

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS LUAN NANDI DOMENEGATTO

**EFEITOS DO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO SOBRE A
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA UNIDADE CONSUMIDORA NO
ESTADO DO PARANÁ**

MEDIANEIRA

2022

MATHEUS LUAN NANDI DOMENEGATTO

**EFEITOS DO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO SOBRE A
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA UNIDADE CONSUMIDORA NO
ESTADO DO PARANÁ**

**Effects of sizing a photovoltaic system on electric energy generation in a
consumer unit in the state of paraná**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Evandro André Konopatzki.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS LUAN NANDI DOMENEGATTO

**EFEITOS DO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO SOBRE A
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA UNIDADE CONSUMIDORA NO
ESTADO DO PARANÁ.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/junho/2022

Evandro André Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Airton Azevedo dos Santos
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcos Fischborn
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

AGRADECIMENTOS

Certamente, não conseguirei expressar aqui meu agradecimento a todas as pessoas que fizeram parte dessa fase de minha vida. Portanto, desde peço desculpas a quem não se faz presentes nas palavras abaixo.

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades encontradas.

A UTFPR, seu corpo docente, direção e administração que não medem esforços para entregar um ensino de qualidade.

A minha família, que dedicou a mim todo o apoio necessário desde meus primeiros passos.

Em especial a minha mãe Zilda (In memoriam), por ter me ensinado valores que carrego comigo em todos os momentos. Seus ensinamentos certamente me conduziram até aqui.

Ao meu orientador Professor Dr. Evandro André Konopatzki, por todo o auxílio dado na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas de sala, por todas as noites de companhia na sala de estudos.

A João Milan e família, por todo o apoio e oportunidade, abrindo as portas das suas instalações para que esse trabalho pudesse ser feito.

Gostaria também de deixar registrado meu agradecimento a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, meu muito obrigado.

RESUMO

A utilização das energias renováveis tem crescido de forma exponencial nos últimos anos, ligado de forma direta a conscientização da população por uma energia mais limpa e também pelo custo da energia. Nesse meio, a energia solar fotovoltaica desponta como a preferida dos consumidores, devido ao seu custo e seu tempo de instalação ser relativamente menores e mais acessíveis se comparadas a outras fontes renováveis. O objetivo deste trabalho é analisar e maximizar a geração de uma usina fotovoltaica on grid com 17,5 kWp, comparando o rendimento do sistema com sua estimativa teórica e com um projeto de parâmetros ideais de rotação e inclinação para a latitude em que se encontra instalada. O objeto de estudo contém trinta e cinco módulos fotovoltaicos e dois inversores e está localizado em uma propriedade rural na cidade de Diamante D'Oeste, no interior do estado do Paraná. Foram realizadas simulações computacionais para estimar a produção de energia em um cenário real e também em um cenário ideal, realizando as correções de posicionamento dos módulos. Dos resultados obtidos conclui-se que é possível aumentar a eficiência da planta geradora quando se trabalha com os valores ideais para inclinação e rotação dos módulos fotovoltaicos, sendo estimado um ganho de 5,39%. Ainda, sugere-se continuidade da pesquisa com estudos detalhados do custo para realização dessas alterações a fim de analisar a viabilidade econômica de sua implantação.

Palavras-chave: sistema solar fotovoltaico; energia solar; energia renovável.

ABSTRACT

The use of renewable energy has grown exponentially in recent years, directly linked to the population's awareness of cleaner energy and also the cost of energy. In this environment, photovoltaic solar energy emerges as the preferred by consumers, due to its cost and installation time being relatively smaller and more accessible compared to other renewable sources. The objective of this work is to analyze and maximize the generation of an on grid photovoltaic plant with 17.5 kWp, comparing the efficiency of the system with its theoretical estimate and with a design of ideal parameters of rotation and inclination for the latitude in which it is located. installed. The object of study contains thirty-five photovoltaic modules and two inverters and is located on a rural property in the city of Diamante D'Oeste, in the interior of the state of Paraná. Computer simulations were carried out to estimate the energy production in a real scenario and also in an ideal scenario, making corrections for the positioning of the modules. From the results obtained, it is concluded that it is possible to increase the efficiency of the generating plant when working with the ideal values for inclination and rotation of the photovoltaic modules, with an estimated gain of 5.39%. Still, it is suggested to continue the research with detailed studies of the cost for carrying out these changes in order to analyze the economic viability of its implementation.

Keywords: photovoltaic solar system; solar energy; renewable energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes da radiação solar	15
Figura 2 - Perfil da irradiância solar ao longo de um dia	16
Figura 3 - Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia.	18
Figura 4 - Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações	19
Figura 5 - Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos	19
Figura 6 - Componentes de um módulo fotovoltaico.	21
Figura 7 - Conjunto de módulos fotovoltaicos em associação série e paralelo.	22
Figura 8 – Exemplo de instalação fotovoltaica em telhado.	22
Figura 9 – Exemplo de instalação fotovoltaica em solo.	23
Figura 10 – Exemplo de inversor trifásico.	24
Figura 11 - Exemplo de oversizing e clipping no inversor	25
Figura 12 - Local da usina fotovoltaica.	27
Figura 13 - Módulos fotovoltaicos da unidade consumidora em estudo	28
Figura 14 - Inversores instalados na unidade consumidora em estudo	29
Figura 15 - Inversor Sofar 12KTL-X	30
Figura 16 - Inversor Growatt 2500TL-X.....	31
Figura 17 - Diagrama unifilar.....	33
Figura 18 – Esboço via PVSOL do posicionamento original dos módulos	35
Figura 19 - Esboço via PVSOL da Inclinação original dos módulos.....	36
Figura 20 - Esboço via PVSOL da divisão original das <i>strings</i> dos inversores.....	36
Figura 21 - Esboço via PVSOL do sombreamento original dos módulos	37
Figura 22 - Esboço via PVSOL do posicionamento corrigido dos módulos.....	38
Figura 23 - Esboço via PVSOL da inclinação corrigida dos módulos.....	39
Figura 24 - Esboço via PVSOL da divisão corrigida das <i>strings</i> dos inversores	40
Figura 25 - Esboço via PVSOL do sombreamento nos módulos após correções	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do computador utilizado nas simulações	26
Tabela 2 - Especificações dos módulos fotovoltaicos utilizados	28
Tabela 3 - Especificações técnicas inversor Sofar 12KTL-X.....	30
Tabela 4 - Especificações técnicas inversor Growatt MIN 2500TL-X.....	31
Tabela 5 – Geração real dos inversores	34
Tabela 6 – Geração da simulação projeto real.....	38
Tabela 7 - Geração da simulação projeto ideal	41
Tabela 8 - Diferença da geração real para estimativa real	42
Tabela 9 - Diferença da geração real para estimativa ideal	44
Tabela 10 - Diferença de geração da estimativa ideal para estimativa real	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Geração projeto real x Geração real.....	41
Gráfico 2 - Geração projeto ideal x Geração real	43
Gráfico 3 - Geração projeto ideal x Geração projeto real	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Fontes renováveis de energia	14
2.2	Energia solar fotovoltaica	14
2.3	Radiação solar	15
2.4	Irradiância solar	16
2.5	Irradiação solar	17
2.6	Orientação dos módulos fotovoltaicos	17
2.7	Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos	18
2.8	Composição do sistema fotovoltaico	20
2.8.1	Modulo Fotovoltaico	20
2.8.2	Inversor de Frequência.....	23
<u>2.8.2.1</u>	<u>Oversizing e clipping nos inversores</u>	<u>24</u>
2.8.3	Medidor Bidirecional	25
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
3.1	Características do sistema fotovoltaico	26
3.1.1	Localização do sistema fotovoltaico	26
3.1.2	Dados do sistema fotovoltaico	27
<u>3.1.2.1</u>	<u>Modulo fotovoltaico</u>	<u>27</u>
<u>3.1.2.2</u>	<u>Inversores</u>	<u>29</u>
<u>3.1.2.3</u>	<u>Dimensionamento da usina</u>	<u>32</u>
3.1.3	Diagrama unifilar da UFV	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Coleta da geração dos inversores	34
4.2	Simulação utilizando condições reais de projeto	35
4.3	Simulação utilizando condições ideais de projeto	38
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	47
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	47
	REFERÊNCIAS	49

ANEXO 1 – Folha de dados dos módulos Risen - RSM150-8-500M	.50
ANEXO 2 – Folha de dados inversor Sofar 12KTL-X.....	51
ANEXO 3 – Folha de dados inversor Growatt MIN 2500TL-X.....	52

1 INTRODUÇÃO

Segundo Tolmasquim (2016), a energia proveniente do Sol vem sendo apropriada pelo homem ao longo de toda sua história. Através dele, por exemplo, são supridas necessidades básicas de aquecimento, iluminação e alimentação.

O uso da energia fotovoltaica esteve inicialmente voltado às aplicações espaciais – em satélites, por exemplo. Posteriormente, a tecnologia passou a ser alternativa para o atendimento de locais isolados, funcionando em conjunto com baterias (sistemas off grid) (TOLMASQUIM, 2016).

O aumento acelerado da demanda de energia elétrica em todo o mundo, a necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes de energia que não poluem têm levado à busca de novas fontes de energia para a geração de eletricidade (VILLALVA, 2015).

As tradicionais fontes de energia ainda constituem a base mundial da geração de eletricidade - como as grandes usinas hidrelétricas, termelétricas a carvão e petróleo e usinas nucleares. Entretanto, tem-se observado a participação crescente de fontes alternativas de eletricidade em muitos países (VILLALVA, 2015).

Embora ainda tímidas e com participação muito reduzida na matriz energética mundial, o uso das fontes alternativas vem crescendo muito em todo o planeta (VILLALVA, 2015).

De acordo com Pinho e Galdino (2014), o sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no Planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica.

A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio. A rigor, a energia proveniente do Sol não é renovável, mas uma fonte inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra (PEREIRA et al., 2006).

O Brasil está situado numa região com incidência mais vertical dos raios solares. Esta condição favorece elevados índices de irradiação em quase todo o território nacional. Adicionalmente, a proximidade à linha do equador faz com que haja pouca variação na incidência solar ao longo do ano. Dessa forma, mesmo no inverno

pode haver bons níveis de irradiação. Essas condições conferem ao país algumas vantagens para o aproveitamento energético do recurso solar (TOLMASQUIM, 2016).

No país, o aproveitamento do Sol para geração elétrica esteve historicamente ligado à geração fotovoltaica. No final do século passado o Brasil começou a desenvolver programas de eletrificação rural fazendo uso dessa tecnologia. Mas somente na década atual é que ela começou a ganhar abrangência nacional, com a regulamentação da geração distribuída conectada à rede e a realização de leilões específicos para sua contratação na forma de plantas centralizadas (TOLMASQUIM, 2016).

Desde o início de sua comercialização, a energia elétrica tem sido fornecida a consumidores residenciais, comerciais, industriais e públicos por meio de geração centralizada e complexos sistemas de transmissão e distribuição (T&D). Sem peças móveis, de manutenção mínima, sem produzir ruído ou qualquer tipo de poluição e utilizando a energia praticamente inesgotável do Sol, geradores solares fotovoltaicos integrados às edificações e conectados à rede elétrica pública vêm crescendo em importância e aplicação em todo o mundo. Os assim chamados Edifícios Solares Fotovoltaicos integram à sua fachada ou cobertura painéis solares que geram, de forma descentralizada e junto ao ponto de consumo, energia elétrica pela conversão direta da luz do Sol e podem servir ao mesmo tempo como material de revestimento (TOLMASQUIM, 2016)

1.1 Justificativa

Um sistema solar fotovoltaico dimensionado e instalado da maneira correta proporciona ao proprietário um melhor custo benefício e uma maior geração de energia elétrica, tornando seu investimento mais seguro e com um retorno mais rápido do capital investido. Como no Brasil, o mercado de energia solar ainda está se consolidando, muitas empresas novas, sem muito tempo de mercado, e consequentemente sem muita experiência no setor, acabam não considerando as devidas variáveis e não realizando simulações, efetuando instalações que não atendem as expectativas dos consumidores, principalmente em relação a energia produzida pela instalação, ou por muitas vezes, fazendo uma compensação com mais

módulos no projeto para suprir a deficiência de algumas variáveis não consideradas, tornando o sistema fotovoltaico mais caro e muitas vezes até inviável.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em verificar a eficiência de uma planta fotovoltaica instalada em uma unidade consumidora na área rural do município de Diamante do Oeste, estado do Paraná.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar a planta fotovoltaica da unidade consumidora usando dados históricos de consumo, considerando a rotação e inclinação em dois cenários:
 - a. Conforme instalado na unidade consumidora;
 - b. Conforme ideal para a latitude da UC;
- Comparar a produção de energia do dimensionamento ideal, com a configuração da planta instalada.
- Analisar a produção real de energia, comparando a produção estimada pelo dimensionamento das plantas real e ideal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fontes renováveis de energia

Segundo Villalva (2015), as fontes renováveis de energia são aquelas consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização, podendo utilizá-las continuamente e nunca se acabam, pois sempre se renovam. Alguns exemplos são as energias solar, aproveitada diretamente para aquecimento ou geração de eletricidade, hidrelétrica, eólica, oceânica, geotérmica e da biomassa. A disponibilidade das fontes de energia renovável depende do local e da quantidade de energia disponível, assim como da capacidade de explorar esse recurso. Enquanto fontes de energia solar e eólica estão presentes em quase todas as partes do mundo, há também fontes que dependem de condições muito específicas e podem ser exploradas apenas pontualmente, como a energia maremotriz e geotérmica (MAUAD et al., 2017). A energia solar é a única fonte indefinidamente renovável que apresenta capacidade de prover energia suficiente para satisfazer toda a demanda energética mundial (MAUAD et al., 2017 apud DUNLAP, 2015).

2.2 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico) (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio (PEREIRA et al., 2006)

Segundo Villalva (2015) os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir corrente elétrica. Essa corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica.

A transformação da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica é um fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico. Observado primeiramente pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839, o efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade. A energia

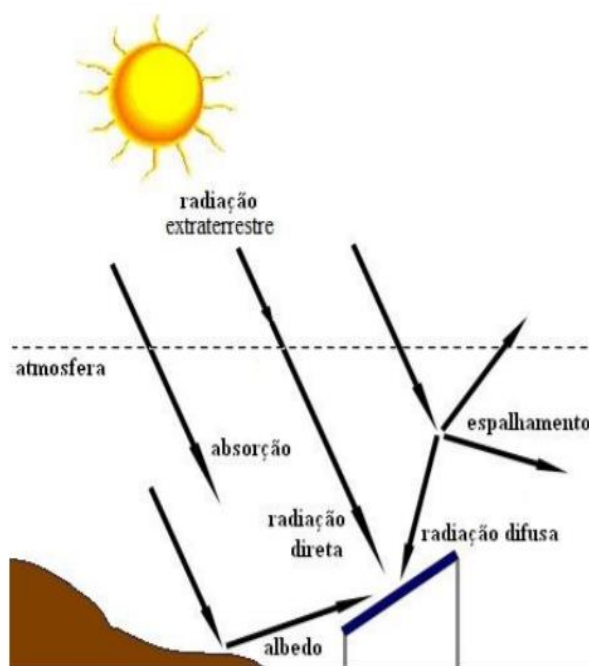
absorvida por esses materiais quebra as ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas. Com isso, cargas elétricas são liberadas e podem ser utilizadas para a realização de trabalho. O efeito fotovoltaico é uma característica física intrínseca ao material que compõe os dispositivos de conversão fotovoltaica (ZILLES, et al. 2012).

2.3 Radiação solar

O termo "radiação solar" é usado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de fluxo de potência, quando é especificamente denominado de irradiância solar, ou em termos de energia por unidade de área, denominado, então, de irradiação solar (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo Mauad et al. (2017) conforme o modo no qual a radiação solar chega até a superfície terrestre, depois de ter atravessado a atmosfera, ela pode ser descomposta em duas diferentes frações: uma conhecida como irradiância direta, e outra denominada irradiância difusa, além disso, a superfície da Terra reflete parte da irradiância solar recebida de volta para a atmosfera. Esta fração é conhecida como albedo. Na figura 1, ilustra-se os 3 componentes da radiação solar.

Figura 1 - Componentes da radiação solar



Fonte: Pinho e Galdino (2014) apud Pinho et al. (2008)

De acordo com Tolmasquim (2016) a radiação solar que atinge a superfície terrestre pode ser decomposta em planos. No plano horizontal, a radiação global consiste na soma das componentes direta e difusa, enquanto que num plano inclinado, além das duas componentes citadas, é acrescida de uma parcela refletida na superfície e nos elementos do entorno.

Ainda conforme Tolmasquim (2016) para o aproveitamento fotovoltaico, a de maior interesse é a Irradiação Global Horizontal, que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal, composta pela Irradiação Difusa Horizontal e pela Irradiação Direta Normal.

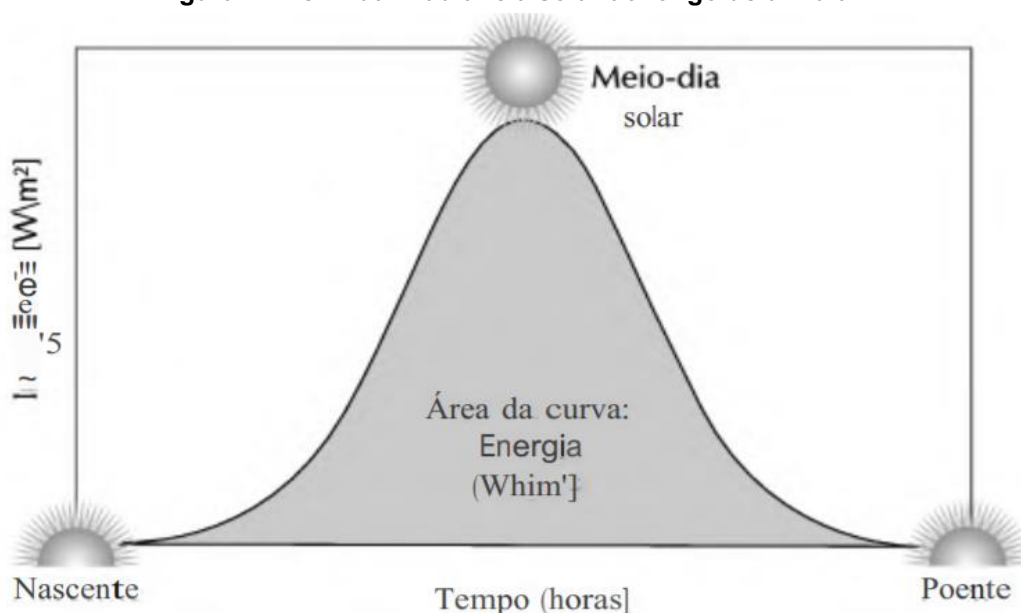
2.4 Irradiância solar

Irradiância é uma grandeza que quantifica a radiação solar, sendo expressa na unidade de potência por área de superfície, ou seja, W/m^2 .

A medida de irradiância em W/m^2 é muito útil para avaliar a eficiência dos dispositivos e sistemas fotovoltaicos. Com o valor padrão de $1.000 W/m^2$ as eficiências das células e módulos fotovoltaicos de diversos fabricantes podem ser especificadas e comparadas com base numa condição padrão de radiação solar (VILLALVA, 2015).

Na figura 2, pode-se observar o perfil da irradiância solar ao longo de um dia.

Figura 2 - Perfil da irradiância solar ao longo de um dia



Fonte: Villalva (2015).

2.5 Irradiação solar

A irradiação solar pode ser definida como a quantidade de energia solar incidente por unidade de superfície durante um período definido de tempo (dia, mês ou ano). Esse parâmetro pode ser obtido através da integração da irradiância global neste período, e costuma ser expresso em $\text{kWh.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, $\text{kWh.m}^{-2} \cdot \text{mes}^{-1}$ ou $\text{kWh.m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ (MAUAD 2017 apud ALONSO; GARCIA; SILVA, 2013).

2.6 Orientação dos módulos fotovoltaicos

De acordo com Villalva (2015), em cada ponto do planeta a radiação direta incide no solo com uma inclinação diferente, inclinação essa que varia de acordo com o tempo e de acordo com a posição da terra e do sol no espaço. Assim, nada pode ser feito para melhorar a captação da radiação difusa, pois ela chega até a superfície terrestre de forma aleatória e irregular. Entretanto, é possível instalar os módulos solares de modo a maximizar a captação de radiação direta, melhorando o aproveitamento da radiação solar.

A instalação correta de um módulo solar fotovoltaico deve levar em conta o movimento diário do Sol. Um módulo instalado com sua face voltada para o Leste, fará o aproveitamento da energia solar somente no período da manhã. No período da tarde, após o meio-dia solar, os raios solares vão deixar de incidir sobre a face do módulo e sua energia não será aproveitada. Da mesma forma, se o módulo estiver com sua face voltada para o Oeste, será capaz de aproveitar a energia solar somente no período da tarde (VILLALVA, 2015).

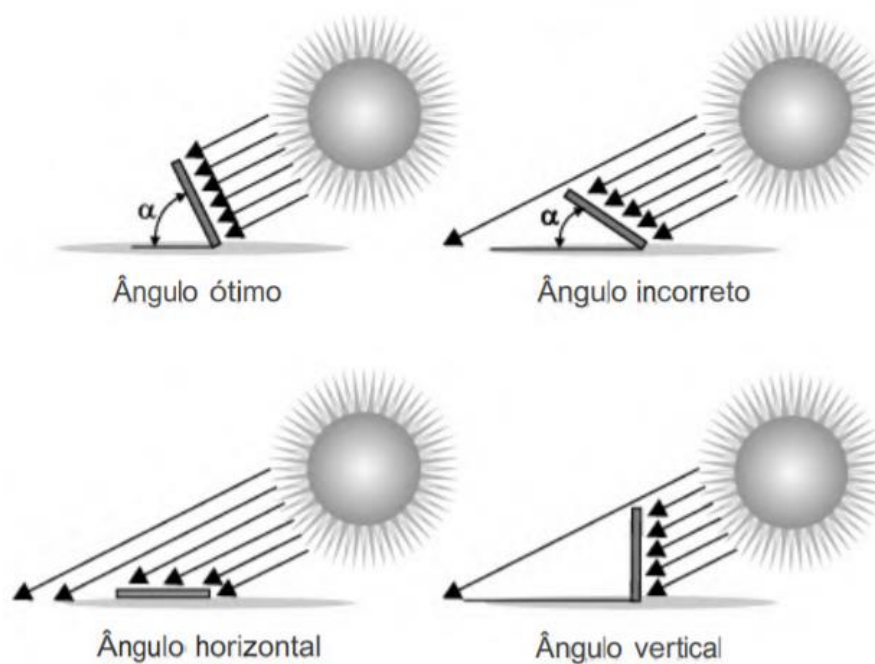
A melhor maneira de instalar um módulo solar fixo, sem um sistema de rastreamento solar, é orientá-lo com sua face voltada para o norte geográfico. Essa orientação melhora o aproveitamento da luz solar ao longo do dia, pois durante todo o tempo o módulo tem raios solares incidindo sobre sua superfície, com maior incidência ao meio-dia solar, quando o módulo fica exatamente de frente para o Sol (VILLALVA, 2015).

2.7 Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos

É importante observar que, para maximizar a energia coletada ao longo do ano, além de voltados ao norte, os geradores fotovoltaicos devem ter a inclinação em relação à horizontal próxima da latitude do local da instalação (ZILLES, et al. 2012).

De acordo com Villalva (2015) a maior parte dos sistemas fotovoltaicos possui ângulo fixo de inclinação, então deve ser escolhido um ângulo por algum critério. A escolha incorreta da inclinação reduz a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica pelo módulo fotovoltaico. Na figura 3, pode-se observar com a variação da inclinação dos módulos, o ângulo de incidência da radiação solar.

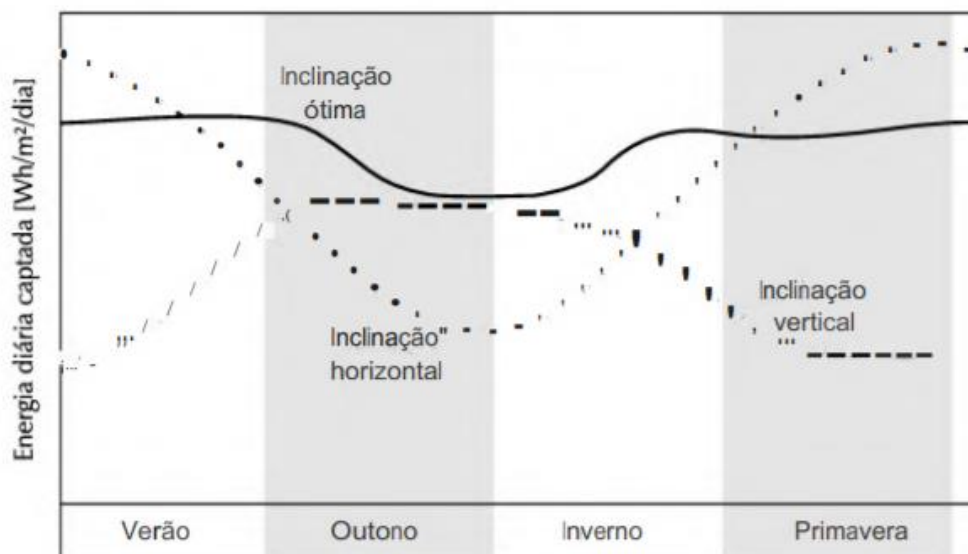
Figura 3 - Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia.



Fonte: Villalva (2015)

Na figura 4, apresenta-se o rendimento com diferentes inclinações dos módulos fotovoltaicos.

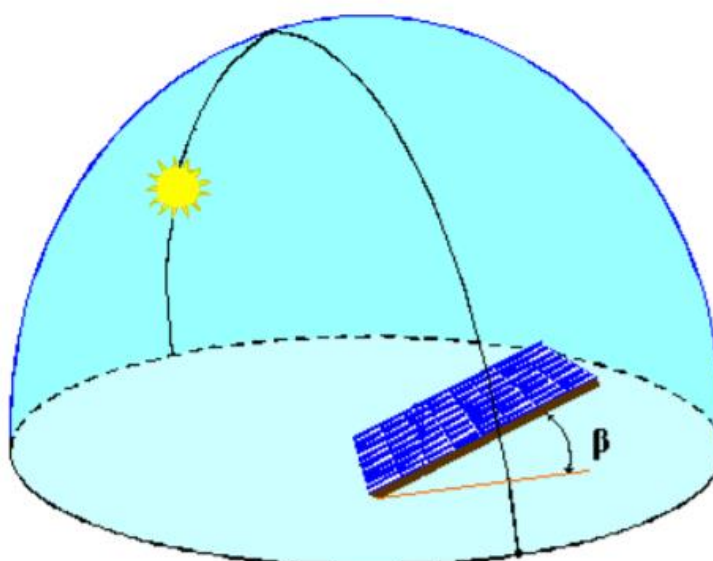
Figura 4 - Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações



Fonte: Villalva (2015)

Segundo Pinho e Galdino (2014) para a geração máxima de energia ao longo do ano, o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos deve seguir a latitude do local onde o sistema será instalado, conforme figura 5. No entanto, pequenas variações na inclinação não resultam em grandes mudanças na energia gerada anualmente e a inclinação dos módulos fotovoltaicos podem estar dentro de um intervalo de 10° da latitude do local.

Figura 5 - Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos



Fonte (Pinho e Galdino, 2014)

Para áreas muito próximas do equador, com latitudes variando entre -10° e $+10^\circ$, aconselha-se uma inclinação mínima de 10° , para favorecer a autolimpeza dos módulos pela ação da água da chuva (PINHO; GALDINO, 2014).

2.8 Composição do sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento (PINHO; GALDINO, 2014).

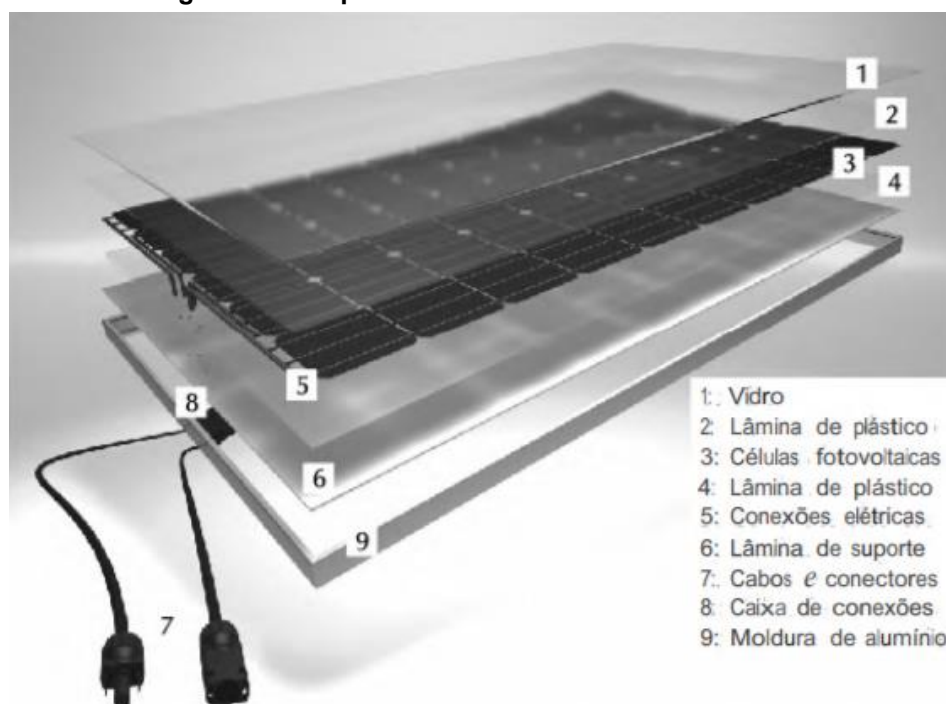
De acordo com Pinho e Galdino (2014), os sistemas fotovoltaicos conectados a rede (SFRC) dispensam o bloco de armazenamento, pois a energia produzida pode ser consumida instantaneamente pela carga, ou injetada diretamente na rede elétrica, para ser usada no modelo de compensação de energia por unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição.

2.8.1 Modulo Fotovoltaico

A célula fotovoltaica é o dispositivo fotovoltaico básico. Uma célula sozinha produz pouca eletricidade, então várias células são agrupadas para produzir painéis, placas ou módulos fotovoltaicos. Um módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Normalmente as células são conectadas em série para produzir tensões maiores (VILLALVA, 2015).

A figura 6 ilustra os componentes de um módulo fotovoltaico.

Figura 6 - Componentes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Villalva, 2014.

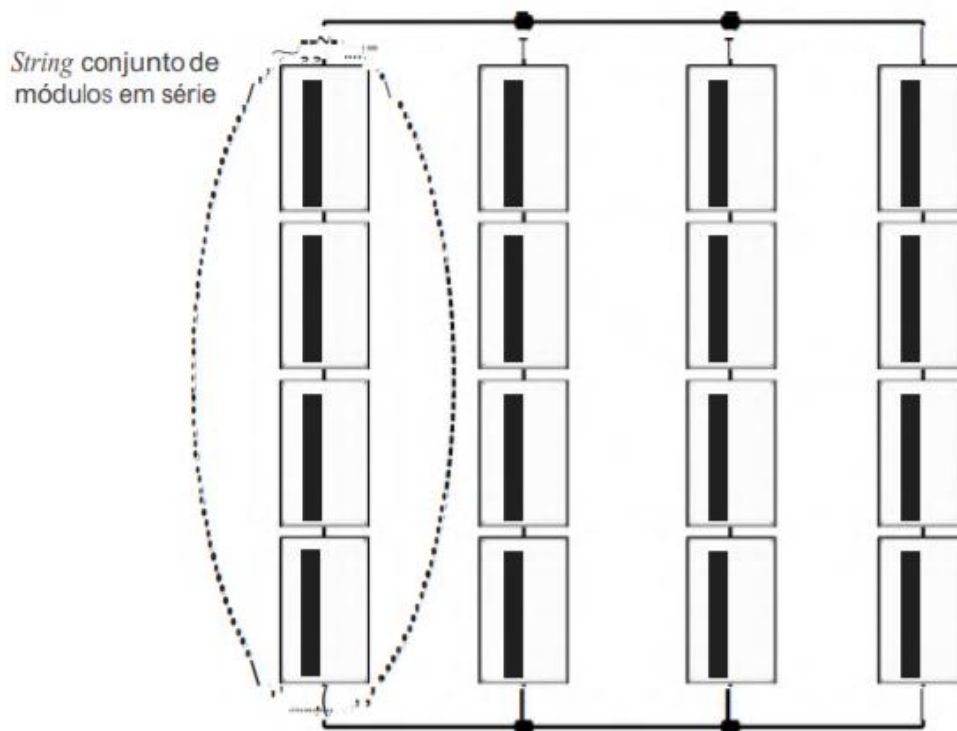
De acordo com Villalva (2015) sistemas fotovoltaicos podem empregar um grande número de módulos conectados em série ou em paralelo para produzir a quantidade de energia elétrica desejada. Um agrupamento de módulos é denominado arranjo ou conjunto fotovoltaico.

Segundo Pinho e Galdino (2014), a conexão em série (chamada *strings*) é feita do terminal positivo de um módulo ao terminal negativo de outro, e assim por diante. Tendo por característica esse modo de ligação, as tensões de todos os módulos são somadas e as correntes que flui em cada módulo são sempre iguais entre si (se os módulos forem idênticos e estiverem com as mesmas condições de operação).

A conexão em paralelo é feita unindo-se os terminais positivos de todos os módulos entre si e procedendo-se da mesma forma com os terminais negativos. Esta conexão resulta na soma das correntes sem alteração da tensão.

Strings são conjuntos de módulos ligados em série. Geralmente, quando se constrói um sistema fotovoltaico, os módulos são primeiramente ligados em série, formando *strings*, para proporcionar a tensão de trabalho adequada. Para aumentar a potência do sistema acrescentam-se *strings* em paralelo, formando conjuntos fotovoltaicos com várias *strings*. Como exemplificado na figura 6.

Figura 7 - Conjunto de módulos fotovoltaicos em associação série e paralelo.



Fonte: Villalva, 2015.

Abaixo tem-se imagens de instalações de módulos fotovoltaicos, a figura 8 ilustra uma instalação feita em telhado, já a figura 9, ilustra uma instalação realizada no solo.

Figura 8 – Exemplo de instalação fotovoltaica em telhado.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 9 – Exemplo de instalação fotovoltaica em solo.



Fonte: Autoria própria (2021).

2.8.2 Inversor de Frequência

Segundo Rüther (2004), os módulos solares fotovoltaicos geram energia em corrente contínua. Assim sendo, se faz necessário o uso de um equipamento eletrônico conhecido como inversor, ou conversor CC-CA, como o exemplificado na figura 10, para que se obtenha tensão em corrente alternada com as características (frequência, conteúdo de harmônicos, forma de onda, etc.) necessárias para satisfazer as condições impostas pela rede elétrica pública e possibilitar assim a interconexão à rede.

Geralmente os inversores para a conexão à rede elétrica são construídos para receber conjuntos com vários módulos conectados em série, formando os chamados *strings* (fileiras de módulos) com tensão de saída elevada (VILLALVA, 2015).

De acordo com Villalva (2015), todos os inversores para a conexão à rede possuem MPPT, o que significa que são preparados para maximizar a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, fazendo-os operar constantemente em seu ponto de máxima potência. Inversores que possuem múltiplas entradas com MPPT

têm a capacidade de otimizar a produção da energia de modo independente para vários conjuntos de módulos fotovoltaicos. Caso um dos conjuntos ou *strings* esteja com uma situação de sombra, por exemplo, os demais que estão conectados ao outro sistema de MPPT continuam operando normalmente em seu ponto de máxima potência. Inversores com múltiplos sistemas de MPPT tornam os sistemas fotovoltaicos mais eficientes.

De modo geral, inversores para conexão á rede com potências individuais de até 5 kW tem saída monofásica. A partir dessa potência é mais comum a utilização de inversores com saída trifásica (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 10 – Exemplo de inversor trifásico.



Fonte: A autoria própria (2021)

2.8.2.1 Oversizing e clipping nos inversores

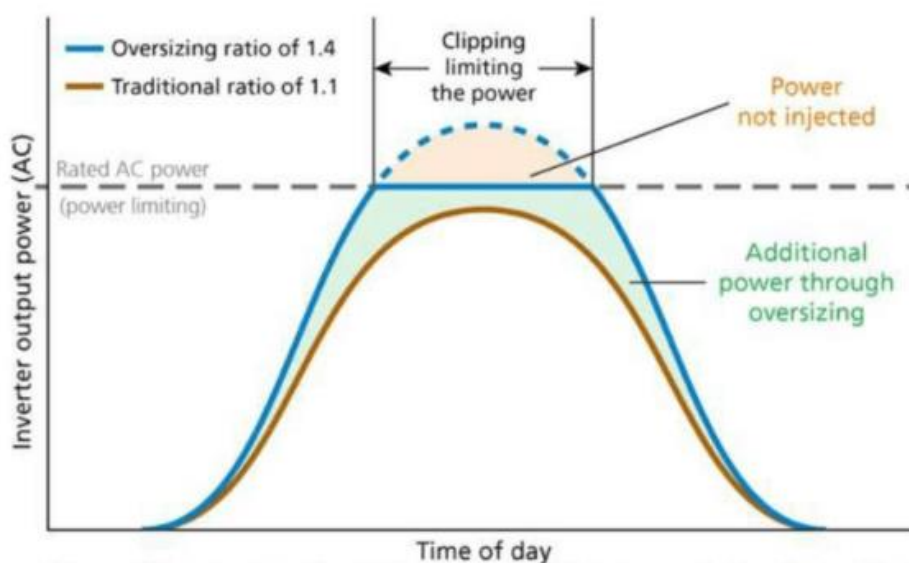
A palavra *oversizing* significa literalmente sobredimensionamento. No contexto de inversores para sistemas fotovoltaicos trata-se do sobredimensionamento da potência de pico do arranjo fotovoltaico (conjunto de módulos do sistema) sobre a potência nominal do inversor (SOUZA, 2019).

$$\text{Oversizing} = \frac{\text{Potencia total de pico dos módulos solares}}{\text{Potência de entrada do inversor}} \quad (1)$$

Uma consequência do *oversizing* é o *clipping*, que é o recorte ou o grampeamento da curva de potência do inversor, como ilustra a figura 10. Dependendo da intensidade do *oversizing* ocorrerá o *clipping*, que nada mais é do que a limitação de potência imposta pelo inversor aos módulos fotovoltaicos. (SOUZA, 2019)

Ainda de acordo com Souza (2019) o *oversizing* é utilizado de forma a se maximizar a geração de energia fotovoltaica, de modo que se atinge a potência nominal do inversor por um período maior de tempo, alargando a curva de geração, consequentemente, obtendo mais energia gerada.

Figura 11 - Exemplo de oversizing e clipping no inversor



Fonte: SOUZA, J. P. (2019)

2.8.3 Medidor Bidirecional

Segundo Tonin (2016), o medidor bidirecional é responsável por registrar a quantidade de energia gerada e injetada na rede, em kWh, e a energia consumida da concessionária, em kWh.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo será descrito a metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho. Foi realizado um estudo de caso em uma unidade consumidora localizada no interior do Paraná, visando analisar o sistema fotovoltaico instalado na unidade consumidora, a fim de avaliar a geração de energia e buscar torna-la mais eficiente. Esse estudo parte do levantamento dos dados da usina instalada, conforme todas as quantidades e modelos dos equipamentos que o compõem.

Para este projeto utilizou-se o software PVSOL Premium 2022 para realizar todas as simulações presentes nesse trabalho, o qual foi utilizado na sua versão de teste disponibilizada pela fabricante Valentin Software, durante o período de 30 dias, compreendido entre 11/04/2022 até 11/05/2022.

Para execução do software PVSOL Premium 2022, foi utilizado um computador com as seguintes configurações de hardware, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Dados do computador utilizado nas simulações

Componentes	Especificações
Processador	I5-7200U 2.5GHz
Memória RAM	8 GB
Placa de vídeo	NVIDIA GeForce MX150
Sistema operacional	Windows 10

Fonte: Autoria própria.

3.1 Características do sistema fotovoltaico

3.1.1 Localização do sistema fotovoltaico

O Sistema em estudo encontra-se no município de Diamante D'Oeste, localizado no interior do estado o Paraná. Possuindo as coordenadas geográficas **24°53'25.9"S 54°12'40.2"W**, com altitude de 571 metros. A fazenda possui um total de 120 alqueires, enquanto a sede possui cerca de 6.000 m².

O local da instalação da UFV é o telhado de um barracão de armazenagem de maquinário agrícola que possui 440 m², sendo 140 m² utilizados para alocação dos módulos.

Figura 12 - Local da usina fotovoltaica.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.2 Dados do sistema fotovoltaico

Considerando levantamento feito junto ao local da instalação, foram coletados marcas e modelos dos equipamentos que compõem o sistema solar fotovoltaico em estudo, além da configuração do sistema projetado.

3.1.2.1 Modulo fotovoltaico

O sistema compreende 35 módulos fotovoltaicos da marca RISEN, modelo RSM150-8-500M. O anexo 1 exhibe todos os detalhes e especificações do produto.

Conforme tabela 2 abaixo, o módulo fotovoltaico possui as seguintes especificações que foram relevantes para o estudo:

Tabela 2 - Especificações dos módulos fotovoltaicos utilizados

Potência nominal	500 Wp
Tensão máxima de potência	42,88 V
Corrente máxima de potência	11,68 A
Tensão de circuito aberto	51,01 V
Corrente de curto circuito	12,46 A
Eficiência do módulo	20,6 %
Número de células	150
Dimensões do módulo	2220x1102x40 mm
Peso	28 kg
Temperatura de operação	-40 a 85°C

Fonte: Datasheet anexo 1

Os módulos em questão estão instalados em telhado de telhas de fibrocimento, através de trilhos de fixação. Eles estão instalados sobre telhado com orientação bem próxima ao norte absoluto, com uma leve rotação no sentido leste de equivalente a 1,5°.

A inclinação dos módulos acompanha a inclinação do telhado do barracão aonde estão instalados. Em medidas realizadas, o barracão possui uma inclinação de aproximadamente 8°.

Abaixo, a figura 13 ilustra a disposição dos módulos sobre o telhado.

Figura 13 - Módulos fotovoltaicos da unidade consumidora em estudo

Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.2.2 Inversores

O sistema em questão possui dois inversores em sua configuração, sendo eles de marcas e características diferentes. Na figura 14, pode-se ver os dois inversores que são usados na UFV:

Figura 14 - Inversores instalados na unidade consumidora em estudo



Fonte: Autoria própria (2022)

Como caracterizado no Anexo 2, o inversor fotovoltaico SOFAR 12KTL-X possui as seguintes especificações que foram relevantes para o estudo, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Especificações técnicas inversor Sofar 12KTL-X

Potência nominal de saída	12 kW
Quantidade de MPPT	2
Quantidade de <i>string</i> por MPPT	1
Faixa de tensão de operação por MPPT	160-960 V
Tensão máxima CC	1000 V
Tensão CA nominal	380 V
Frequência nominal	60 Hz
Oversizing permitido	33 %
Fator de potencia	>0,99

Fonte: Datasheet anexo 2

Na figura 15, vemos em detalhes o inversor SOFAR 12KTL-X:

Figura 15 - Inversor Sofar 12KTL-X

Fonte: Autoria própria (2022)

Vale ressaltar que o inversor SOFAR 12KTL-X possui uma tensão CA nominal de saída de 380V, fazendo-se necessário um transformador 380/220V de 15kVA para realizar a conexão do inversor com a rede.

O outro inversor conectado ao sistema fotovoltaico, é o inversor GROWATT MIN 2500TL-X. Como caracterizado no Anexo 3, o inversor fotovoltaico GROWATT MIN 2500TL-X possui as seguintes especificações que foram relevantes para o estudo, conforme ilustrado na tabela 4.

Tabela 4 - Especificações técnicas inversor Growatt MIN 2500TL-X

Potência nominal de saída	2,5 kW
Quantidade de MPPT	2
Quantidade de <i>string</i> por MPPT	1
Faixa de tensão de operação por MPPT	80-500 V
Tensão máxima CC	500 V
Tensão CA nominal	220 V
Frequência nominal	60 Hz
Oversizing permitido	40 %
Fator de potencia	>0,99

Fonte: Datasheet anexo 3

Na figura 16, vemos em detalhes o inversor GROWATT MIN 2500TL-X:

Figura 16 - Inversor Growatt 2500TL-X



Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.2.3 Dimensionamento da usina

A projeto da UFV se distribui de forma equilibrada entre a potência dos dois inversores.

Abaixo, tem-se a disposição do dimensionamento do inversor SOFAR 12KTL-X. Nele foram usados 30 módulos fotovoltaicos RISEN RSM150-8-500M, sendo a totalidade dividida em duas *strings* de 15 módulos cada.

Os 30 módulos geram uma Potência de 15 kWp. Quando ligados no inversor de 12KW, tem-se um *oversizing* de 25% acima da potência nominal. A fabricante desse modelo de inversor permite até 33% de *oversizing* de acordo com o *datasheet*. Abaixo, demonstra-se o cálculo do *oversizing* em operação.

$$P_{\text{mód}} = Q_{\text{td}} * P_{\text{nominal}} \text{ (kWp)} \quad (2)$$

$$P_{\text{mód}} = 30 * 0,500 \text{ (kWp)} \quad (3)$$

$$P_{\text{mód}} = 15,0 \text{ kWp} \quad (4)$$

$$P_{\text{inversor}} = 12 \text{ kW} \quad (5)$$

$$\text{Oversizing Inversor} = \frac{15,0}{12,0} = 1,25 \quad (6)$$

$$\text{Oversizing Inversor} = 25\% \quad (7)$$

Abaixo, tem-se a disposição do dimensionamento do inversor GROWATT MIN 2500TL-X. Nele foram usados 5 módulos fotovoltaicos RISEN RSM150-8-500M, sendo a totalidade colocada em apenas uma *string* de 5 módulos.

Os 5 módulos geram uma Potência de 2,5KWp. Quando ligados no inversor de 2,5KW, tem-se dimensionamento que não possui *oversizing* acima da potência nominal. A fabricante desse modelo de inversor permite até 40% de *oversizing* de acordo com o *datasheet*.

$$P_{\text{mód}} = Q_{\text{td}} * P_{\text{nominal}} \text{ (kWp)} \quad (8)$$

$$P_{\text{mód}} = 5 * 0,500 \text{ (kWp)} \quad (9)$$

$$P_{\text{mód}} = 2,50 \text{ kWp} \quad (10)$$

$$\text{inversor} = 2,50 \text{ kW} \quad (11)$$

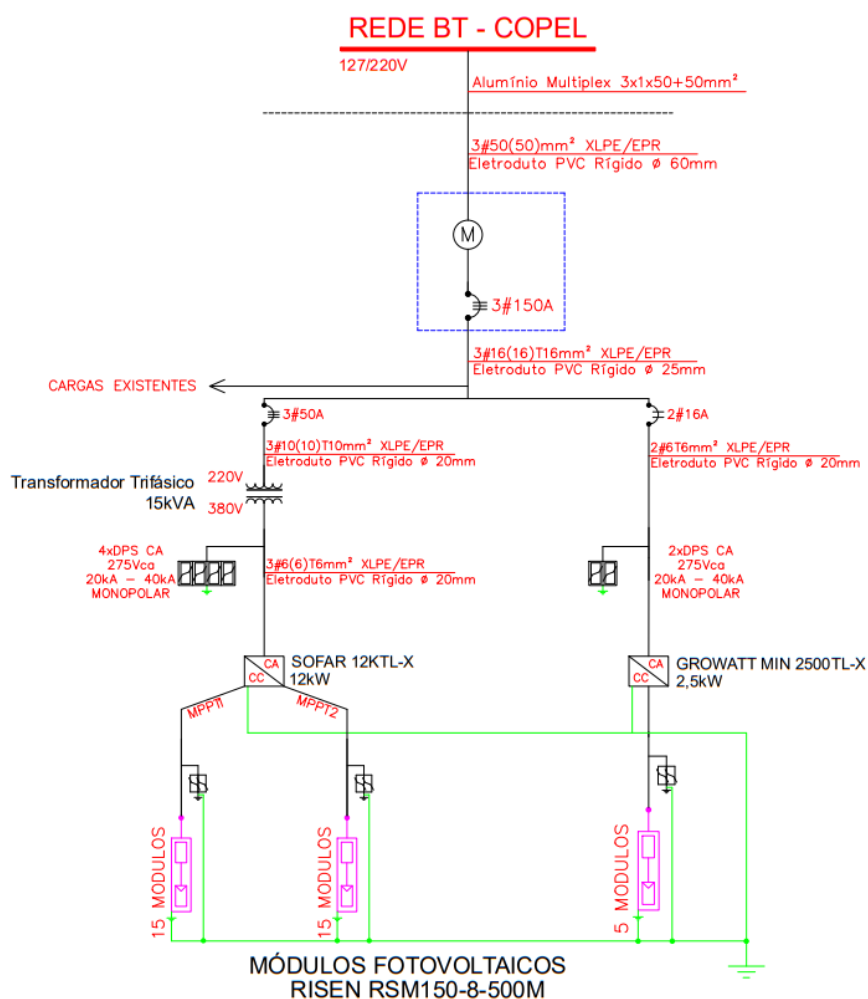
$$\text{Oversizing Inversor} = \frac{2,50}{2,50} = 1,0 \quad (12)$$

$$\text{Oversizing Inversor} = 0\% \quad (13)$$

Como pode se observar, o inversor da marca GROWATT não possui *oversizing*, pois a potência de módulos não ultrapassa a sua potência nominal.

3.1.3 Diagrama unifilar da UFV

Figura 17 - Diagrama unifilar



FONTE: Autoria própria (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Coleta da geração dos inversores

Primeiramente, coletou-se dados referentes ao histórico de geração de cada inversor do sistema original, sendo levado em consideração os meses de agosto de 2021 até março de 2022.

O acompanhamento dos dados de geração dos inversores foi feito através das suas respectivas plataformas de monitoramento *online*. Abaixo, demonstra-se os dados coletados dos sistemas de monitoramento.

Na tabela 2, pode-se observar a geração mensal dos 9 meses respectivos ao estudo, registrado pelos dois inversores.

Tabela 5 – Geração real dos inversores

TEMPO	SOFAR 12KTL-X	GROWATT 2500TL-X	TOTAL
Mês	kWh	kWh	kWh
Ago/21	1683,11	274,70	1957,81
Set/21	1872,50	307,80	2180,30
Out/21	1783,22	297,36	2080,58
Nov/21	2204,74	373,60	2578,34
Dez/21	2591,74	440,60	3032,34
Jan/22	2283,33	386,50	2669,83
Fev/22	2206,17	350,90	2557,07
Mar/22	1919,49	300,7	2220,19
TOTAL	16544,30	2732,16	19276,46

Fonte: Autoria própria

A partir disso, foram realizados dimensionamentos empregando o software PVSOL, a fim de simular as condições reais impostas para a usina, além de condições ideais, para que seja feita uma breve análise dos efeitos do dimensionamento da UFV.

4.2 Simulação utilizando condições reais de projeto

Primeiramente, foram utilizadas condições reais do projeto fotovoltaico instalado na unidade consumidora em estudo. Para esse dimensionamento, foi empregado o software PVSOL Premium.

Como ponto de partida do dimensionamento, foi utilizada a localização exata do objeto em estudo. Usando uma imagem via satélite disponibilizada pelo google maps, foi selecionado uma imagem que contemplasse as benfeitorias da fazenda, entre elas o barracão que condiciona a usina em questão.

A partir da imagem, pode-se desenhar e dimensionar todos os objetos próximos a UFV, como postes, reserva nativa e outras benfeitorias que o local possui, todas essas edificações feitas em escala real de dimensionamento.

Em seguida, após a conclusão da edificação, utilizando ferramentas disponibilizadas pelo software, foram alocados os 35 módulos RISEN RSM150-8-500M no caimento norte do telhado, de forma idêntica à disposição dos módulos existentes.

Figura 18 – Esboço via PVSOL do posicionamento original dos módulos



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 19 - Esboço via PVSOL da Inclinação original dos módulos



Fonte: Autoria própria (2022)

Com ajuda do PVSOL, os módulos foram alocados de forma realizada originalmente nos inversores, ficando distribuídos:

- Inversor SOFAR 12KTL-X: 2 *strings* de 15 módulos em serie cada.
- Inversor GROWATT MIN 2500TL-x: 1 *string* de 5 módulos em série.

Abaixo, a figura 20 nos mostra como está alocada a configuração dos inversores no local.

Figura 20 - Esboço via PVSOL da divisão original das *strings* dos inversores



Fonte: Autoria própria (2022)

Com a configuração dos inversores concluída, e também a colocação de todos os itens que podem gerar algum sombreamento nos módulos, foi utilizado um recurso de estudo de sombreamento, disponibilizado pelo software, o qual possui um registro de dados históricos de posicionamento solar e temperatura ambiente dos últimos 20 anos, onde ele nos ilustra quais módulos serão afetados e qual é a porcentagem de perda diária daquele modulo referente ao sombreamento sofrido. Na figura 21, pode-se observar melhor.

Figura 21 - Esboço via PVSOL do sombreamento original dos módulos



Fonte: Aatoria própria (2022)

Como pode-se observar, os módulos possuem uma perda uniforme em todo o telhado. Essa perda se dá pelo fato de haver uma reserva florestal a alguns metros a frente do telhado, sendo essa perda por sombreamento evidente nos primeiros e nos últimos minutos do dia, quando o sol está próximo a linha do horizonte. Parte dessa sombra também se dá devido a um poste próximo ao telhado, poste esse também considerado no estudo de sombreamento.

Com todo o dimensionamento realizado e o estudo de sombreamento feito, o software nos gera uma planilha de dados referente a geração mensal desse sistema. Para isso ele utiliza o histórico de radiação dos últimos 20 anos referentes a localidade indicada para a simulação. Fazendo assim uma geração média mensal do sistema em questão.

Diante disso, foram obtidos os dados de geração mensal, por inversor e total, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Geração da simulação projeto real

TEMPO	SOFAR 12KTL-X	GROWATT 2500TL-X	TOTAL
Mês	kWh	kWh	kWh
Ago/21	1688,2	278,69	1966,89
Set/21	1737,5	286,36	2023,86
Out/21	2096,6	340,67	2437,27
Nov/21	2255,0	378,11	2633,11
Dez/21	2380,3	399,39	2779,69
Jan/22	2258,7	379,4	2638,1
Fev/22	2016,5	331,91	2348,41
Mar/22	2057,5	336,46	2393,96
TOTAL	16490,3	2730,99	19221,29

Fonte: Autoria própria

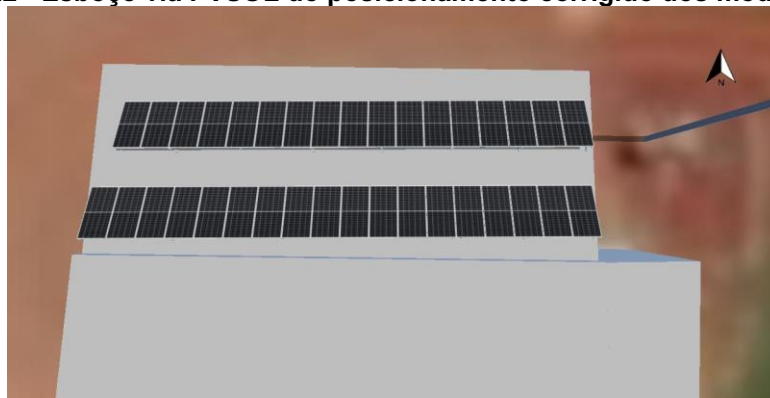
4.3 Simulação utilizando condições ideais de projeto

Em um segundo momento, realizou-se o projeto e a simulação de um sistema com os mesmos equipamentos do projeto real, porém com a modificação de algumas variáveis.

Utilizando o mesmo dimensionamento realizado anteriormente, foram retirados todos os módulos e realocados com correções de rotação e inclinação, conforme é ilustrado abaixo nas figuras 22 e 23 respectivamente.

No que se refere a rotação, os módulos possuem uma ótima posição em relação ao norte, porém foi efetuado uma rotação de 1,2° no sentido anti-horário para que não houvesse nenhuma defasagem angular em relação ao norte.

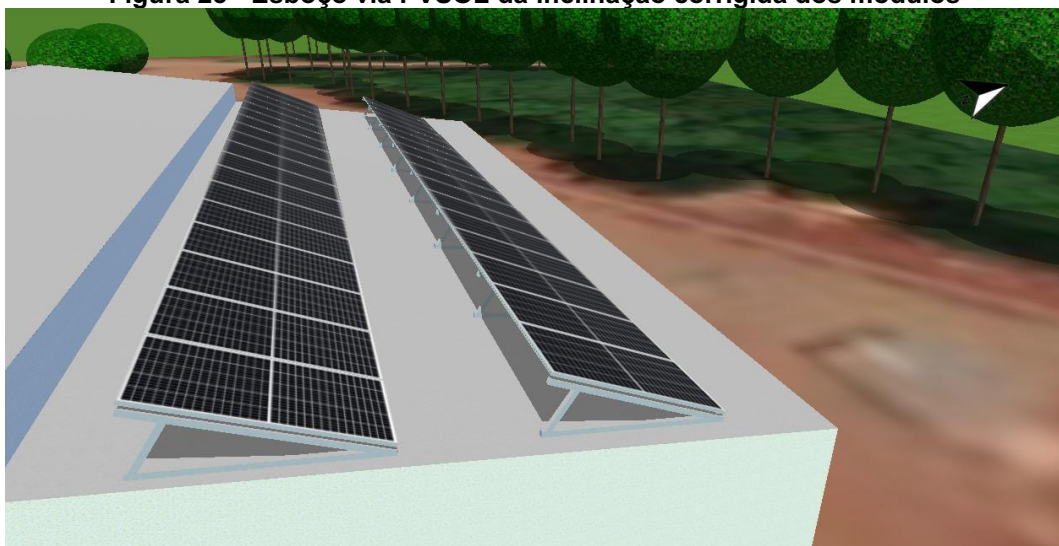
Figura 22 - Esboço via PVSOL do posicionamento corrigido dos módulos



Fonte: Autoria própria (2022)

No que se refere a inclinação, todos os módulos sofreram acréscimo de inclinação, através de uma estrutura extra, que elevou a inclinação dos módulos de $8,2^\circ$ para 24° , de forma a se captar a radiação solar direta de forma mais perpendicular.

Figura 23 - Esboço via PVSOL da inclinação corrigida dos módulos

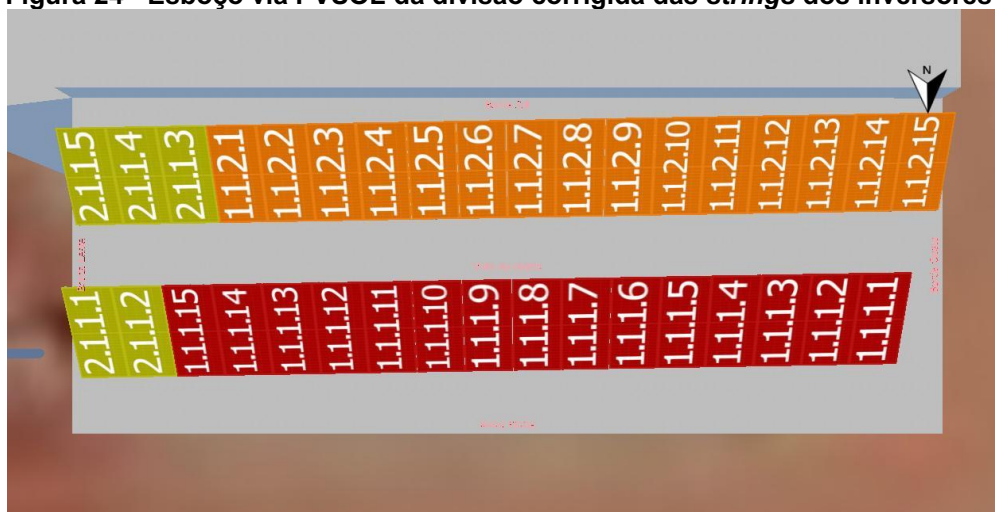


Fonte: Autoria própria (2022)

Além dessas correções, foi adotado uma configuração diferente, aonde um dos módulos da fileira inferior foi alocado em anexo a fileira superior do telhado, de modo a se melhorar o espaço disponível de acesso para manutenção e limpeza dos módulos.

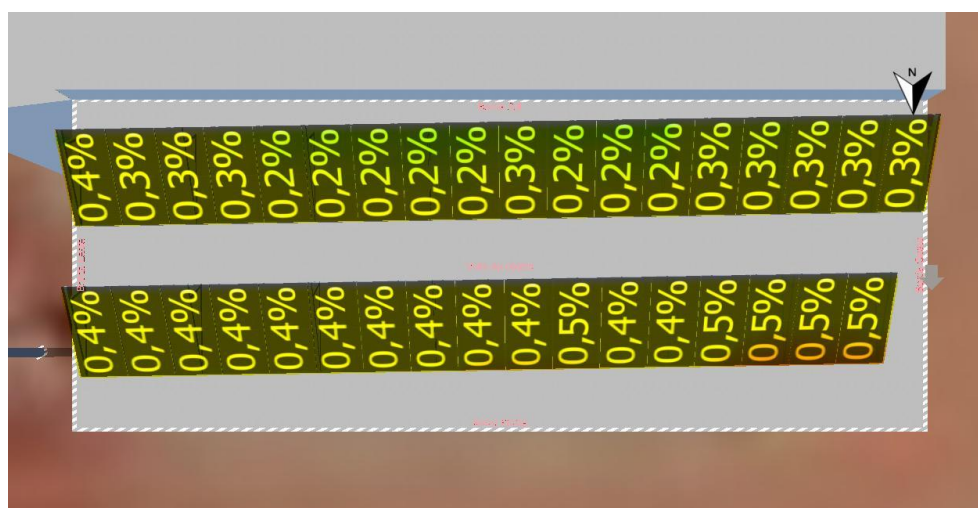
Após isso, foi realizado o mesmo processo da simulação com parâmetros reais, realizando a divisão dos módulos em cada respectivo inversor, de forma idêntica a original, e também o estudo de sombreamento. Abaixo tem-se a configuração dos inversores e também o estudo de sombreamento, nas figuras 24 e 25 respectivamente.

Figura 24 - Esboço via PVSOL da divisão corrigida das *strings* dos inversores



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 25 - Esboço via PVSOL do sombreamento nos módulos após correções



Fonte: Autoria própria (2022)

Como se pode observar, os módulos continuam identificando perda de geração referente ao sombreamento referente a reserva florestal e ao poste localizado próximo ao sistema fotovoltaico.

Em seguida, foi realizado a simulação de geração através do *software*, a fim de se obter a geração máxima de cada inversor. Diante disso, obtiveram-se os seguintes dados de geração:

Tabela 7 - Geração da simulação projeto ideal

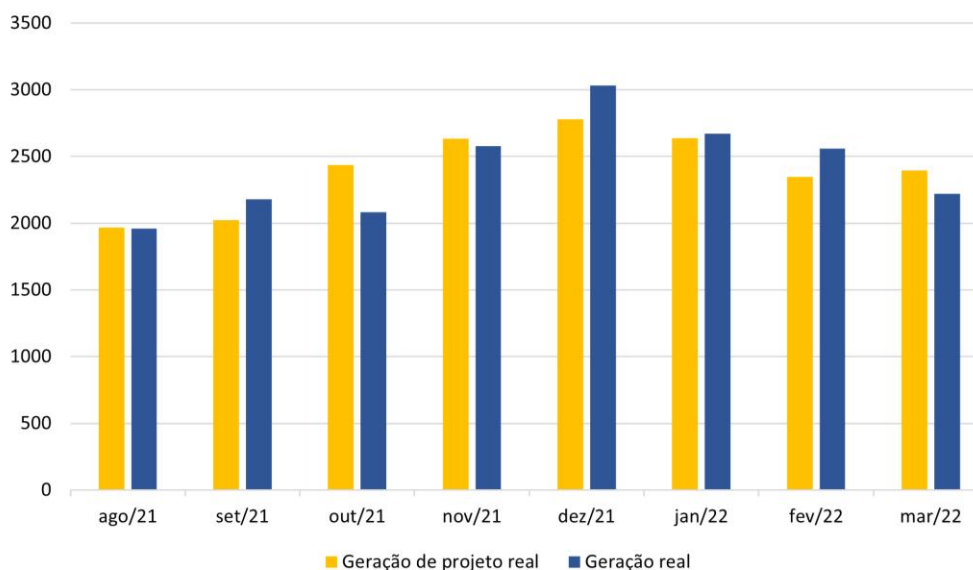
TEMPO	SOFAR 12KTL-X	GROWATT 2500TL-X	TOTAL
Mês	kWh	kWh	kWh
Ago/21	2023,6	334,5	2358,1
Set/21	1945,4	323,44	2268,84
Out/21	2226,1	367,95	2594,05
Nov/21	2279,6	383,35	2662,95
Dez/21	2351,3	393,74	2745,04
Jan/22	2280,4	383,4	2663,8
Fev/22	2080,3	346,97	2427,27
Mar/22	2222,9	372,89	2595,79
TOTAL	17409,6	2906,24	20315,84

Fonte: Autoria própria

Com as simulações realizadas, foi possível comparar os dados de geração registrado pelos inversores nos últimos 9 meses de trabalho, com a geração entregue pelo software.

Em um primeiro momento, realizou-se a comparação entre a geração do sistema real com a simulação desse mesmo sistema, mantendo todos os padrões estabelecidos originalmente na execução de montagem do projeto. No gráfico 1, apresenta-se barras comparativas, aonde estão explícitas as gerações mensais de agosto de 2021 até março de 2022.

Gráfico 1 - Geração projeto real x Geração real



Fonte: Autoria própria

Nesse comparativo, tem-se que a variação deve ser a mínima possível, visto que a simulação foi realizada com parâmetros reais de projeto. Abaixo, apresenta-se na tabela 8, a diferença de geração mensal comparativa.

Tabela 8 - Diferença da geração real para estimativa real

Tempo	Diferença de geração	Percentual
Mês	kWh	%
Ago/21	9,08	0,46
Set/21	-156,44	-7,73
Out/21	356,68	14,63
Nov/21	54,77	2,08
Dez/21	-252,65	-9,09
Jan/22	-31,73	-1,2
Fev/22	-208,66	--8,89
Mar/22	173,77	7,26
TOTAL	-55,18	-0,29%

Fonte: Autoria própria

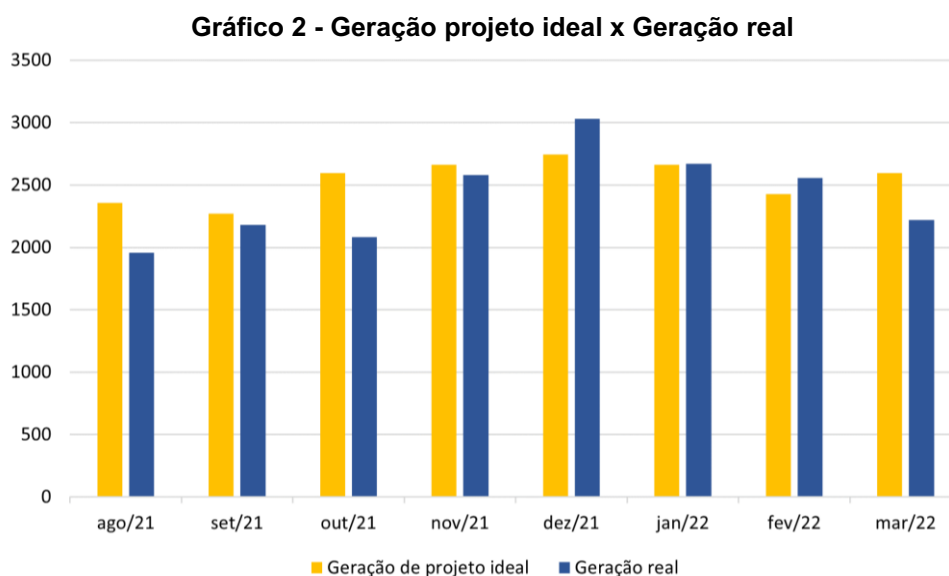
Como pode-se observar, houve uma variação mensal considerável, isso porque o software usa um banco de dados climáticos para realização da simulação, sendo então utilizado dados referentes a anos anteriores. Esse modo de dimensionamento, pode produzir uma diferença considerável caso haja um período longo de chuvas ou nuvens em alguns determinados meses do ano. Porém, essa diferença tende a diminuir ao passo que se aumenta o tempo de análise, como foi o que ocorreu com o estudo em questão.

Ao se analisar o período de 9 meses como um todo, vemos que a diferença entre a geração obtida pelos sistemas de monitoramentos dos inversores para o resultado da simulação computacional, girou em torno de 55,18 kWh de geração do sistema real instalado para o sistema real simulado, sendo essa diferença de aproximadamente 0,29%.

Essa simulação nos mostra que por mais que a simulação use dados climáticos históricos, houve uma grande semelhança nos dados de geração, mostrando a eficiência do software. Essa proximidade de geração também nos mostra a eficiência do sistema instalado, gerando aproximadamente 99,7% do estipulado via simulação.

Em um segundo momento, realizou-se a comparação entre a geração do sistema real com a simulação do sistema ideal. Nessa configuração de sistema ideal, foi reconfigurado a alocação dos módulos no telhado, corrigindo a orientação delas para um norte perfeito, e adicionando uma estrutura de elevação, corrigindo a inclinação dos módulos para 24°.

Abaixo apresenta-se no gráfico 2, a comparação de barras entre as duas gerações em questão:



Fonte: Autoria própria

Nesse sistema, pode-se identificar a variação de geração sofrido pelas correções das variáveis que englobam o posicionamento dos módulos. Abaixo, apresenta-se na tabela 9 a porcentagem de ganho, ou perda, ao longo dos meses, de geração com a alteração das variáveis.

Tabela 9 - Diferença da geração real para estimativa ideal

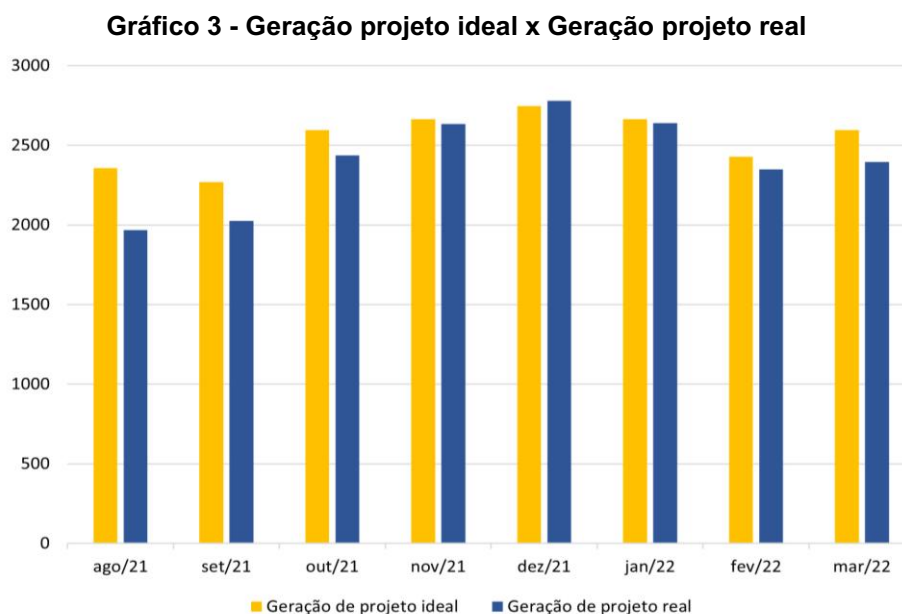
TEMPO	Geração total	Percentual
Mês	kWh	%
Ago/21	400,29	16,98
Set/21	88,54	3,9
Out/21	513,46	19,79
Nov/21	84,61	3,18
Dez/21	-287,3	-10,47
Jan/22	-6,03	-0,23
Fev/22	-129,8	-5,35
Mar/22	375,6	14,47
TOTAL	1039,38	5,39%

Fonte: Autoria própria

Como se pode observar, obteve-se uma variação da geração se comparada mês a mês da simulação ideal para a geração real. Porém, olhando os valores como um total, englobando os 9 meses de análise de geração, pode-se observar que houve um acréscimo de aproximadamente 1040 kWh, que representa 5,39% a mais de geração em relação ao que o sistema de fato produziu ao longo dos 9 meses corridos.

Diante da diferença de resultados, observa-se a eficiência que se consegue acrescentar na geração do projeto, apenas realizando pequenas correções na direção e ângulo dos módulos fotovoltaicos, a fim de que recebessem radiação solar de forma mais efetiva ao longo do dia.

Para fins de análise, foi realizada a comparação entre as duas simulações feitas, a que contém dados reais de geração e a que contém um cenário ideal. Nesse comparativo, pode-se ignorar as diferenças mensais de geração, visto que ambas foram realizadas com o mesmo banco de dados climáticos fornecido pelo software PVSOL. Abaixo, o gráfico 3 ilustra as gerações mensais de ambas as simulações.



Fonte: Autoria própria

Nesse ponto, pode-se analisar de forma clara e específica a diferença que as alterações das variáveis proporcionaram ao projeto em análise. Abaixo, a tabela 10, que nos mostra a diferença de geração do projeto ideal em relação ao projeto real e seu respectivo percentual.

Tabela 10 - Diferença de geração da estimativa ideal para estimativa real

TEMPO	Geração total	Percentual
Mês	kWh	%
Ago/21	391,21	16,89
Set/21	244,98	12,10
Out/21	156,78	6,43
Nov/21	29,84	1,13
Dez/21	-34,65	-1,25
Jan/22	25,7	0,97
Fev/22	78,86	3,36
Mar/22	201,83	8,43
TOTAL	1094,55	5,69%

Fonte: Autoria própria

Como pode-se observar, houve um ganho mensal em praticamente todos os meses analisados. Um ponto importante a salientar, é que a tabela acima nos mostra efetivamente a melhora de geração através das mudanças efetuadas. Como pode-se

observar, houve um acréscimo de aproximadamente 1.095 kWh durante o período de 9 meses, que representa um ganho de 5,69% em relação a simulação de projeto real. Claramente, se pode empregar esse ganho de geração às mudanças realizadas em projeto.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo teve como objetivo desenvolver a análise de algumas variáveis de projeto que comprometem a geração de uma usina fotovoltaica conectada a rede elétrica em uma unidade consumidora localizada na área rural de Diamante D'Oeste.

Para isso, foi necessário realizar um levantamento de dados de geração registrado pelos inversores instalados no local. Também, foi necessário o levantamento dos dados de projeto, tais como quantidade e modelo de módulos e inversores, configuração da distribuição das *strings* em cada inversor, orientação e inclinação dos módulos e análise geral sobre os arredores da usina, para definir pontos de sombreamento. Com esse levantamento, foi possível realizar simulações computacionais de modo a reproduzir a usina instalada, tanto no seu cenário real, quanto em um cenário ideal, otimizando ao máximo a instalação a fim de se ter a maior geração de energia mensal possível.

A partir das simulações, foi possível visualizar a diferença de geração obtida quando se manipula o posicionamento dos módulos na sua inclinação e orientação para condições ideais para a localização da usina.

A análise comparativa feita entre a geração real produzida nos 9 meses estudados e a geração estimada via simulação com a configuração real da usina para o mesmo período de tempo, comprovou a eficácia do software PVSOL nas simulações realizadas, devido a grande proximidade de resultados.

Analisando os resultados, conclui-se que as correções efetuadas a partir do projeto real apresentaram resultados relevantes e que é possível através das mudanças realizadas em projeto melhorar a geração de energia de forma prática.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

A análise dos fatores que podem interferir na geração da energia elétrica por sistemas fotovoltaicos mostrou-se um tema bastante amplo e uma fonte promissora para estudos futuros, de forma que o aprofundamento de alguns tópicos dessa pesquisa pode tornar os resultados ainda mais assertivos. Dessa forma, sugere-se como futuros trabalhos:

- Mensurar as diferenças causadas por perdas de modo a se agrupar os módulos com uma maior taxa de sombreamento em uma quantidade mínima de *strings* possíveis.
- Analisar o efeito de perda no transformador devido a transformação de tensão em casos de inversores com tensão de alimentação diferentes da rede em que é conectado.
- Discriminar a interferência do acúmulo de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos na geração de energia.
- Analisar o custo da instalação das placas no ângulo e rotação ideais com intuito de verificar a viabilidade econômica das alterações.

Espera-se que esse estudo desperte curiosidade em seus leitores, auxiliando na propagação dos conhecimentos utilizados na elaboração do mesmo.

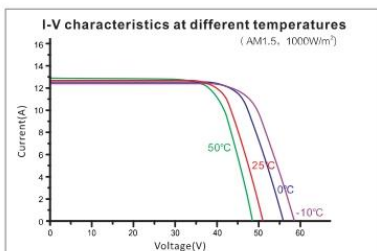
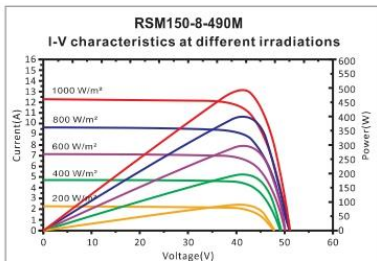
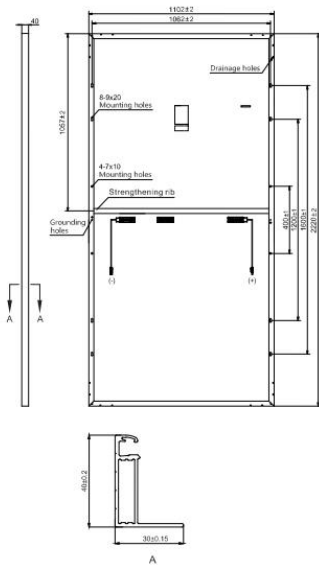
REFERÊNCIAS

- ECORI ENERGIA SOLAR. **Datasheet Risen RSM150-8-500M**. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/e2387-6-titan-mono-rsm150-8-480-505m-g5.3-iec1500v-40mm-2020h1-5-en.pdf>. Acesso em: 14/04/2022.
- GINVERTER. **Datasheet Growatt Min 2500TL-X**. Disponível em: <https://www.ginverter.pt/show-40-578.html>. Acesso em: 14/04/2022.
- MAUAD, Frederico Fábio; FERREIRA, L. D. C; TRINDADE, T. C. G. **Energia Renovável no Brasil, Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras**. 1. ed. São Carlos, 2017.
- PEREIRA, E. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. INPE. São José dos Campos, 2017.
- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- RUTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos - O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Editora UFSC / LABSOLAR, Florianópolis, SC, 2004.
- SOFAR SOLAR. **Datasheet Sofar 12KTL-X** Disponível em: <https://www.sofarsolar.com/product-detail/453/Sofar12KTL>. Acesso em: 14/04/2022.
- SOUZA, João P. **Oversizing e clipping nos sistemas fotovoltaicos**. Canal Solar, 2019. Disponível em: (<https://canalsolar.com.br/oversizing-e-clipping-nos-sistemas-fotovoltaicos/>). Acesso em: 21/05/2022.
- TOLMASQUIM, Mauricio T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2016.
- TONIN, Fabianna Stumpf; URBANETZ JR, Jair. **Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica - SFVCR**. Artigo - INDUSCON, Curitiba, 2016;
- VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações, sistemas isolados e conectados à rede**. 2º edição. São Paulo. Editora Ética, 2015.
- ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

ANEXO 1 – Folha de dados dos módulos Risen - RSM150-8-500M



Dimensions of PV Module Unit: mm



Our Partners:

REM150-M-9BB-EN-H1-5-2020

ELECTRICAL DATA (STC)

Model Number	RSM150-8-480M	RSM150-8-485M	RSM150-8-490M	RSM150-8-495M	RSM150-8-500M	RSM150-8-505M
Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	480	485	490	495	500	505
Open Circuit Voltage-Voc(V)	50.13	50.35	50.57	50.79	51.01	51.23
Short Circuit Current-Isc(A)	12.18	12.25	12.32	12.39	12.46	12.53
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	42.00	42.22	42.44	42.66	42.88	43.10
Maximum Power Current-Imp(A)	11.44	11.50	11.56	11.62	11.68	11.74
Module Efficiency (%) *	19.6	19.8	20.0	20.2	20.4	20.6

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5 according to EN 60904-3.
 * Module Efficiency (%): Round-off to the nearest number

ELECTRICAL DATA (NMOT)

Model Number	RSM150-8-480M	RSM150-8-485M	RSM150-8-490M	RSM150-8-495M	RSM150-8-500M	RSM150-8-505M
Maximum Power-Pmax (Wp)	363.8	367.7	371.5	375.4	379.3	383.2
Open Circuit Voltage-Voc (V)	46.62	46.83	47.03	47.23	47.44	47.64
Short Circuit Current-Isc (A)	9.99	10.05	10.10	10.16	10.22	10.27
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	38.98	39.18	39.38	39.59	39.79	40.00
Maximum Power Current-Imp (A)	9.34	9.38	9.43	9.48	9.53	9.58

NMOT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline 210×70mm
Cell configuration	150 cells (5×15+5×15)
Module dimensions	2220×1102×40mm
Weight	28kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	Anodized Aluminium Alloy type 6063T5, Silver Color
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm ² (12AWG), Positive(+) 270mm, Negative(-) 270mm
Connector	Risen Twinsel PV-SY02, IP68

TEMPERATURE & MAXIMUM RATINGS

Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	44°C±2°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.28%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.36%/°C
Operational Temperature	-40°C~+85°C
Maximum System Voltage	1500VDC
Max Series Fuse Rating	20A
Limiting Reverse Current	20A

PACKAGING CONFIGURATION

	40ft(HQ)
Number of modules per container	540
Number of modules per pallet	27
Number of pallets per container	20
Packaging box dimensions (LxWxH) in mm	2250×1130×1240
Box gross weight[kg]	810

CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.
 ©2020 Risen Energy. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

THE POWER OF RISING VALUE

ANEXO 2 – Folha de dados inversor Sofar 12KTL-X

Datasheet	SOFAR 3.3KTL-X*	SOFAR 4.4KTL-X	SOFAR 5KTL-X*	SOFAR 5.5KTL-X	SOFAR 6.6KTL-X	SOFAR 8.8KTL-X	SOFAR 11KTL-X	SOFAR 12KTL-X
Input (DC)								
Recommended max. PV input power	4390Wp	5860Wp	6650Wp	7320Wp	8780Wp	11710Wp	14630Wp	15960Wp
Max. DC power for single MPPT	3550W	4500W	5700W	5700W	6250W	6200W	6200W	6850W
Number of MPP trackers	2							
Number of DC inputs	1 for each MPPT							
Max. input voltage	1000V							
Start-up voltage	200V							
Rated input voltage	600V							
MPPT operating voltage range	160-960V							
Full power MPPT voltage range	160V-850V	190V-850V	240V-850V	240V-850V	290V-850V	380V-850V	480V-850V	575V-850V
Max. input MPPT current	11A / 11A							
Max. input short circuit current per MPPT	14A							
Output (AC)								
Rated power	3000W	4000W	5000W		6000W	8000W	10000W	12000W
Max. AC power	3300VA	4400VA	5000VA	5500VA	6600VA	8800VA	11000VA	13200VA
Max. output current	4.8A	6.4A	8.0A	8.0A	9.6A	12.8A	15.9A	19.1A
Nominal grid voltage	3 / N / PE, 220 / 380Vac, 230 / 400Vac, 240 / 415Vac							
Grid voltage range	310Vac-480Vac (according to local standard)							
Nominal frequency	50Hz / 60Hz							
Grid frequency range	45Hz-55Hz / 54Hz-66Hz (according to local standard)							
Active power adjustable range	0...100%							
THDi	< 3%							
Power factor	1 default (adjustable + / -0.8)							
Power limit export	Zero export or adjustable power limit export							
Performance								
Max. efficiency	98.0%				98.3%			
European efficiency	97.5%				98.0%			
Self-consumption at night	< 1W							
MPPT efficiency	> 99.9%							
Protection								
DC reverse polarity protection	Yes							
DC switch	Yes							
Safety protection	Anti islanding, RCMU, ground fault monitoring							
ARPC	Anti reverse power controller (optional)							
Communication								
Power management unit	According to certification and request							
Standard communication mode	RS485, WiFi / Ethernet / GPRS (optional), SD card							
Operation data storage	25 years							
General Data								
Ambient temperature range	-25°C...+60°C							
Topology	Transformerless							
Degree of protection	IP65							
Allowable relative humidity range	0...100%							
Max. operating altitude	2000m							
Noise	< 29dB							
Weight	21kg				21kg			
Cooling	Natural							
Dimension	457*452*202mm							
Display	LCD display							
Warranty	5 years / 7 years / 10 years							
Standard								
EMC	EN 61000-6-1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-4							
Safety standards	IEC62109-1 / 2, IEC62116, IEC61727, IEC-61683, IEC60068 (1, 2, 14, 30), IEC60255							
Grid standards	AS / NZS 4777, VDE V 0124-100, V 0126-1-1, VDE-AR-N 4105, CEI 0-21, EN50549, G83, Rd1699, UTE C15-712-1, EN50530, NB / T32004							

The models marked with "*" should be available only for some designated countries.

SOFAR 3300 / 4400 / 5000 / 5500 / 6600 / 8800 / 11000 / 12000TL-X_EN_202103_V1

ANEXO 3 – Folha de dados inversor Growatt MIN 2500TL-X

Datasheet	MIN 2500TL-X	MIN 3000TL-X	MIN 3600TL-X	MIN 4200TL-X	MIN 4600TL-X	MIN 5000TL-X	MIN 6000TL-X
Input Data							
Max. recommended PV power (for module STC)	3500W	4200W	5040W	5880W	6440W	7000W	8100W
Max. DC voltage	500V	500V	550V	550V	550V	550V	550V
Start voltage	100V	100V	100V	100V	100V	100V	100V
MPP work voltage range/nominal voltage	80V-500V /360V	80V-500V /360V	80V-550V /360V	80V-550V /360V	80V-550V /360V	80V-550V /360V	80V-550V /360V
Max. input current	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A
Max. short-circuit current	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A
Number of independent MPP trackers / strings per MPP tracker	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1
Output (AC)							
Rated AC output power	2500W	3000W	3600W	4200W	4600W	5000W	6000W
Max. AC apparent power	2500VA	3000VA	3600VA	4200VA	4600VA	5000VA	6000VA
Max. output current	11.3A	13.6A	16A	19A	20.9A	22.7A	27.2A
AC nominal voltage	230V(160V-300V)	230V(160V-300V)	230V(160V-300V)	230V(160V-300V)	230V(160V-300V)	230V(160V-300V)	230V(160V-300V)
AC grid frequency	50Hz/60Hz ± 5Hz	50Hz/60Hz ± 5Hz	50Hz/60Hz ± 5Hz	50Hz/60Hz ± 5Hz	50Hz/60Hz ± 5Hz	50Hz/60Hz ± 5Hz	50Hz/60Hz ± 5Hz
Adjustable power factor	0.8leading... 0.8lagging	0.8leading... 0.8lagging	0.8leading... 0.8lagging	0.8leading... 0.8lagging	0.8leading... 0.8lagging	0.8leading... 0.8lagging	0.8leading... 0.8lagging
THDi	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
AC connection	Single phase	Single phase	Single phase	Single phase	Single phase	Single phase	Single phase
Efficiency							
Max. efficiency	98.2%	98.2%	98.2%	98.4%	98.4%	98.4%	98.4%
Euro weighted efficiency	97.1%	97.1%	97.2%	97.5%	97.5%	97.5%	97.5%
MPPT efficiency	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%
Protection Devices							
DC reverse polarity protection	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
DC switch	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
DC surge protection	Type II	Type II	Type II	Type II	Type II	Type II	Type II
Output over current protection	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Output over voltage protection-varistor	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Ground fault monitoring	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Grid monitoring	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Integrated all - pole sensitive leakage current monitoring unit	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
General Data							
Dimensions (W / H / D) in mm	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160
Weight	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG
Operating temperature range	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C
Noise emission (typical)	≤25 dB(A)	≤25 dB(A)	≤25 dB(A)	≤25 dB(A)	≤25 dB(A)	≤25 dB(A)	≤25 dB(A)
Altitude	4000m	4000m	4000m	4000m	4000m	4000m	4000m
Self-Consumption night	< 0.5W	< 0.5W	< 0.5W	< 0.5W	< 0.5W	< 0.5W	< 0.5W
Topology	Transformerless	Transformerless	Transformerless	Transformerless	Transformerless	Transformerless	Transformerless
Cooling concept	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Environmental Protection Rating	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65
Relative humidity	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Features							
DC connection	H4/MC4(opt)	H4/MC4(opt)	H4/MC4(opt)	H4/MC4(opt)	H4/MC4(opt)	H4/MC4(opt)	H4/MC4(opt)
AC connection	Connector	Connector	Connector	Connector	Connector	Connector	Connector
Display	OLED+LED	OLED+LED	OLED+LED	OLED+LED	OLED+LED	OLED+LED	OLED+LED
Interfaces: RS485 / USB / Wi-Fi / 4G / RF	yes / yes / opt / opt / opt	yes / yes / opt / opt / opt	yes / yes / opt / opt / opt	yes / yes / opt / opt / opt	yes / yes / opt / opt / opt	yes / yes / opt / opt / opt	yes / yes / opt / opt / opt
Warranty: 5 years / 10 years	yes / opt	yes / opt	yes / opt	yes / opt	yes / opt	yes / opt	yes / opt

