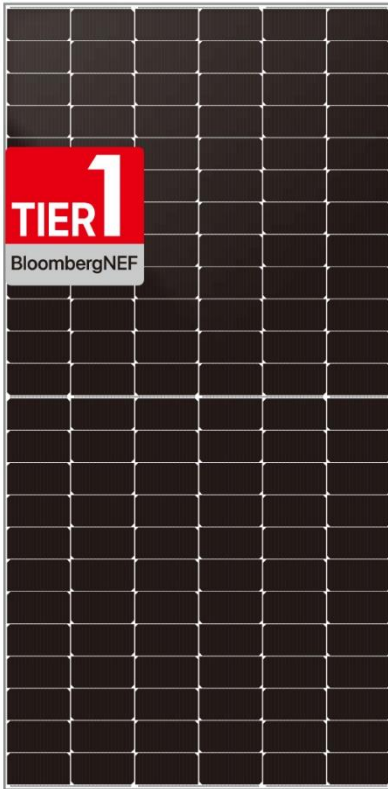
Este estudo confirma que a energia solar é uma solução viável e economicamente vantajosa para os consumidores. Além de proporcionar autonomia energética e redução de custos, o sistema fotovoltaico contribui para uma matriz energética mais sustentável. A implantação deste projeto reflete um passo importante para o cliente e para o desenvolvimento de práticas ambientalmente conscientes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. E.; SILVA, F. R. Análise de Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos Residenciais Conectados à Rede no Brasil. *Revista de Engenharia e Tecnologia Sustentável*, v. 5, n. 2, p. 45-62, 2021.
- ANEEL. Informações Técnicas. Regulação do Setor Elétrico. Distribuição. Geração Distribuída. 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 02 ago. 2024.
- ANEEL. Resolução Normativa 1098/24. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20241098.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14300:2022 - Micro e Minigeração Distribuída de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16690:2020 - Instalações Elétricas de Sistemas Fotovoltaicos (FV). Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410:2004 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- BOYLE, G. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- BRASIL. Lei nº 14.300 de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nº 10.848, de 15 de março de 2004, e 9424, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: parte 1, seção 1, p. 2, Brasília, DF, nº 148, 5 ago 2022. Disponível em: [Página 2 do Diário Oficial da União - Seção 1, número 148, de 05/08/2022 - Imprensa Nacional](#). Acesso em: 19 ago. 2024
- CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Dados de Irradiação Solar no Brasil. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br>. Acesso em: 19 ago. 2024
- DUNLOP, J. P. *Photovoltaic Systems*. 3rd ed. American Technical Publishers, 2012.
- FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE). *Photovoltaics Report*. Freiburg, 2021.
- GREEN, M. A. *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982.
- HANSEN, R. Photovoltaic Inverter Technology and Market Trends. *Renewable Energy Journal*, v. 42, p. 341-352, 2018.

- KIM, H. S.; LEE, J.; PARK, K. Overload Capacity of Solar Inverters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 33, n. 2, p. 560-568, 2018.
- LUQUE, A.; HEGEDUS, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- MANUAL TÉCNICO DO INVERSOR SOLIS. Especificações e Proteções Internas. Solis Inverters. Disponível em: <https://www.solisinverters.com>. Acesso em: 07 ago 2024.
- MANUAL TÉCNICO DO MÓDULO SOLAR DAH. Procedimentos de Instalação e Manutenção. DAH Solar. Disponível em: <https://www.dahsolarpv.com>. Acesso em: 07 ago. 2024.
- 2024.MARTINS, J. G. Geração Distribuída e Sustentabilidade Energética. *Revista de Energia Limpa*, v. 15, n. 2, p. 112-125, 2021.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). *Best Practices for Photovoltaic System Installation*. Golden, CO, 2019.
- OLIVEIRA, R. D. O Novo Marco Legal da Geração Distribuída: Impactos e Perspectivas. *Revista Brasileira de Políticas Energéticas*, v. 14, n. 1, p. 99-112, 2022.
- PEREIRA, A. C.; LIMA, J. M. Análise das Normas para Conexão de Sistemas Fotovoltaicos à Rede Elétrica. *Revista de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 8, n. 4, p. 183-199, 2023.
- PERLIN, J. *Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy*. New York: New World Library, 2013.
- RGE (RIO GRANDE ENERGIA). *Procedimentos para Conexão de Geração Distribuída. Manual Técnico*, 2024.
- SANTOS, F. R.; ALVES, J. R. Regulação da Geração Distribuída: Desafios e Oportunidades no Brasil. *Revista de Política Energética*, v. 11, n. 3, p. 75-92, 2023.
- SANTOS, F. R.; OLIVEIRA, T. Planejamento e Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos. *Engenharia de Energia*, v. 7, n. 1, p. 58-70, 2021.
- SOLAR ENERGY INSTITUTE. *Guidelines for Solar System Performance*. Boston, MA, 2020.
- TWIDELL, J.; WEIR, T. *Renewable Energy Resources*. 3rd ed. London: Routledge, 2015.
- ZHOU, X.; YANG, Y.; WANG, J. High-Efficiency Perovskite Solar Cells. *Journal of Advanced Materials*, v. 33, n. 17, p. 2054-2065, 2021.

ANEXO 1 – Folha de dados do painel DHN-72X16



TOPCon

DHN-72X16

0~+5W

575~585 W



Higher Power Generation Efficiency

N-type TOPCon module could increase power generation by 3%+ per watt compared with PERC module



Lower Degradation Rate, PID Resistance

First-year $\leq 1\%$, 2-30 year $\leq 0.4\%$; excellent Anti-PID performance



Lower Temp. Coefficient

More power generation under high-temperature



Better Dim Light Performance

Excellent performance under dim light

Comprehensive Products & System Certificates

IEC 61215 / IEC 61730 / CE / INMETRO

ISO 45001: 2018/International standards for occupational health & safety

ISO 14001: 2015/Standards for environmental management system

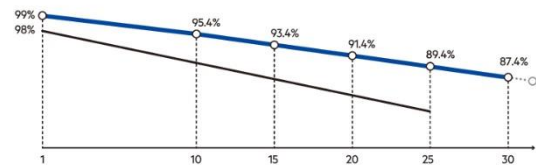
ISO 9001: 2015/Quality management system



Quality Guarantee

15-Year Material & Technology Warranty

30-Year Linear Power Output Warranty

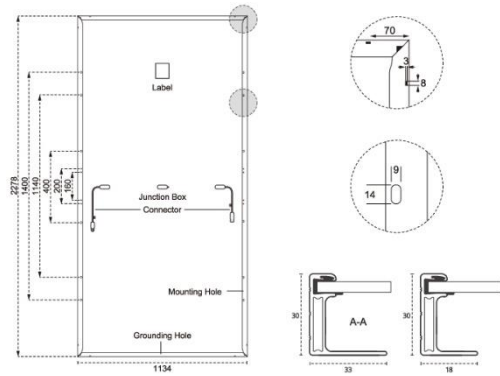


▲ DAH Solar Linear power output guarantee ▾ Standard Linear power output guarantee



Mechanical Specification

Cable	4.0mm ² , 350/250mm in length, (Including Connector) length can be customized
No.of Cells	144 (6×24)
Glass	3.2mm High Transmission, Antireflection Coating
Junction Box	IP68, 3 Bypass Diodes
Connector	MC4 Compatible
Weight	29kg
Cells Type	N-type 182×91.875mm
Dimension (L×W×T)	2278×1134×30mm
Packing	36pcs/Pallet, 720pcs/40HQ



STC-Electrical Characteristics

Module Type	DHN-72X16		
Maximum Power (Pmax/W)	575	580	585
Open-circuit Voltage (Voc/V)	51.2	51.4	51.6
Maximum Power Voltage (Vmp/V)	43.4	43.6	43.8
Short-circuit Current (Isc/A)	14.08	14.14	14.20
Maximum Power Current (Imp/A)	13.25	13.30	13.36
Module Efficiency (%)	22.26	22.45	22.65

Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m² , Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

NOCT—Electrical Characteristics

Maximum Power (Pmax/W)	432	436	440
Open-circuit Voltage (Voc/V)	48.6	48.8	49.0
Maximum Power Voltage (Vmp/V)	41.2	41.4	41.6
Short-circuit Current (Isc/A)	11.37	11.42	11.46
Maximum Power Current (Imp/A)	10.49	10.53	10.57

Standard Test Environment : Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s

Operating Parameters

Maximum System Voltage	1500V DC
Power Tolerance	0~+5W
Operating Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum Series Fuse Rating	25A
Nominal Operating Cell Temperature	45°C±2°C
Application Level	Class A

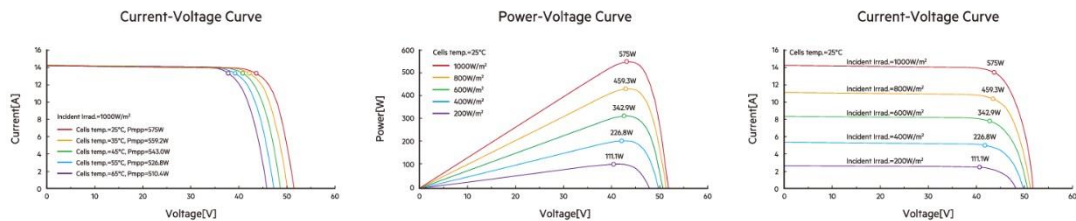
Temperature Coefficient

Temperature Coefficient of Isc (α Isc)	0.046%/°C
Temperature Coefficient of Voc (β Voc)	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of Pmax (γ Pmp)	-0.30%/°C

Mechanical Loads

Snow load, frontside / Wind load, backside	5400Pa/2400Pa
--	---------------

I-V Curve



ANEXO B – Folha de dados do inversor SOLIS S6-GR1P6K-S



GINLONG TECHNOLOGIES CO.,LTD.

S6-GR1P(2.5-6)K-S

Inversores Solis monofásicos

Características:

- Corrente da string até 16A
- Integrado com a função de controle de potência de exportação zero
- Leve e com design compacto para fácil instalação
- Design de 2 MPPT com algoritmo MPPT preciso

Modelo:

S6-GR1P2.5K-S / S6-GR1P3K-S

S6-GR1P3.6K-S / S6-GR1P4K-S

S6-GR1P4.6K-S / S6-GR1P5K-S

S6-GR1P6K-S





www.solisinverters.com

Folha de Dados

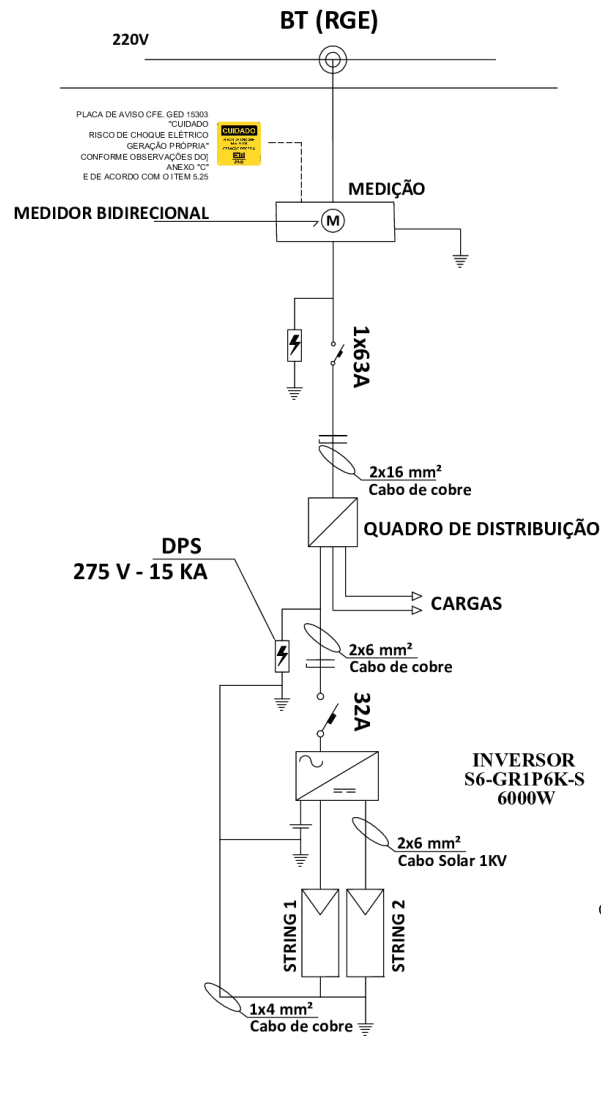
S6-GR1P(2.5-6)K-S

Modelo	2.5K	3K	3.6K	4K	4.6K	5K	6K
Entrada CC							
Potência máxima de entrada	4.25 kW	5.1 kW	6.12 kW	6.8 kW	7.82 kW	8.5 kW	10.2 kW
Tensão máx de entrada	550 V	550 V					
Tensão nominal	250 V	330 V					
Tensão de partida	60 V	100 V					
Intervalo de tensão MPPT	50-550 V	90-550 V					
Corrente máx de entrada	16 A / 16 A						
Corrente máx de curto-circuito	22 A / 22 A						
MPPTs / Número de Entradas	2/2						
Saída CA							
Potência nominal de saída	2.5 kW	3 kW	3.6 kW	4 kW	4.6 kW	5 kW	6 kW
Potência nominal de saída a 40°C	2.5 kW	3 kW	3.6 kW	4 kW	4.6 kW	5 kW	6 kW
Potência máx de saída aparente	2.5 kVA	3 kVA	3.6 kVA	4 kVA	4.6 kVA	5 kVA	6 kVA
Potência máx de saída	2.5 kW	3 kW	3.6 kW	4 kW	4.6 kW	5 kW	6 kW
Potência máx de saída a 40°C	2.5 kW	3 kW	3.6 kW	4 kW	4.6 kW	5 kW	6 kW
Tensão nominal da rede	1/N/PE, 220 V						
Frequência nominal da rede	60 Hz						
Corrente nominal de saída da rede	11.4 A / 10.9 A	13.6 A / 13 A	16 A / 15.7 A	18.2 A / 17.4 A	20.9 A / 20 A	22.7 A / 21.7 A	27.3 A / 26.1 A
Corrente máx de saída	11.4 A	13.6 A	16 A	18.2 A	20.9 A	22.7 A	27.3 A
Fator de potência	> 0,99 (0,8 inicial - 0,8 atrasado)						
Harmônicas (THDi)	<3%						
Eficiência							
Eficiência máxima	97.3%	97.3%	97.6%		97.7%		
Eficiência EU	96.5%	96.6%	97.1%		97.1%		
Eficiência MPPT	>99.5%						
Proteção							
Proteção contra inversão de polaridade CC	Sim						
Proteção contra curto-circuito	Sim						
Proteção de sobrecorrente de saída	Sim						
Proteção contra sobretensão	Sim						
Monitoramento de rede	Sim						
Proteção de ilhamento	Sim						
Proteção de temperatura	Sim						
AFCI integrado (proteção de circuito de falha de arco CC)	Sim ⁽¹⁾						
Interruptor CC integrado	Sim						
Dados gerais							
Dimensões (L*A*P)	330*371*161 mm						
Peso	8.2 kg	8.3 kg	8.9 kg		9 kg		
Topologia	Sem Transformador						
Consumo próprio (noite)	<1 W						
Faixa de temperatura ambiente de operação	-25 ~ +60°C						
Umidade relativa	0-100%						
Grau de proteção (IP)	IP66						
Conceito de refrigeração	Convecção natural						
Altitude máx de operação	4000 m						
Certificados de padrão de conexão da rede	NBR 16149, NBR 16150, IEC 62116, IEC 61000-3-4/-5, IEC 61000-3-11/-12						
Padrão de segurança / EMC	IEC 62109-1/-2, IEC 61000-6-1/-2/-3/-4						
Características							
Conexão CC	Conectores MC4						
Conexão CA	Ficha de ligação rápida						
Tela	LED + APP						
Comunicação	RS485, USB, Opcional: Wi-Fi, GPRS						

(1) Ativação necessária.

APÊNDICE A – Diagrama unifilar

DIAGRAMA UNIFILAR SEM ESCALA

1


- Sobretensão (em todas as fases) – 59;
 • Subtensão (em todas as fases) – 27;
 • Sobre e Subfrequência 81 O/U;
 • Check de Sincronismo – 25;
 • Anti-ilhamento – 78;
 • Relé Anti-ilhamento – 81 df/dt.

**ÁREA PERMITIDA P/
CONEXÃO DA
MICROGERAÇÃO
POSIÇÃO A CRITÉRIO
DO ACESSANTE)**