UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

LUCAS MEDEIROS DA ROCHA

THIAGO MARCOS ASSUNÇÃO

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FIXOS E MÓVEIS PARA MICROGERAÇÃO

Palhoça

2020

LUCAS MEDEIROS DA ROCHA
THIAGO MARCOS ASSUNÇÃO

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FIXOS E MÓVEIS PARA MICROGERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Me. Eng.

Palhoça

2020

LUCAS MEDEIROS DA ROCHA
THIAGO MARCOS ASSUNÇÃO

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FIXOS E MÓVEIS PARA MICROGERAÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 16 de novembro de 2020.

_____
Professor e orientador Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Me. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

_____
Prof. Fabiano Max da Costa, Eng. Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

_____
Anderson Horstmann, Eng.

Este relatório é dedicado a Deus e a nossas famílias.

AGRADECIMENTOS

A todos nossos familiares, em especial nossos pais, pelas palavras de incentivos e apoio nas decisões, tornando nossas conquistas possíveis.

Ao professor Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, nosso orientador, pela sua disponibilidade e por partilhar de seus conhecimentos para que este relatório fosse concluído.

“Mais do que máquinas precisamos de humanidade. Mais do que inteligência precisamos de afeição e doçura. Sem essas virtudes a vida será de violência e tudo estará perdido” (Charles Chaplin, 1940).

RESUMO

A preocupação com os recursos naturais se faz cada dia mais presente em nossa sociedade, o que nos leva a um novo cenário no setor energético que tem direcionado suas atenções as soluções renováveis. A energia fotovoltaica tem um papel de destaque no que se trata de energia renovável, podendo estar presente desde a microgeração até em grandes usinas geradoras, tornando-se um mercado em plena expansão. Vislumbrando esse mercado, novas soluções aparecem no intuito de maximizar a produção de energia nestes sistemas, um exemplo de aplicação é o seguidor solar. O sistema de geração de energia fotovoltaico consiste na transformação da radiação solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico, já o sistema com seguidor solar auxilia esse tipo de geração, através de engrenagens mecânicas e motores que direcionam os módulos solares para a posição de maior captação, assim aumentando a produção de energia, tornando o sistema fotovoltaico mais eficiente. Nesse sentido o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade de implantação de sistemas de geração de energia fotovoltaico com e sem seguidor solar com base em softwares capazes de calcular os ganhos desse sistema. Através do software PVsyst, foram realizadas as simulações dos três sistemas fotovoltaicos, no qual um é fixo e os outros dois são implantados com auxílio de seguidor solar de eixo horizontal e de dois eixos, tal ferramenta conta com um banco de dados afiado que proporciona um panorama fiel das gerações desses sistemas.

Com o cruzamento de dados de geração, levantamento de custos e técnicas de análise financeira, observamos que ambos os sistemas se mostram atrativos, mesmo em sistemas menos usuais no mercado de micro e minigeração como os seguidores solares.

Nesse contexto nosso trabalho se propõe a mostrar a realidade dessas três tecnologias, de modo a definir um sistema desejável do ponto de vista técnico-econômico para uma microgeração de 25 kW.

Palavras-chave: Seguidor Solar. Fotovoltaico. Eficiência.

ABSTRACT

The concern with natural resources is increasingly present in our society, which leads us to a new scenario in the energy sector that has focused its attention on renewable solutions. Photovoltaic energy has a prominent role in terms of renewable energy, and can be present from microgeneration to large generating plants, becoming a market in full expansion. Looking at this market, new solutions appear in order to maximize energy production in these systems, an example of application is the solar tracker. The photovoltaic energy generation system consists of the transformation of solar radiation into electrical energy through the photovoltaic effect, whereas the system with solar tracker assists this type of generation, through mechanical gears and motors that direct the solar modules to the position of greatest capture , thus increasing energy production, making the photovoltaic system more efficient. In this sense, the present work aims to analyze the feasibility of implementing photovoltaic energy generation systems with and without a solar follower based on software capable of calculating the gains of this system. Through the PVsyst software, we carry out the simulations of the three photovoltaic systems, in which one is fixed and the other two are implemented with the aid of a horizontal and two-axis solar tracker, such a tool has a sharp database that provides a panorama generations of these systems.

With the crossing of generation data, cost surveys and financial analysis techniques, we observed that both systems are attractive, even in less usual systems in the micro and mini generation market, such as solar followers.

In this context, our work aims to show the reality of these three technologies, in order to define a desirable system from the technical-economic point of view for a 25 kW microgeneration.

Keywords: Tracker. Photovoltaic. Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz energética brasileira 17
Figura 2 – Átomo 19
Figura 3 – Comparação do gap de energia entre materiais isolante, semicondutor e condutor 20
Figura 4 – Junção P-N 21
Figura 5 – Efeito fotovoltaico 21
Figura 6 – Espectro visível 22
Figura 7 – Radiação solar 23
Figura 8 – Componentes consideradas no modelo de Perez 24
Figura 9 – Movimento do sol 25
Figura 10 – Camadas 26
Figura 11 – Lingote de silício monocristalino 27
Figura 12 – Wafers de silício monocristalino 27
Figura 13 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino 28
Figura 14 – Lingote de silício policristalino 29
Figura 15 – Célula de silício policristalino 30
Figura 16 – Módulo fotovoltaico 31
Figura 17 – Painéis fotovoltaico bifacial 31
Figura 18 – Curvas P – V de um sistema fotovoltaico 32
Figura 19 – Células sombreadas 33
Figura 20 – Efeito do diodo bypass 33
Figura 21 – Sistema On-Grid 34
Figura 22 – Sistema Off-Grid 35
Figura 23 – Comparação de energia gerada entre um sistema fixo e um sistema com seguidor solar 36
Figura 24 – Seguidor solar passivo 37
Figura 25 – Seguidor polar de eixo único 38
Figura 26 – Seguidor solar de eixo horizontal 39
Figura 27 – Seguidor de eixo vertical 40
Figura 28 – Seguidor solar de dois eixos 41
Figura 29 – Seguidor solar VS placa fixa 41
Figura 30 – Sistema fotovoltaico com inversor solar 42
Figura 31 – PVsyst 44

Figura 32 – Simulação dos sistemas fotovoltaicos na Unisul 48
Figura 33 – Sistema fixo..... 49
Figura 34 – Sistema com tracker de eixo horizontal 50
Figura 35 – Sistema fotovoltaico com tracker de dois eixos..... 51
Figura 36 – Conversão de radiação solar em energia elétrica 52
Figura 37 – Perdas relacionadas ao sistema 53
Figura 38 – Performance Ratio..... 54
Figura 39 – Perdas do sistema fixo..... 55
Figura 40 – Performance Ratio do sistema fixo 56
Figura 41 – Perdas do sistema com seguidor solar de eixo horizontal..... 58
Figura 42 – Performance Ratio do sistema com seguidor solar de eixo horizontal 59
Figura 43 – Perdas do sistema com seguidor de dois eixos..... 61
Figura 44 – Performance Ratio do sistema com seguidor solar de dois eixos 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração do sistema fixo 56
Tabela 2 – Saldos e resultados do sistema fixo 57
Tabela 3 – Geração do sistema com seguidor solar de eixo horizontal 59
Tabela 4 – Saldos e resultados do sistema com seguidor solar de eixo horizontal 60
Tabela 5 – Geração do sistema com seguidor solar de dois eixos 61
Tabela 6 – Saldos e resultados do sistema com seguidor solar de dois eixos 63
Tabela 7 – Orçamento do sistema fixo 64
Tabela 8 – Orçamento do sistema com seguidor de eixo horizontal 65
Tabela 9 – Orçamento do sistema com seguidor de dois eixos 65
Tabela 10 – Fluxo de caixa do sistema fixo 66
Tabela 11 – VPL, TIR e Payback do sistema fixo 67
Tabela 12 – Fluxo de caixa do sistema com seguidor solar de um eixo 68
Tabela 13 – VPL, TIR e Payback do sistema com seguidor solar de um eixo 68
Tabela 14 – Fluxo de caixa do sistema com seguidor solar de dois eixos 69
Tabela 15 – VPL, TIR e Payback do sistema com seguidor solar de dois eixos 69
Tabela 16 – Comparação entre os sistemas 70
Tabela 17 – Geração e área dos sistemas móveis 71
Tabela 18 – Geração e área do sistema fixo 71
Tabela 19 – Geração por m² 71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 JUSTIFICATIVA 14
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA 15
1.3 OBJETIVOS 15
1.3.1 Objetivo Geral 15
1.3.2 Objetivos Específicos 16
1.4 DELIMITAÇÕES 16
1.5 METODOLOGIA 16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17
2.1 CENÁRIO ENERGÉTICO 17
2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO 18
2.3 RADIAÇÃO SOLAR 22
2.4 TIPOS DE RADIAÇÃO SOLAR 22
2.5 TRANSPOSIÇÃO DA IRRADIÂNCIA PARA O PLANO INCLINADO 23
2.6 ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 24
2.7 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 25
2.7.1 Células fotovoltaicas 25
2.7.1.1 Silício monocristalino 26
2.7.1.2 Silício policristalino 28
2.7.2 Módulos fotovoltaicos 30
2.8 SOMBREAMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 32
2.9 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS 34
2.10 SEGUIDOR SOLAR (TRACKER) 35
2.11 SEGUIDOR SOLAR PASSIVO 36
2.12 SEGUIDOR SOLAR ATIVO 37
2.12.1 Seguidor polar de eixo único 38
2.12.2 Seguidor de eixo horizontal 38
2.12.3 Seguidor de eixo vertical ou azimute 39
2.12.4 Seguidor de dois eixos 40
2.13 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS FIXOS E COM SEGUIDOR SOLAR 41

2.14 INVERSORES 42
2.15 SOFTWARE PVSYST 7.0.10 43
2.16 VIABILIDADE ECONÔMICA 44
2.16.1 Fluxo de caixa 44
2.16.2 Taxa mínima de atratividade (TMA) 44
2.16.3 Valor presente líquido (VPL) 45
2.16.4 Taxa interna de retorno (TIR) 45
2.16.5 Payback descontado 46
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO 47
3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO 47
3.1.1 Características do sistema fixo 48
3.1.2 Características do seguidor solar de eixo horizontal 49
3.1.3 Características do seguidor solar de dois eixos 50
3.2 FATORES DO GRUPO FOTOVOLTAICO 51
3.2.1 Conversão de radiação solar em energia elétrica 51
3.2.2 Perdas relacionadas ao sistema 52
3.2.3 Performance Ratio (PR) 54
3.3 ENERGIA GERADA 55
3.3.1 Geração do sistema fotovoltaico fixo 55
3.3.1.1 Análise de geração de energia do sistema fixo 55
3.3.1.2 Taxa de desempenho do sistema fixo 56
3.3.2 Geração do sistema com seguidor solar de eixo horizontal 58
3.3.2.1 Análise de geração de energia do sistema com seguidor solar horizontal 58
3.3.2.2 Taxa de desempenho do sistema com seguidor solar de eixo horizontal 59
3.3.3 Geração do sistema com seguidor solar de dois eixos 60
3.3.3.1 Análise de geração de energia do sistema com seguidor solar de dois eixos 60
3.3.3.2 Taxa de desempenho do sistema com seguidor solar de dois eixos 62
3.4 INVESTIMENTO 63
3.4.1 Investimento do sistema fotovoltaico fixo 63
3.4.2 Investimento seguidor solar 64
3.4.2.1 Investimento seguidor solar de eixo horizontal 64
3.4.2.2 Investimento seguidor solar de dois eixos 65
4 VIABILIDADE DOS SISTEMAS 66
4.1 VIABILIDADE ECONÔMICA 66

4.2 VIABILIDADE TÉCNICA 70
5 CONCLUSÃO 72
REFERÊNCIAS 73
ANEXOS 77
ANEXO A – Relatório PVsyst sistema fixo 78
ANEXO B – Relatório PVsyst sistema com seguidor solar de eixo horizontal 82
ANEXO C – Relatório PVsyst sistema com seguidor solar de dois eixos 87

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia fotovoltaica é vista como uma tecnologia de energia limpa e sustentável, que utiliza o insumo mais abundante e amplamente disponível no planeta, a radiação solar. O Brasil possui um potencial gigantesco para geração de energia solar, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, diariamente incidem entre 4.444 a 5.483 watt-hora por metro quadrado (Wh/m²) no país, tornando a geração fotovoltaica um mercado atrativo, porém ainda existem certas barreiras como o custo, intermitência e sazonalidade que ofuscam o potencial desses sistemas, requerendo pesquisas e investimentos no setor para que se alcance uma grande escalabilidade dessa geração na matriz energética brasileira.

O presente trabalho busca realizar um estudo que permita o aperfeiçoamento da produção de energia elétrica a partir da energia solar, comparando a eficiência energética do sistema fotovoltaico com seguidor solar ao modelo fixo sem rastreamento. Neste sentido, realizamos o desenvolvimento por software de um seguidor solar que se ajusta automaticamente ao alinhamento do sol possibilitando receber sua maior incidência em um período maior. Os dados coletados servirão de suporte para análise de viabilidade podendo por fim afirmar se a implementação do seguidor solar em sistemas fotovoltaicos é viável e atrativo tanto tecnicamente quanto financeiramente.

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com as projeções do *International Energy Outlook* 2017, deve haver um crescimento de 28% no consumo de energia elétrica no mundo entre os anos de 2015 e 2040, necessitando assim de novas fontes geradoras para atender essa crescente demanda. Na procura por fontes alternativas de geração de energia que causem menos impactos ambientais, evidencia-se uma evolução no estudo das energias limpas, principalmente do vento e sol.

Na geração fotovoltaica a fonte primária de energia é o sol, no Brasil possuímos um alto índice de radiação solar, de acordo com Lima (2016) o Nordeste Brasileiro é a região que apresenta os maiores índices de incidência de radiação solar, tornando essa geração mais eficiente e refletindo assim em um melhor resultado ao sistema.

A geração limpa e renovável vem ganhando evidência no que se trata de utilização sustentável dos recursos naturais, porém não garantem ainda um fornecimento constante de energia como as tradicionais fontes geradoras que compõem a matriz energética brasileira (Hidráulica, Biomassa, Carvão e Petróleo). Dessa forma, ao propor o sistema de seguidor solar,

buscamos maximizar os ganhos da geração fotovoltaica, que se caracteriza por sofrer diversas perdas e atenuações no processo de conversão da luz do sol em energia elétrica.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A necessidade de usinas geradoras para atender a demanda de energia elétrica é crescente, no Sistema Elétrico de Potência Brasileiro, as usinas responsáveis por atender a maior parte da carga são: as hidroelétricas que são vulneráveis a estiagem, além de causar impactos ambientais, e as termelétricas que realizam a combustão de materiais, geralmente fósseis como o carvão, responsáveis pela emissão de gases na atmosfera.

Como alternativa para as tradicionais fontes surgiu a geração fotovoltaica, que aproveita a radiação do sol e a transforma em energia elétrica, se mostrando mais próspera de acordo com o crescimento na relação custo-benefício. O grande interesse mundial no segmento proporcionou avanços tecnológicos no que se trata de aspecto construtivo das placas, porém existe um grande défice na produção dessa energia, já que apenas uma pequena parte da radiação emitida pelo sol é convertida em potência.

Uma alternativa proposta para aumentar a eficiência do sistema fotovoltaico visa os movimentos de rotação e translação da Terra, sabendo que a posição do sol durante o dia e as estações do ano influenciam na produção de energia proveniente do sol.

O seguidor solar (Tracker) surgiu como uma ferramenta que maximiza a produção, essa técnica envolve basicamente estruturas mecânicas, motores e códigos de programação para direcionar os painéis fotovoltaicos de acordo com o movimento do sol, fazendo com que a placa esteja sempre perpendicular aos raios solares, tendo assim máxima produção durante todo dia.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é simular três sistemas fotovoltaicos idênticos, que diferem uns dos outros apenas por usarem métodos e tecnologias de instalações diferentes, tal como, o modelo fixo de módulo fotovoltaico, o seguidor solar de eixo horizontal e o seguidor de dois eixos. Podendo assim determinar os ganhos obtidos e concluir a viabilidade técnica e financeira da aplicação desse mecanismo para sistemas de microgeração de 25 kW.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir as especificações a serem utilizadas nos sistemas fotovoltaicos;
- Criar uma modelagem da estrutura mecânica utilizando software;
- Simulação das características elétricas do projeto;
- Orçar sistemas simulados;
- Constatar viabilidade técnica e econômica;

1.4 DELIMITAÇÕES

Neste trabalho vislumbramos explorar o desempenho do seguidor solar com rastreadores passivos, com um e dois graus de liberdade, avaliando e comparando o tradicional sistema de placas fixas. Essa análise será realizada através do software PYsyst, onde realizaremos os parâmetros desejados de ambas tecnologias de modo a assegurar um retrato fiel da geração dos três métodos (fixo, seguidor solar de eixo horizontal e seguidor solar de dois eixos), todos os sistemas serão simulados na localização do campus da Unisul, unidade Pedra Branca para uma correta comparação entre as simulações. Por fim através de uma análise técnica e financeira definiremos a geração fotovoltaica de energia elétrica ideal a ser utilizada em nossa microgeração de 25 kW.

1.5 METODOLOGIA

O presente trabalho avalia, através de uma pesquisa de natureza aplicada, teórico-experimental, a viabilidade técnica-financeira entre os sistemas fotovoltaicos fixo, seguidor solar de eixo horizontal e de dois eixos, podendo assim dividir o trabalho em cinco capítulos.

O capítulo 1 trata da introdução, objetivos da pesquisa e suas justificativas.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico e abrange a energia do Brasil, fontes de energia, tecnologias das placas, componentes do sistema fotovoltaico e seus tipos.

No capítulo 3 é apresentado a metodologia utilizada, como: características da simulação do sistema fotovoltaico, ajuste de parâmetro, geração de energia e investimento dos modelos apresentados no presente trabalho.

No Capítulo 4 é apresentada a viabilidade técnica-econômica dos três sistemas (fixo, seguidor solar de um grau e dois graus de liberdade).

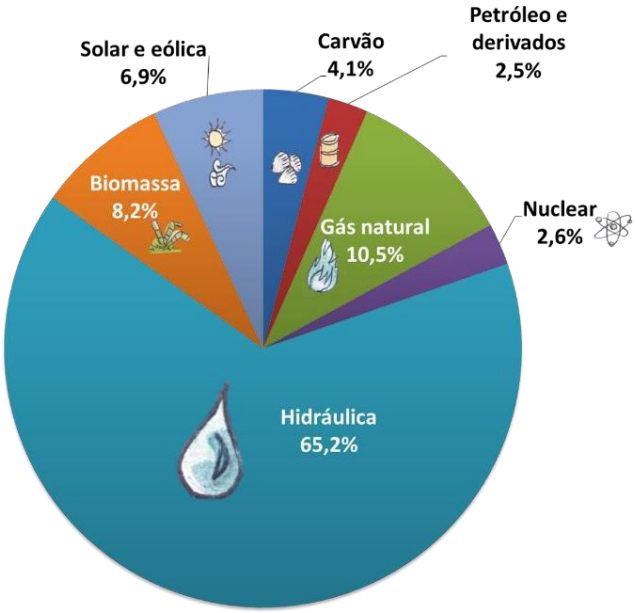
Por fim, no Capítulo 5 é apresentada a conclusão da presente monografia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CENÁRIO ENERGÉTICO

No cenário energético mundial busca-se alternativas sustentáveis que propiciem uma menor interferência na relação com a natureza, possibilitando a geração de energia através de fontes sustentáveis capazes de atender a demanda crescente e os anseios da sociedade. No Brasil, as características geográficas possibilitam a utilização das fontes renováveis como biomassa, eólica e solar na composição da sua matriz energética. Podemos verificar a composição da matriz energética brasileira na figura 1.

Figura 1 – Matriz energética brasileira



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2018.

Segundo o estudo do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB/CEPEL, possuímos um potencial de geração eólica de aproximadamente 150 gigawatt (GW), se destacando em especial os litorais brasileiro pela maior incidência de ventos.

Na geração fotovoltaica, no local menos ensolarado no Brasil é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, que é um dos líderes no uso da energia fotovoltaica, de acordo com a Orizon Solar Energy. Mostrando assim o potencial energético que possuímos em nosso território.

Necessitamos de avanços tecnológicos que viabilizem a implementação desses sistemas em larga escala, podendo assim aproveitar o grande potencial energético renovável existente em nosso território.

2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

A energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá, por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico (IMHOFF).

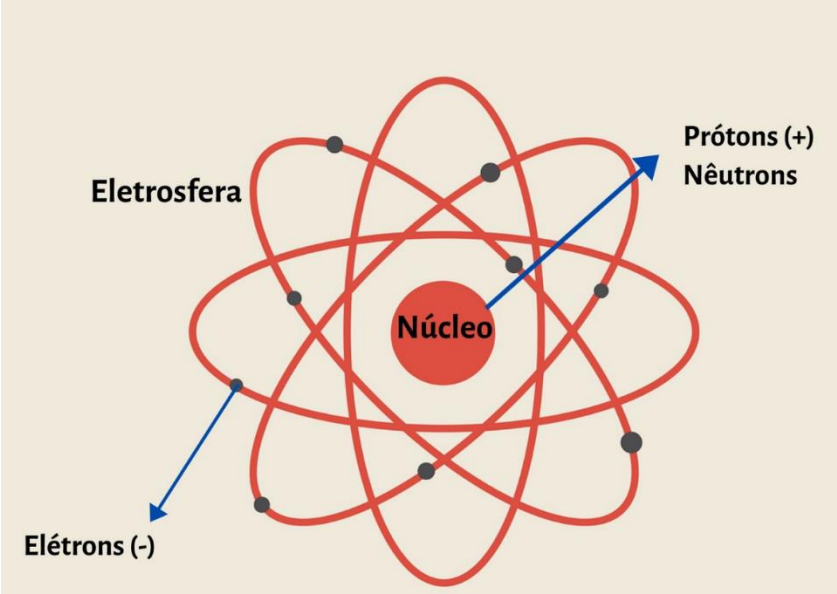
O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a luz, ou radiação eletromagnética do Sol, incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas (Villalva).

Para entender o efeito fotovoltaico, é necessário expor algumas teorias básicas sobre semicondutores e como esse material torna possível a conversão da energia solar em eletricidade.

Toda a matéria existente é formada por átomos que são partículas microscópicas compostas por elétrons que giram em torno de um núcleo composto por prótons e os nêutrons.

Segundo Camila Salgado de Paula, os elétrons se encontram na eletrosfera, que corresponde a maior parte do volume atômico, girando ao redor do núcleo em órbitas (ou camadas) com energia definida. Há no máximo sete camadas ao redor do núcleo e são representadas pelas letras K, L, M, N, O, P e Q a partir do núcleo. A camada mais externa é também a mais energética, chamada de banda de valência. Podemos verificar a composição do átomo através da figura 2.

Figura 2 – Átomo



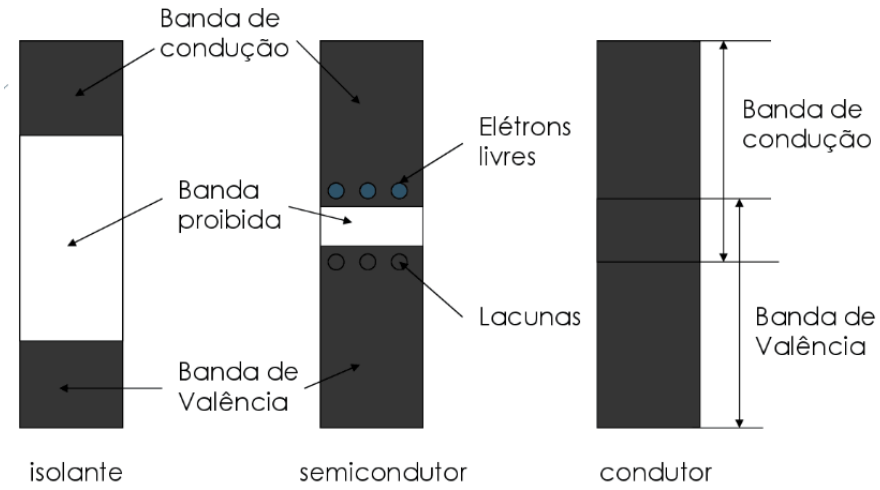
Fonte: Significados, 2020

Alguns elétrons na banda de valência podem possuir uma grande quantidade de energia, o que lhes permite saltar para uma faixa superior. Estes elétrons são responsáveis pela condução de eletricidade e de calor, e esta faixa é chamada de banda de condução. A diferença na energia de um elétron na banda de valência e a camada mais interna da banda de condução é chamada de energia de gap (Kalogirou).

Materiais que possuem a banda de valência cheia de elétrons e a banda de condução vazia são chamados de isolantes, isso se dá pelo fato de que a energia necessária para vencer o vão (gap) que há entre a banda de valência e a banda de condução é muito grande impossibilitando os elétrons de saltarem para a banda de condução. Já os materiais que possuem a banda de valência vazia e alguns elétrons na banda de condução são chamados de condutores.

De acordo com Kalogirou, os materiais com camadas de valência parcialmente cheias têm gaps intermediários e são chamados de semicondutores. Eles têm a mesma estrutura de banda que os isolantes, mas a sua diferença de energia é muito mais estreita. Os dois tipos de semicondutores são os puros, chamados semicondutores intrínsecos, e aqueles dopados com pequenas quantidades de impurezas, chamados semicondutores extrínsecos. Nos semicondutores intrínsecos, os elétrons de valência podem ser facilmente excitados por meios térmicos ou ópticos e pular o gap de energia estreito para a banda de condução, onde os elétrons não têm ligação atômica e, portanto, são capazes de se moverem livremente através do cristal. Podemos verificar o gap de energia entre os diferentes materiais na figura 3.

Figura 3 – Comparação do gap de energia entre materiais isolante, semicondutor e condutor



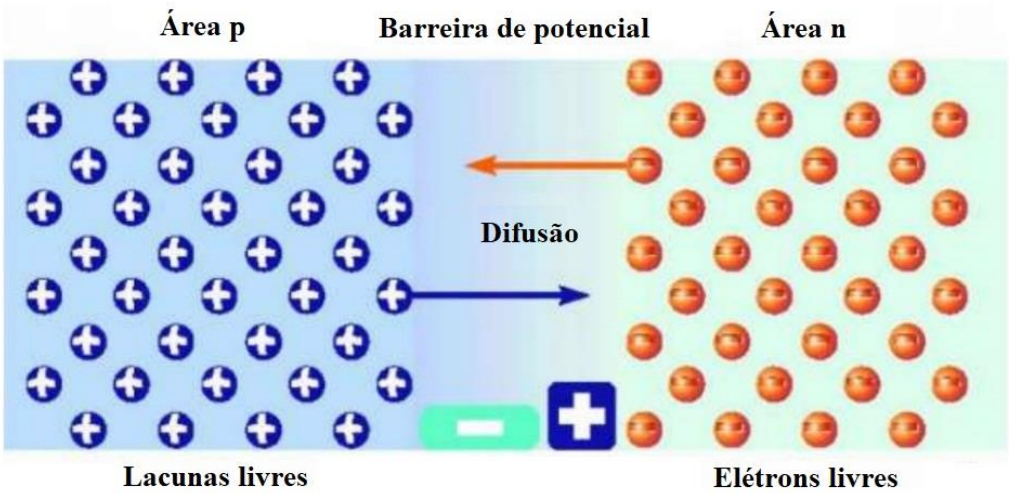
Fonte: static.docsity, 2019.

Em semicondutores, se o material que é dopado tem mais elétrons na camada de valência do que o semicondutor, o material é chamado um semicondutor do tipo N. O semicondutor do tipo N é eletricamente neutro, mas tem excesso de elétrons, que estão disponíveis para condução (Kalogirou).

Em semicondutores, se o material que é dopado tem menos elétrons na camada de valência que o semicondutor, o material dopado é chamado um semicondutor do tipo P. O semicondutor do tipo P é eletricamente neutro, mas tem lacunas positivas (elétrons perdidos) em sua estrutura, que podem acomodar elétrons em excesso (Kalogirou).

De acordo com Villalva, quando duas camadas de materiais P e N são colocadas em contato, formando o que se chama junção semicondutora, os elétrons da camada N migram para a camada P e ocupam os espaços vazios das lacunas. A mudança dos elétrons e lacunas de uma camada para outra origina um campo elétrico e cria uma barreira de potencial entre as duas camadas, como ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Junção P-N

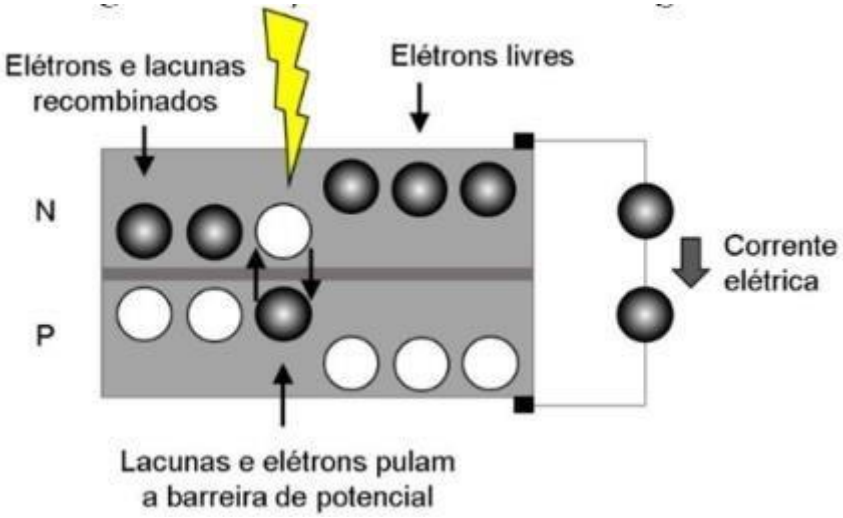


Fonte: Monografias poli ufrj, 2011

A camada superior de material N de uma célula fotovoltaica é tão fina que a luz pode penetrar nesse material e descarregar sua energia sobre os elétrons, fazendo com que eles tenham energia suficiente para vencer a barreira de potencial e movimentar-se da camada N para a camada P (Villalva).

Os elétrons em movimento são coletados pelos eletrodos metálicos. Se houver um circuito fechado os elétrons vão circular em direção aos eletrodos da camada N, formando uma corrente elétrica (Villalva). Podemos verificar o efeito fotovoltaico na figura 5.

Figura 5 – Efeito fotovoltaico



Fonte: Curso elétrica e cia, 2018

2.3 RADIAÇÃO SOLAR

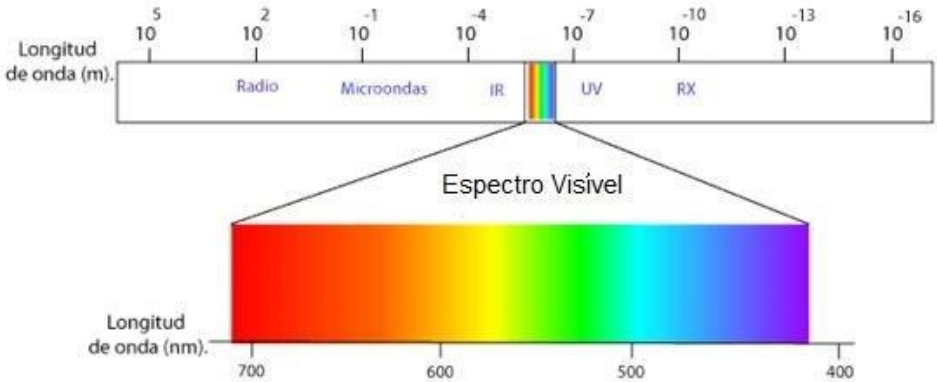
O sol é a fonte primária de energia para todos os seres vivos, é através dele que os vegetais realizam a fotossíntese liberando oxigênio, que usamos como uma fonte de energia própria.

A energia do Sol é transmitida para o nosso planeta através do espaço na forma de radiação eletromagnética. Essa radiação é constituída de ondas eletromagnéticas que possuem frequência e comprimentos de ondas diferentes (Villalva).

A soma de todas as frequências emitidas pelo Sol e que chegam a terra é chamada de espectro da radiação solar, possuindo faixa de comprimento desde os raios gamas (na faixa de 10^{-14} ,centésimo de trilionésimo metros) até as ondas de rádio (na faixa de 10^{2}, hecto metros). Porém para aplicações de energia solar é utilizado apenas uma parte do espectro da radiação solar.

A radiação fundamental para aplicações de energia solar é aquela emitida pelo Sol nas faixas de espectro ultravioleta, visível e infravermelho. Portanto, a radiação do comprimento de onda importante está entre 0,15 e 3,0 micrómetro (Kalogirou).

Figura 6 – Espectro visível



Fonte: Pinterest, 2018.

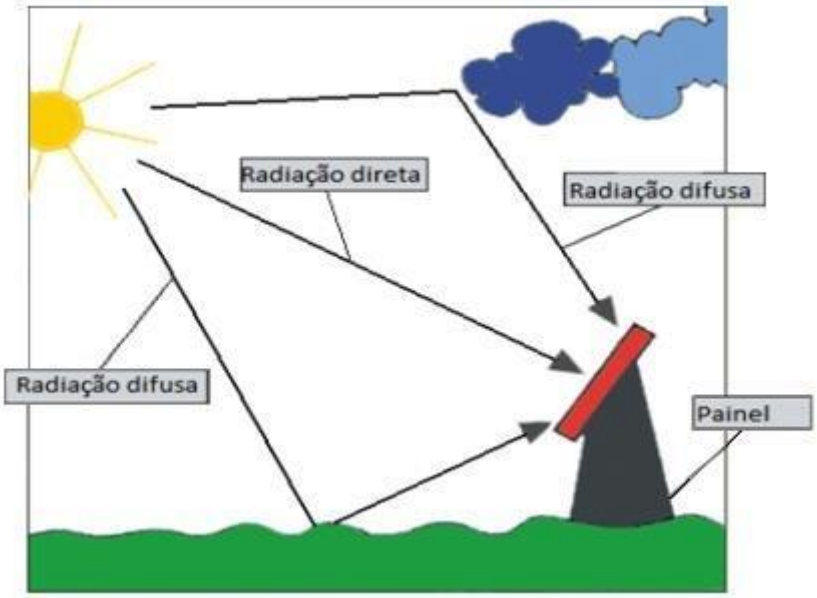
2.4 TIPOS DE RADIAÇÃO SOLAR

A radiação sofre variações a partir do momento em que ela entra na atmosfera até chegar à superfície terrestre, pois há a influência de diversos fatores como ar atmosférico, nuvens e da poluição. A radiação que atinge o solo, chamada de radiação global, vem de todas as direções

pois ao entrar na atmosfera ela encontra obstáculos como vapor e se espalha mudando de direção.

A radiação global é a soma da radiação direta e da radiação difusa. A radiação direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do Sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal com uma inclinação que depende do ângulo zenital do Sol. A radiação difusa corresponde aos raios solares que chegam indiretamente ao plano. É resultado da difração na atmosfera e da reflexão da luz na poeira, nas nuvens e em outros objetos (Villalva).

Figura 7 – Radiação solar



Fonte: HCC energia solar, 2017.

2.5 TRANSPOSIÇÃO DA IRRADIÂNCIA PARA O PLANO INCLINADO

De modo a averiguar a disponibilidade de recurso solar na área de interesse de um projeto fotovoltaico, é necessário utilizar modelos matemáticos que consigam estimar a radiação solar local em superfícies arbitrariamente inclinadas, como o modelo de Perez.

O modelo de Perez é um método complexo de cálculo que leva em conta as componentes do céu denominadas de direta normal, difusa isotrópica, difusa circunsolar, difusa refletida do solo e difusa do horizonte em superfícies inclinadas, como mostra a figura 8.

Figura 8 – Componentes consideradas no modelo de Perez

Fonte: DUFFIE e BECKMAN, 2013.

Utilizando ferramentas computacionais, podemos reproduzir esse modelo matemático e com isso, gerar simulações que possam trazer resultados confiáveis de radiação solar em médias horária, diária, mensal e anual em planos horizontal e inclinado.

2.6 ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

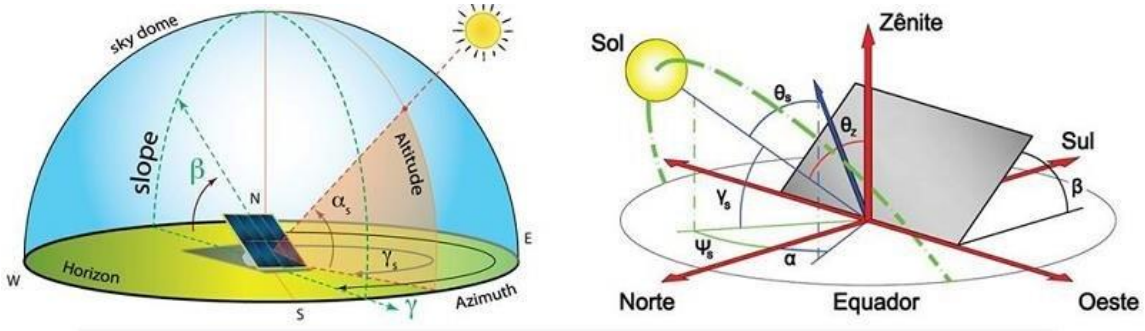
Como visto anteriormente não temos como saber de onde vem os raios da radiação difusa. Já a radiação direta é possível saber e por isso os painéis fotovoltaicos são orientados de acordo com ela para maximizar a captação dos raios diretos, porém esses raios atingem o solo com diferentes inclinações em cada ponto do planeta e essa inclinação varia ao longo dos dias pois a terra está em constante movimento referente ao Sol.

Para orientar os painéis corretamente deve-se levar em conta o movimento do sol diariamente. O Sol nasce no Leste e se põe no Oeste devido ao movimento de rotação da terra, ou seja, se os painéis forem orientados para leste a maior incidência da radiação sobre os módulos seria na parte da manhã, do contrário a maior incidência seria na parte da tarde. Para maximizar a captação da radiação solar os módulos são orientados em direção ao norte para locais abaixo da linha do equador e orientados ao sul para localidades acima da linha do equador.

O movimento de translação é responsável pelas estações do ano, elas influenciam na orientação dos módulos pois no verão o ângulo da altura solar é maior que no inverno, com

isso, para maximizar a captação da radiação solar é necessário que os painéis sejam instalados com uma certa inclinação, geralmente essa inclinação corresponde a latitude do local de instalação. Podemos verificar o movimento do sol e os ângulos através da figura 9.

Figura 9 – Movimento do sol



Fonte: BBS Solar, 2019.

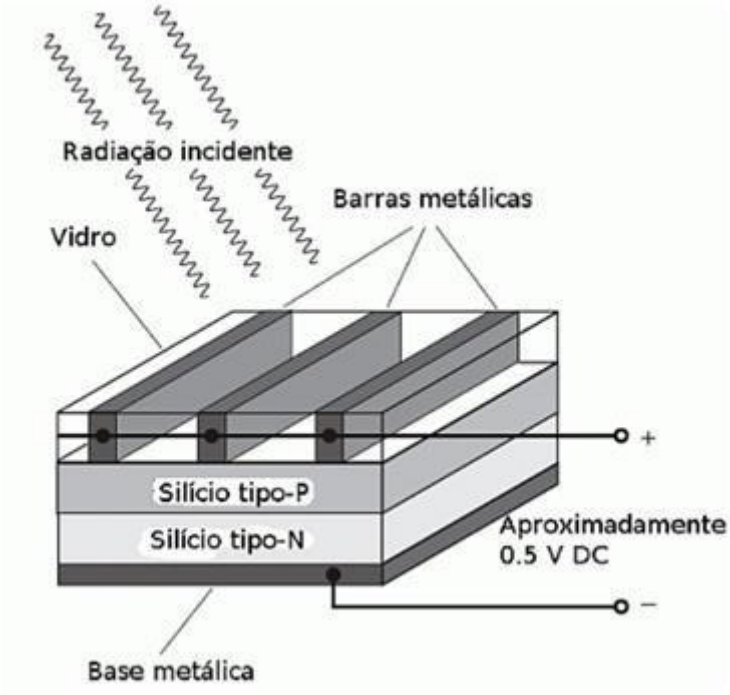
2.7 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

2.7.1 Células fotovoltaicas

Também conhecida como célula solar, a célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor, que utiliza o efeito fotovoltaico para produzir eletricidade a partir da luz solar.

A célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semicondutor P e N. Acima desse material há uma grade metálica e embaixo uma base metálica. A base e a grade metálica têm como finalidade coletar a corrente elétrica produzida pela ação dos raios solares. A base inferior se trata de uma película de alumínio ou de prata. A parte superior recebe a luz solar, portanto precisa ser translúcida para que os raios penetrem no material, por essa razão os contatos elétricos são em forma de uma fina grade metálica, com ilustrado da figura 10.

Figura 10 – Camadas



Fonte: ResearchGate, 2016.

Existem atualmente diversas tecnologias para a fabricação de células fotovoltaicas, onde as mais comuns encontradas no mercado são as de silício monocristalino e a de silício policristalino.

2.7.1.1 Silício monocristalino

A fabricação da célula de silício monocristalino se inicia no aquecimento do cristal de dióxido de silício em altas temperaturas, onde são submetidos a um processo de formação de cristal chamado de Czochralski. O resultado desse processo é o lingote de silício monocristalino mostrado na figura 11.

Figura 11 – Lingote de silício monocristalino

Fonte: vocesolar, 2019.

Esses lingotes são serrados na espessura da célula para produzir wafers, que são finas bolachas de silício cortadas em formato octogonal (quadrado com as pontas cortadas), como mostrada na figura 12.

Figura 12 – Wafers de silício monocristalino

Fonte: Portal Solar, 2018.

De acordo com Villalva, os wafers são submetidos a processos químicos nos quais recebem impurezas em ambas as faces, formando as camadas de silício P e N que constituem a base para o funcionamento da célula fotovoltaica. Por último, a célula semi acabada recebe uma

película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra face e uma camada de material anti reflexivo na face que vai receber a luz. O produto final é a célula fotovoltaica monocristalina mostrado na figura 13.

Figura 13 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino

Fonte: Alicdn, 2019

As células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente. Alcançando eficiência de 15% a 18%, porém possui um custo de produção mais elevado do que os outros tipos de células. São células rígidas e quebradiças, que precisam ser montadas em módulos para adquirir resistência mecânica para o uso prático (Villalva).

2.7.1.2 Silício policristalino

Por ser um processo de fabricação menos rigoroso, as células de silício policristalino são mais baratas, porém possuem uma eficiência menor quando comparado com as células de silício monocristalinos.

O lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes (Villalva).

A figura 14 exibe o aspecto de um lingote de silício policristalino.

Figura 14 – Lingote de silício policristalino

Fonte: Arcuma, 2015.

Semelhante ao processo de fabricação das células de silício monocristalino, os lingotes de silício policristalinos são fatiados para produzir wafers, que posteriormente se transformam em células fotovoltaicas.

A figura 15 ilustra células de silício policristalinas, como pode ser observado, há a presença de manchas devido ao tipo de silício utilizado em sua fabricação.

Figura 15 – Célula de silício policristalino

Fonte: Alicdn, 2019

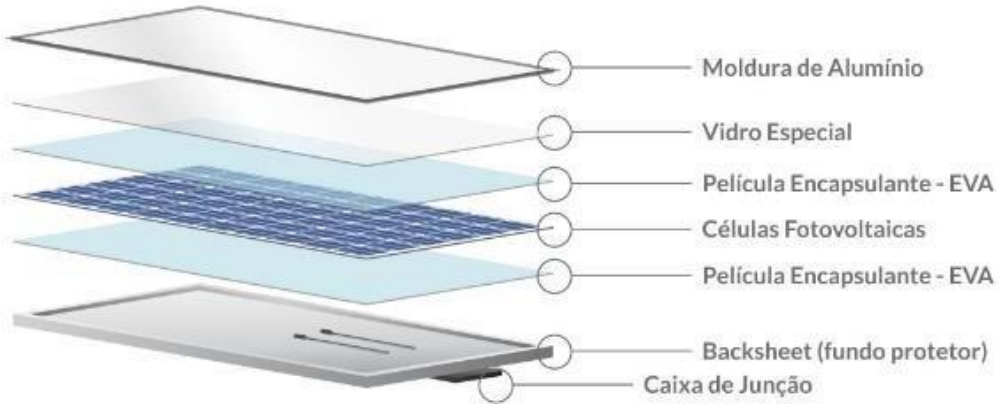
2.7.2 Módulos fotovoltaicos

Um conjunto de células fotovoltaicas conectadas em série e paralelo formam o painel fotovoltaico, que encapsula essas células através de uma moldura de alumínio, um vidro especial, filme encapsulante (material selante de cura rápida que tem como finalidade proteger as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado por raios UV, temperaturas extremas e umidade) e o filme branco (também chamado de Backsheet tem como função proteger os componentes internos do painel solar, especificamente as células fotovoltaicas).

Um módulo consiste em várias células fotovoltaicas interligadas de modo a produzir uma tensão e corrente, podendo as células estarem interligadas em série ou em paralelo dentro do módulo. Em uma ligação em série, a corrente em um módulo permanece constante, enquanto a tensão é aditiva (BALFOUR; SHAW; NASH).

Podemos verificar a composição da célula fotovoltaica através da figura 16.

Figura 16 – Módulo fotovoltaico

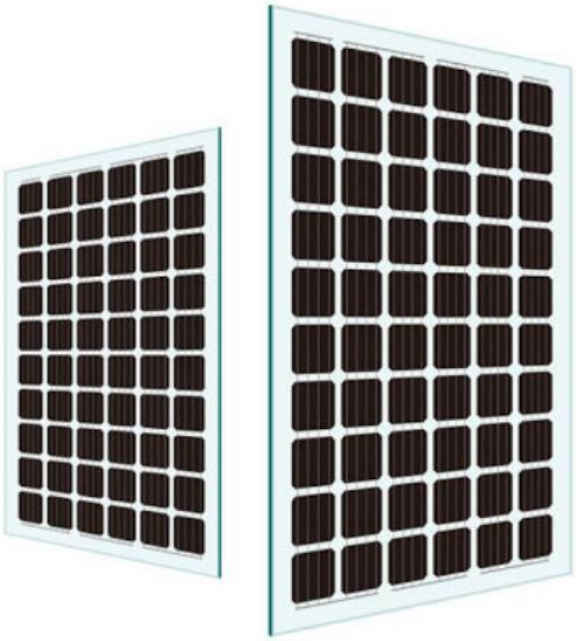


Fonte: ResearchGate, 2016.

Com o objetivo de aumentar a geração de energia, os fabricantes passaram a oferecer módulos solares bifaciais que possuem células fotovoltaicas com duas faces capazes de absorver energia solar radiante. Essa tecnologia de módulo utiliza o efeito do albedo, onde a luz solar refletida do solo ou de qualquer outra superfície é absorvida pelo painel, tanto na parte inferior como na parte superior.

De acordo com Villalva, os módulos bifaciais (figura 17) podem oferecer aumento de eficiência de até 30% sobre os módulos convencionais. Porém, este aumento depende do modo de instalação (altura do solo, ângulo de inclinação) e também do tipo de solo.

Figura 17 – Painéis fotovoltaico bifacial



Fonte: Solar-pvmodule, 2020

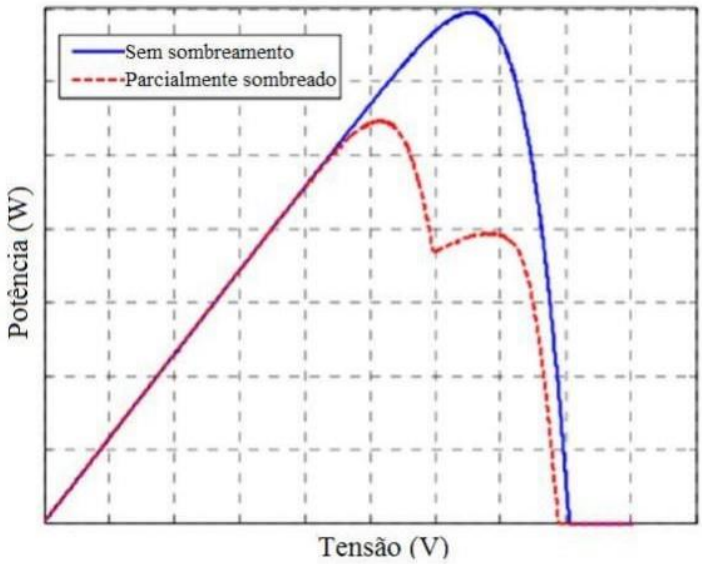
2.8 SOMBREAMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A intensidade da corrente elétrica produzida é diretamente proporcional à radiação que incide sobre a célula, portanto se não sofrer radiação suficiente, sua corrente pode se tornar nula, devendo assim se atentar na escolha da localização dos módulos com intuito de evitar sombras.

O efeito do sombreamento impede a passagem elétrica das células, pois se um módulo de um conjunto estiver recebendo menos irradiação, a corrente elétrica do conjunto é reduzida e consequentemente o sistema produz menos energia.

Quando o módulo estiver parcialmente sombreado, a curva Potência x Tensão do módulo fotovoltaico apresentará uma queda na tensão diminuindo assim o rendimento do sistema, como verificado na figura 18.

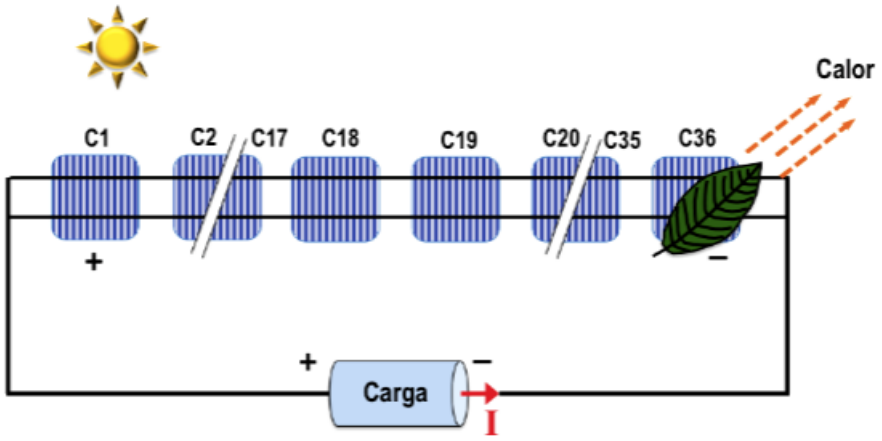
Figura 18 – Curvas P – V de um sistema fotovoltaico



Fonte: Kandemir et al., 2017.

Nesse caso a luz em uma das células está obstruída, fazendo com que a corrente produzida seja muito pequena ou zero, limitando assim a corrente nas outras células, pois ao estar ligada em série prejudica o desempenho do conjunto de módulo, apenas pela sombra ocasionada na placa, como ilustrado na figura 19.

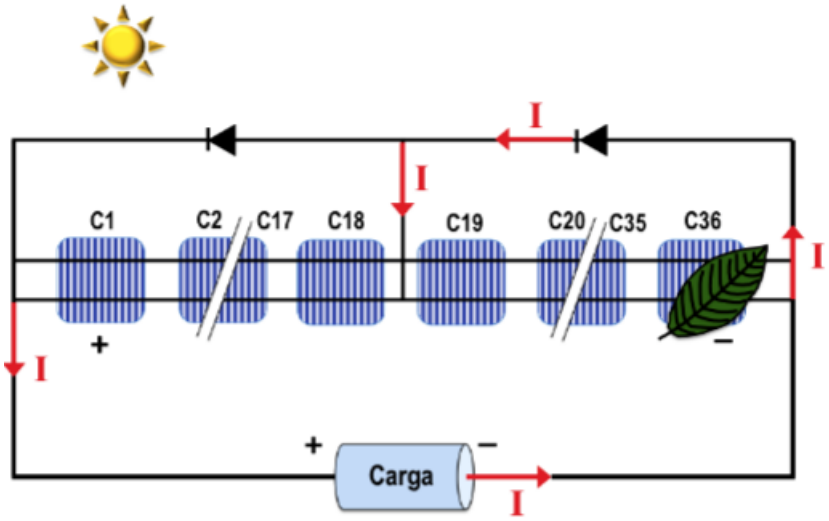
Figura 19 – Células sombreadas



Fonte: Felipe Fernandes dos Santos, 2011.

Pensando em minimizar o efeito do sombreamento nos módulos uma alternativa é adicionar diodos de by-pass ligados em paralelos com as células. Mesmo sendo o ideal a utilização de um diodo para cada célula, devido ao custo é utilizado um diodo para cada grupo, como ilustrado na figura 20.

Figura 20 – Efeito do diodo bypass



Fonte: Felipe Fernandes dos Santos, 2011

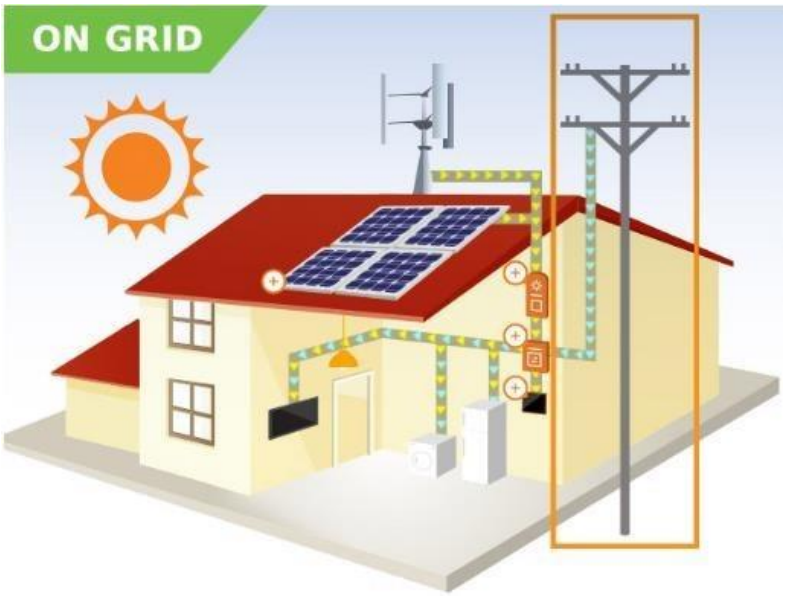
Com o uso do diodo, quando uma célula estiver produzindo pouca corrente, as demais células do módulo continuarão produzindo corrente, já que a célula atingida é desviada pelo diodo em paralelo.

2.9 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Podemos classificar os sistemas fotovoltaico, como: Sistema conectado à rede, conhecido como On-Grid, e Sistema isolado, conhecido como Off-Grid.

O sistema conectado à rede, On-Grid é aquele que se mantém ligado com a rede de distribuição, sem a necessidade de armazenar a energia produzida nas placas fotovoltaicas, sendo elas conectadas a um inversor de frequência que transforma essa energia para o padrão da rede. Para esse sistema é utilizado o método de compensação em que todo excedente de energia produzida pela unidade vai para a rede da concessionária, gerando créditos para o consumidor. Tem como objetivo reduzir o consumo da energia elétrica da concessionária, substituindo-a por uma fonte de energia limpa e renovável. Na figura 21 é ilustrado um sistema On-Grid.

Figura 21 – Sistema On-Grid

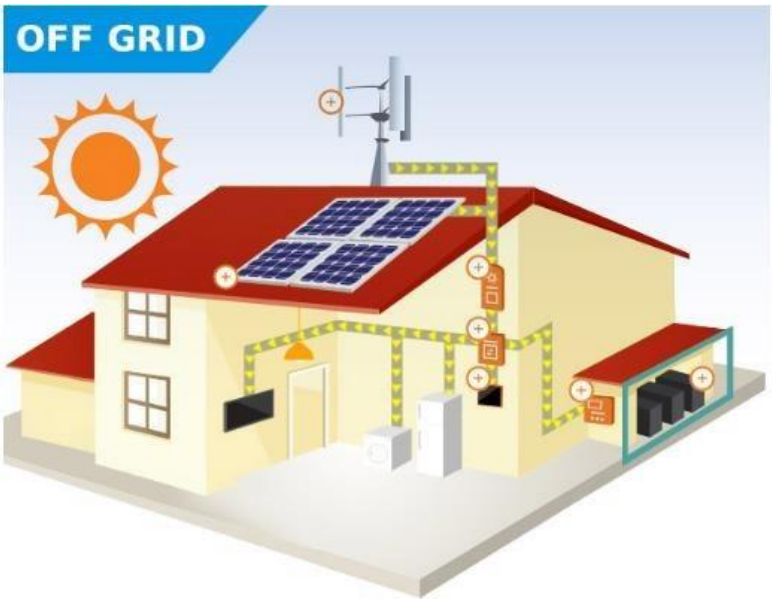


Fonte: Você Solar, 2018.

O sistema isolado, Off-Grid é aquele que através do armazenamento de energia, o sistema é capaz de atender a demanda da instalação elétrica a qual é subsidiário, não necessitando ligação com a rede de distribuição para prover energia a sua unidade consumidora, pois a energia produzida através de placas fotovoltaicas é armazenada em baterias estacionárias. O maior problema enfrentado por esse sistema é o alto custo das baterias e sua vida útil, que depende de mais ou menos ciclos de cargas e descargas, podendo não passar de dois anos e alcançar um máximo de seis anos.

Podemos verificar através da figura 22 a ilustração do sistema off-grid.

Figura 22 – Sistema Off-Grid



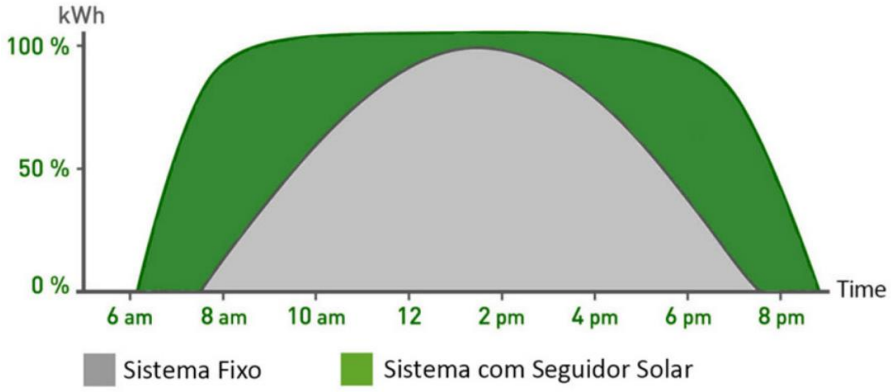
Fonte: Você Solar, 2018.

2.10 SEGUIDOR SOLAR (TRACKER)

Um seguidor solar é um dispositivo mecânico que tem por objetivo garantir que os painéis fotovoltaicos fiquem sempre na posição mais favorável a captar o máximo de radiação solar possível. O custo de um sistema de seguimento, quando se tem em conta o valor do projeto de um sistema fotovoltaico é de um incremento de 20% desse valor, mas é preciso ter em conta que um sistema deste tipo pode vir a aumentar as receitas geradas em cerca de 40%. Os seguidores fotovoltaicos são sistemas que normalmente tem baixo custo de manutenção (CORTEZ).

O seguidor solar, também conhecido como tracker, tem o objetivo de aumentar a eficiência de sistemas fotovoltaicos, que por sua vez possuem baixa eficiência. O dispositivo rastreia a posição do Sol durante o período diurno e mantém os módulos sempre perpendiculares aos raios solares, captando ao máximo a radiação disponível durante o dia, e consequentemente gerando mais energia quando comparado com sistemas fixos, como verificado na figura 23.

Figura 23 – Comparação de energia gerada entre um sistema fixo e um sistema com seguidor solar



Fonte: Portal Solar, 2016.

Existem muitos tipos de seguidores solares, estes variam em custo, complexidade e funções. Eles podem fazer o seguimento através de vários eixos e garantir diferentes níveis de precisão (CORTEZ).

Podemos classificar os seguidores solares como:

- Passivos
- Ativos

2.11 SEGUIDOR SOLAR PASSIVO

Os seguidores passivos fazem uso da comparação ou transferência de massa de um lado para o outro para seguirem o Sol. Em sistemas passivos normalmente utilizam-se fluidos com baixas temperaturas de vaporização ou que simplesmente escoam de um reservatório em uma extremidade para o reservatório da outra extremidade. Por utilizarem apenas da gravidade e das características do fluido, não é necessária outra forma adicional de energia para realizar a rotação dos módulos fotovoltaicos. São rastreadores simples, que se limitam a seguir o Sol em seu movimento de Leste para Oeste, normalmente não possuindo ajustes de inclinação conforme as estações do ano (FABIANO PASSOS).

Na figura 24 verificamos o funcionamento do seguidor solar passivo.

Figura 24 – Seguidor solar passivo

Fonte: Sollar, 2019.

2.12 SEGUIDOR SOLAR ATIVO

São seguidores que podem fazer o seguimento por diferentes métodos, podem utilizar sensores ou algoritmos cronológicos do "movimento" do sol e vão ser responsáveis por fazer o seguimento do sol de forma ativa ao fazer atuar algum tipo de motor (CORTEZ).

Os seguidores solares ativos diferentemente dos passivos utilizam um sistema de controle de posição. Esse controle pode ser alcançado através da utilização de microprocessadores e microcontroladores, que processam os dados da posição solar, obtidos através de sensores. Após o processamento são enviados comandos ao motor, para movimentar os módulos fotovoltaicos. Os sensores utilizados podem ser do tipo: luminosidade, fim de curso e pireliômetro.

Podem ser classificados conforme a movimentação em seu eixo, da seguinte forma:

- Seguidor polar de eixo único
- Seguidor de eixo horizontal
- Seguidor de eixo vertical ou azimute
- Seguidor de dois eixos

2.12.1 Seguidor polar de eixo único

Este tipo de seguidor tem um eixo Norte-Sul fixo num ângulo, normalmente a latitude do local. Ao adotar este eixo como o de rotação, garantimos que o painel vai estar perpendicular ao sol nos equinócios da Primavera e de Outono. Em qualquer outro dia um pequeno erro vai acontecer (CORTEZ).

Figura 25 – Seguidor polar de eixo único

Fonte: Depositphotos, 2018.

2.12.2 Seguidor de eixo horizontal

Este tipo de seguidor tem como princípio a rotação do plano do coletor solar sobre o eixo horizontal. A implementação deste tipo de sistema, geralmente é feita com um tubo horizontal paralelo ao eixo polar norte-sul, apoiado sobre suportes. Os painéis são montados em cima deste tubo que gira sobre seu eixo de acordo com o movimento aparente do sol ao longo do dia, de Leste-Oeste. (MORAES).

Podemos verificas na figura 26 um sistema fotovoltaico utilizando o seguidor solar de eixo horizontal

Figura 26 – Seguidor solar de eixo horizontal

Fonte: PV magazine, 2019.

2.12.3 Seguidor de eixo vertical ou azimute

No seguidor de eixo vertical, o eixo de rotação fica localizado no topo de uma base vertical fixa. É vulgarmente conhecido por seguidor azimutal e tem uma inclinação fixa que é definida pela latitude da localização. Quanto maior for a latitude, maior será a inclinação do painel em relação à superfície terrestre. Deste modo, os seguidores de eixo vertical apresentam um maior rendimento em localizações com latitudes elevadas, porque esse parâmetro será controlado pela inclinação do painel em relação à superfície terrestre. As aplicações destes seguidores verticais são semelhantes aos seguidores polares, porém com estruturas diferentes (Nascimento).

Na figura 27 é possível identificar seguidor solar de eixo vertical.

Figura 27 – Seguidor de eixo vertical

Fonte: Microgeracaofv, 2019.

2.12.4 Seguidor de dois eixos

Os dois eixos de rotação permitem que o seguidor alinhe as células solares para ficarem perpendiculares aos raios de sol ao longo do dia e das estações do ano. A energia obtida com a utilização de um seguidor solar de dois eixos, em comparação com um sistema fixo, aumenta em até 40% sua geração anual. Os seguidores de dois eixos acompanham com mais exatidão a gama de movimentos do sol, no entanto, são mais complexos e mais caros(Martins).

A figura 28 apresenta o sistema com seguidor solar de dois eixos.

Figura 28 – Seguidor solar de dois eixos

Fonte: Portal Energia, 2016.

2.13 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS FIXOS E COM SEGUIDOR SOLAR

As características da instalação devem ser levadas em conta em um sistema com seguidor solar, já que se necessita um espaço consideravelmente maior do que no sistema fixo, pois é recomendado um espaço entre os painéis de modo que não ocorra a sombra entre eles, tal situação pode ser tornar inaplicável em certas plantas fotovoltaicas.

Outro fator que deve ser analisado é a vida útil do sistema já que o seguidor solar é composto por motores e partes móveis, acarretando uma menor vida útil e maior manutenção no sistema. A figura 29 ilustra a comparação do sistema fixo e o sistema com seguidor solar.

Figura 29 – Seguidor solar VS placa fixa

Fonte: Delta Solar, 2019.

No que se trata de ganho, devem ser analisadas as características solares da região, que podem tornar os ganhos mais ou menos atrativos ao implementar o sistema com rastreadorsolar. Podemos ter como base o acompanhamento utilizando seguidor solar realizado por um ano na Grécia, na Alemanha e no Reino Unido, onde se obteve um ganho, respectivamente, de 34.8%, 28.7% e 30.4% na geração de energia (Axaopoulos; Fylladitakis).

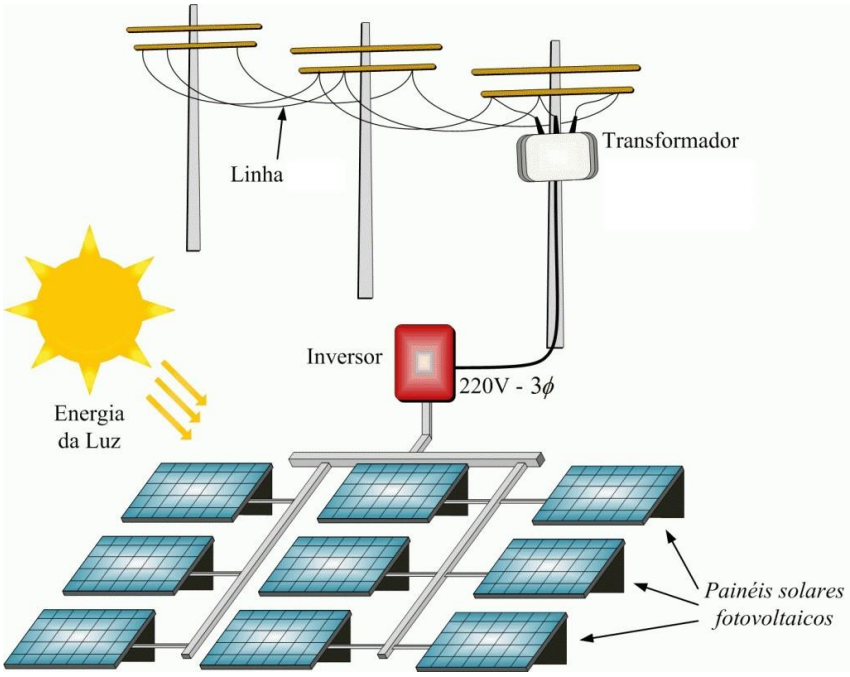
2.14 INVERSORES

Para converter a energia gerada pelos módulos em corrente contínua para corrente alternada, garantir a segurança do sistema e medir a energia produzida pelos painéis solares utilizamos os inversores.

Os inversores devem obedecer às características do sistema ao qual serão interligados, para sistemas interligados ou para sistemas autônomos, possibilitando assim, a interconexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica. Para realizar a conexão é necessário atender a norma ABNT NBR 16149:2013 (ABNT, 2013b), que estabelece parâmetros como: faixas de variação de tensão e frequência, THD, proteção contra ilhamento, fator de potência, entre outros.

Podemos verificar a ilustração da utilização do inversor através da figura 30

Figura 30 – Sistema fotovoltaico com inversor solar



Fonte: Labsolar, 2011.

A topologia de uma usina solar é predominantemente feita com inversores centralizados ou dentro de uma subestação, onde está posicionado o transformador, equipamentos de medição e proteção.

2.15 SOFTWARE PVSYST 7.0.10

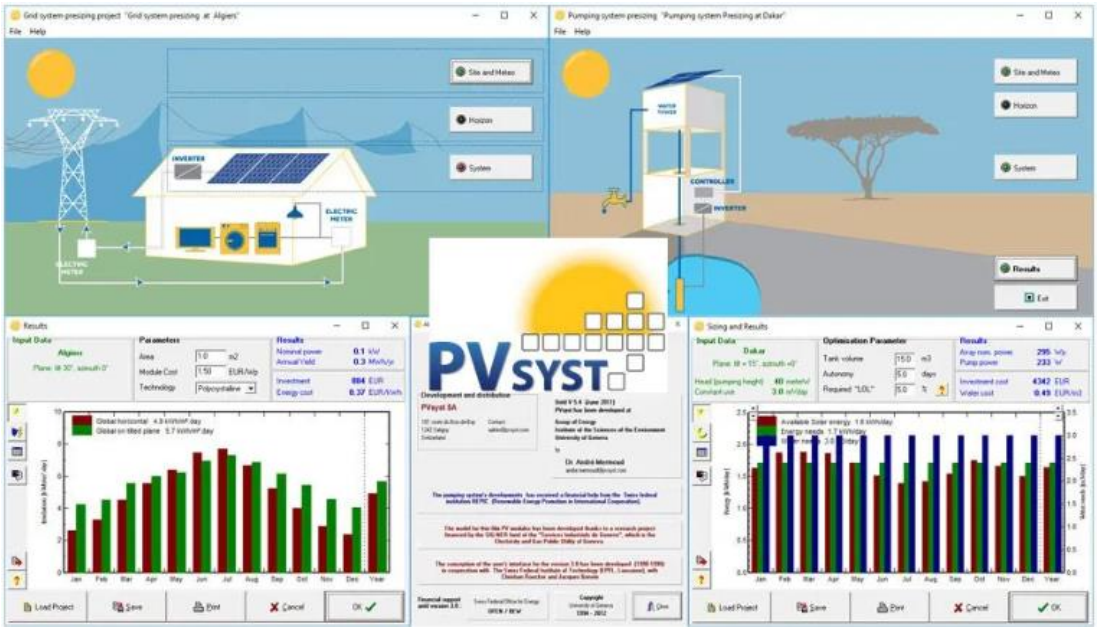
O PVSyst emprega seu conhecimento da tecnologia fotovoltaica, ferramentas de dados meteorológicos e componentes, para simular um sistema de geração de energia fotovoltaico com alta aproximação da realidade, com inúmeros recursos avançados para fazer os cálculos preliminares de pré-projeto e elaborar estimativas de maneira mais rápida, prática e com qualidade, se tornando assim uma poderosa ferramenta de simulação para os sistemas fotovoltaicos.

Os usuários do software podem estimar, por exemplo, cálculo de perdas por sombreamento, sujeira nos módulos, depreciação dos equipamentos, qualidade da energia que circula na rede elétrica, análise financeira sob diferentes cenários, além da produção de energia considerando a eficiência de cada equipamento. Esses recursos possibilitam um projeto mais seguro, minimizando erros e facilitando o entendimento de muitas variáveis.

Os projetos de geração fotovoltaicas devem utilizar algum tipo de software de auxílio ao projetista, é importante estar munido de ferramentas precisas e completas capazes de minimizar os erros e evitar surpresas ao longo da obra e após a conclusão e entrega do empreendimento, além de conferir um maior grau de profissionalismo ao projeto.

Podemos verificar a parametrização do software PVsyst na figura 31.

Figura 31 – PVsyst



Fonte: Instituto solar, 2019.

2.16 VIABILIDADE ECONÔMICA

2.16.1 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa é o registro das entradas e saídas realizadas ao longo do investimento, sendo ele aplicado a todas as etapas do projeto, de modo que se tenha uma perspectiva exata da situação financeira do período a ser analisado.

Proporcionado ao investidor a visualização do desempenho do seu capital, garantindo maior controle financeiro e credibilidade às informações, ajudando assim, na tomada de decisões relacionadas ao futuro do seu investimento.

2.16.2 Taxa mínima de atratividade (TMA)

Taxa mínima de atratividade (TMA) é uma das principais taxas de análise de investimento que indica se vale a pena fazer um determinado investimento, pois ela define o percentual mínimo que um investidor está disposto a ganhar a partir de uma aplicação financeira, assim, qualquer taxa acima da TMA é considerado interessante por gerar ganhos financeiros que compensam o tempo e os riscos do investimento, sendo indispensável para a tomada de decisão.

A TMA está relacionada a fatores que vão além do investimento em si, como custo de capital e custo de oportunidade.

2.16.3 Valor presente líquido (VPL)

O valor presente líquido é um dos métodos mais conhecidos quando o assunto é análise da viabilidade de projetos de investimento, com ele é possível ajustar o investimento com as taxas de juros que geralmente é a TMA, obtendo assim uma noção de valor do dinheiro no futuro.

Para o cálculo do VPL é representada pela Equação (1).

$$\mathrm{VPL} = -I0 + \sum Fct\ (1+r)\ t\ n\ t = 1 \tag{1}$$

I0: Valor inicial investido

t: Tempo (anos)

n: Quantidade de anos do fluxo de caixa

Fct: Fluxo de caixa relativo ao valor investido no sistema

r: Taxa de retorno

Portanto, se o valor do VPL é maior que zero, o investimento pode ser aplicado caso não seja, será rejeitado devido as desvantagens econômicas.

2.16.4 Taxa interna de retorno (TIR)

A taxa interna de retorno serve para indicar a rentabilidade do investimento, sendo umas das taxas mais desejáveis de ser obtida, pois determina se o investimento financeiro deve ser aplicado ou não.

Ao encontrar essa taxa, geralmente a comparamos com à Taxa Mínima de Atratividade para que se decida se o projeto deve ou não ser aceito, se a TIR for maior que a TMA, o investimento deve ser aceito.

2.16.5 Payback descontado

O payback descontado é o período no qual o retorno de investimento em um projeto demora para voltar ao investidor de acordo com o fluxo de caixa descontado.

O payback descontado costuma não ser uma ferramenta determinante para tomada de decisão, porém é mais um indicador utilizado para avaliar o tempo de retorno, bem como os riscos e a viabilidade de um investimento.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do trabalho pode ser divido em três principais etapas, primeiramente realizamos as simulações dos sistemas fotovoltaicos mencionados, definindo as características utilizadas na simulação e ajustando os parâmetros correspondentes com a situação desejada, obtendo assim dados fiéis da geração desses sistemas. Em seguida foi realizado um estudo de implementação, contrapondo dados teóricos com a realidade do mercado, chegando a valores ideais para realização desses sistemas. Por fim utilizamos técnica de análise financeira para definir a real viabilidade desses sistemas em frente ao atual cenário brasileiro.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para efeito de simulação, realizamos a instalação dos nossos sistemas fotovoltaicos no campus da Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), localizado no município de Palhoça, bairro Pedra Branca (Latitude -27,624294°, Longitude -48,680891°).

Os três sistemas fotovoltaicos propostos contam com 72 módulos solares, modelo TSM-DEG14C-(II)-360-Bifacial da Fabricante chinesa Trina Solar, com potência nominal de 360 watt-pico (Wp).

Esses sistemas foram divididos em 4 fileiras (strings) de 18 módulos, totalizando uma potência nominal (STC) de 25,92 kilowatt-pico (kWp), gerando uma tensão e corrente máxima de 635 volts (V) e 37 ampères (A) respectivamente.

O inversor utilizado é o ECO 25.0-3-S, fabricado pela Fronius Internacional, tendo sua faixa de tensão de 580 a 850 V, com sua corrente de entrada máxima de 44,2 A, produzindo uma tensão de saída para acoplamento na rede de 380/220 V em uma frequência de 60 hertz (Hz).

Os relatórios detalhados dos sistemas fotovoltaicos aplicados podem ser conferidos no anexo A, B e C do presente trabalho.

Através da figura 32, podemos verificar a simulação dos sistemas (fixo, seguidor solar de eixo horizontal e de dois eixos), alocados no campus da Unisul.

Figura 32 – Simulação dos sistemas fotovoltaicos na Unisul

Fonte: Elaborado pelo autor, Sketchup 2020.

3.1.1 Características do sistema fixo

Através do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESCESB), foi possível identificar no local da simulação, a irradiação solar que atinge um determinado plano em diferentes inclinações, posto isso, verificou-se que a melhor média anual de irradiação solar ocorre quando o plano está com uma inclinação de 22° em relação ao eixo horizontal.

Com essa informação direcionamos nossos módulos com a inclinação de 22° (norte) com intuito de maximizar sua produção de energia.

Na figura 33, verificamos a simulação do sistema fixo.

Figura 33 – Sistema fixo

Fonte: Elaborado pelo autor, Sketchup 2020.

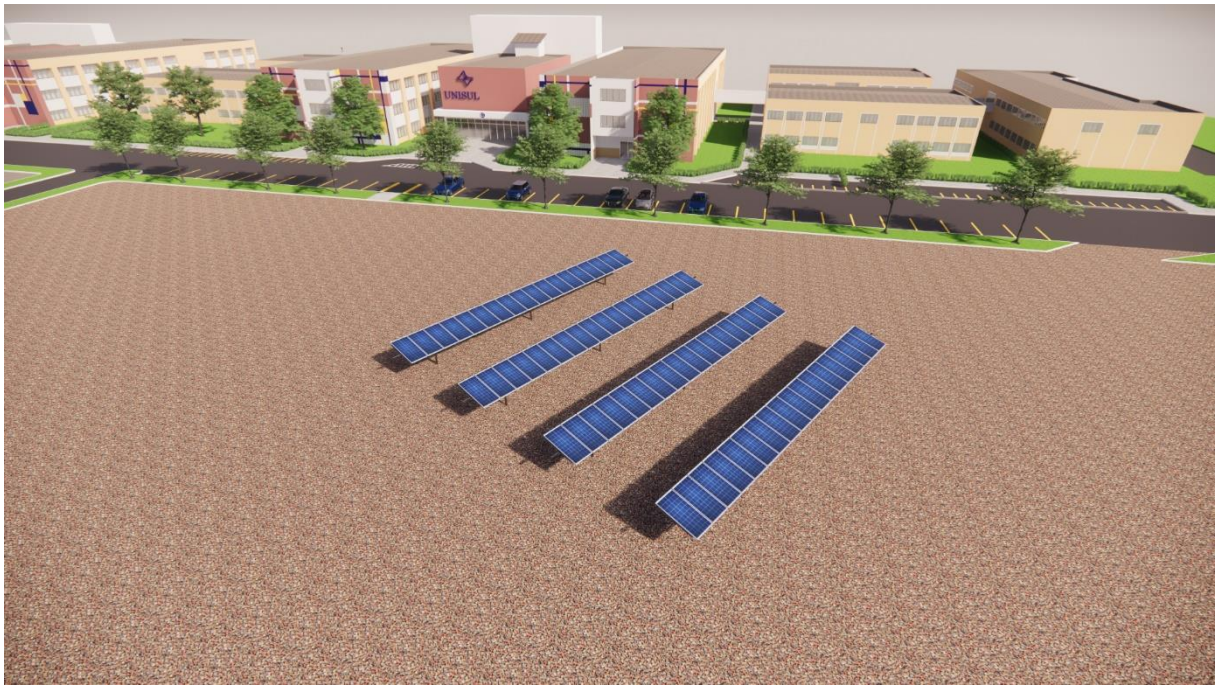
O sistema fixo necessita de um espaço médio de 250m² para alocação da sua estrutura de aço galvanizado com alumínio, que suporta os módulos distribuídos no sistema.

3.1.2 Características do seguidor solar de eixo horizontal

O seguidor solar de eixo horizontal utilizado conta com um controle de rastreamento por cálculo via algoritmo em CLP industrial, que possibilita sua adequação a posição do sol, podendo se movimentar na faixa de – 60° a 60° (Leste-Oeste). O motor utilizado para movimentação das engrenagens da estrutura de aço galvanizado e alumínio estrutural é de 0,5 cv, trifásico de 60 hz.

Na figura 34, verificamos a simulação do sistema com tracker de eixo horizontal.

Figura 34 – Sistema com tracker de eixo horizontal



Fonte: Elaborado pelo autor, Sketchup 2020.

O sistema com seguidor solar ocupa mais espaço em relação ao tradicional sistema fixo, pois necessita de um espaçamento maior entre fileiras de módulos evitando efeitos de sombreamento, ocupando assim área média de 300m².

3.1.3 Características do seguidor solar de dois eixos

O seguidor solar de dois eixos também conta com controle de rastreamento por cálculo via algoritmo em CLP industrial, possibilitando sua adequação a posição do sol, podendo se movimentar na faixa de– 60° a 60° (Leste-Oeste) e 10° a 80° (norte-sul). Para esses sistemas são utilizados dois motores de indução, possibilitando assim sua motivação nos dois eixos necessários.

Na figura 35, verificamos a simulação do sistema com tracker de dois eixos.

Figura 35 – Sistema fotovoltaico com tracker de dois eixos

Fonte: Elaborado pelo autor, Sketchup 2020.

O sistema com seguidor solar de dois eixos necessita de mais espaço que os sistemas de eixo horizontal, ocupando assim uma área média de 312m².

3.2 FATORES DO GRUPO FOTOVOLTAICO

Para que a simulação seja o mais fiel possível com a realidade, é necessário que se considere diversos fatores intrínsecos as condições e características do grupo fotovoltaico implementado, afetando diretamente a geração de energia elétrica do nosso sistema.

Dividindo os fatores que influenciam o desempenho do sistema fotovoltaico em basicamente dois grupos, conversão de radiação solar em energia elétrica e as perdas relacionadas ao sistema.

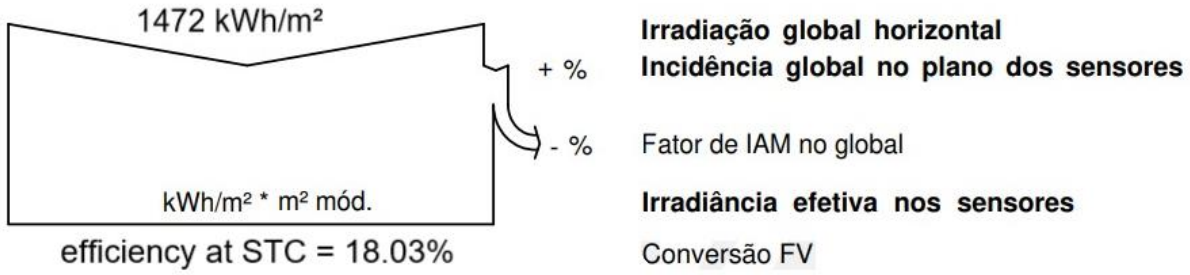
3.2.1 Conversão de radiação solar em energia elétrica

Para conversão de irradiação solar em energia elétrica, necessitamos considerar a irradiação horizontal na região de instalação do sistema, assim através da incidência global no

plano, e o fator de IAM (ângulo de incidência da irradiação) que corresponde às perdas que ocorrem com as mudanças de ângulo de incidência quando a luz atravessa as camadas protetoras do módulo até atingir as células solares, podemos definir a irradiância efetiva do nosso sistema.

Podemos verificar através da figura 36, a conversão de radiação solar em energia.

Figura 36 – Conversão de radiação solar em energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

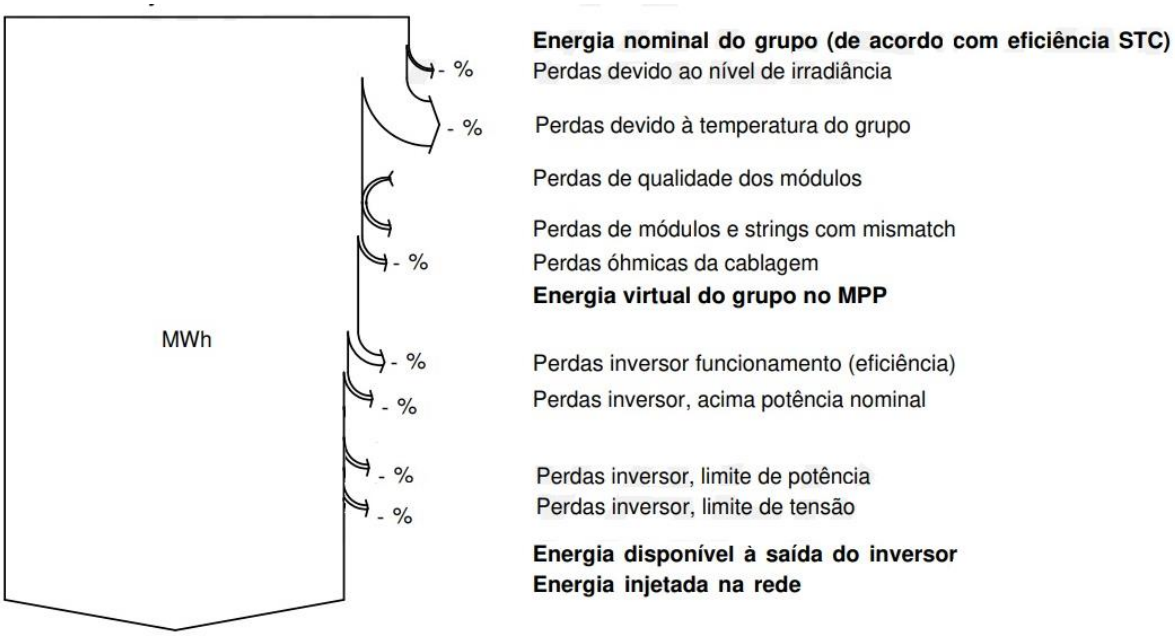
Com a irradiância efetiva e a eficiência de conversão de 18,03% de acordo com a fabricante, encontramos a energia nominal possível para o grupo.

3.2.2 Perdas relacionadas ao sistema

A partir dos dados de energia nominal do sistema, devemos considerar as perdas intrínsecas, como: perdas devido a irradiância, perdas de temperatura, perdas de qualidade dos módulos, perdas de módulos e strings com mismatch, perdas Ôhmicas, eficiência do inversor e perdas do inversor por limite de potência e tensão.

Na figura 37, é demostrada as perdas relacionadas ao sistema.

Figura 37 – Perdas relacionadas ao sistema



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

Perdas devido ao nível de irradiância, são a perdas associadas às condições climáticas locais que podem diminuir o nível de irradiância, tornando menor a capacidade de produção de energia dos painéis.

Perdas de Temperatura se referem á queda de potência gerada decorrente do aumento da temperatura nos módulos solares, efeito esse que está diretamente relacionado com o material dos módulos fotovoltaicos, modo de instalação e dissipação de calor no sistema.

Perdas ôhmicas nos cabos, são as perdas decorrentes a condutores e conectores que compõem o sistema, devendo eles ter um bom dimensionamento de modo a minimizar ao máximo as perdas ôhmicas.

Perdas de módulos e strings com mismatch estão relacionadas às características do sistema em série, que obriga que as correntes dos módulos sejam iguais, assim caso um módulo estiver gerando menos energia, seja por sujeira, degradação, fabricação, temperatura ou sombreamento, todo o sistema é obrigado a trabalhar com o parâmetro desse módulo.

Já a eficiência do inversor não é igual em toda faixa de tensão, assim o nível de tensão de entrada influencia o seu rendimento já que é necessário um ajuste entre sua tensão de entrada e sua tensão de saída.

A perda do inversor por limite de potência e tensão ocorre quando o gerador fotovoltaico disponibiliza uma potência ou tensão maior do que a capacidade do inversor, assim a saída é limitada ao valor nominal do equipamento.

3.2.3 Performance Ratio (PR)

De acordo com os dados técnicos do PVsyst, o Performance Ratio ou taxa de desempenho é uma medida para avaliar a qualidade de um sistema fotovoltaico. A taxa de desempenho é a razão da energia efetivamente produzida, em relação à energia que seria produzida se o sistema estivesse trabalhando continuamente em sua eficiência STC (Condições de padrões de teste). Assim o resultado é a proporção da energia disponível após a dedução das perdas de energia.

A Performance Ratio pode ser calculada conforme a seguinte equação:

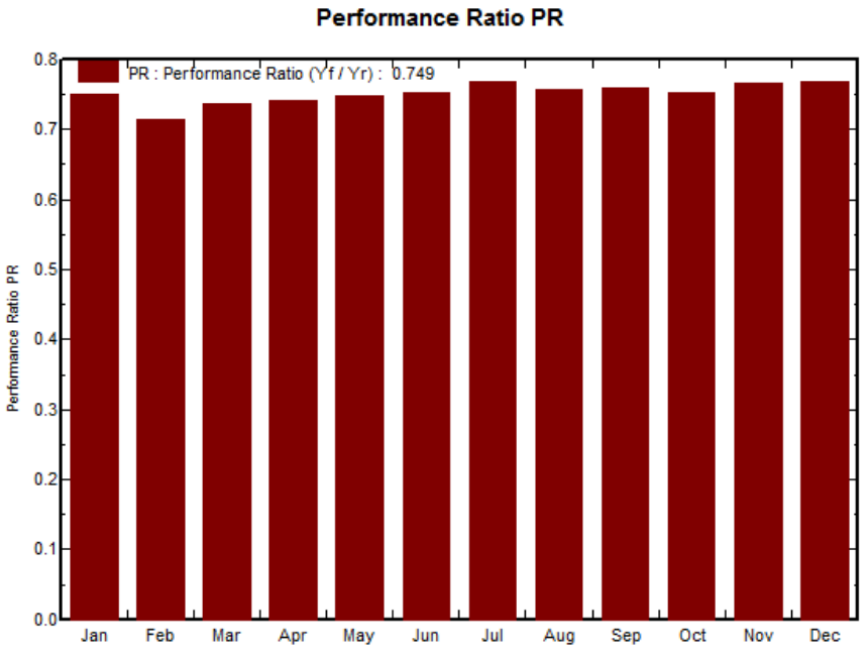
Fórmula para cálculo manual da Performance Ratio

$$PR = \frac{\text{Rendimento real do sistema indicado em kWh num ano}}{\text{Rendimento nominal do sistema calculado em kWh num ano}}$$

(2)

Uma Performance Ratio ideal possui um valor de 100%, porém na realidade esse valor não é, contudo, atingível devido às perdas inevitáveis do sistema, como as perdas por aquecimento dos módulos fotovoltaicos. Sistemas fotovoltaicos eficientes chegam a atingir uma Performance Ratio de pouco mais de 80%, como podemos verificar na figura 38.

Figura 38 – Performance Ratio



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

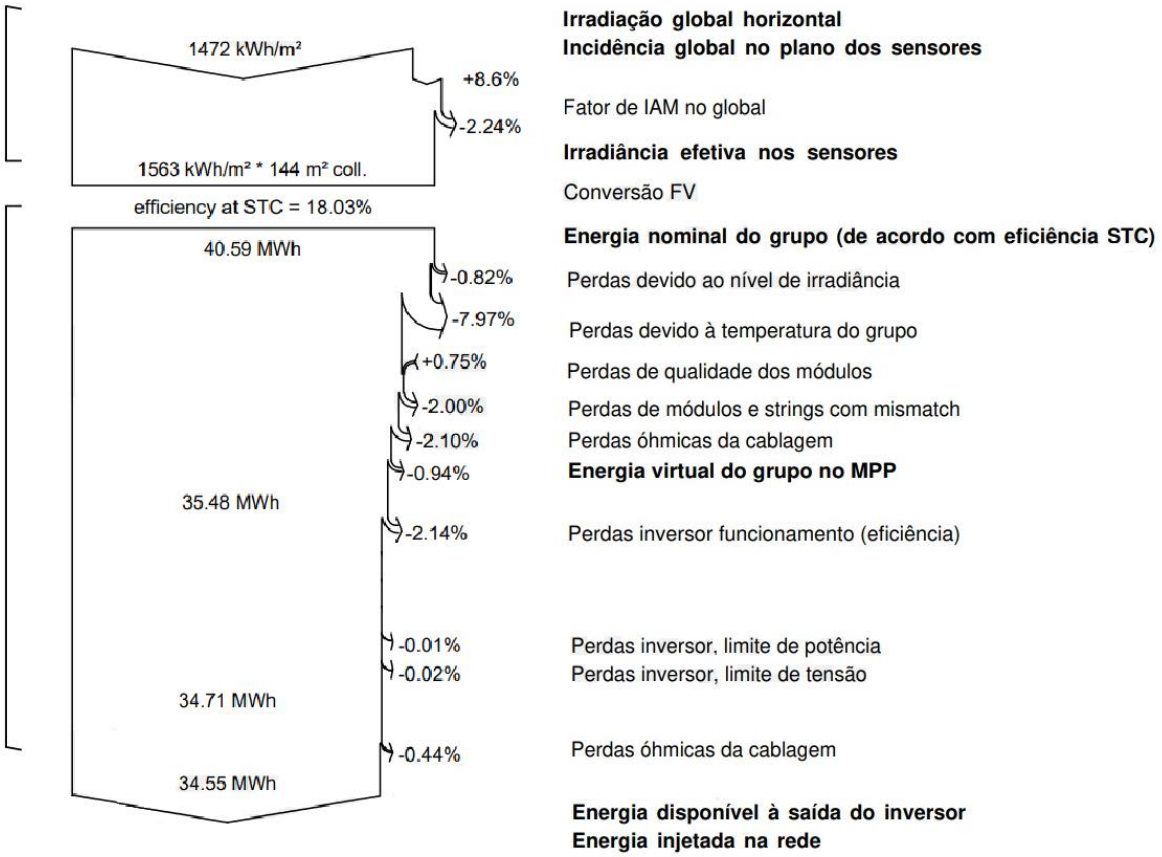
3.3 ENERGIA GERADA

3.3.1 Geração do sistema fotovoltaico fixo

3.3.1.1 Análise de geração de energia do sistema fixo

Verificamos que o grande défice dessa geração ocorre principalmente na parte de conversão de radiação solar em energia elétrica, uma menor incidência de irradiação no plano decorrente do sistema fixo, aliada a uma maior perda por fator de IAM (ângulo de incidência da irradiação), faz com que a conversão em energia elétrica desse sistema tenha uma menor eficiência, como verificado na figura 39.

Figura 39 – Perdas do sistema fixo



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

Para essa micro usina conectada à rede elétrica, verificamos uma geração de energia anual de 34.550 kilowatts hora (kWh), com uma tarifa atual utilizada pela concessionária de 0,506 R$/kWh de acordo com as tarifas vigentes homologadas pela ANEEL a somar com 7,29% de impostos (PIS, COFINS) para o grupo B1, esse sistema fotovoltaico fornece um retorno anual de R$ 18.760,65, como constatado na tabela 1.

Tabela 1 – Geração do sistema fixo

Geração Ano (KWh)		34.550
Tarifa Concessionária (R$/KWh)	R$	0,543
Economia Ano	R$	18.760,650

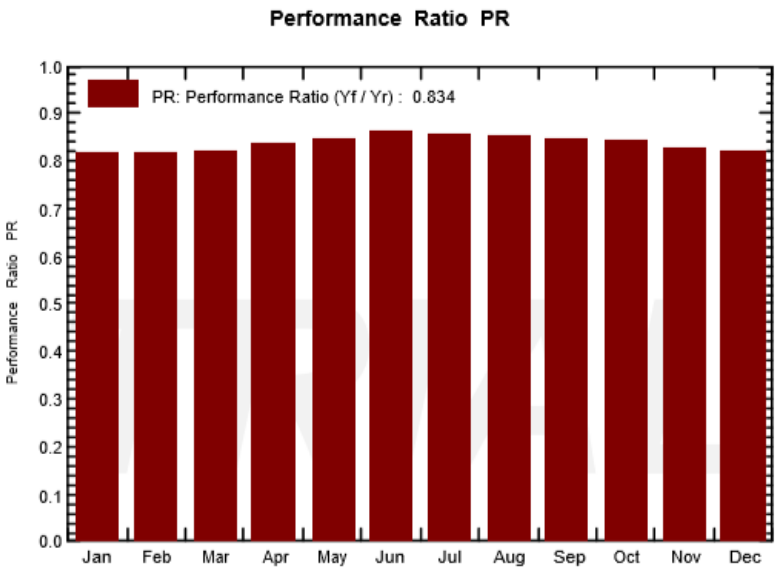
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.3.1.2 Taxa de desempenho do sistema fixo

Analisando os dados no diagrama de perdas do sistema fixo ilustrado na figura 39, observamos que a energia produzida em condições STC é de 40.59 megawatts hora por ano (MWh/ano), e a energia produzida em condições reais é de 34.55 MWh/ano. Aplicando esses valores na fórmula 2, obtemos um resultado de Performance Ratio de 85,1%.

O software PVsyst executa o cálculo de Performance Ratio levando em consideração diversos parâmetros, o que implica em um resultado de taxa de desempenho mais precisa, a figura 40 ilustra a Performance Ratio do sistema fixo calculada através do software.

Figura 40 – Performance Ratio do sistema fixo



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

A Tabela 2, traz os principais saldos e resultados da simulação, expõe também a Performance Ratio com mais detalhes.

Tabela 2 – Saldos e resultados do sistema fixo

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	165.2	80.90	23.97	155.5	151.3	3.370	3.284	0.815
February	140.8	66.10	24.15	140.1	136.9	3.032	2.954	0.814
March	138.0	61.70	23.40	149.8	146.6	3.270	3.186	0.821
April	107.7	46.80	21.76	128.0	125.4	2.839	2.766	0.834
May	94.9	37.20	19.13	124.3	121.8	2.792	2.720	0.844
June	79.5	32.10	17.83	108.2	106.2	2.474	2.411	0.860
July	84.9	35.00	17.11	111.1	109.1	2.525	2.459	0.854
August	104.2	43.10	17.83	128.5	126.2	2.911	2.836	0.851
September	103.5	54.30	18.42	114.4	112.0	2.575	2.507	0.845
October	132.1	68.50	20.00	135.4	132.2	3.036	2.957	0.842
November	155.1	75.60	21.63	149.2	145.4	3.278	3.193	0.825
December	166.2	83.10	23.19	154.6	150.3	3.367	3.281	0.819
Year	1472.1	684.40	20.68	1599.2	1563.3	35.469	34.554	0.834

Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

GlobHor: Irradiação global horizontal

DiffHor: Irradiação difusa horizontal

T_Amb: Temperatura ambiente

GlobInc: Incidência global no plano

GlobEff: Eficácia global, corrigido para IAM e sombreamento

EArray: Energia efetiva na saída da matriz

E_Grid: Energia injetada na rede

PR: Performance Ratio

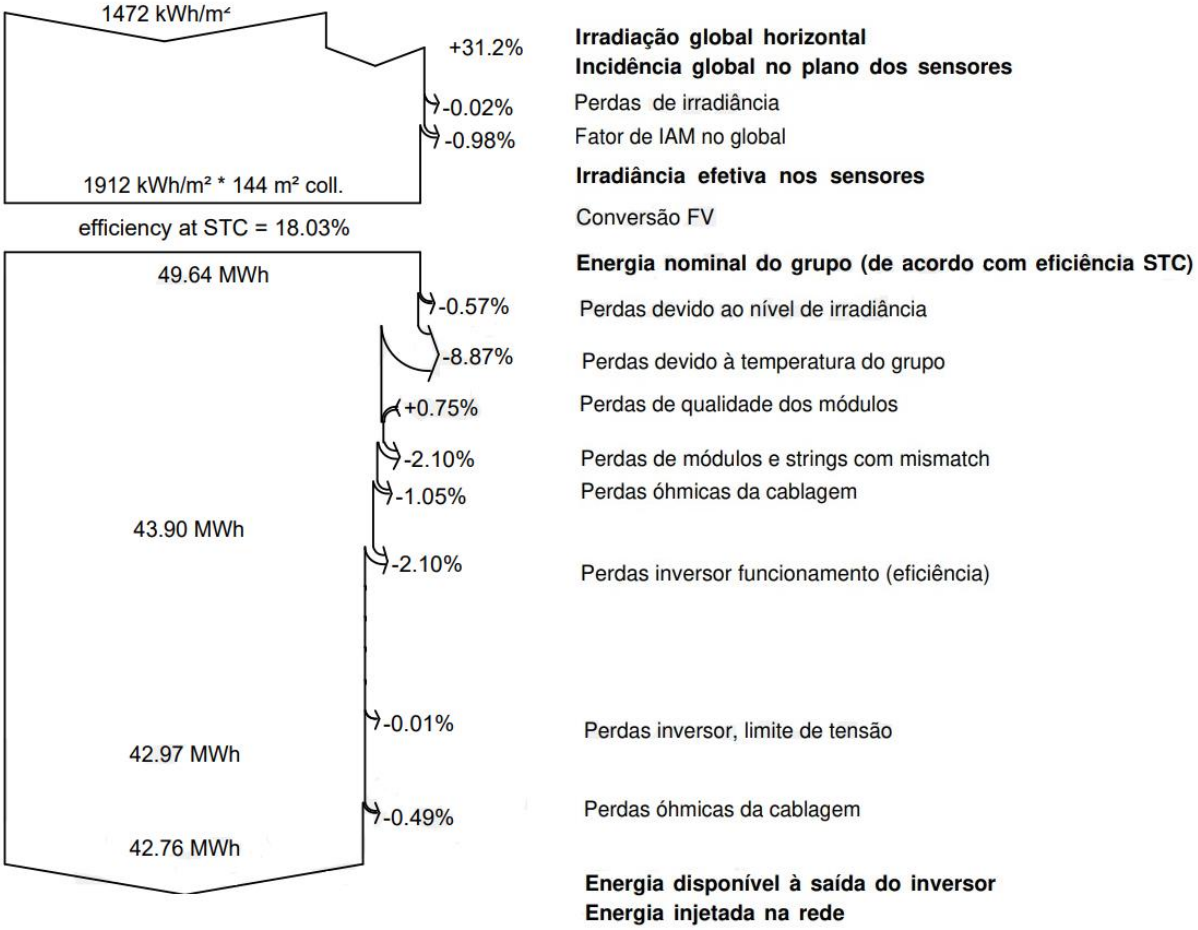
Uma análise importante a ser feita da Tabela 2 é o aumento da Performance Ratio nos meses em que as temperaturas são menores, podendo chegar a 86%, isso se dá pelo fato de que nessas épocas do ano, a condições em que o sistema se encontra chegam mais próximas das condições de teste STC.

3.3.2 Geração do sistema com seguidor solar de eixo horizontal

3.3.2.1 Análise de geração de energia do sistema com seguidor solar horizontal

Verificamos que para o sistema com seguidor solar de eixo horizontal a conversão de radiação solar em energia elétrica já é mais eficiente, com um ganho de 22% em comparação aos sistemas fixos nessa etapa, porém identificamos efeitos colaterais como uma maior perda por temperatura relacionada ao aquecimento dos módulos por sua maior incidência a essa radiação, como verificado na figura 41.

Figura 41 – Perdas do sistema com seguidor solar de eixo horizontal



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

O sistema fotovoltaico utilizando o seguidor solar de eixo horizontal apresentou uma geração de energia anual de 42.760 kWh, com base na tarifa atual aplicada pela concessionária local, esse sistema fornece um retorno anual de R$ 23.218,68, como disposto na tabela 3.

Tabela 3 – Geração do sistema com seguidor solar de eixo horizontal

Geração Ano (KWh)		42.760
Tarifa Concessionária (R$/KWh)	R$	0,543
Economia Ano	R$	23.218,680

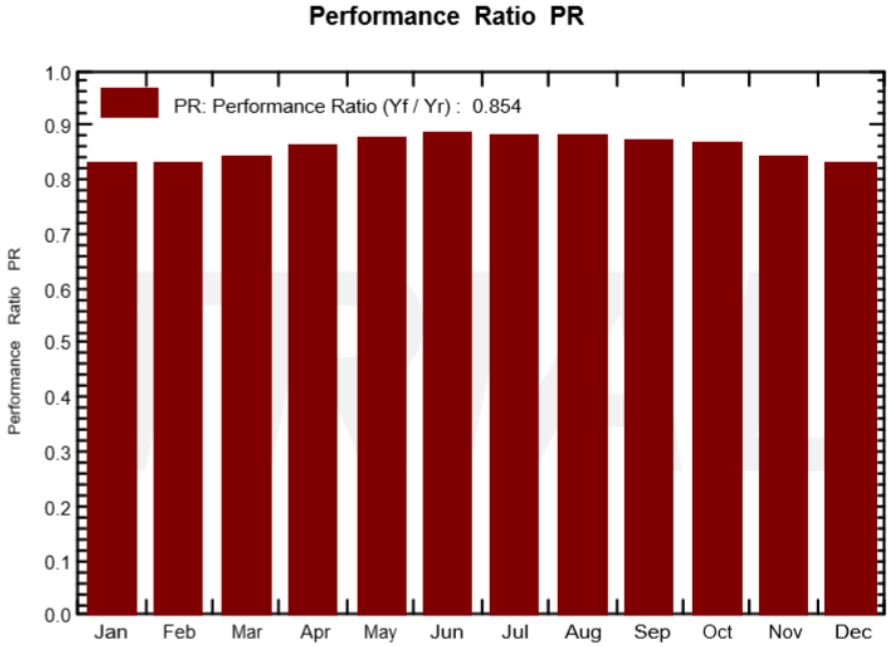
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.3.2.2 Taxa de desempenho do sistema com seguidor solar de eixo horizontal

Analisando os dados no diagrama de perdas do sistema com seguidor solar de eixo horizontal ilustrado na figura 41, é possível observar que a energia produzida em condições STC é de 49.64 MWh/ano, e a energia produzida em condições reais é de 42.76 MWh/ano. Aplicando esses valores na fórmula 2, obtemos um resultado de Performance Ratio de 86,1%.

Através do software PVsyst pode ser obtido um valor mais preciso, chegando a uma taxa de desempenho de 85,4% como indicado na figura 42.

Figura 42 – Performance Ratio do sistema com seguidor solar de eixo horizontal



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

Com base na Tabela 4, pode ser observado que em determinados meses do ano a Performance Ratio pode chegar a 88,8% devido às condições em que o sistema se encontra nessas épocas do ano.

Tabela 4 – Saldos e resultados do sistema com seguidor solar de eixo horizontal

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	165.2	80.90	23.97	214.4	212.6	4.745	4.624	0.832
February	140.8	66.10	24.15	181.6	180.1	4.012	3.909	0.830
March	138.0	61.70	23.40	182.0	180.4	4.079	3.975	0.843
April	107.7	46.80	21.76	146.6	145.1	3.353	3.268	0.860
May	94.9	37.20	19.13	133.9	132.2	3.114	3.034	0.874
June	79.5	32.10	17.83	109.6	107.9	2.588	2.521	0.888
July	84.9	35.00	17.11	114.1	112.4	2.673	2.603	0.880
August	104.2	43.10	17.83	141.3	139.8	3.309	3.224	0.881
September	103.5	54.30	18.42	130.7	129.3	3.034	2.954	0.872
October	132.1	68.50	20.00	169.9	168.3	3.923	3.822	0.868
November	155.1	75.60	21.63	195.9	194.2	4.390	4.276	0.842
December	166.2	83.10	23.19	211.0	209.1	4.674	4.554	0.833
Year	1472.1	684.40	20.68	1930.9	1911.6	43.894	42.764	0.854

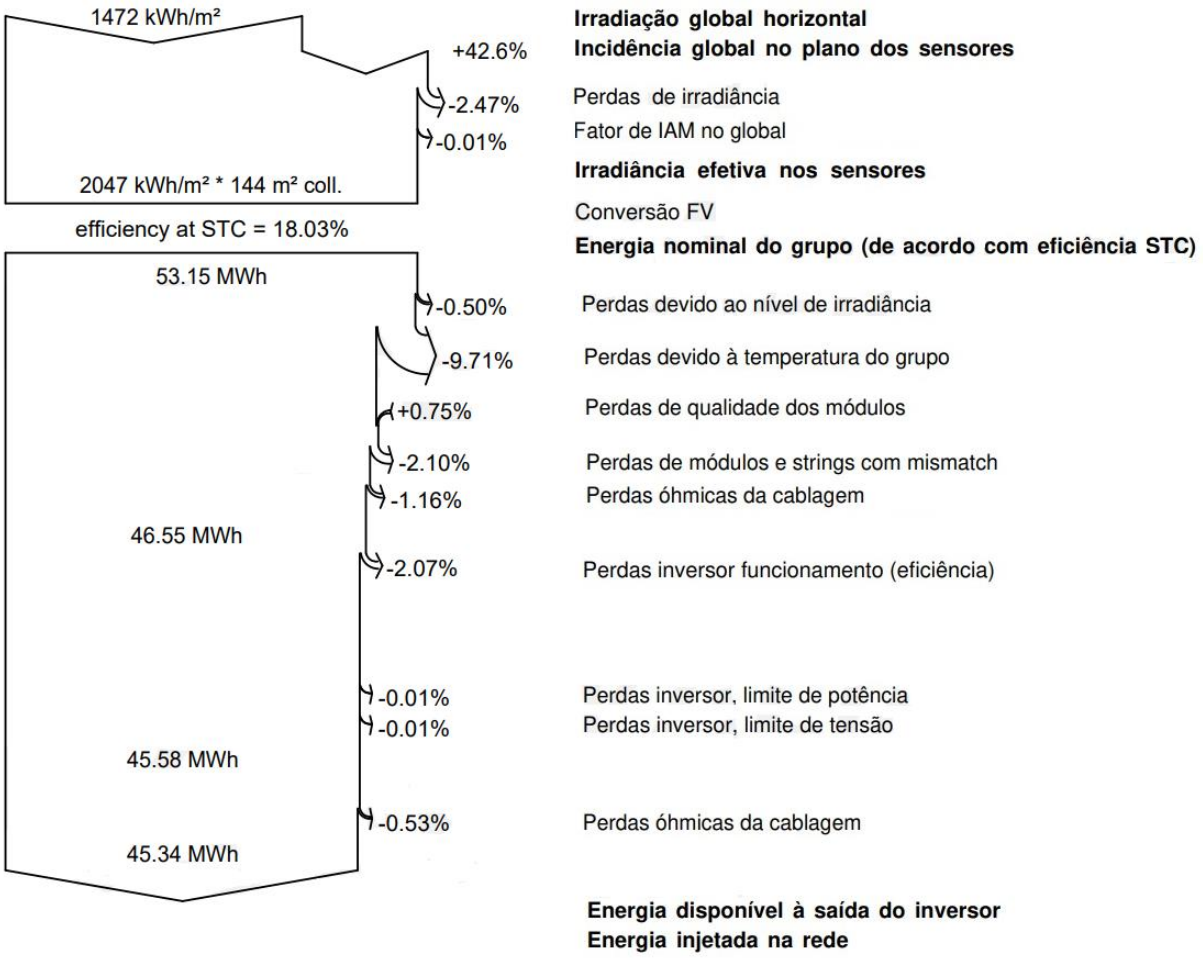
Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

3.3.3 Geração do sistema com seguidor solar de dois eixos

3.3.3.1 Análise de geração de energia do sistema com seguidor solar de dois eixos

O sistema com dois eixos é o que apresenta um melhor desempenho frente aos outros, com 2047 kWh/m² fazendo com que a sua conversão de radiação em energia elétrica chegue a 30% a mais do que os sistemas fixos. Esses sistemas sofrem também com perdas colaterais, porém sua geração alcança os 45.34 MWh anuais, como podemos observar na figura 43.

Figura 43 – Perdas do sistema com seguidor de dois eixos



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

No sistema fotovoltaico que utiliza o seguidor solar de dois eixos apresentou uma geração de energia anual de 45.340 kWh, sabendo a tarifa atual aplicada pela concessionária local, verifica-se um retorno anual de R$ 24.619,62, como detalhado na tabela 5.

Tabela 5 – Geração do sistema com seguidor solar de dois eixos

Geração Ano (KWh)		45.340
Tarifa Concessionária (R$/KWh)	R$	0,543
Economia Ano	R$	24.619,620

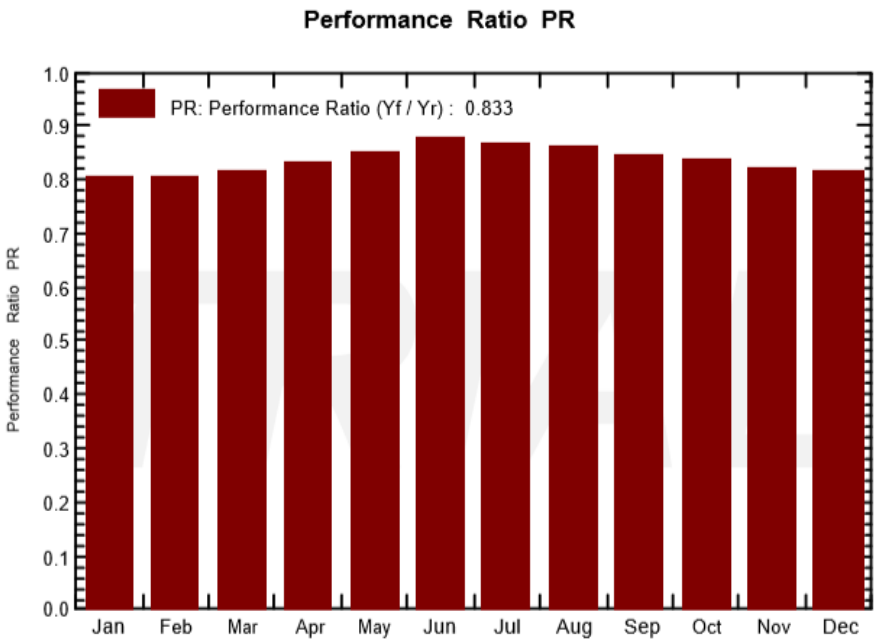
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.3.3.2 Taxa de desempenho do sistema com seguidor solar de dois eixos

Analisando os dados no diagrama de perdas do sistema com seguidor solar de dois eixos ilustrado na figura 43, é possível observar que a energia produzida em condições STC é de 53.15 MWh/ano, e a energia produzida em condições reais é de 45.34 MWh/ano. Aplicando esses valores na fórmula 2, obtemos um resultado de Performance Ratio de 85,3%.

Através do software PVsyst pode ser obtido um valor mais preciso, chegando a uma taxa de desempenho de 83,33% como indicado na figura 44.

Figura 44 – Performance Ratio do sistema com seguidor solar de dois eixos



Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

Com base na Tabela 6, pode ser observado que em determinados meses do ano a Performance Ratio pode chegar a 87,5% devido às condições em que o sistema se encontra nessas épocas do ano.

Tabela 6 – Saldos e resultados do sistema com seguidor solar de dois eixos

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	165.2	80.90	23.97	213.0	204.6	4.566	4.449	0.806
February	140.8	66.10	24.15	183.2	176.7	3.922	3.821	0.804
March	138.0	61.70	23.40	191.6	185.2	4.146	4.039	0.813
April	107.7	46.80	21.76	166.3	162.1	3.679	3.584	0.832
May	94.9	37.20	19.13	168.5	167.6	3.826	3.726	0.853
June	79.5	32.10	17.83	145.9	145.9	3.398	3.310	0.875
July	84.9	35.00	17.11	145.7	145.5	3.356	3.267	0.865
August	104.2	43.10	17.83	166.9	164.4	3.813	3.714	0.859
September	103.5	54.30	18.42	140.3	136.4	3.163	3.080	0.847
October	132.1	68.50	20.00	173.2	166.4	3.862	3.762	0.838
November	155.1	75.60	21.63	195.7	189.5	4.281	4.169	0.822
December	166.2	83.10	23.19	208.8	202.6	4.535	4.419	0.816
Year	1472.1	684.40	20.68	2099.0	2047.0	46.547	45.339	0.833

Fonte: Elaborado pelo autor, PVsyst 2020.

3.4 INVESTIMENTO

Após a comparação de geração de energia entre os sistemas móveis e fixo através das simulações obtidas via PVSyst, iniciamos a análise de investimento das três estruturas que são objetos de estudo deste trabalho, sendo um sistema fixo, um seguidor solar de eixo horizontal e outro de dois eixos.

Utilizamos como referência os valores de orçamento de equipamentos utilizados nas simulações, possibilitando um panorama fiel do custo relacionado a cada modelo para a montagem de uma micro usina de 25 KW.

Além dos custos de equipamentos e instalação, levamos em conta os custos da manutenção anual de modo a assegurar o pleno funcionamentos dos sistemas. Para o sistema fixo orçamos junto ao mercado local o custo da manutenção, já para os sistemas compostos por seguidor solar, utilizamos a taxa de manutenção de 1,6% ano, de acordo com os leilões de energia de reserva no Brasil (EPE).

3.4.1 Investimento do sistema fotovoltaico fixo

Para o sistema fixo, realizamos o orçamento com base no mercado nacional, como verificado na tabela 7.

Tabela 7 – Orçamento do sistema fixo

Descrição	Valor	
Sistema Fotovoltaico (Módulos, inversor, String box)	R$	64.000
Estrutura metálica de fixação	R$	14.500
Projeto e instalação do sistema fotovoltaico	R$	24.000
INVESTIMENTO	**R$**	**102.500**

Manutenção Ano	R$	985

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para o sistema fixo o valor da manutenção consiste em uma limpeza semestral das placas solares, além de medições e inspeções de módulos, componentes e conexões, bem como a possível troca dos mesmos, de modo a garantir o funcionamento adequado e seguro do sistema.

3.4.2 Investimento seguidor solar

Os seguidores solares apesar de serem amplamente utilizados em usinas de geração centralizada, ainda são pouco utilizados em projetos de geração distribuída no Brasil, seja pelo preço ou pela necessidade de uma equipe muito qualificada, a maioria dos fabricantes só trabalham com projetos acima de 1MW, sendo poucas as oportunidades de conferir projetos de microgeração e minigeração com tal sistema.

Para os sistemas com seguidor solar, o custo da manutenção além de contar com todos cuidados característicos do sistema fixo, necessita também uma troca periódica de peças que inclui motores e engrenagens, decorrentes do desgaste natural.

3.4.2.1 Investimento seguidor solar de eixo horizontal

Orçamos junto ao fabricante que se baseou em projetos de pesquisas realizados por ela e com características similares ao nosso, qual seria a média do investimento necessário para o sistema móvel de eixo horizontal.

Podemos verificar o custo relacionado a esse sistema na tabela 8.

Tabela 8 – Orçamento do sistema com seguidor de eixo horizontal

Descrição	Valor	
Sistema Fotovoltaico (Módulos, inversor, String box)	R$	64.000
Fundação / Estrutura metálica / Motores	R$	60.000
Projeto e instalação do sistema fotovoltaico	R$	40.000
VALOR TOTAL	**R$**	**164.000**

Manutenção 1,6% Ano	R$	2.624

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.4.2.2 Investimento seguidor solar de dois eixos

Para o sistema de seguidor solar de dois eixos não foi possível orçar junto ao mercado nacional, assim utilizamos como parâmetro a análise realizada pela Solar Review, que realiza estudos e comparações aplicadas a energia solar, onde foi verificado que um sistema solar de eixo duplo para uma pequena geração custa em média o dobro do sistema fixo.

Trazendo essa estimativa para o nosso sistema, chegamos aos valores apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Orçamento do sistema com seguidor de dois eixos

VALOR TOTAL	**R$**	**205.000**

Manutenção 1,6% Ano	R$	3.280

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Tal custo se justifica pela diferença de tecnologia utilizada para esse sistema, já que o de um eixo necessita apenas de um motor simples para girar toda a estrutura, e no de dois eixos aumenta a complexidade da estrutura e o motor que necessita atuar em dois eixos.

4 VIABILIDADE DOS SISTEMAS

4.1 VIABILIDADE ECONÔMICA

Utilizamos os dados obtidos no presente trabalho para definir através de técnicas de análise de investimento, a viabilidade dos modelos de sistemas fotovoltaicos trabalhados.

Para um investimento no setor de energia a taxa mínima de atratividade (TMA) segundo a ANEEL é de 7,11% a.a., ou seja, qualquer taxa acima é interessante por gerar ganhos financeiros que compensam o tempo e os riscos do investimento.

O tempo de vida útil estimado para o sistema fotovoltaicos foi de 30 anos, já a degradação dos módulos considerada foi de 0,5 % ano, como descrito pelo fabricante.

Levamos em conta a característica tributária local, que conta com isenção de impostos para micro e minigeração de energia de até 1MW em Santa Catarina (SC), isentando assim o cálculo ICMS para nossa micro geração distribuída de 25 KW.

Para analisar a viabilidade econômica de uma micro usina que utiliza o sistema fixo, realizamos primeiro o fluxo de caixa, que possibilita observar a movimentação do investimento, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 – Fluxo de caixa do sistema fixo

	GERAÇÃO KW	TARIFA ENERGIA	MANUTENÇÃO	FLUXO DE CAIXA	FLUXO DE CAIXA DESCONTADO
Investimento		0,543	985	-102500	-R$ 102.500,00
1° Ano	34550,0	R$ 0,56	R$ 1.015,93	R$ 18.333,81	R$ 17.116,80
2° Ano	34377,3	R$ 0,58	R$ 1.047,83	R$ 18.809,70	R$ 16.395,39
3° Ano	34204,5	R$ 0,60	R$ 1.080,73	R$ 19.297,41	R$ 15.703,95
4° Ano	34031,8	R$ 0,61	R$ 1.114,67	R$ 19.797,19	R$ 15.041,24
5° Ano	33859,0	R$ 0,63	R$ 1.149,67	R$ 20.309,34	R$ 14.406,08
6° Ano	33686,3	R$ 0,65	R$ 1.185,77	R$ 20.834,13	R$ 13.797,34
7° Ano	33513,5	R$ 0,67	R$ 1.223,00	R$ 21.371,85	R$ 13.213,93
8° Ano	33340,8	R$ 0,70	R$ 1.261,40	R$ 21.922,80	R$ 12.654,82
9° Ano	33168,0	R$ 0,72	R$ 1.301,01	R$ 22.487,28	R$ 12.119,00
10° Ano	32995,3	R$ 0,74	R$ 1.341,86	R$ 23.065,60	R$ 11.605,52
11° Ano	32822,5	R$ 0,76	R$ 1.384,00	R$ 23.658,06	R$ 11.113,45
12° Ano	32649,8	R$ 0,79	R$ 1.427,45	R$ 24.264,98	R$ 10.641,91
13° Ano	32477,0	R$ 0,81	R$ 1.472,27	R$ 24.886,69	R$ 10.190,06
14° Ano	32304,3	R$ 0,84	R$ 1.518,50	R$ 25.523,52	R$ 9.757,09
15° Ano	32131,5	R$ 0,86	R$ 1.566,19	R$ 26.175,81	R$ 9.342,22
16° Ano	31958,8	R$ 0,89	R$ 1.615,36	R$ 26.843,90	R$ 8.944,69
17° Ano	31786,0	R$ 0,92	R$ 1.666,09	R$ 27.528,13	R$ 8.563,80
18° Ano	31613,3	R$ 0,95	R$ 1.718,40	R$ 28.228,87	R$ 8.198,85
19° Ano	31440,5	R$ 0,98	R$ 1.772,36	R$ 28.946,47	R$ 7.849,20
20° Ano	31267,8	R$ 1,01	R$ 1.828,01	R$ 29.681,31	R$ 7.514,20
21° Ano	31095,0	R$ 1,04	R$ 1.885,41	R$ 30.433,75	R$ 7.193,25
22° Ano	30922,3	R$ 1,07	R$ 1.944,61	R$ 31.204,18	R$ 6.885,77
23° Ano	30749,5	R$ 1,11	R$ 2.005,67	R$ 31.992,99	R$ 6.591,20
24° Ano	30576,8	R$ 1,14	R$ 2.068,65	R$ 32.800,57	R$ 6.309,01
25° Ano	30404,0	R$ 1,18	R$ 2.133,61	R$ 33.627,32	R$ 6.038,68
26° Ano	30231,3	R$ 1,21	R$ 2.200,60	R$ 34.473,65	R$ 5.779,72
27° Ano	30058,5	R$ 1,25	R$ 2.269,70	R$ 35.339,97	R$ 5.531,66
28° Ano	29885,8	R$ 1,29	R$ 2.340,97	R$ 36.226,71	R$ 5.294,05
29° Ano	29713,0	R$ 1,33	R$ 2.414,48	R$ 37.134,30	R$ 5.066,46
30° Ano	29540,3	R$ 1,37	R$ 2.490,29	R$ 38.063,16	R$ 4.848,46

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A geração conta com uma perda de eficiência dos módulos de 0,5% ao ano, já os valores de tarifa de energia e de manutenção foram ajustados pelo valor futuro com base no IPCA acumulado de 3,14% de setembro de 2020. O fluxo de caixa descontado foi ajustado pela Taxa mínima de atratividade (TMA) de 7,11%.

Na Tabela 11, temos o VPL, TIR e o payback descontado do sistema.

Tabela 11 – VPL, TIR e Payback do sistema fixo

VPL do projeto	R$ 190.686,68
Taxa interna de retorno (TIR)	20%
Tempo de Payback	7 anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Assim chegamos a uma VPL > 0, que indica a viabilidade do investimento, já a Taxa interna de retorno (TIR) encontrado supera a Taxa mínima de atratividade (TMA), confirmando a viabilidade do projeto. Observarmos pelo Payback descontado que o tempo necessário para recuperação do investimento é de 7 anos.

Já para o sistema fotovoltaico contando com o seguidor solar de um eixo, o fluxo de caixa é apresentado na Tabela 12 e demonstra como ficariam os valores de geração pelo capital investido ao decorrer do tempo.

Tabela 12 – Fluxo de caixa do sistema com seguidor solar de um eixo

	GERAÇÃO KW	TARIFA ENERGIA	MANUTENÇÃO	FLUXO DE CAIXA	FLUXO DE CAIXA DESCONTADO
Investimento		0,543	2624	-164000	-R$ 164.000,00
1° Ano	42760,0	R$ 0,56	R$ 2.706,39	R$ 21.241,35	R$ 19.831,34
2° Ano	42546,2	R$ 0,58	R$ 2.791,37	R$ 21.784,83	R$ 18.988,65
3° Ano	42332,4	R$ 0,60	R$ 2.879,02	R$ 22.341,50	R$ 18.181,19
4° Ano	42118,6	R$ 0,61	R$ 2.969,42	R$ 22.911,65	R$ 17.407,49
5° Ano	41904,8	R$ 0,63	R$ 3.062,66	R$ 23.495,57	R$ 16.666,17
6° Ano	41691,0	R$ 0,65	R$ 3.158,83	R$ 24.093,58	R$ 15.955,89
7° Ano	41477,2	R$ 0,67	R$ 3.258,02	R$ 24.705,97	R$ 15.275,37
8° Ano	41263,4	R$ 0,70	R$ 3.360,32	R$ 25.333,07	R$ 14.623,38
9° Ano	41049,6	R$ 0,72	R$ 3.465,84	R$ 25.975,19	R$ 13.998,73
10° Ano	40835,8	R$ 0,74	R$ 3.574,66	R$ 26.632,66	R$ 13.400,29
11° Ano	40622,0	R$ 0,76	R$ 3.686,91	R$ 27.305,80	R$ 12.826,99
12° Ano	40408,2	R$ 0,79	R$ 3.802,68	R$ 27.994,96	R$ 12.277,77
13° Ano	40194,4	R$ 0,81	R$ 3.922,08	R$ 28.700,48	R$ 11.751,65
14° Ano	39980,6	R$ 0,84	R$ 4.045,23	R$ 29.422,70	R$ 11.247,66
15° Ano	39766,8	R$ 0,86	R$ 4.172,25	R$ 30.161,98	R$ 10.764,89
16° Ano	39553,0	R$ 0,89	R$ 4.303,26	R$ 30.918,68	R$ 10.302,45
17° Ano	39339,2	R$ 0,92	R$ 4.438,39	R$ 31.693,16	R$ 9.859,51
18° Ano	39125,4	R$ 0,95	R$ 4.577,75	R$ 32.485,79	R$ 9.435,24
19° Ano	38911,6	R$ 0,98	R$ 4.721,49	R$ 33.296,95	R$ 9.028,88
20° Ano	38697,8	R$ 1,01	R$ 4.869,75	R$ 34.127,02	R$ 8.639,69
21° Ano	38484,0	R$ 1,04	R$ 5.022,66	R$ 34.976,40	R$ 8.266,94
22° Ano	38270,2	R$ 1,07	R$ 5.180,37	R$ 35.845,46	R$ 7.909,95
23° Ano	38056,4	R$ 1,11	R$ 5.343,03	R$ 36.734,62	R$ 7.568,07
24° Ano	37842,6	R$ 1,14	R$ 5.510,80	R$ 37.644,27	R$ 7.240,66
25° Ano	37628,8	R$ 1,18	R$ 5.683,84	R$ 38.574,83	R$ 6.927,13
26° Ano	37415,0	R$ 1,21	R$ 5.862,31	R$ 39.526,71	R$ 6.626,90
27° Ano	37201,2	R$ 1,25	R$ 6.046,39	R$ 40.500,34	R$ 6.339,40
28° Ano	36987,4	R$ 1,29	R$ 6.236,25	R$ 41.496,14	R$ 6.064,11
29° Ano	36773,6	R$ 1,33	R$ 6.432,07	R$ 42.514,55	R$ 5.800,52
30° Ano	36559,8	R$ 1,37	R$ 6.634,03	R$ 43.556,00	R$ 5.548,14

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A geração também contou com uma perda de eficiência dos módulos de 0,5% ao ano, a tarifa de energia e de manutenção foram ajustados pelo IPCA acumulado de 3,14% de setembro de 2020, e o fluxo de caixa descontado foi ajustado pela Taxa mínima de atratividade (TMA) de 7,11%.

Na tabela 13, temos o VPL, TIR e o payback descontado do sistema.

Tabela 13 – VPL, TIR e Payback do sistema com seguidor solar de um eixo

VPL do projeto	R$ 174.755,08
Taxa interna de retorno (TIR)	15%
Tempo de Payback	10 anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Temos um VPL > 0, que indica a viabilidade do investimento, já a Taxa interna de retorno (TIR) encontrado supera a Taxa mínima de atratividade (TMA), confirmando a viabilidade do projeto. Observarmos pelo Payback descontado que o tempo necessário para recuperação do investimento é de 10 anos.

Para analisar a viabilidade econômica de uma micro usina utilizando o sistema de rastreador solar de dois eixos, realizamos o seguinte fluxo de caixa:

Tabela 14 – Fluxo de caixa do sistema com seguidor solar de dois eixos

	GERAÇÃO KW	TARIFA ENERGIA	MANUTENÇÃO	FLUXO DE CAIXA	FLUXO DE CAIXA DESCONTADO
Investimento		0,543	3280	-205000	-R$ 205.000,00
1° Ano	45340,0	R$ 0,56	R$ 3.382,99	R$ 22.009,68	R$ 20.548,67
2° Ano	45113,3	R$ 0,58	R$ 3.489,22	R$ 22.569,84	R$ 19.672,90
3° Ano	44886,6	R$ 0,60	R$ 3.598,78	R$ 23.143,47	R$ 18.833,82
4° Ano	44659,9	R$ 0,61	R$ 3.711,78	R$ 23.730,87	R$ 18.029,91
5° Ano	44433,2	R$ 0,63	R$ 3.828,33	R$ 24.332,34	R$ 17.259,72
6° Ano	44206,5	R$ 0,65	R$ 3.948,54	R$ 24.948,19	R$ 16.521,86
7° Ano	43979,8	R$ 0,67	R$ 4.072,52	R$ 25.578,72	R$ 15.814,98
8° Ano	43753,1	R$ 0,70	R$ 4.200,40	R$ 26.224,25	R$ 15.137,81
9° Ano	43526,4	R$ 0,72	R$ 4.332,29	R$ 26.885,10	R$ 14.489,11
10° Ano	43299,7	R$ 0,74	R$ 4.468,33	R$ 27.561,60	R$ 13.867,69
11° Ano	43073,0	R$ 0,76	R$ 4.608,63	R$ 28.254,07	R$ 13.272,44
12° Ano	42846,3	R$ 0,79	R$ 4.753,35	R$ 28.962,86	R$ 12.702,27
13° Ano	42619,6	R$ 0,81	R$ 4.902,60	R$ 29.688,30	R$ 12.156,12
14° Ano	42392,9	R$ 0,84	R$ 5.056,54	R$ 30.430,74	R$ 11.633,01
15° Ano	42166,2	R$ 0,86	R$ 5.215,32	R$ 31.190,53	R$ 11.131,98
16° Ano	41939,5	R$ 0,89	R$ 5.379,08	R$ 31.968,04	R$ 10.652,11
17° Ano	41712,8	R$ 0,92	R$ 5.547,98	R$ 32.763,62	R$ 10.192,52
18° Ano	41486,1	R$ 0,95	R$ 5.722,19	R$ 33.577,65	R$ 9.752,36
19° Ano	41259,4	R$ 0,98	R$ 5.901,86	R$ 34.410,49	R$ 9.330,83
20° Ano	41032,7	R$ 1,01	R$ 6.087,18	R$ 35.262,53	R$ 8.927,15
21° Ano	40806,0	R$ 1,04	R$ 6.278,32	R$ 36.134,14	R$ 8.540,58
22° Ano	40579,3	R$ 1,07	R$ 6.475,46	R$ 37.025,73	R$ 8.170,40
23° Ano	40352,6	R$ 1,11	R$ 6.678,79	R$ 37.937,69	R$ 7.815,93
24° Ano	40125,9	R$ 1,14	R$ 6.888,50	R$ 38.870,41	R$ 7.476,50
25° Ano	39899,2	R$ 1,18	R$ 7.104,80	R$ 39.824,29	R$ 7.151,51
26° Ano	39672,5	R$ 1,21	R$ 7.327,89	R$ 40.799,76	R$ 6.840,33
27° Ano	39445,8	R$ 1,25	R$ 7.557,99	R$ 41.797,22	R$ 6.542,40
28° Ano	39219,1	R$ 1,29	R$ 7.795,31	R$ 42.817,10	R$ 6.257,15
29° Ano	38992,4	R$ 1,33	R$ 8.040,08	R$ 43.859,81	R$ 5.984,06
30° Ano	38765,7	R$ 1,37	R$ 8.292,54	R$ 44.925,79	R$ 5.722,62

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Como nos sistemas anteriores, a geração sofreu uma perda de eficiência dos módulos de 0,5% ao ano, a tarifa de energia e de manutenção foram ajustados pelo IPCA acumulado de 3,14% de setembro de 2020, e o fluxo de caixa descontado foi ajustado pela Taxa mínima de atratividade (TMA) de 7,11%.

Na tabela 15, temos o VPL, TIR e o payback descontado do sistema.

Tabela 15 – VPL, TIR e Payback do sistema com seguidor solar de dois eixos

VPL do projeto	R$ 145.428,78
Taxa interna de retorno (TIR)	13%
Tempo de Payback	13 anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Temos um VPL > 0, que indica a viabilidade do investimento, já a Taxa interna de retorno (TIR) encontrado supera a Taxa mínima de atratividade (TMA), confirmando a viabilidade do projeto. Observarmos pelo Payback descontado que o tempo necessário para recuperação do investimento é de 13 anos.

Assim concluímos que todas as gerações podem ser consideradas como viáveis, pois em todos os sistemas encontramos uma VPL>0, e uma TIR maior que a TMA de 7,11% a.a.

Podemos observar esses resultados na tabela 16.

Tabela 16 – Comparação entre os sistemas

	FIXO	EIXO HORIZONTAL	DOIS EIXOS
VPL do projeto	R$ 191.207,78	R$ 174.755,08	R$ 145.428,78
Taxa interna de retorno (TIR) a.a	20%	15%	13%
Tempo de Payback	7 anos	10 anos	13 anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Porém ao compararmos os sistemas fotovoltaicos entre si, verificamos que apesar dos grupos com seguidores solares proporcionarem um aumento em cerca de 30% na geração de energia, o investimento para isso ainda é muito alto, fazendo com que o sistema fixo se destaque em nossa análise econômica, alcançando uma maior taxa interna de retorno (TIR) e um menor tempo de Payback, com o menor investimento necessário entre os sistemas.

Por outro lado, a geração com seguidor solar de dois eixos foi a que apresentou o pior desempenho na análise econômica, situação essa ocasionada pelo alto custo dessa tecnologia em baixa escala, fazendo com que seus ganhos não justifiquem o maior investimento necessário.

4.2 VIABILIDADE TÉCNICA

A análise técnica está direcionada a verificar o máximo rendimento dos sistemas fotovoltaicos por área implantada, definindo assim se justifica o incremento do investimento em sistemas com seguidor solar em busca de uma maior produção de energia.

Sabemos que para um grupo fotovoltaico que utiliza seguidor solar de eixo horizontal alcançar a geração de 42.760 kWh é necessária uma área total de 300 m². Já para o seguidor solar de dois eixos é necessária uma área total de 312m² para alcançar uma geração de 45.340 kWh, como verificado na tabela 17.

Tabela 17 – Geração e área dos sistemas móveis

	Geração (kWh)	Área (m²)
Seguidor solar de eixo horizontal	42.760	300
Seguidor solar de dois eixos	45.340	312

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Já o sistema fixo apresentou uma geração menor de 34.550 kWh, porém também necessitou uma área reduzida de 250m², como podemos verificar na tabela 18.

Tabela 18 – Geração e área do sistema fixo

	Geração (kWh)	Área (m²)
Sistema Fotovoltaico Fixo	34.550	260

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Com esses dados podemos verificar qual sistema apresenta uma maior geração de energia elétrica por metro quadrado necessário para implementação (kWh/m²), como representado na tabela 19.

Tabela 19 – Geração por m²

	kWh/m²
Seguidor solar de eixo horizontal	142,5
Seguidor solar de dois eixos	**145,3**
Sistema Fotovoltaico Fixo	132,9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Podemos verificar através da Tabela 19 que os sistemas móveis com seguidor solar geram uma maior energia em uma menor área.

O sistema com seguidor solar de dois eixos foi o que apresentou uma melhor resposta nessa análise, como uma geração anual de 145,3 kWh por m², logo se tornando a melhor opção para quem busca maximizar sua produção de energia.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho, constatou através de uma pesquisa de natureza aplicada, teórico-experimental a realidade da geração de energia solar fotovoltaica no cenário nacional, oferecendo uma ampla visão de mercado, bem como, as características e aplicações desse tipo de sistema.

A análise financeira mostrou que, apesar dos sistemas fixos e móveis apresentarem viabilidade econômica, o sistema fixo é o que oferece um melhor resultado, com um tempo de Payback reduzido de 7 anos, e uma taxa interna de retorno (TIR) de 20%, mostrando que apesar de não produzir tanta energia quanto os sistemas móveis, seu custo reduzido decorrente a uma maior disseminação no mercado nacional e uma mão de obra mais acessível, faz com que se torne mais atrativo financeiramente.

Contudo, do ponto de vista técnico os sistemas com seguidores solares se mostraram a melhor opção para projetos que buscam maximizar sua geração, seja por limitação de espaço ou na busca de uma maior produção de energia, já que possui uma maior capacidade de produção por metro quadrado.

Assim, devemos considerar as características e as necessidades do projeto para poder definir qual o melhor sistema, concluindo assim, que apesar dos sistemas fixos apresentarem uma maior viabilidade financeira, os sistemas com seguidores solares podem ser uma ótima opção em alguns casos.

REFERÊNCIAS

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2017

BALFOUR, John; SHAW, Michael; NASH, Nicole Bremer. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.

KALOGIROU, Soteris A.. **Engenharia de Energia Solar**: processo e sistemas. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016

BARROS, Hugo Albuquerque. **Anteprojeto de um sistema fotovoltaico de 12 kWp conectado á rede**. 2011. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ZANI, Victor. **Célula Fotovoltaica – Da Luz Solar à Energia Elétrica**. 2019. Disponível em: http://vocesolar.com.br/celula-fotovoltaica-da-luz-solar-a-energia-eletrica/. Acesso em: 27 out. 2020.

VASHISHTHA, Sanjay. **Case study of performance ratio**. 2013. Disponível em: https://firstgreenconsulting.wordpress.com/2013/01/05/case-study-of-performance-ratio/. Acesso em: 07 nov. 2020.

LANE, Catherine. **What is a solar tracker and is it worth the investment ?** 2020. Elaborada por Solar Reviews. Disponível em: https://www.solarreviews.com/blog/are-solar-axis-trackers-worth-the-additional-investment. Acesso em: 23 out. 2020.

O FUTURO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL. Brasil: Aranda, set. 2018.

MARCELO GRADELLA VILLALVA. **Energia Solar Fotovoltaica. Conceitos e Aplicações.**

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica.** 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Porto, Porto, 2013.

PASSOS, Fabiano. Seguidor Solar – Parte 2: Classificação e tipos. **Microgeração Fotovoltaico**, 17 de outubro de 2016. Disponível em: https://microgeracaofv.wordpress.com/2016/10/17/seguidor-solar-parte-2-tipos/.

Axaopoulos, P. J.; Fylladitakis, E. D. **Energy and economic comparative study of a tracking vs. a fixed photovoltaic system**. European Scienti c Journal, v. 9, n. 12, 2013.

PVSYST. **Taxa de desempenho**. Disponível em: https://www.pvsyst.com/help/performance_ratio.htm. Acesso em: 01 nov. 2020.

SOLAR, Portal. **Passo a Passo da Fabricação da Célula Fotovoltaica**. 2018. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-da-celula-fotovoltaica.html.

Acesso em: 10 out. 2020.

ENERGY, Orizon Solar. **ENERGIA SOLAR**. 2017. Disponível em: http://www.orizon.eco.br/energia_solar.html. Acesso em: 05 nov. 2021

PAULA, Camila Salgado de. **Átomo**. 2015. Disponível em: http://educacao.globo.com/quimica/assunto/estrutura-atomica/atomo.html#:~:text=Baseado%20no%20modelo%20at%C3%B4mico%20Rutherford,%3A%20pr%C3%B3tons%2C%20n%C3%AAutrons%20e%20el%C3%A9trons. Acesso em: 05 set. 2020.

MORAES, Euler Paiva. **Seguidor Solar de Um Eixo Inclinado**. Centro Universitário de Brasília, UNICEUB, 2012.

Nascimento, Bruno André Marques. **S Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar.** 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação Industrial, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, 2015.

Martins, Frederico Osvaldo Martins. **Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo.** 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica. Acesso em: 15 nov. 2020.

SIGNIFICADOS. **Átomo**. 2020. Disponível em: https://www.significados.com.br/atomo/. Acesso em: 27 out. 2020.

ENGENHARIA ELÉTRICA. Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop). **Materiais Semicondutores, Slides de Engenharia de Materiais**. 2019. Disponível em: https://www.docsity.com/pt/materiais-semicondutores-2/4947467/. Acesso em: 20 nov. 2020.

BARROS, Hugo Albuquerque. **Anteprojeto de um sistema fotovoltaico de 12 kWp conectado à rede**. 2011. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**4ª

LUCIANO ALVES. Universidade Federal de Campina Grande (Ufcg). **Bancada Virtual Para Testes de Inversores em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333263996_Bancada_Virtual_Para_Testes_de_Inversores_em_Sistemas_Fotovoltaicos_Conectados_a_Rede_Eletrica. Acesso em: 18 nov. 2020.

MARTA MIGUEL TURU. **Notas De Química**. 2018. Disponível em: https://br.pinterest.com/pin/317644579943969942/?lp=true. Acesso em: 11 out. 2020.

LUIZ ALBERTO WAGNER PINTO JR. Hcc Engenharia Elétrica. **Energia solar no Rio Grande do Sul: temos irradiância**. Disponível em: https://hccengenharia.com.br/a-irradiancia-solar-no-rio-grande-do-sul-e-suficiente-para-gerar-energia-solar/grafico-2-radiacao/. Acesso em: 15 mar. 2020.

VICTOR ZANI. Você Solar. **Célula Fotovoltaica – Da Luz Solar à Energia Elétrica**. Disponível em: http://vocesolar.com.br/celula-fotovoltaica-da-luz-solar-a-energia-eletrica/. Acesso em: 30 nov. 2020.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação da Célula Fotovoltaica**. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-da-celula-fotovoltaica.html. Acesso em: 18 jul. 2020.

ALI EXPRESS. **Célula fotovoltaica de silício monocristalino**. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/i/4000181581882.html. Acesso em: 12 jun. 2020.

Kandemir, E., Cetin, N.S., Borekci, S., 2017. A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 78, pp. 93-112.

SANTOS, Filipe Fernandes dos. **Utilização de Energia Fotovoltaica para a eficiência energética de uma moradia**. 2011. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

VICTOR ZANI. Você Solar. **O que é Energia Solar – Tudo sobre energia solar fotovoltaica**. Disponível em: http://vocesolar.com.br/o-que-e-energia-solar/. Acesso em: 27 nov. 2020.

PORTAL SOLAR. **Seguidor Solar – Tracker: Vantagens e Desvantagens Parte 1**. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar---tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html. Acesso em: 01 dez. 2020.

SOLLAR SOLUÇÕES FOTOVOLTAICAS MÓVEIS. **Seguidor Solar Fotovoltaico**. Disponível em: https://eel2019.wixsite.com/blogdeintroducao/post/seguidor-solar-fotovoltaico. Acesso em: 15 nov. 2020.

Depositphotos. **Painéis solares inclinado eixo rastreador, conceito de energia de inovação futuro**. 2018. Disponível em: br.depositphotos.com/192969442/stock-photo-blue-rotating-solar-panels-tilted.html. Acesso em: 08 fev. 2020.

EMILIANO BELLINI. PV Magazine. **Arctech apresenta um novo rastreador solar**. 2019. Disponível em: https://www.pv-magazine-latam.com/brasil-noticias/arctech-apresenta-um-novo-rastreador-solar/. Acesso em: 03 maio 2020.

Microgeracaofv. **SEGUIDOR SOLAR – CLASSIFICAÇÃO E TIPOS**. Disponível em: https://microgeracaofv.wordpress.com/2016/10/17/seguidor-solar-parte-2-tipos/. Acesso em: 14 maio 2020

PEDRO REIS. Portal Energia **Em que consiste um sistema seguidor solar fotovoltaico.** 2016. Disponível em: https://www.portal-energia.com/em-que-consiste-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/. Acesso em: 17 ago. 2020.

Delta Solar. **Seguidor Solar – Vantagens e Desvantagens**. 2016. Disponível em: https://microgeracaofv.wordpress.com/2016/10/03/seguidor-solar-parte-1-vantagens-e-desvantagens/. Acesso em: 26 maio 2020.

PEDRO MACHADO DE ALMEIDA. Labsolar. **Condicionamento da Energia Solar Fotovoltaica para Sistemas Interligados à Rede Elétrica**. Disponível em: https://www.ufjf.br/labsolar/2011/05/26/condicionamento/. Acesso em: 02 jul. 2020.

Instituto Solar. **Software Pvsyst: Descubra as principais características da Ferramenta de SFV's**. Disponível em: https://institutosolar.com/software-pvsyst/. Acesso em: 04 jun. 2020.

ANEXOS

ANEXO A – Relatório PVsyst sistema fixo

PVSYST 7.0.10		13/09/20	Page 1/4

Grid-Connected System: Simulation parameters

Project : **Micro usina UNISUL 1**

Geographical Site	**Pedra Branca**		Country	**Brazil**
Situation	Latitude	-27.62° S	Longitude	-48.68° W
Time defined as	Legal Time	Time zone UT-3	Altitude	7 m
	Albedo	0.20		
Meteo data:	**Pedra Branca**	NASA-SSE satellite data 1983-2005 - Synthetic		

Simulation variant : **New simulation variant**

Simulation date 13/09/20 17h45

Simulation parameters	System type	**No 3D scene defined, no shadings**		
Collector Plane Orientation	Tilt	22°	Azimuth	0°
Models used	Transposition	Perez	Diffuse Circumsolar	Perez, Meteonorm separate
Horizon	Free Horizon			
Near Shadings	No Shadings			
User's needs :	Unlimited load (grid)			

PV Array Characteristics

PV module	Si-mono	Model	**TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial**		
Original PVsyst database		Manufacturer	Trina Solar		
Number of PV modules		In series	18 modules	In parallel	4 strings
Total number of PV modules		nb. modules	72	Unit Nom. Power	360 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**25.92 kWp**	At operating cond.	23.42 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	635 V	I mpp	37 A
Total area		Module area	**144 m²**	Cell area	126 m²

Inverter	Model	**ECO 25.0-3-S**		
Original PVsyst database	Manufacturer	Fronius International		
Characteristics	Unit Nom. Power	**25.0 kWac**	Oper. Voltage	580-850 V
Inverter pack	Total power	**25 kWac**	Pnom ratio	1.04
	Nb. of inverters	1 units		
Total	Total power	**25 kWac**	Pnom ratio	1.04

PV Array loss factors

Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	289 mΩ	Loss Fraction	1.5 % at STC
LID - Light Induced Degradation			Loss Fraction	2.0 %
Module Quality Loss			Loss Fraction	-0.8 %
Module mismatch losses			Loss Fraction	2.0 % at MPP
Strings Mismatch loss			Loss Fraction	0.10 %

Incidence effect (IAM): Fresnel AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000

System loss factors

AC loss, inverter to injection	Inverter voltage	400 Vac tri		
	Wires: 3 x 10 mm²	30 m	Loss Fraction	0.9 % at STC

PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.10		13/09/20	Page 2/4

Grid-Connected System: Main results

Project : **Micro usina UNISUL 1**

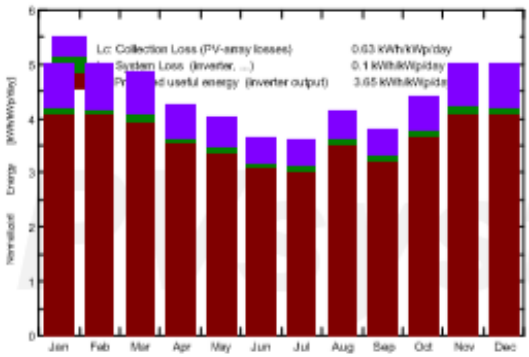
Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**No 3D scene defined, no shadings**		
PV Field Orientation	tilt	22°	azimuth	0°
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

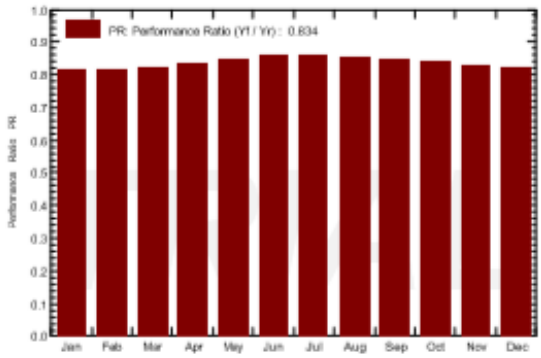
Main simulation results

System Production	**Produced Energy**	**34.55 MWh/year**	Specific prod.	1333 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	83.36 %		

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 25.92 kWp



Performance Ratio PR



New simulation variant

Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	165.2	80.90	23.97	155.5	151.3	3.370	3.284	0.815
February	140.8	66.10	24.15	140.1	136.9	3.032	2.954	0.814
March	138.0	61.70	23.40	149.8	146.6	3.270	3.186	0.821
April	107.7	46.80	21.76	128.0	125.4	2.839	2.766	0.834
May	94.9	37.20	19.13	124.3	121.8	2.792	2.720	0.844
June	79.5	32.10	17.83	108.2	106.2	2.474	2.411	0.860
July	84.9	35.00	17.11	111.1	109.1	2.525	2.459	0.854
August	104.2	43.10	17.83	128.5	126.2	2.911	2.836	0.851
September	103.5	54.30	18.42	114.4	112.0	2.575	2.507	0.845
October	132.1	68.50	20.00	135.4	132.2	3.036	2.957	0.842
November	155.1	75.60	21.63	149.2	145.4	3.278	3.193	0.825
December	166.2	83.10	23.19	154.6	150.3	3.367	3.281	0.819
Year	1472.1	684.40	20.68	1599.2	1563.3	35.469	34.554	0.834

Legends:

GlobHor	Global horizontal irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
T_Amb	T amb.	E_Grid	Energy injected into grid
GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.10		13/09/20	Page 3/4

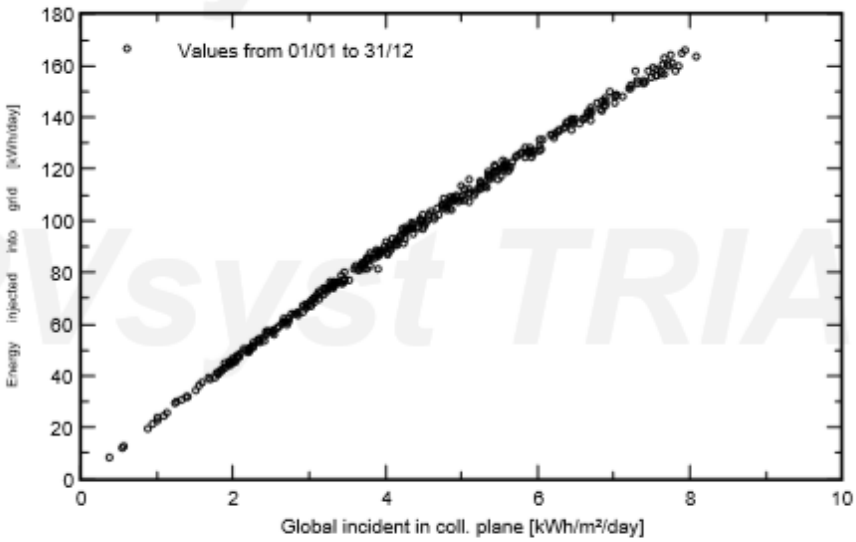
Grid-Connected System: Special graphs

Project : **Micro usina UNISUL 1**

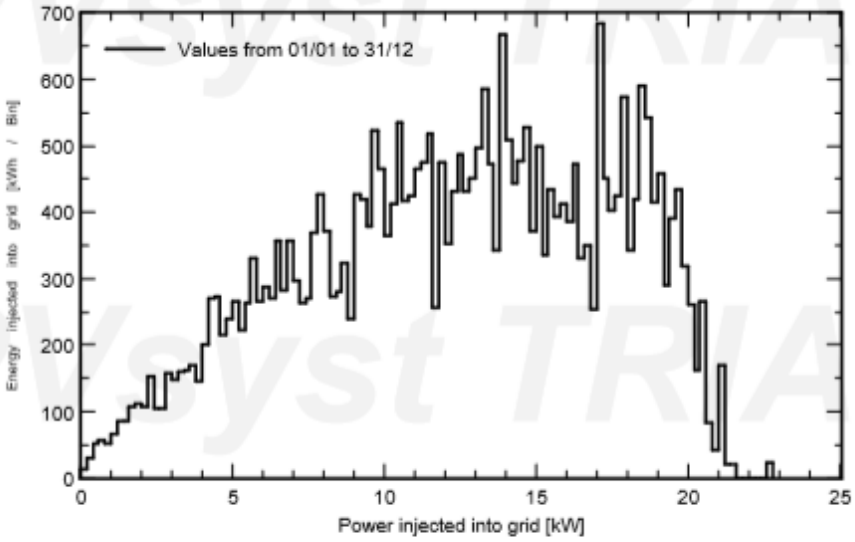
Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**No 3D scene defined, no shadings**		
PV Field Orientation	tilt	22°	azimuth	0°
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution



PVsyst TRIAL

PVSYST 7.0.10		13/09/20	Page 4/4

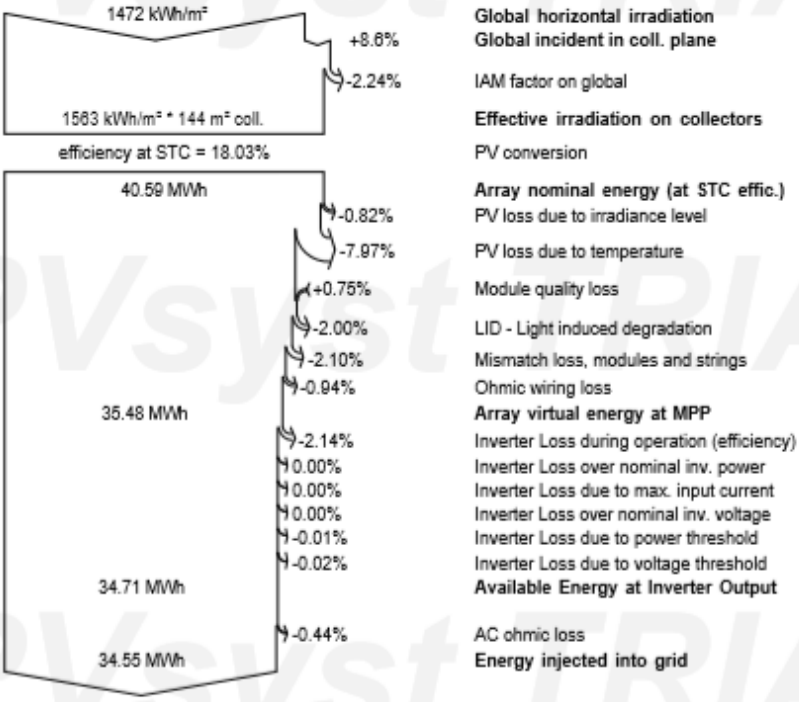
Grid-Connected System: Loss diagram

Project : **Micro usina UNISUL 1**

Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**No 3D scene defined, no shadings**		
PV Field Orientation	tilt	22°	azimuth	0°
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Loss diagram over the whole year



PVsyst TRIAL

ANEXO B – Relatório PVsyst sistema com seguidor solar de eixo horizontal

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 1/5

Grid-Connected System: Simulation parameters

Project : **Micro usina UNISUL 2**

Geographical Site	**Pedra Branca**		Country	**Brazil**
Situation	Latitude	-27.62° S	Longitude	-48.68° W
Time defined as	Legal Time	Time zone UT-3	Altitude	7 m
	Albedo	0.20		
Meteo data:	**Pedra Branca**	NASA-SSE satellite data 1983-2005 - Synthetic		

Simulation variant : **New simulation variant**

Simulation date 26/09/20 15h52

Simulation parameters	System type	**Trackers single array**		
Tracking plane, tilted axis	Axis Tilt	0°	Axis azimuth	0°
Rotation Limitations	Minimum Phi	-60°	Maximum Phi	60°
	Tracking algorithm	Astronomic calculation		
Models used	Transposition	Perez	Diffuse	Perez, Meteonorm
			Circumsolar	separate
Horizon	Free Horizon			
Near Shadings	Linear shadings			
User's needs :	Unlimited load (grid)			

PV Array Characteristics

PV module	Si-mono	Model	**TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial**		
Original PVsyst database		Manufacturer	Trina Solar		
Number of PV modules		In series	18 modules	In parallel	4 strings
Total number of PV modules		nb. modules	72	Unit Nom. Power	360 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**25.92 kWp**	At operating cond.	23.42 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	635 V	I mpp	37 A
Total area		Module area	**144 m²**	Cell area	126 m²
Inverter		Model	**ECO 25.0-3-S**		
Original PVsyst database		Manufacturer	Fronius International		
Characteristics		Unit Nom. Power	**25.0 kWac**	Oper. Voltage	580-850 V
Inverter pack		Total power	**25 kWac**	Pnom ratio	1.04
		Nb. of inverters	1 units		
Total		Total power	**25 kWac**	Pnom ratio	1.04

PV Array loss factors

Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	289 mΩ	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction	-0.8 %
Module mismatch losses			Loss Fraction	2.0 % at MPP
Strings Mismatch loss			Loss Fraction	0.10 %

Incidence effect (IAM): Fresnel AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000

System loss factors

AC loss, inverter to injection	Inverter voltage	400 Vac tri		
	Wires: 3 x 10 mm²	30 m	Loss Fraction	0.9 % at STC

PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 2/5

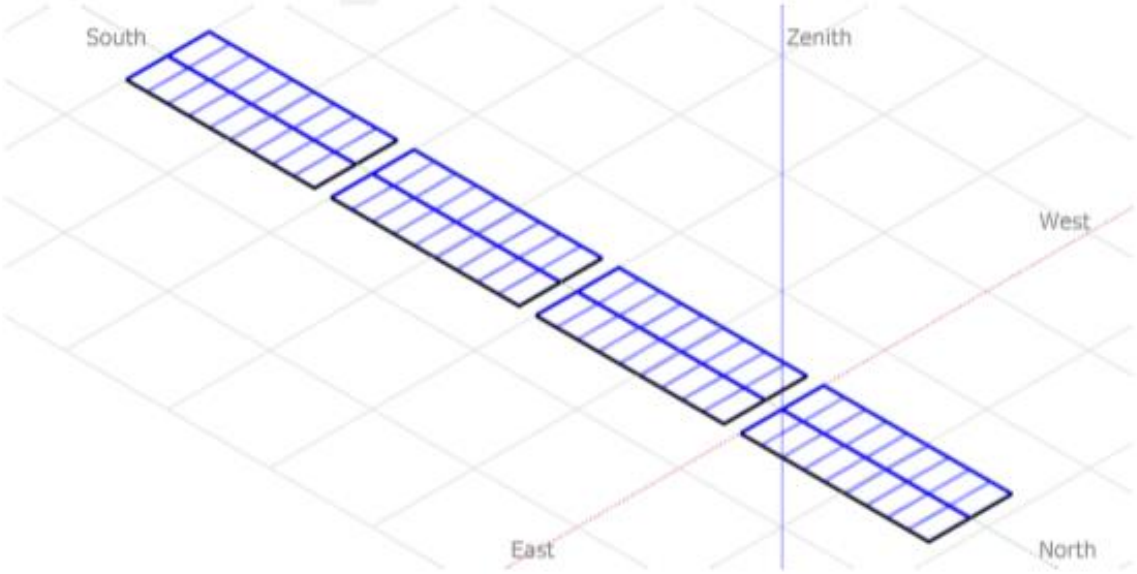
Grid-Connected System: Near shading definition

Project : **Micro usina UNISUL 2**

Simulation variant : **New simulation variant**

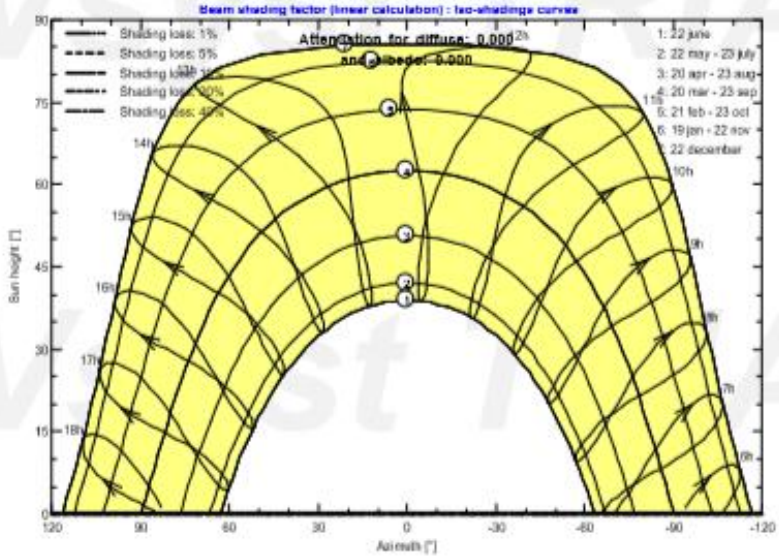
Main system parameters	System type	**Trackers single array**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tracking, tilted axis, Axis Tilt	0°	Axis azimuth	0°
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Micro usina UNISUL 2



PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12	26/09/20	Page 3/5

Grid-Connected System: Main results

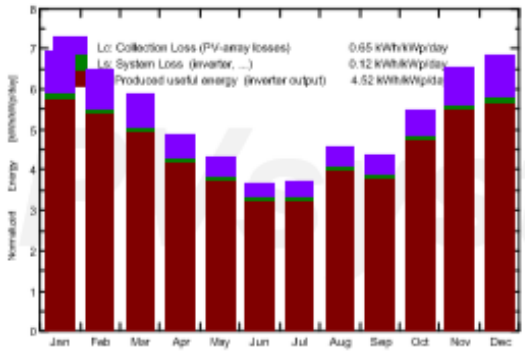
Project : **Micro usina UNISUL 2**

Simulation variant : **New simulation variant**

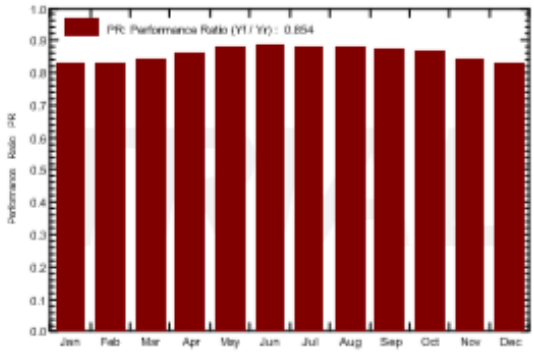
Main system parameters	System type	**Trackers single array**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tracking, tilted axis, Axis Tilt	0°	Axis azimuth	0°
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Main simulation results				
System Production	**Produced Energy**	**42.76 MWh/year**	Specific prod.	1650 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	85.44 %		

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 26.92 kWp



Performance Ratio PR



New simulation variant

Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	165.2	80.90	23.97	214.4	212.6	4.745	4.624	0.832
February	140.8	66.10	24.15	181.6	180.1	4.012	3.909	0.830
March	138.0	61.70	23.40	182.0	180.4	4.079	3.975	0.843
April	107.7	46.80	21.76	146.6	145.1	3.353	3.268	0.860
May	94.9	37.20	19.13	133.9	132.2	3.114	3.034	0.874
June	79.5	32.10	17.83	109.6	107.9	2.588	2.521	0.888
July	84.9	35.00	17.11	114.1	112.4	2.673	2.603	0.880
August	104.2	43.10	17.83	141.3	139.8	3.309	3.224	0.881
September	103.5	54.30	18.42	130.7	129.3	3.034	2.954	0.872
October	132.1	68.50	20.00	169.9	168.3	3.923	3.822	0.868
November	155.1	75.60	21.63	195.9	194.2	4.390	4.276	0.842
December	166.2	83.10	23.19	211.0	209.1	4.674	4.554	0.833
Year	1472.1	684.40	20.68	1930.9	1911.6	43.894	42.764	0.854

Legends:

GlobHor	Global horizontal irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
T_Amb	T amb.	E_Grid	Energy injected into grid
GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 4/5

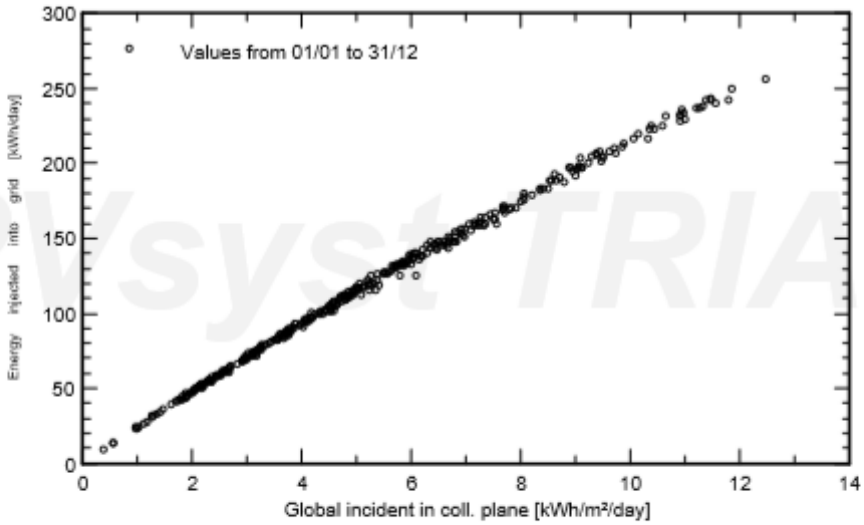
Grid-Connected System: Special graphs

Project : **Micro usina UNISUL 2**

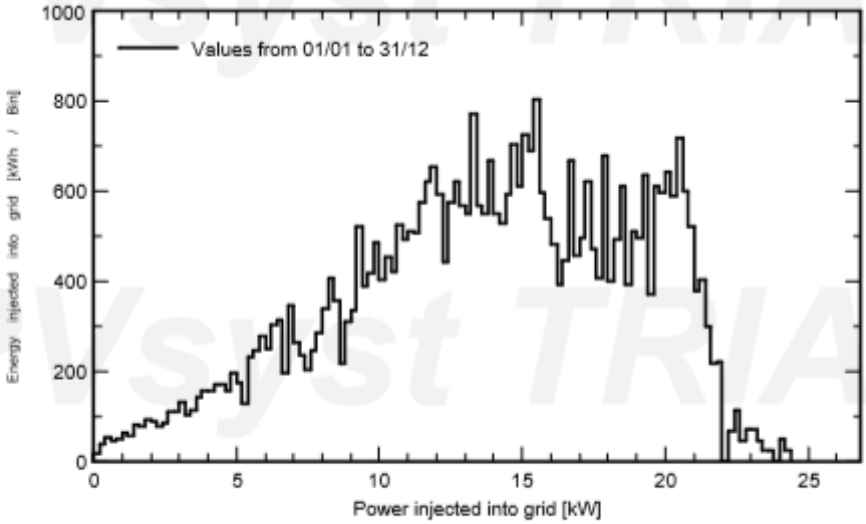
Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**Trackers single array**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tracking, tilted axis, Axis Tilt	0°	Axis azimuth	0°
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution



PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 5/5

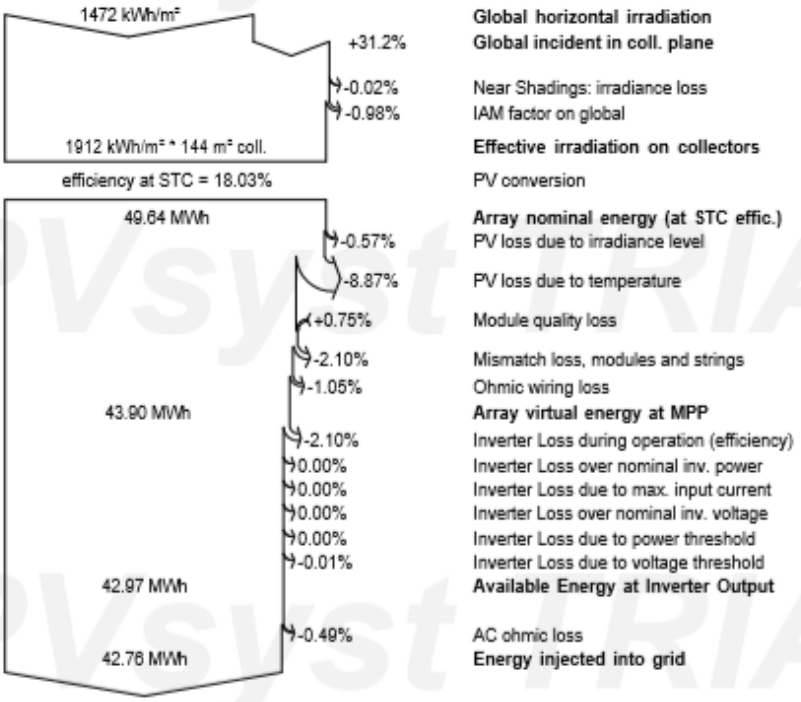
Grid-Connected System: Loss diagram

Project : **Micro usina UNISUL 2**

Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**Trackers single array**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tracking, tilted axis, Axis Tilt	0°	Axis azimuth	0°
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Loss diagram over the whole year



PVsyst TRIAL

ANEXO C – Relatório PVsyst sistema com seguidor solar de dois eixos

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 1/5

Grid-Connected System: Simulation parameters

Project : **Micro Usina - Unisul 3**

Geographical Site	**Pedra Branca**		Country	**Brazil**
Situation	Latitude	-27.62° S	Longitude	-48.68° W
Time defined as	Legal Time	Time zone UT-3	Altitude	7 m
	Albedo	0.20		
Meteo data:	**Pedra Branca**	NASA-SSE satellite data 1983-2005 - Synthetic		

Simulation variant : **New simulation variant**

Simulation date 26/09/20 16h43

Simulation parameters	System type	**Tracking system**		
Tracking two axis, frame E-W	Frame axis azimuth	0°		
Frame Rotation Limitations	Minimum Tilt	10°	Maximum Tilt	80°
Tracker's tilt on frame	Minimum Phi	-60°	Maximum Phi	60°
Models used	Transposition	Perez	Diffuse	Perez, Meteonorm
			Circumsolar	separate
Horizon	Free Horizon			
Near Shadings	Linear shadings			
User's needs :	Unlimited load (grid)			

PV Array Characteristics

PV module	Si-mono	Model	**TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial**		
Original PVsyst database		Manufacturer	Trina Solar		
Number of PV modules		In series	18 modules	In parallel	4 strings
Total number of PV modules		nb. modules	72	Unit Nom. Power	360 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**25.92 kWp**	At operating cond.	23.42 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	635 V	I mpp	37 A
Total area		Module area	**144 m²**	Cell area	126 m²
Inverter		Model	**ECO 25.0-3-S**		
Original PVsyst database		Manufacturer	Fronius International		
Characteristics		Unit Nom. Power	**25.0 kWac**	Oper. Voltage	580-850 V
Inverter pack		Total power	**25 kWac**	Pnom ratio	1.04
		Nb. of inverters	1 units		
Total		Total power	**25 kWac**	Pnom ratio	1.04

PV Array loss factors

Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	289 mΩ	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction	-0.8 %
Module mismatch losses			Loss Fraction	2.0 % at MPP
Strings Mismatch loss			Loss Fraction	0.10 %

Incidence effect (IAM): Fresnel AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000

System loss factors

AC loss, inverter to injection	Inverter voltage	400 Vac tri		
	Wires: 3 x 10 mm²	30 m	Loss Fraction	0.9 % at STC

PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 2/5

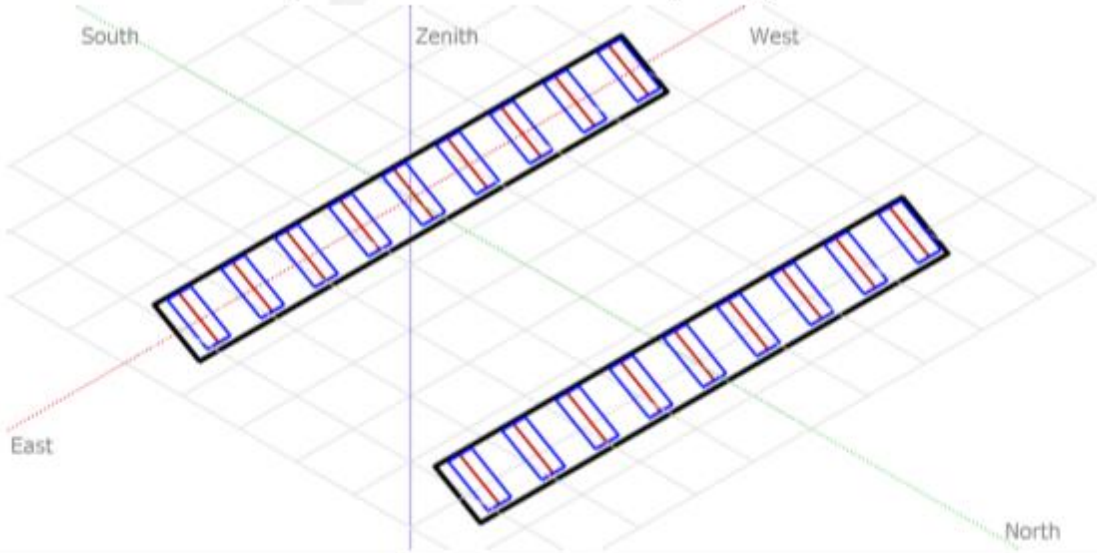
Grid-Connected System: Near shading definition

Project : **Micro Usina - Unisul 3**

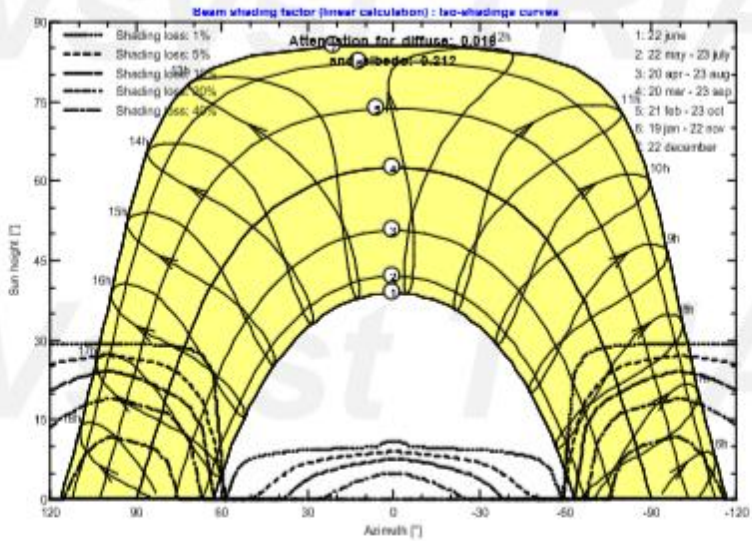
Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**Tracking system**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tilt			
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram



PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 3/5

Grid-Connected System: Main results

Project : **Micro Usina - Unisul 3**

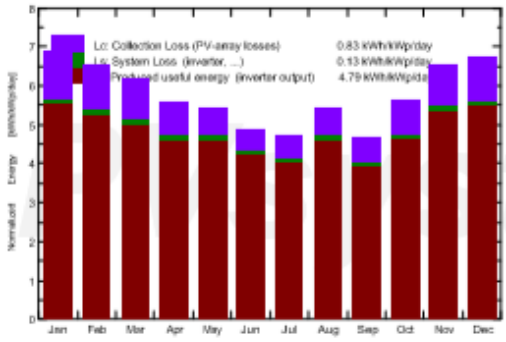
Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**Tracking system**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tilt			
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

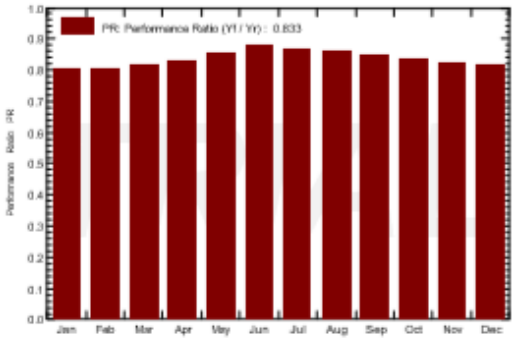
Main simulation results

System Production	**Produced Energy**	**45.34 MWh/year**	Specific prod.	1749 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	83.33 %		

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 26.92 kWp



Performance Ratio PR



New simulation variant

Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	165.2	80.90	23.97	213.0	204.6	4.566	4.449	0.806
February	140.8	66.10	24.15	183.2	176.7	3.922	3.821	0.804
March	138.0	61.70	23.40	191.6	185.2	4.146	4.039	0.813
April	107.7	46.80	21.76	166.3	162.1	3.679	3.584	0.832
May	94.9	37.20	19.13	168.5	167.6	3.826	3.726	0.853
June	79.5	32.10	17.83	145.9	145.9	3.398	3.310	0.875
July	84.9	35.00	17.11	145.7	145.5	3.356	3.267	0.865
August	104.2	43.10	17.83	166.9	164.4	3.813	3.714	0.859
September	103.5	54.30	18.42	140.3	136.4	3.163	3.080	0.847
October	132.1	68.50	20.00	173.2	166.4	3.862	3.762	0.838
November	155.1	75.60	21.63	195.7	189.5	4.281	4.169	0.822
December	166.2	83.10	23.19	208.8	202.6	4.535	4.419	0.816
Year	1472.1	684.40	20.68	2099.0	2047.0	46.547	45.339	0.833

Legends:

GlobHor	Global horizontal irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
T_Amb	T amb.	E_Grid	Energy injected into grid
GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 4/5

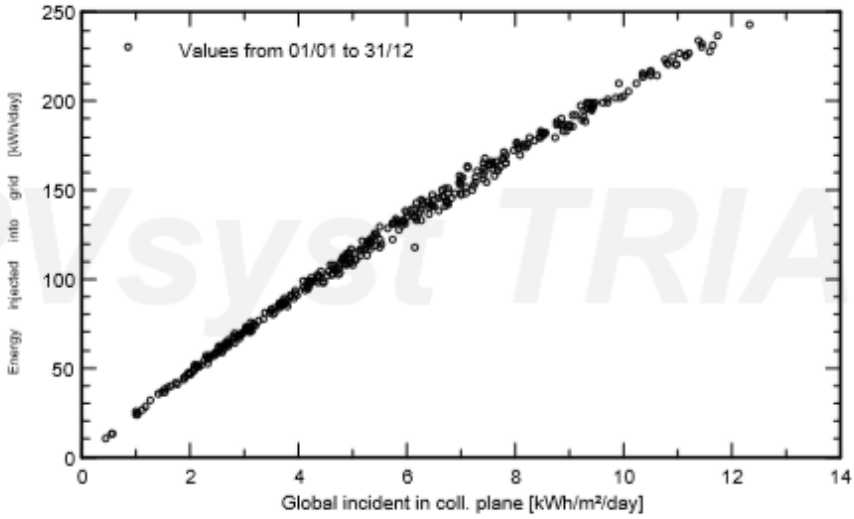
Grid-Connected System: Special graphs

Project : **Micro Usina - Unisul 3**

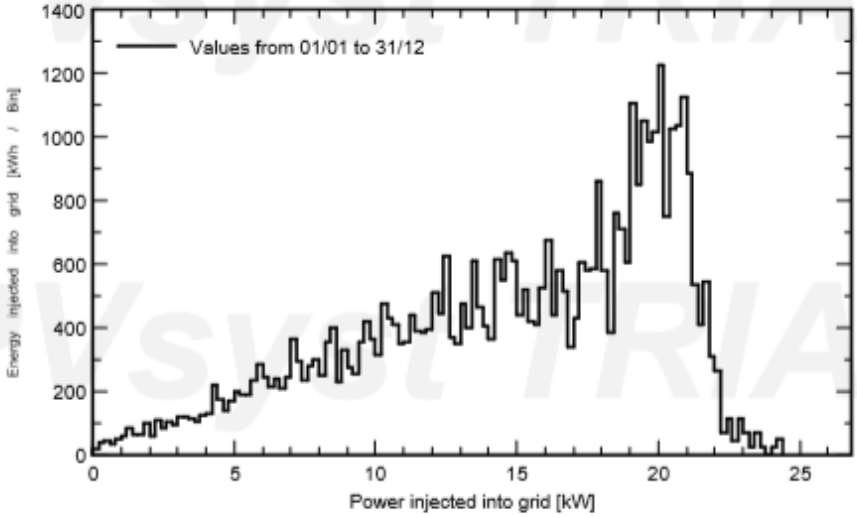
Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**Tracking system**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tilt			
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution



PVsyst Evaluation mode

PVSYST 7.0.12		26/09/20	Page 5/5

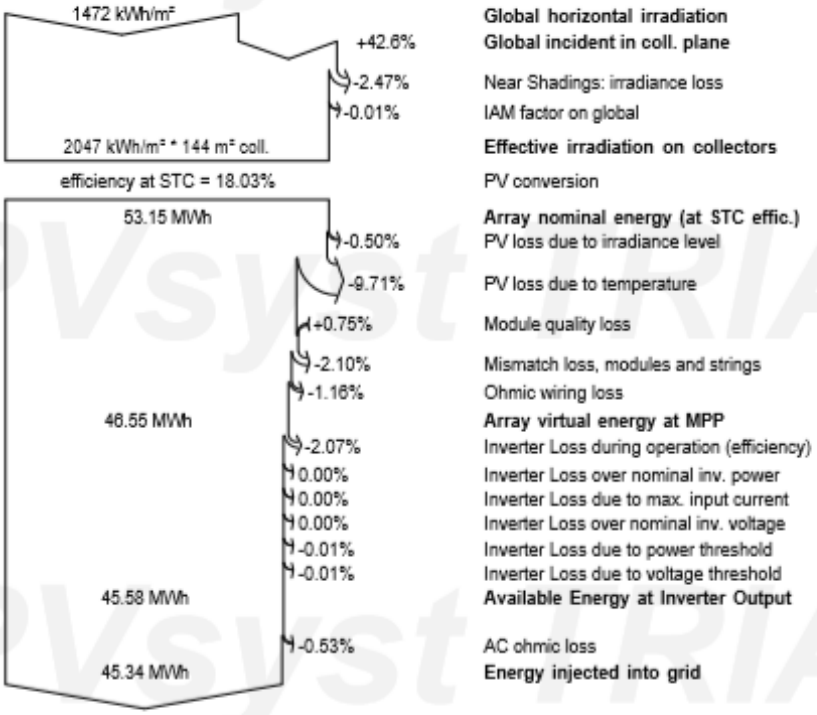
Grid-Connected System: Loss diagram

Project : **Micro Usina - Unisul 3**

Simulation variant : **New simulation variant**

Main system parameters	System type	**Tracking system**		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tilt			
PV modules	Model	TSM-DEG14C-20-(II)-360-Bifacial		360 Wp
PV Array	Nb. of modules	72	Pnom total	**25.92 kWp**
Inverter	Model	ECO 25.0-3-S	Pnom	25.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Loss diagram over the whole year



PVsyst TRIAL