

Bruno Miguel Mimoso Farinha

**PROJETO DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA EM
AUTOCONSUMO COM ANÁLISE DA PENALIZAÇÃO
DA ORIENTAÇÃO E SOMBREAMENTO LOCAL**



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Instituto Superior de Engenharia
2024

Bruno Miguel Mimoso Farinha

**PROJETO DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA EM
AUTOCONSUMO COM ANÁLISE DA PENALIZAÇÃO
DA ORIENTAÇÃO E SOMBREAMENTO LOCAL**

**Mestrado em Engenharia Mecânica
(Especialidade em Energia, Refrigeração e
Climatização)**

**Trabalho realizado sob a orientação de:
Professor Doutor Nelson Manuel Santos Sousa**



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Instituto Superior de Engenharia
2024

PROJETO DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA EM AUTOCONSUMO COM ANÁLISE DA PENALIZAÇÃO DA ORIENTAÇÃO E SOMBREAMENTO LOCAL

Declaração de autoria da obra

Declaro ser o autor desta obra, que é original e inédita. Os autores e obras consultados são devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluídas.

(Nome Completo do Autor)

©2023, Bruno Miguel Mimoso Farinha

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os professores, que ao longo de todo este percurso do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica na Universidade do Algarve, contribuíram para o meu enriquecimento e desenvolvimento, não só a nível intelectual e académico, mas também a nível pessoal e profissional.

Quero agradecer especialmente ao meu orientador, Professor Doutor Nelson Manuel Santos Sousa, pelo acompanhamento, orientação, disponibilidade, empenho, apoio e auxílio durante todo o processo, bem como pela disponibilização da sua máquina fotográfica para as fotografias “olho de peixe”.

Quero agradecer ao Engenheiro Carlos Santos, pela disponibilidade, apoio e auxílio na instalação do sistema a estudar, bem como com a montagem dos componentes e programação dos softwares para ser possível a realização das medições para obtenção de dados.

Quero ainda agradecer ao Engenheiro Pedro Góis e ao Engenheiro António Mota, da empresa *ALGARPOWER*, pela disponibilidade de ambos e pela disponibilização dos equipamentos para a realização do presente trabalho, nomeadamente, painel fotovoltaico, micro inversor e cabos.

Por fim, mas não menos importante, quero dar um muitíssimo importante, especial e sentido agradecimento à Mestre Ana Carina Ferreira Marinheira, por todo o seu apoio, o seu acreditar em mim, e a sua extrema paciência durante todo este processo.

RESUMO

O trabalho desenvolvido e apresentado ao longo do atual relatório de projeto, tem como finalidade a realização de um projeto de instalação de painéis fotovoltaicos em um edifício público de serviços, nomeadamente no edifício conhecido como *Mercado de Faro*, e respetiva elaboração de orçamento de instalação.

O presente relatório apresenta um estudo sobre a produção fotovoltaica em função da orientação e o efeito da penalização do sombreamento local e instalação dos painéis seguindo a orientação do edifício, comparando com uma orientação a Sul com o mesmo grau de inclinação, para assim se proceder ao projeto final de instalação de painéis fotovoltaicos bem como à elaboração do respetivo orçamento de instalação. A instalação dos painéis seguindo a orientação do edifício deve-se ao facto do cliente necessitar manter os acessos na cobertura do edifício desimpedidos, bem como manter um agradável nível estético.

Neste estudo foram estudados e validados modelos de radiação solar pela comparação de duas bases de dados num período de 10 anos. Foram também validados modelos de produção fotovoltaica através de uma instalação experimental construída para o propósito, analisando-se com detalhe a influência da temperatura das células fotovoltaicas. Comprovados os modelos foi realizada a simulação técnica e económica para a instalação fotovoltaica com 152,5 kWp alcançando-se uma fração solar de 45,4% o que justifica o retorno de investimento em 2,3 anos. A penalização do sombreamento local é de 12,5%. Enquanto que a penalização face à orientação do edifício é de 3,8%.

A realização deste trabalho é de elevada importância, pois vai poder contribuir não só para uma redução de custos de consumo energético a pagar à *E-REDES*, mas também, e de nada menos importante, contribuir de forma indireta para uma redução da pegada ambiental por redução de consumo de energia elétrica da rede de fornecimento com recurso ao autoconsumo, contribuindo assim para uma redução de emissões de gases com efeito de estufa, nomeadamente o CO₂, que são emitidos através de centrais termoelétricas na produção de energia elétrica utilizando os tão falados atualmente combustíveis fósseis.

Palavras-Chave: Edifícios públicos de serviços; Fotovoltaico; Custos; Energia; Autoconsumo.

ABSTRACT

The work developed and presented throughout the current project report aims to carry out a project to install photovoltaic panels in a public service building, namely in the building known as *Mercado de Faro*, and the respective preparation of an installation budget.

This report presents a study on photovoltaic production depending on the orientation and the effect of penalizing local shading and installing the panels following the orientation of the building, comparing with a south orientation with the same degree of inclination, to proceed with the final project installation of photovoltaic panels as well as the preparation of the respective installation budget. The installation of the panels following the orientation of the building is due to the fact that the client needs to keep access to the building's roof unobstructed, as well as maintaining a pleasant aesthetic level.

In this study, solar radiation models were studied and validated by comparing two databases over a period of 10 years. Photovoltaic production models were also validated through an experimental installation built for the purpose, analyzing in detail the influence of the temperature of the photovoltaic cells. Once the models were proven, a technical and economic simulation was carried out for the photovoltaic installation with 152,5 kWp, achieving a solar fraction of 45,4%, which justifies the return on investment in 2,3 years. The penalty for local shading is 12,5%. While the penalty due to the building's orientation is 3,8%.

Carrying out this work is of great importance, as it will be able to contribute not only to a reduction in energy consumption costs payable to *E-REDES*, but also, and no less important, to indirectly contribute to a reduction in the environmental footprint by reduction of electrical energy consumption from the supply network using self-consumption, thus contributing to a reduction in greenhouse gas emissions, namely CO₂, which are emitted through thermoelectric plants in the production of electrical energy using the currently talked about fossil fuels.

Keywords: Public service buildings; Photovoltaic; Costs; Energy; Self-consumption.

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Objetivos e Características do Projeto	2
1.2	Contexto e Metodologia do Trabalho	2
1.3	Organização do Documento.....	3
2	Estado da Arte.....	5
3	Desenvolvimento do trabalho realizado.....	31
3.1.	Enquadramento legal para instalação de sistemas de painéis fotovoltaicos para autoconsumo	36
3.2.	Modelos matemáticos estudados.....	38
3.2.1.	Modelo de radiação solar adaptado de <i>John A. Duffie e William A. Bechman</i> 39	
3.2.2.	Modelo de produção fotovoltaica de 5 parâmetros.....	44
3.2.3.	Modelo de balanço térmico para determinação da temperatura da célula ...	46
3.3.	Painéis fotovoltaicos a instalar – Características técnicas	48
3.4.	Inversores a instalar – Características técnicas	50
3.5.	Estrutura e equipamentos para estudo do painel fotovoltaico	51
3.5.1.	Estrutura de suporte e acoplamento do painel fotovoltaico	52
3.5.2.	Equipamentos de medição de radiação solar	54
3.5.3.	Equipamentos de medição de temperaturas	55
3.5.4.	Equipamento de medição de velocidade do vento	57
3.5.5.	Equipamento de inversão de corrente <i>DC/AC</i> – Micro Inversor	58
3.5.6.	Equipamento de medição da produção do painel fotovoltaico	59
3.6.	Validação do modelo de radiação solar	61
3.6.1.	Estação meteorológica da Universidade do Algarve - <i>EPPLEY</i>	61
3.6.2.	Software online <i>PVGIS Internacional</i>	64
4	Estudo da Radiação e Resultados Experimentais	71
4.1	Modelação da Produção do <i>Mercado de Faro</i>	79

4.2	Resultados da Modelação para o <i>Mercado de Faro</i>	82
4.2.1.	Comparação de energias consumida, produzida e excedente, com painéis fotovoltaicos instalados a 20° de inclinação com a mesma orientação do edifício, de 25° SW (Sudoeste):	85
4.2.2.	Comparação de energias consumida, produzida e excedente, com painéis fotovoltaicos instalados a 20° de inclinação com orientação a Sul, de 0° S (Sul):	86
5	Projeto de instalação dos painéis fotovoltaicos e instalação elétrica	87
5.1	Área de implementação e projeto dos respetivos painéis fotovoltaico	93
5.2	Cálculos e resultados do retorno do investimento	97
5.2.1	Cálculo da energia fotovoltaica produzida e valores de poupança para uma orientação de 0° S	97
5.2.2	Cálculo da energia fotovoltaica produzida e valores de poupança para uma orientação de 25° SW	99
5.3	Orçamento do projeto	101
6	Discussão de Resultados e Conclusões	105
6.1	Análise do trabalho realizado.....	106
6.2	Trabalhos futuros	109
	Referências.....	111
	A Gráficos de Diagramas de Carga e Produção Fotovoltaica Mensal Relativos a Um Ano	
	117	
A.1	Comparação da Previsão da Radiação Solar Mensal Para o Ano de 2024 No Plano Horizontal - Com Desvio Padrão	119
A.2	Comparação da Previsão Média de Radiação Solar Para os Dias 15 de Cada Mês do Ano de 2024 – Com Desvio Padrão.....	125
A.3	Gráficos de diagrama de carga de energia consumida e energia produzida com orientação de 25° SW – Alinhada com o Edifício	131
A.4	Gráficos de diagrama de carga de energia consumida e energia produzida com orientação de 0° S – Orientação a Sul.....	137

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Constituição de uma célula fotovoltaica de Silício, e circulação da corrente elétrica, (figura retirada de <https://metalsol.com.br/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/>).....6
- Figura 2 – Funcionamento de uma célula fotovoltaica, (figura retirada de <https://www.solsticioenergia.com/2017/08/17/como-funciona-celula-fotovoltaica>).7
- Figura 3 - Painel fotovoltaico com 72 células ligadas em série, (figura retirada de <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-circuit-design>).....7
- Figura 4 – Ilustração de painéis fotovoltaicos ligados tanto em série como em paralelo em conjunto, (figura retirada de <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/photovoltaic-array.html>).7
- Figura 5 - Exemplo ilustrativo de montagem de painéis fotovoltaicos ligados em paralelo, (figura retirada de <https://pt.slideshare.net/JooVitorPereiraMende/energia-solar-70470663>).....8
- Figura 6 – Exemplo de uma "árvore" fotovoltaica, (figura retirada de <https://pt.slideshare.net/DeepakMahajan65/solar-tree-205814954>).8
- Figura 7 – Central Fotovoltaica Hércules em Moura, Portugal, (figura retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar_em_Portugal).....8
- Figura 8 – Sistema fotovoltaico numa moradia/vivenda, (figura retirada de <https://abee-go.org.br/2019/04/27/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico-com-back-up-de-baterias/>).9
- Figura 9 – Visão da Estação Espacial Internacional e seus painéis solares, (figura retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Grelha_solar_da_ISS).9
- Figura 10 – Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891), (figura retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Edmund_Becquerel).10
- Figura 11 – Extrato da patente da primeira célula solar, registada em março de 1954, (extraído da referência [3]).....11
- Figura 12 – A primeira aplicação de uma célula solar de silício foi como fonte de alimentação de uma rede telefónica local em Americus, na Geórgia, Estados Unidos da América, em 1955, (extraído da referência [3]).11
- Figura 13 – Imagem do Vanguard I, o primeiro satélite com células solares, lançado em Março de 1958 levando a bordo um pequeno painel solar com 100 cm² visível na janela em cima à esquerda, (extraído da referência [3]).12
- Figura 14 – Célula fotovoltaica atual, (figura retirada de <https://canalsolar.com.br/o-que-sao-as-celulas-solares-fotovoltaicas-do-tipo-n/>).13
- Figura 15 – Célula fotovoltaica de CIGS [Cobre (Cu)- Índio (In)- Gálio (Ga) – Selénio (Se)], (figura retirada de <https://energiasolare.blogs.sapo.pt/tag/c%C3%A9lulas+solares+flex%C3%ADveis>). .14

Figura 16 – Esquema dos passos de produção para um painel fotovoltaico, (fonte IEA, figura retirada de ref. ^a [31]).	14
Figura 17 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV), (figura retirada de https://www.portalsolar.com.br/noticias/materias/sunew-fara-a-maior-instalacao-de-filmes-fotovoltaicos-organicos-do-mundo).	18
Figura 18 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV), transparência, (figura retirada de https://casa.abril.com.br/bem-estar/arvores-solares-o-design-e-a-sustentabilidade-promovem-energia-solar).	18
Figura 19 – Dispositivo concentrador solar em forma de lupa, (figura retirada de https://www.researchgate.net/figure/Figure-2-A-CPV-solar-cell-module-Fresnel-lens-array-is-used-to-focus-sunlight-onto_fig39_325618123).	21
Figura 20 – Dispositivo Solar AGILE – Axially Graded Index Lens, (figura retirada de PortalEnergia, ref. ^a [27]).	21
Figura 21 – Célula multicamada – Tri Junction Cell (Perovskite-Perovskite-Silício, (figura retirada de https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsenergylett.2c01556).	23
Figura 22 – Célula multicamada – Tri Junction Cell, sua constituição e produção de energia elétrica, (figuras retiradas das referências [28] e [29]).	23
Figura 23 - Diversos tipos de painéis fotovoltaicos com diferentes tipos de constituição e construção, (figura retirada de https://codibly.com/news-insights/solar-cell-technology/).	24
Figura 24 – Orientação do painel fotovoltaicos em relação à posição do Sol e à superfície da Terra. Fonte: John Duffie e William Beckman [40].	39
Figura 25 - Esquema do modelo de cinco parâmetros e um díodo	44
Figura 26 - Equação de balanço de energia	46
Figura 27 - Atividade de estudo do painel fotovoltaico em curso, com os diversos equipamentos de medição e leitura, bem como estrutura com inclinação regulada para estar num ângulo de estudo definido.	51
Figura 28 - Software de leitura e recolha de dados de medição da radiação solar e temperaturas ambiente e do painel fotovoltaico	51
Figura 29 - Estrutura suporte para montagem do painel fotovoltaico.	52
Figura 30 - Sistema de regulação de inclinação da estrutura suporte do painel fotovoltaico.	52
Figura 31 - Sistema de regulação de inclinação da estrutura suporte do painel fotovoltaico.	53
Figura 32 - Equipamento para regulação da inclinação do painel fotovoltaico em relação à altura solar.	53
Figura 33 - Atividade de estudo do painel fotovoltaico em curso, com os diversos equipamentos de medição e leitura, bem como estrutura com inclinação regulada para estar num ângulo de estudo definido.	54
Figura 34 - Piranómetro utilizado na medição da radiação solar (exemplo demonstrado no plano do painel).	54
Figura 35 - Termopar de medição da temperatura ambiente	55
Figura 36 - Termopar de medição da temperatura no centro da superfície de incidência solar do painel fotovoltaico.	55

Figura 37 - Termopar de medição da temperatura no topo da superfície de incidência solar do painel fotovoltaico	56
Figura 38 - Termopar de medição da temperatura na base da superfície de incidência solar do painel fotovoltaico	56
Figura 39 - Termopar de medição da temperatura no centro da superfície interior do painel fotovoltaico	56
Figura 40 - Anemómetro e sensor de temperatura do ar ambiente.....	57
Figura 41 - Equipamento de leitura e recolha de dados de velocidade do vento e de temperatura ambiente.....	57
Figura 42 - Analisador de redes, Chauvin Arnoux CA8332B.....	59
Figura 43 - Conjunto de leitura e recolha de dados de análise de redes	59
Figura 44 - Multímetro Fluke 187 (esuerda) e Pinça Apmerimétrica RS PRO 36T (direita) ..	60
Figura 45 - Imagem de configuração de dados para simulação fotovoltaica. Fonte PVGIS..	64
Figura 46 - Mapa de cobertura da base de dados da radiação solar. Fonte: PVGIS.....	65
Figura 47 - Base de dados padrão da radiação solar mundial. Fonte: PVGIS.....	65
Figura 48 - Imagem demonstrativa de mapa de sombreamento local, com fotografia de horizonte. Fonte: PVGIS.	67
Figura 49 – Fotografia “Olho de Peixe” da zona1 do Mercado de Faro	79
Figura 50 – Planta de instalação dos painéis fotovoltaicos na cobertura do edifício Mercado de Faro, com indicação de zonas de instalação – Orientação dos painéis fotovoltaicos a 25° SW, em concordância com a orientação do edifício.	83
Figura 51 - Imagem demonstrativa do efeito de sombreamento parcial no painel fotovoltaico. Fonte: https://greenpower.pt/hotsop-paineis-solares/	88
Figura 52 - Ilustração de cálculo da distância entre painéis fotovoltaicos com base no dia de menor ângulo de elevação do ano. Fonte: https://www.passeidireto.com/arquivo/81882191/planilha-de-calculo-da-distancia-minima-entre-paineis-para-evitar-sombreamento ; adaptado para o hemisfério Norte. ..	88
Figura 53 - Esquema de ângulo de elevação solar e azimute solar consoante a hora do dia e nos vários meses do ano, em forma de globo. Fonte: Sun Earth Tools.....	90
Figura 54 - Esquema de ângulo de elevação solar e azimute solar consoante a hora do dia, nos vários meses do ano, em forma de gráfico. Fonte: Sun Earth Tools.	91
Figura 55 - Imagem da incidência solar no local escolhido, demonstrativa da incidência solar ao longo do dia. Fonte: Sun Earth Tools.	91
Figura 56 - Planta de instalação dos painéis fotovoltaicos na cobertura do edifício Mercado de Faro com orientação de 25° SW.	93
Figura 57 - Esquema elétrico de ligação elétrica dos painéis fotovoltaicos ao inversor, e respetiva ligação à rede elétrica, com os respetivos equipamentos de proteção elétrica.	96
Figura 58 - Carta de apresentação da proposta de orçamento	102
Figura 59 - Carta de apresentação da validade da proposta de orçamento.....	103

Figura 60 – Orçamento de instalação fotovoltaica de potência de 152 550 kW.....104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais constituintes das principais células fotovoltaicas	13
Tabela 2 – Top 10 dos países de potência instalada em 2022, e de potência total instalada, fonte IEA PVPS,, (tabela retirada de IEA – Agência Internacional de Energia; ref. ^a [35]).	27
Tabela 3 - Dados de localização do edifício "Mercado de Faro"	33
Tabela 4 - Dados e características dos painéis fotovoltaicos a instalar	48
Tabela 5 – Características mecânicas do painel fotovoltaico a instalar e em estudo	49
Tabela 6 – Dados e características dos inversores a instalar	50
Tabela 7 – Dados e características do microinversor utilizado para ensaios.....	58
Tabela 8 - Dados registados pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve no ano de 2020.....	62
Tabela 9 - Dados registados pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve (excerto do ano de 2020, 1 janeiro das 00:00:00 às 23:00:00)	63
Tabela 10 - Bancos de bases de dados de radiação solar mundial. Fonte: PVGIS.....	66
Tabela 11 - Coeficientes para utilizar em modelação numérica, consoante o tipo de painel fotovoltaico. Fonte: PVGIS.	68
Tabela 12 - Coeficientes para cálculo da temperatura do módulo fotovoltaico. Fonte: PVGIS.	69
Tabela 13 - Diversos ângulos solares, barra de luz solar, do dia 21 de dezembro de 2023. Fonte:Sun Earth Tools.	90
Tabela 14 - Ângulos de elevação do sol e azimute solar nas diversas horas de sol ao longo do dia. Fonte: Sun Earth Tools.	90
Tabela 15 – Custo do kWh a pagar por consumo, e valor de venda do kWh à rede.	97
Tabela 16 – Quantidade de energia consumida e energia produzida com e sem contabilização de sombreamento, e excedente de energia produzida com sombreamento.	97
Tabela 17 – Contabilização de custos de energia consumida, poupança em Euro, venda do excedente em Euro, percentagem de poupança e valor a pagar de consumo final.	98
Tabela 18 – Custo do kWh a pagar por consumo, e valor de venda do kWh à rede.	99
Tabela 19 – Quantidade de energia consumida e energia produzida com e sem contabilização de sombreamento, e excedente de energia produzida com sombreamento.	99
Tabela 20 – Contabilização de custos de energia consumida, poupança em Euro, venda do excedente em Euro, percentagem de poupança e valor a pagar de consumo final.	100
Tabela 21 – Retorno do investimento, comparando a contabilização do sombreamento da envolvente local e sem o sombreamento, com uma orientação de 0° Sul.	101

Tabela 22 - Retorno do investimento, comparando a contabilização do sombreamento da envolvente local e sem o sombreamento, com uma orientação de 25° SW, alinhada com o edifício.	101
--	-----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico comparativo de capacidade de energia cumulativa por geração de energia entre 2010 e 2027, fonte IEA Renewables 2022, (gráfico retirado de ref. ^a [30]).	26
Gráfico 2 – Produção de eletricidade através de energias renováveis instaladas em 2022, fontes IEA PVPS, BNEF, GWEC, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref. ^a [35]).	26
Gráfico 3 – Evolução anual de instalações de energias renováveis, fontes IEA PVPS, BNEF, GWEC, IRENA, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref. ^a [35]).	27
Gráfico 4 – Taxa de penetração no mercado fotovoltaico (2022), fonte IEA PVPS, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref. ^a [35]).	28
Gráfico 5 – Evolução das vendas de veículos elétricos e crescimento dos fotovoltaicos, fonte IEA PVPS, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref. ^a [35]).	28
Gráfico 6 – Capacidade de produção de energias renováveis por fonte de energia em 2022, fonte IRENA Renewable Capacity Highlights, (ref. ^a [36]).	29
Gráfico 7 – Crescimento de potência de energias renováveis por fonte de energia em 2022, fonte IRENA Renewable Capacity Highlights, (ref. ^a [36]).	30
Gráfico 8 - Consumo típico diário, tendo como exemplo o dia 23 de agosto de 2023.	34
Gráfico 9 - Necessidade energética do edifício através da energia ativa consumida ao longo do ano de 2023.	34
Gráfico 10 - Evolução da Energia Solar Disponível ao longo do ano de 2024.	35
Gráfico 11 – Gráfico de eficiência elétrica (esquerda) e gráfico de dependência da temperatura	49
Gráfico 12 – Gráfico da vida útil do painel fotovoltaico e sua degradação ao longo da mesma	49
Gráfico 13 - Variação da Precipitação e Temperaturas máxima, média e mínima ao longo do ano de 2020, medidos pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve.	62
Gráfico 14 - Radiação média mensal para o ano de 2020, registados pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve no ano de 2020	63
Gráfico 15 – Previsão da radiação solar para o mês de setembro de 2024 com base na radiação média entre 2013 e 2023, da análise de dados obtidos pelo EPPLEY e pelo PVGIS, e com o respetivo desvio padrão	73
<i>Gráfico 16 – Previsão da radiação solar para o dia 15 de setembro de 2024 com base na radiação média entre 2013 e 2023, da análise de dados obtidos pelo EPPLEY e pelo PVGIS, e com o respetivo desvio padrão</i>	74

Gráfico 17 – Comparação da radiação solar no plano horizontal do painel fotovoltaico entre PVGIS vs Radiação Medida vs Radiação Calculada Empiricamente, para o dia 13 de setembro de 2023	75
Gráfico 18 – Comparação da radiação solar entre Radiação Medida e a Radiação Calculada, para o dia 13 de setembro de 2023.....	76
Gráfico 19 – Comparação entre a Produção Fotovoltaica Medida e a Produção Fotovoltaica Calculada Empiricamente, para o dia 13 de setembro de 2023	77
Gráfico 20 – Temperatura de funcionamento da célula, para o dia 13 de setembro de 2023.	77
Gráfico 21 – Curva de potência máxima do painel fotovoltaico em relação à temperatura da célula	78
Gráfico 22 - Comparação da previsão da produção fotovoltaica com e sem sombreamento da envolvente local, para o ano de 2024, para orientação de 0° S e de 25° SW em concordância com a orientação do edifício.....	80
Gráfico 23 - Modelação numérica comparativa da produção fotovoltaica para o dia 13 de setembro de 2024, com e sem fator de sombreamento da envolvente local, e nas orientações de 0° S e 25° SW em concordância com a orientação do edifício.	80
Gráfico 24 - Modelação numérica da produção fotovoltaica para o dia 13 de setembro de 2024, comparando com o consumo de energia, dando origem a um excedente de produção fotovoltaica, com e sem o fator de sombreamento da envolvente local, orientação de 0°S e 25°SW.....	81
Gráfico 25 - Modelação da produção fotovoltaica para o mês de setembro de 2024, contabilizando o fator de sombreamento da envolvente local.	81
Gráfico 26 – Comparativo entre energia consumida, energia produzida, e excedente de energia produzida, com inclinação de 20° e orientação de 25° SW, igual ao edifício do Mercado de Faro.....	85
Gráfico 27 – Comparativo entre energia consumida, energia produzida, e excedente de energia produzida, com orientação a Sul, 0° S, e inclinação de 20°..	86
Gráfico 28 - Curvas de eficiência do Inversor a instalar, consoante a carga e a tensão.	95
Gráfico 29 - Previsão da radiação solar para janeiro de 2024 com desvio padrão	119
Gráfico 30 - Previsão da radiação solar para fevereiro de 2024 com desvio padrão	119
Gráfico 31 - Previsão da radiação solar para março de 2024 com desvio padrão	120
Gráfico 32 - Previsão da radiação solar para abril de 2024 com desvio padrão	120
Gráfico 33 - Previsão da radiação solar para maio de 2024 com desvio padrão	121
Gráfico 34 - Previsão da radiação solar para junho de 2024 com desvio padrão	121
Gráfico 35 - Previsão da radiação solar para julho de 2024 com desvio padrão	122
Gráfico 36 - Previsão da radiação solar para agosto de 2024 com desvio padrão	122
Gráfico 37 - Previsão da radiação solar para setembro de 2024 com desvio padrão.....	123
Gráfico 38 - Previsão da radiação solar para outubro de 2024 com desvio padrão	123
Gráfico 39 - Previsão da radiação solar para novembro de 2024 com desvio padrão	124
Gráfico 40 - Previsão da radiação solar para dezembro de 2024 com desvio padrão.....	124

Gráfico 41 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de janeiro de 2024 com desvio padrão.	125
Gráfico 42 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de fevereiro de 2024 com desvio padrão.	125
Gráfico 43 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de março de 2024 com desvio padrão.	126
Gráfico 44 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de abril de 2024 com desvio padrão.	126
Gráfico 45 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de maio de 2024 com desvio padrão.	127
Gráfico 46 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de junho de 2024 com desvio padrão.	127
Gráfico 47 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de julho de 2024 com desvio padrão.	128
Gráfico 48 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de julho de 2024 com desvio padrão.	128
Gráfico 49 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de setembro de 2024 com desvio padrão.	129
Gráfico 50 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de outubro de 2024 com desvio padrão.	129
Gráfico 51 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de novembro de 2024 com desvio padrão.	130
Gráfico 52 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de dezembro de 2024 com desvio padrão.	130
Gráfico 53 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Janeiro 2024.....	131
Gráfico 54 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Fevereiro 2024.....	131
Gráfico 55 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Março 2024.....	132
Gráfico 56 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Abril 2024.....	132
Gráfico 57 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Maio 2024.....	133
Gráfico 58 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Junho 2024.....	133
Gráfico 59 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Julho 2024.....	134
Gráfico 60 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Agosto 2024.....	134
Gráfico 61 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Setembro 2024.....	135
Gráfico 62 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Outubro 2024.....	135
Gráfico 63 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Novembro 2024.....	136
Gráfico 64 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Dezembro 2024.....	136
Gráfico 65 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Janeiro 2024.....	137
Gráfico 66 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Fevereiro 2024.....	137
Gráfico 67 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Março 2024.....	138

Gráfico 68 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Abril 2024	138
Gráfico 69 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Maio 2024	139
Gráfico 70 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Junho 2024	139
Gráfico 71 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Julho 2024	140
Gráfico 72 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Agosto 2024	140
Gráfico 73 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Setembro 2024	141
Gráfico 74 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Outubro 2024	141
Gráfico 75 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Novembro 2024.....	142
Gráfico 76 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Dezembro 2024	142

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACRÓNIMO	Significado
A	Ampere
AC	Alternated Current (Corrente Alternada)
AGILE	Axially Graded Index Lens (Lente de Índice Graduado Axialmente)
ANREEE	Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
As	Arsénio
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
CdS	Sulfeto de Cádmio
CdTe	Telureto de Cádmio
CER	Comunidades de Energia Renovável
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selénio
CO₂	Dióxido de Carbono
Cu	Cobre
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
E-REDES	Nome de empresa
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
GaAs	Arseniato de Gálio
GW	Gigawatt
GWEC	Global Wind Energy Council (Conselho Global de Energia Eólica)
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
In	Índio
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes (Painel Intergorvenamental sobre as Mudanças Climáticas)
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agência Internacional para as Energias Renováveis)
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
m/s	Metros por segundo

m²	Metro quadrado
MPPT	Maximum Power Point Tracker (Localizador do Ponto de Potência Máxima)
MW	Megawatt
mW	mili-watt
NOCT	Nominal Operating Temperature Cell (Temperatura Nominal de Operação da Célula)
NZE	Net Zero Emissions
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
OPV	Organic Photovoltaic Panels (Painéis Orgânicos Fotovoltaicos)
PV	Photovoltaic (Fotovoltaico)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
PVPS	Photovoltaic Power Systems Programme (Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica)
SDGs	Sustainable Development Goals
Se	Selénio
Si	Silício
SOLAREX	Nome de empresa
STC	Standard Test Conditions (Condições Standards de Teste)
TW	Terawatt
TWh	Terawatt-hora
UAlg	Universidade do Algarve
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo
UV	Ultravioleta
V	Volt
W	Watt
W/m²	Watt por metro quadrado
Wh	Watt-hora
Wp	Watt-pico

1

INTRODUÇÃO

Com a atual preocupação ambiental, a produção de energia elétrica com recurso a energias renováveis é cada vez maior, por tal tem-se vindo a verificar um aumento de equipamentos de produção de energia elétrica, entre os quais estão os painéis fotovoltaicos.

Painéis fotovoltaicos são dispositivos que convertem a energia da luz solar em energia elétrica, compostos por células fotovoltaicas, as quais são dispositivos semicondutores que produzem eletricidade quando expostos à luz. Desta forma tal, são uma fonte de energia renovável e limpa, pois durante a produção de energia elétrica não produzem emissões de gases com efeito de estufa, o que os torna numa opção atraente para a produção de energia elétrica sustentável.

Este trabalho consiste na elaboração de um projeto de instalação de painéis fotovoltaicos no edifício *Mercado de Faro*, e respetivo orçamento de instalação.

Para tal, vai ser estudado a produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, e em como a sua produção possa ser influenciada pela orientação e sombreamento solar dos mesmos.

O estudo tem como recurso um painel fotovoltaico, igual ao previsto para instalação no edifício visado, com o qual vão ser realizadas simulações de desempenho do mesmo, através da modelação numérica de forma a se perceber qual a penalização de uma instalação com diferente orientação e eventual sombreamento, em que será necessário estudar a radiação solar local assim como a produção fotovoltaica associada à instalação, e em que possa envolver escolha de arranjos diferentes de painéis e inversores.

Além do recurso indicado no parágrafo anterior, vão também ser utilizados como recursos equipamentos de análise de redes elétricas para leitura de corrente elétrica consumida,

tensão elétrica recebida e utilizada, e ainda a potência elétrica consumida, bem como plantas do edifício por forma a analisar a área disponível para instalação de painéis fotovoltaicos, e, ainda, faturas de consumo do edifício paga à *E-REDES* dos anos de 2022 e 2023.

A realização deste trabalho é de elevada importância, pois vai poder contribuir, não só para uma redução de custos de consumo energético a pagar nas faturas à *E-REDES*, mas também, e de nada menos importante, contribuir de forma indireta para uma redução da pegada ambiental por redução de consumo de energia elétrica através de centrais termoelétricas que possam ter como recurso de produção de energia elétrica, os tão falados atualmente combustíveis fósseis, causadores de emissões de gases com efeito de estufa, nomeadamente o CO₂.

Nos subcapítulos seguintes, vão ser descritos os objetivos do projeto, o contexto do trabalho, bem como a organização do respetivo relatório de projeto.

1.1 OBJETIVOS E CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

Os objetivos deste projeto são os de estudar a produção de energia elétrica fotovoltaica através de painéis fotovoltaicos, realização do projeto de instalação dos painéis fotovoltaicos, e respetiva orçamentação.

Realizar o estudo de produção de energia elétrica fotovoltaica, analisando a sua produção, e as eventuais penalizações de acordo, num mesmo ângulo de inclinação previsto de 20°, com a orientação a Sul, orientação igual à do edifício em questão de 25° SW, bem como ainda com análise de sombreamento solar e sem sombreamento, por forma a se mostrar ao cliente as diferenças entre as mesmas, de modo a se conseguir a redução de custos energéticos mais viável a pagar na fatura à *E-REDES* pelo cliente *AMBIFARO*,

1.2 CONTEXTO E METODOLOGIA DO TRABALHO

Existindo uma área de cobertura disponível do edifício, justifica-se a análise de instalação de um sistema fotovoltaico e a respetiva produção de energia para autoconsumo.

Entretanto sendo um edifício citadino com uma orientação sudoeste e estando o mesmo rodeado por estruturas vizinhas, ter-se-á de analisar e avaliar o efeito da orientação e sombreamento local na produção fotovoltaica. Realizar-se-á também, uma auditoria energética aos consumos, simulação e análise da radiação solar incidente e simulação da produção fotovoltaica em função da orientação e agrupamento dos coletores.

Como tal justifica-se este projeto e análise detalhada da instalação fotovoltaica em função do consumo normal do edifício.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente relatório começa por um capítulo com o atual estado da arte, com a descrição, a constituição, e uma breve história evolutiva dos painéis fotovoltaicos, bem como novas tecnologias associadas aos painéis fotovoltaicos por forma a otimizar a produção de energia elétrica, e ainda a evolução da produção de energia elétrica fotovoltaica ao longo dos últimos anos e as perspetivas futuras da mesma.

Seguidamente, encontra-se o capítulo do desenvolvimento do trabalho realizado, onde se procede à descrição do trabalho realizado, com descrição dos painéis fotovoltaicos a utilizar na realização do presente projeto, bem como à simulação da energia elétrica produzida pelos respetivos painéis fotovoltaicos recorrendo à utilização de um espécimen igual ao previsto para a instalação real, em que se vai analisar a sua real produção de energia elétrica simulando duas orientações solares diferentes, a Sul e na orientação do edifício 25° SW, para se poder verificar qual a melhor orientação a instalar os painéis, para que possam ser utilizados durante todo o ano para o melhor rendimento na produção. Ainda neste capítulo procede-se à recolha de dados de consumo energético do edifício do *Mercado de Faro*, com recurso à consulta das faturas a pagar à *E-REDES* e a equipamentos de medição de consumo real de energia elétrica, ao longo do dia, os quais estão instalados na rede elétrica do respetivo edifício.

Contém ainda o capítulo dos resultados experimentais obtidos, os quais vão sendo registados à medida que vão sendo obtidos ao longo do tempo do estudo, nas diversas orientações e inclinações solares, com a real produção energética dos mesmos. Ainda neste capítulo, procede-se à análise dos dados obtidos por simulação do painel fotovoltaico utilizado como amostra, bem como à análise dos dados obtidos através das faturas de consumo, e ainda dos dados obtidos com recurso aos equipamentos de análise da rede, e assim se poder realizar um projeto final de acordo com a posição dos painéis fotovoltaicos por forma a se obter a produção energética ao longo do ano, e, assim se calcular o ponto de retorno do investimento.

E por final, o capítulo das conclusões e trabalhos futuros, que consiste na descrição das análises do trabalho realizado, comentando os resultados obtidos e se foram atingidos os objetivos propostos, na descrição sobre trabalhos futuros, onde se comenta possíveis melhorias a serem propostas, e ainda na descrição de publicações e contribuições com o trabalho realizado, sendo neste caso o relatório projeto de instalação dos painéis fotovoltaicos no edifício visado, bem como o seu respetivo orçamento de instalação.

2

ESTADO DA ARTE

Energia solar fotovoltaica, quando pensamos em energia solar, damos-nos conta de que, em termos básicos, só pensamos na sua fonte principal, o Sol, o qual existe há cerca de 4,6 mil milhões de anos [1], e em que é responsável por atuar como fonte de energia em diversos processos, sejam eles na utilização por particulares em residências, sejam eles na utilização da mesma para produção a nível industrial ou outros fins comerciais, no entanto, a história diz-nos que o homem, como ser humano, já utilizava a energia solar para produzir fogo através da utilização dos raios solares.

Nessa altura ainda havia um caminho muito longo a percorrer até à atualidade, em que temos um complexo sistema tecnológico de produção de energia solar no presente e em constante desenvolvimento para o futuro. Ora, o Sol ao ser a maior estrela do Sistema Solar em que nos encontramos, é um dos responsáveis, ou mesmo o principal, pelos fenómenos meteorológicos, e também pela fotossíntese realizada pelas plantas, processo do qual todos os seres vivos dependem devido à produção de oxigénio.

O nosso Sol, a composição mássica do Sol é de 74% Hidrogénio, 24% Hélio, sendo os restantes 2% formados por Oxigénio, Carbono, Ferro, Enxofre, Néon, Azoto, Silício e Magnésio, e em que a sua luz demora em média cerca de 8 minutos e 20 segundos a chegar ao nosso planeta Terra, tendo de percorrer cerca de 149 836 270 km à velocidade de 299 792 458 m/s [1]. Atualmente é utilizado, principalmente, na produção de energia solar fotovoltaica, no aquecimento de água pela energia heliotérmica, também denominada de energia solar térmica concentrada, e em que a mesma também é utilizada na produção de energia elétrica fotovoltaica, bem como na indústria em geral e em parques fotovoltaicos.

A energia solar é um tipo de energia renovável obtida a partir da radiação solar, a qual é convertida em eletricidade por meio da utilização de células fotovoltaicas, que em conjunto formam os denominados de painéis fotovoltaicos, que são então os dispositivos que com recurso às células fotovoltaicas, convertem a luz solar em eletricidade. Quando a luz solar incide sobre uma célula fotovoltaica, a mesma liberta eletrões, estes, por sua vez, são conduzidos através da mesma, produzindo assim uma corrente elétrica. Energia solar fotovoltaica é, portanto, uma fonte de energia limpa e renovável que tem o potencial de transformar a forma como produzimos e consumimos energia. Estas células, geralmente fabricadas com recurso a semicondutores, tais como o Silício cristalino (c-Si) e o Arsenieto de Gálio (GaAs), captam fotões da luz solar produzindo assim a corrente elétrica, como se apresenta na figura 1.

O processo de produção de energia elétrica de um sistema fotovoltaico começa com os painéis fotovoltaicos, os quais consistem em múltiplas células fotovoltaicas ligadas em série e em paralelo por forma a produzir a eletricidade requerida, tensão e corrente. Quando a luz solar incide sobre as células, os eletrões existentes no material semiconductor ficam excitados começando a se movimentarem, criando assim a produção de uma corrente elétrica contínua. As células de silício produzem uma corrente (A-Ampere) e uma tensão (V-Volt), como se apresenta na figura 2, que combinadas em série e paralelo produzem uma determinada potência elétrica (W-Watt), ilustradas nas figuras 3 a 5. Esta mesma corrente é então captada e direcionada, através de cabos, para baterias no caso de se querer armazenar, ou para um inversor para converter a corrente contínua em corrente alternada, e assim se poder utilizar diretamente, pois esta última é o tipo de corrente utilizada em residências, indústria, comércio, etc.

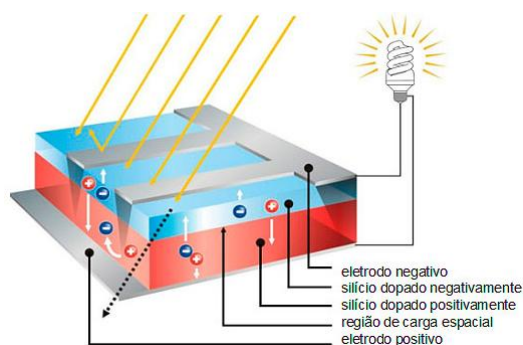


Figura 1 – Constituição de uma célula fotovoltaica de Silício, e circulação da corrente elétrica, (figura retirada de <https://metalsol.com.br/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/>).

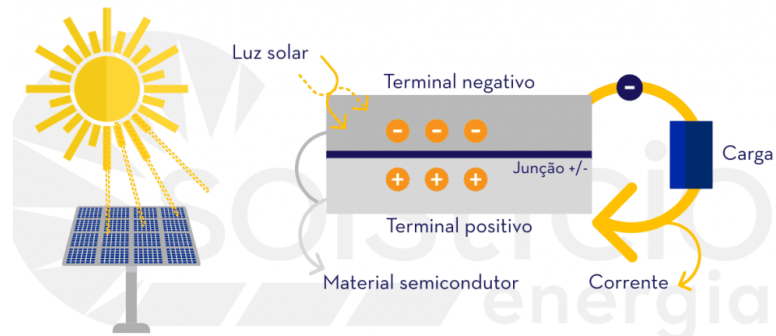


Figura 2 – Funcionamento de uma célula fotovoltaica, (figura retirada de <https://www.solsticioenergia.com/2017/08/17/como-funciona-celula-fotovoltaica>).

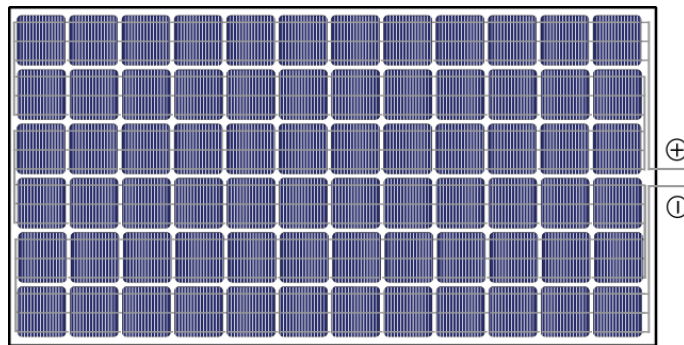


Figura 3 - Painel fotovoltaico com 72 células ligadas em série, (figura retirada de <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-circuit-design>).

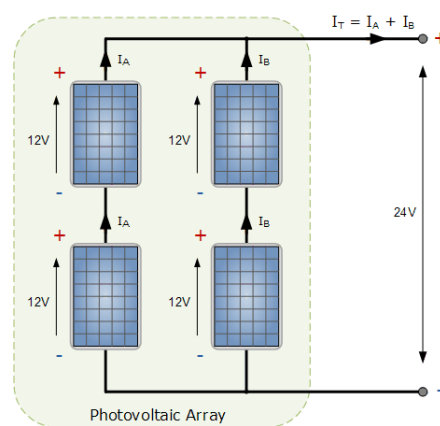


Figura 4 – Ilustração de painéis fotovoltaicos ligados tanto em série como em paralelo em conjunto, (figura retirada de <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/photovoltaic-array.html>).

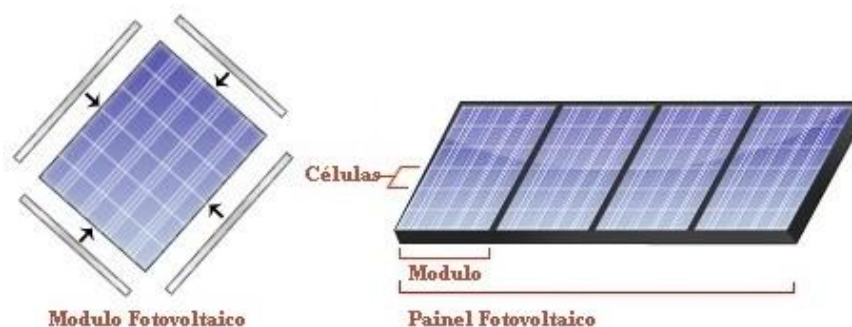


Figura 5 - Exemplo ilustrativo de montagem de painéis fotovoltaicos ligados em paralelo, (figura retirada de <https://pt.slideshare.net/JooVitorPereiraMende/energia-solar-70470663>).

Atualmente, é muito comum observar-se painéis fotovoltaicos montados em telhados de moradias, prédios, armazéns, escolas, fábricas, edifícios comerciais, bem como em terrenos de produção de energia fotovoltaica e ainda em instalações mais avançadas como estruturas e equipamentos espaciais, como se pode observar nas figuras 6 a 9.



Figura 6 – Exemplo de uma "árvore" fotovoltaica, (figura retirada de <https://pt.slideshare.net/DeepakMahajan65/solar-tree-205814954>).



Figura 7 – Central Fotovoltaica Hércules em Moura, Portugal, (figura retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar_em_Portugal).

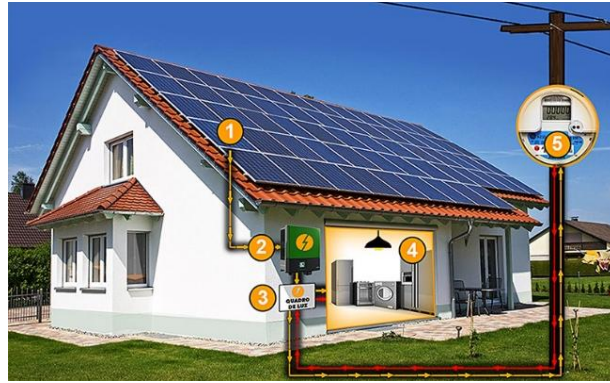


Figura 8 – Sistema fotovoltaico numa moradia/vivenda, (figura retirada de <https://abee-go.org.br/2019/04/27/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico-com-back-up-de-baterias/>).



Figura 9 – Visão da Estação Espacial Internacional e seus painéis solares, (figura retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Grelha_solar_da_ISS).

A história dos painéis fotovoltaicos remonta ao século XIX, quando um físico francês, de seu nome Alexandre Edmond Becquerel em 1839, figura 10, descobriu o efeito fotovoltaico. Becquerel observou que, quando um eletrodo de platina revestido com Cloreto de Prata ao ser imerso numa solução condutora de ácido nítrico e exposto à luz solar, o mesmo produzia uma corrente elétrica.



Figura 10 – Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891), (figura retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Edmond_Becquerel).

Este mesmo efeito foi observado em 1876, por W. G. Adams e R. E. Day, e em que descobriram que o selênio produzia eletricidade perante a incidência de luz solar [2-5].

Em 1883, o engenheiro americano Charles Fritts construiu a primeira célula fotovoltaica prática, utilizando uma célula de selênio numa fina camada de ouro. A célula de Fritts tinha uma eficiência de apenas 1%, mas foi um passo importante no desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica.

No século XX, houve uma série de avanços na tecnologia fotovoltaica, incluindo o desenvolvimento de células de Silício cristalino mais eficientes, a criação de células de Silício amorfo e a melhoria dos processos de fabrico.

A primeira célula fotovoltaica de aplicação prática, era constituída por silício e teve origem nos laboratórios da empresa “Bell Laboratories”, em 1954 realizada pelo químico Calvin Fuller, auxiliado pelo físico Gerald Pearson e pelo engenheiro Daryl Chapin. Após Fuller ter desenvolvido o processo de dopagem de um material, de forma a controlar as suas propriedades elétricas, Pearson produziu um material constituído por uma junção p-n, com o objetivo de criar um campo elétrico nesta. Enquanto caracterizava eletricamente o material,

Pearson descobriu a presença de uma corrente elétrica quando este se encontrava exposto à luz solar. Surgiu assim a primeira célula fotovoltaica que apresentava rendimentos na ordem dos 4%, ao contrário do rendimento de 1% obtido na célula de selénio [2-6], em que se pode ver um extrato da patente da primeira célula solar registada na figura 11.

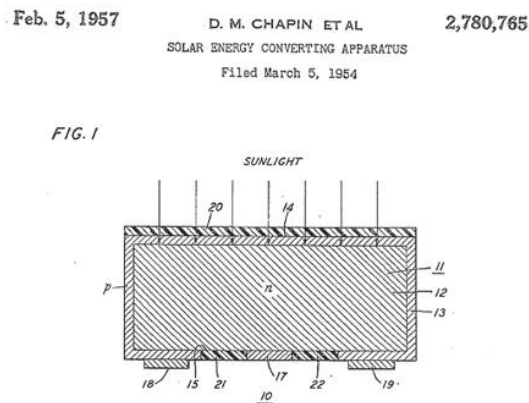


Figura 11 – Extrato da patente da primeira célula solar, registada em março de 1954, (extraído da referência [3]).

Ao alterar o componente do substrato n de Gálio para Arsénio, e uma difusão de Boro no substrato p, Fuller obteve uma célula com rendimento de 6%. [2-6]

Em 1955, nos Estados Unidos da América, no estado da Geórgia, surgiu a primeira aplicação de uma célula solar de silício, como fonte de alimentação de uma rede telefónica local [2-5], figura 12.



Figura 12 – A primeira aplicação de uma célula solar de silício foi como fonte de alimentação de uma rede telefónica local em Americus, na Geórgia, Estados Unidos da América, em 1955, (extraído da referência [3]).

A aplicação prática dos painéis solares não foi bem-sucedida, devido aos custos de produção elevados e à sua baixa rentabilidade. Os elevados custos de produção deviam-se ao facto de o processo de fabrico monocristalino levar a imensos desperdícios durante o processo de corte em bolachas finas (wafers) e aos custos de produção por si só. Apenas a indústria aeroespacial continuou a investir na sua utilização como fonte de energia para alimentar satélites, embora com alguma relutância [2-7].

A NASA incorporou células solares como *back-up* de uma pilha convencional, no *Vanguard I*, lançado em março de 1958, figura 13, tendo sido este o primeiro uso prático de painéis solares no espaço. Este satélite manteve-se operacional durante oito anos, apesar da sua pilha química ter falhado. No entanto, foi o painel com cerca de 100 cm², que produzia quase 0,1 W, que manteve o transmissor de 5 mW em funcionamento, para além das expectativas. Também a União Soviética decidiu na altura investir neste campo, tendo lançado dois meses depois o *Sputnik-3*, que também incorporava células solares. A partir desta altura, depois da demonstração de fiabilidade, durabilidade e do baixo peso, muitos outros decidiram investir, ao ponto de, atualmente, todos os veículos espaciais serem equipados com células fotovoltaicas [2-5].



Figura 13 – Imagem do Vanguard I, o primeiro satélite com células solares, lançado em Março de 1958 levando a bordo um pequeno painel solar com 100 cm² visível na janela em cima à esquerda, (extraído da referência [3]).

A partir de 1960, começou a substituição do contacto formal único por uma rede de contactos mais finos e espalhados, com recurso à serigrafia e à técnica de deposição por evaporação de materiais em vácuo. Desta forma, os custos de produção foram reduzidos, assim como a resistência série, e a eficiência foi aumentada [2-8].

A década de 1970 foi um período de crescimento significativo para a indústria fotovoltaica, impulsionado pela crise do petróleo. Os painéis solares começaram a ser utilizados numa variedade de aplicações, incluindo sistemas de energia solar residencial e comercial, sistemas de energia solar para satélites e estações espaciais, e sistemas de energia solar para veículos espaciais.

Em 1973, os países do Médio Oriente pertencentes à *OPEP*, que estavam em guerra com Israel, subiram o preço do petróleo quatro vezes, originando uma nova crise petrolífera. Levando a que as indústrias questionassem a dependência do petróleo, dando importância às energias renováveis e logo à pesquisa e desenvolvimento dos painéis fotovoltaicos. Os novos desenvolvimentos passaram pela utilização de Silício Policristalino ou amorfo, e pela utilização de novos métodos de produção de Silício com menos desperdícios, já que este passou a ser produzido diretamente em filme fino [2-8].

Uma das primeiras empresas a disponibilizar painéis fotovoltaicos para o público em geral, foi a atual BP Solar, fundada em 1973 por Joseph Lindmeyer e Peter Varadi, na altura denominada de *SOLAREX* [2-9].

Atualmente, existem várias células fotovoltaicas presentes no mercado, cuja designação provém do seu principal material constituinte, figura 14.



Figura 14 – Célula fotovoltaica atual, (figura retirada de <https://canalsolar.com.br/o-que-sao-as-celulas-solares-fotovoltaicas-do-tipo-n/>).

Na Tabela 1, seguinte podem-se verificar as principais vantagens e desvantagens dos principais tipos de células [10-13].

Tabela 1 – Materiais constituintes das principais células fotovoltaicas

Material	Vantagens	Desvantagens
Silício cristalino [c-Si]	Elevado rendimento	Elevados custos de produção
Silício amorfo [a-Si]	Custos de produção reduzidos	Baixo rendimento Degradação rápida
Silício policristalino	Custos de produção inferiores ao do silício cristalino	Rendimento inferior ao do silício cristalino
Telureto de Cádmio [CdTe], e Sulfeto de Cádmio [CdS]	Elevado rendimento teórico; Baixo custo de fabrico	Ainda com baixo rendimento; Materiais poluentes
Arsenieto de Gálio [GaAs]	Rendimento elevado	Elevados custos de produção
CIGS - Cobre, Índio, Gálio, Selénio - [CuInGaSe ₂]	Elevada tolerância à radiação; Rendimento elevado	Recurso a materiais raros (Índio); Elevados custos de produção

Na década de 1980, o preço dos painéis solares começou a cair, tornando-os mais acessíveis para o consumidor. A indústria fotovoltaica continuou a crescer na década de 1990, também no início dos anos 2000, bem como a eficiência dos painéis solares continuou a melhorar.

Nos dias de hoje, a tecnologia mais utilizada nos painéis solares fotovoltaicos é o substrato rígido. No entanto os painéis de filme fino flexível [14-22], figura 15, apresentam-se como uma nova tendência, apesar de ser uma tecnologia em desenvolvimento, sendo os materiais mais utilizados o Silício amorfo, Telureto de Cádmio e CIGS [Cobre (Cu) – Índio (In) – Gálio (Ga) – Selênio (Se)] e cujas vantagens são:

- Elevada flexibilidade.
- Elevada resistência.
- Baixo peso.
- Baixo custo.
- Facilidade de integração em diversos tipos de superfícies.

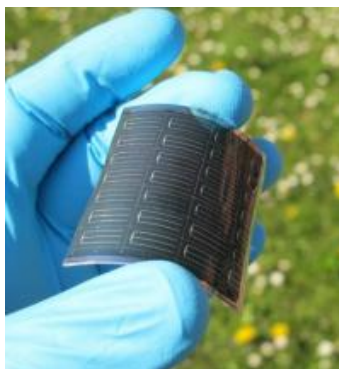


Figura 15 – Célula fotovoltaica de CIGS [Cobre (Cu)- Índio (In)- Gálio (Ga) – Selênio (Se)], (figura retirada de <https://energiasolare.blogs.sapo.pt/tag/c%C3%A9lulas+solares+flex%C3%ADveis>).

Nesta tecnologia, o material semiconductor pode ser impresso tanto num substrato metálico, como num polímero, tornando-os extremamente flexíveis. Quanto ao rendimento energético, para módulos CIGS em substratos de polímero, já foram registados valores relativamente elevados, aproximadamente 19%, muito próximo do valor apresentado pelos módulos de silício (25%), contudo ainda muito longe do rendimento teórico máximo (87%) [17-24].

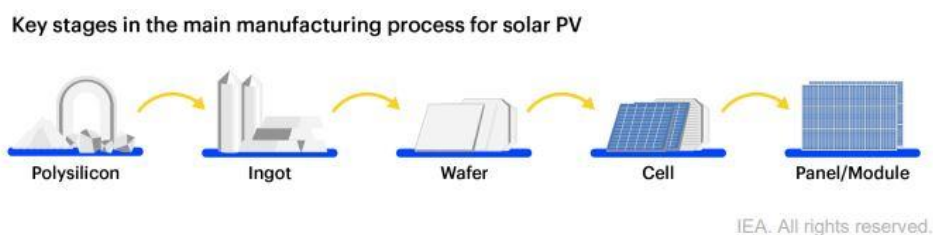


Figura 16 – Esquema dos passos de produção para um painel fotovoltaico, (fonte IEA, figura retirada de ref.^a [31]).

O estado da arte dos painéis fotovoltaicos é caracterizado por uma eficiência crescente e um custo de produção em queda, sendo o atual ano de 2023 muito caracterizado por tal. Pode-se definir a eficiência de uma célula fotovoltaica como sendo a relação entre a quantidade de luz solar que capta e a quantidade de luz solar que a mesma é capaz de converter em eletricidade.

Os painéis fotovoltaicos podem ser divididos em dois tipos principais, monocristalinos e policristalinos, tendo como principal diferença, entre os dois tipos de painéis, o processo de fabrico das células fotovoltaicas.

Os painéis fotovoltaicos monocristalinos são feitos de cristais de silício puro e são produzidos em laboratório. As células fotovoltaicas monocristalinas têm uma estrutura uniforme, o que lhes confere uma maior eficiência, quando comparados com as células fotovoltaicas policristalinas, no entanto são também mais caros. Porém são uma boa opção para quando seja necessário produzir uma grande quantidade de energia elétrica, tais como sistemas residenciais de médio a grande porte.

A eficiência dos painéis fotovoltaicos monocristalinos é geralmente de 15 a 20%. Significa que, por cada 100 watts de luz solar que incidem sobre o painel fotovoltaico, apenas 15 a 20 watts são convertidos em energia elétrica.

Os painéis fotovoltaicos policristalinos são feitos de pequenos cristais de silício, da espessura equivalente à de um cabelo humano, que são fundidos em conjunto. As células fotovoltaicas policristalinas têm uma estrutura menos uniforme do que as monocristalinas, o que lhes confere menor eficiência quando comparadas com as mesmas, visto que, devido à descontinuidade da sua estrutura molecular, há uma maior dificuldade de movimento de elétrons reduzindo assim a potência produzida. No entanto, são mais baratos do que os painéis de células monocristalinas sendo uma boa opção para necessidades de produção de menor quantidade de energia elétrica, tais como em sistemas residenciais de pequeno porte.

No caso dos painéis fotovoltaicos policristalinos, a eficiência é geralmente de 12 a 16%, o que significa que, por cada 100 watts de luz solar que incidem sobre o painel fotovoltaico, apenas 12 a 16 watts são convertidos em energia elétrica.

As células amorfas são compostas por um suporte de vidro ou de outra matéria sintética, na qual é depositada uma camada fina de silício, sendo que a organização dos átomos já não é regular como num cristal. Apesar do rendimento deste tipo de células ser mais baixo do que nas células cristalinas, a corrente produzida pode ser considerada razoável. A sua gama de aplicações são essencialmente os pequenos produtos de consumo, tais como relógios, calculadoras, mas, no entanto, podem também ser utilizadas em instalações solares.

Apresentam como vantagem o facto de reagirem melhor à luz difusa e à luz fluorescente e, portanto, apresentarem melhores desempenhos a temperaturas elevadas

Além da eficiência, os painéis fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos também apresentam outras diferenças, tais como:

- Resistência: os painéis fotovoltaicos monocristalinos são geralmente mais resistentes a danos mecânicos do que os policristalinos.
- Temperatura: os painéis fotovoltaicos monocristalinos são menos afetados pela temperatura do que os policristalinos.
- Aparência: os painéis fotovoltaicos monocristalinos têm uma cor uniforme, enquanto os policristalinos têm uma cor mais heterogénea.

A escolha entre painéis fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos deve ser feita tendo em conta o projeto específico, o espaço disponível para instalação e o orçamento do cliente.

Se o objetivo é produzir uma grande quantidade de energia elétrica, os painéis fotovoltaicos monocristalinos são uma melhor opção, apesar de serem mais caros.

Caso o objetivo seja produzir uma pequena quantidade de energia elétrica, então os painéis fotovoltaicos policristalinos serão uma boa opção, pois são mais baratos e podem ser instalados em espaços de menores dimensões.

Em 2023, as células fotovoltaicas de silício cristalino conseguiram uma eficiência média de cerca de até 22%, enquanto as células de filmes finos conseguiram uma eficiência de até 25%. Sendo a sua eficiência determinada por uma série de fatores, incluindo o material semiconductor utilizado, a geometria da célula e o processo de fabrico. Os principais esforços de investigação e pesquisa no campo da energia fotovoltaica estão essencialmente centrados no desenvolvimento de novas tecnologias de células fotovoltaicas que possam aumentar a eficiência dos respetivos painéis.

O custo de produção de painéis fotovoltaicos também tem vindo a cair significativamente nos últimos anos, tornando-os numa opção mais acessível para os consumidores e empresas. Em 2022, o custo de produção de um painel fotovoltaico de silício cristalino de 1 kW caiu para cerca de US\$ 0,20 por watt, o que representa uma queda de mais de 80% em relação a 2010. A queda no custo de produção é o resultado de uma série de fatores, incluindo a produção em larga escala, a melhoria nos processos de fabrico, a tecnologia de materiais e a redução dos custos dos materiais. A redução do custo de produção está, por tal,

a tornar os painéis fotovoltaicos numa opção mais acessível para as empresas e para os particulares.

Com o aumento da eficiência e a redução dos custos de produção, o mercado mundial de energia fotovoltaica tem aumentado. Nos últimos 20 anos, a demanda por energia solar cresceu consistentemente com taxas de crescimento de 20–25% ao ano, atingindo 427 MW em 2002. Cinquenta anos de pesquisa e inovação reduziram drasticamente o preço dos painéis fotovoltaicos de silício ao nível possível usando a tecnologia existente. No entanto, apesar de muito esforço para reduzir ainda mais o preço dos painéis fotovoltaicos de silício, esta tecnologia está confinada a nichos. Assim, a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos de semicondutores ainda representa menos de 0,1% da produção total de energia mundial.

Os semicondutores orgânicos são uma alternativa menos dispendiosa aos semicondutores inorgânicos como o silício. Além disso, moléculas orgânicas podem ser processadas por técnicas não disponíveis para semicondutores inorgânicos cristalinos.

As propriedades materiais superiores que os polímeros (plásticos) detêm, combinadas com um grande número de técnicas de processamento baratas tornou os materiais à base de polímeros presente em quase todos os aspetos da nossa sociedade moderna [25].

Como tal, os painéis fotovoltaicos não fugiram à regra e surgem assim os Painéis Orgânicos Fotovoltaicos (OPV), figuras 17 e 18, que são polímeros impressos sobre substâncias flexíveis – plástico ou papel – formados por moléculas orgânicas com capacidade fotovoltaica.

Considerado um tipo de painel solar de terceira geração, trata-se de um filme superfino, com cerca de 1 mm de espessura, que pesa cerca de 0,5 kg/m², possui um raio de curvatura de até 10 cm e a sua superfície tem um nível de transparência que chega aos 50%.

As vantagens dos OPV são inúmeras, tais como maior absorção da luz, elevada resistência ao impacto, potencial de baixo custo, reciclável, transparente, leve, flexível, baixa dependência do grau de inclinação, além de ter uma utilização reduzida de carbono quando comparados com os painéis fotovoltaicos tradicionais.

Os benefícios dos OPV não ficam por aí, visto que o filme OPV depende menos do ângulo de incidência da luz solar, ou seja, tem uma baixa dependência do grau de inclinação quando instalado e por isso consegue ser aproveitado por mais tempo.

A sua capacidade de absorver os raios ultravioleta e infravermelhos contribui para diminuir a carga de calor do ambiente. Este conjunto de características faz com que a tecnologia seja adequada para geração de energia mesmo em ambientes internos, pelo fato de ser capaz de converter luz em energia, mesmo com baixa luminosidade.

Por tal, hoje em dia são considerados como a tecnologia solar mais sustentável de entre as opções disponíveis no mercado atual.



Figura 17 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV), (figura retirada de <https://www.portalsolar.com.br/noticias/materias/sunew-fara-a-maior-instalacao-de-filmes-fotovoltaicos-organicos-do-mundo>).



Figura 18 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV), transparência, (figura retirada de <https://casa.abril.com.br/bem-estar/arvores-solares-o-design-e-a-sustentabilidade-promovem-energia-solar>).

Os principais desafios, que ainda necessitam ser ultrapassados, para o avanço dos painéis fotovoltaicos incluem:

- Aumentar a eficiência das células fotovoltaicas: A eficiência das células fotovoltaicas ainda está longe do limite teórico, o que significa que há espaço para melhorias.
- Reduzir o custo de produção dos painéis fotovoltaicos: O custo de produção dos painéis fotovoltaicos ainda é relativamente alto, o que pode limitar sua adoção em algumas aplicações.
- Melhorar a durabilidade dos painéis fotovoltaicos: Os painéis fotovoltaicos são projetados para durar muitos anos, no entanto ainda há possibilidade de melhorias para aumentar a sua durabilidade.

Apesar destes desafios, os painéis fotovoltaicos são uma tecnologia promissora de futuro com o potencial de fornecer uma fonte de energia limpa e renovável.

As principais tendências no desenvolvimento de painéis fotovoltaicos incluem:

- O desenvolvimento de novas tecnologias de células fotovoltaicas: Os investigadores estão continuamente a trabalhar no desenvolvimento de novas tecnologias de células fotovoltaicas, como células de perovskita e células orgânicas. Estas tecnologias têm o potencial de aumentar a eficiência e reduzir o custo dos painéis fotovoltaicos.
- O desenvolvimento de painéis fotovoltaicos flexíveis e transparentes: Os painéis fotovoltaicos flexíveis e transparentes podem ser usados numa variedade de aplicações, como edifícios, veículos e dispositivos eletrónicos.
- O desenvolvimento de painéis fotovoltaicos integrados em edifícios: Os painéis fotovoltaicos integrados em edifícios são uma solução que combina a geração de energia solar com o design do edifício.

Estas tendências estão a impulsionar o desenvolvimento de painéis fotovoltaicos mais eficientes, acessíveis e versáteis, de modo que tanto empresas como particulares possam ter acesso a esta fonte de energia renovável, a um mais baixo custo e sem a necessidade de haver uma área designada especialmente para a montagem dos respetivos painéis.

As aplicações dos painéis fotovoltaicos abrangem uma larga variedade, incluindo:

- Produção de energia fotovoltaica em larga escala: Utilizados para produzir eletricidade em grandes parques solares de painéis fotovoltaicos que estão ligados diretamente à rede elétrica e que podem produzir várias centenas de megawatts. Ou produção de energia elétrica através dos raios solares direcionados a concentradores solares com recurso a espelhos, utilizando assim a energia solar como uma fonte de calor e funcionando como uma central térmica, mas sem a necessidade dos combustíveis fósseis.
- Produção de energia fotovoltaica residencial: Utilizados para produzir eletricidade em residências para autoconsumo, estão montados essencialmente em coberturas e edifícios, podendo estar também ligados à rede pública.
- Produção de energia fotovoltaica rural: Este tipo de aplicação é utilizado em zonas rurais, ou no interior de países que possam ter linhas de eletricidade muito distantes da população ou da zona de necessidade.
- Iluminação direta de ruas e estradas.

- Sistemas independentes para alimentar pequenos dispositivos, tais como por exemplo smartphones, calculadoras, powerbanks, carregadores solares móveis, etc.
- No transporte: Alguns veículos que utilizam a força motriz elétrica para se moverem, têm sistemas solares fotovoltaicos integrados nos seus tejadilhos para carregamento das suas baterias e assim poderem fornecer energia elétrica aos seus motores elétricos. Ou em postos de carregamento independentes da rede elétrica para veículos de locomoção elétrica.
- Torres de comunicação e sinalização que utilizam dispositivos elétricos e eletrônicos, que não tenham grande consumo de energia elétrica e em que a sua conexão à rede elétrica seja difícil
- Sistemas de bombagem de água.
- Utilização em naves espaciais e em estações espaciais, pois a energia disponível no espaço é escassa sendo a energia solar a única fonte de energia utilizável.

O trabalho levado a cabo pela investigação, pesquisa e desenvolvimento, no campo da energia solar fotovoltaica, está a contribuir para que se consigam superar todos os desafios por forma a tornar os painéis fotovoltaicos numa fonte de energia cada vez mais eficiente, limpa, acessível e sustentável. Por tal, temos vindo a verificar um aumento percentual significativo no campo da utilização da energia fotovoltaica como uma das fontes de energia principais na produção de energia elétrica.

Ao mesmo tempo, a investigação e desenvolvimento no campo dos painéis fotovoltaicos, por forma a se conseguir melhorar o seu rendimento e eficiência, leva a que se estejam a descobrir e a desenvolver novas tecnologias neste campo, tais como concentradores solares fotovoltaicos do tipo lupa, concentradores solares fotovoltaicos em forma de pirâmide invertida, e ainda células fotovoltaicas multicamadas, tecnologias as quais se descrevem de seguida.

Os concentradores solares tipo lupa [26], que pode ser visto na figura 19, podem ser utilizados para melhorar a eficiência das células fotovoltaicas, pois ao concentrar a luz solar numa área menor, os coletores podem aumentar a quantidade de energia solar que é convertida em eletricidade.



Figura 19 – Dispositivo concentrador solar em forma de lupa, (figura retirada de https://www.researchgate.net/figure/Figure-2-A-CPV-solar-cell-module-Fresnel-lens-array-is-used-to-focus-sunlight-onto_fig39_325618123).

Os concentradores solares em forma de pirâmide invertida [27], os quais estão ilustrados na figura 20, tal como os concentradores do tipo lupa, utilizam a concentração da luz solar para aumentar a eficiência das células fotovoltaicas. São dispositivos simples, compostos por uma camada de vidro em forma de pirâmide invertida com a ponta cortada, feitas de material com um índice de refração graduado, exatamente por cima das células fotovoltaicas e que substituem a cobertura de vidro comum dos painéis solares, que faz com que a luz solar, que entra na parte superior a partir de qualquer ângulo, seja direcionada para baixo e concentrada em um ponto focal na base da pirâmide, mesmo junto das células fotovoltaicas instaladas na base das pirâmides, de modo a aproveitar a luz solar concentrada.

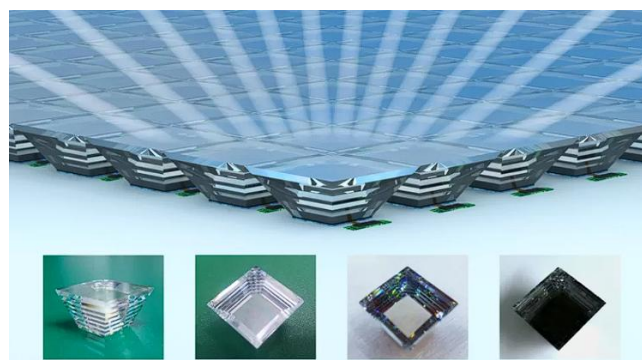


Figura 20 – Dispositivo Solar AGILE – Axially Graded Index Lens, (figura retirada de PortalEnergia, ref.^a [27]).

Ao se optar por esta opção como revestimento superior do painel solar, será desnecessário o atual revestimento, eliminando-se a necessidade da orientação solar, criando assim espaço para arrefecimento do painel solar, ligação de circuitos entre as pirâmides dos concentradores individualizados e mais importante ainda, reduzir a quantidade de células solares necessárias para a produção de energia elétrica.

Ambos os concentradores solares, tipo lupa ou em forma de pirâmide invertida, têm como variedades de utilização, as seguintes:

- Geração de energia solar: os concentradores solares em pirâmide podem ser utilizados para gerar eletricidade para residências, empresas e indústrias.
- Veículos elétricos: os concentradores solares em pirâmide podem ser utilizados para alimentar veículos elétricos, aumentando a sua autonomia.
- Satélites: os concentradores solares em pirâmide podem ser utilizados para alimentar satélites, aumentando a sua vida útil.

Não obstante, ambos os concentradores solares, tipo lupa ou em forma de pirâmide invertida, estão ainda em desenvolvimento, sendo que, ambos têm o potencial de revolucionar a geração de energia solar, visto terem a possibilidade de vir a tornar a energia solar mais eficiente, acessível e confiável.

Os concentradores solares apresentam uma série de vantagens, tais como:

- Aumento da eficiência: os concentradores solares em pirâmide podem aumentar a eficiência das células fotovoltaicas em até 50%.
- Redução do custo: os concentradores solares em pirâmide podem reduzir o custo dos sistemas fotovoltaicos, pois permitem a utilização de células fotovoltaicas menores e mais baratas.
- Melhoria da confiabilidade: os concentradores solares em pirâmide podem melhorar a confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos, pois protegem as células fotovoltaicas contra danos causados por condições climáticas adversas.

No entanto, têm como desvantagens o seguinte:

- Maior custo inicial
- Maior complexidade de instalação

As células fotovoltaicas multicamadas [28,29], ilustrada na figura 21, são um tipo de célula fotovoltaica que consiste em duas ou mais camadas de materiais semicondutores. Cada camada tem uma função específica, que contribui para a eficiência da célula.

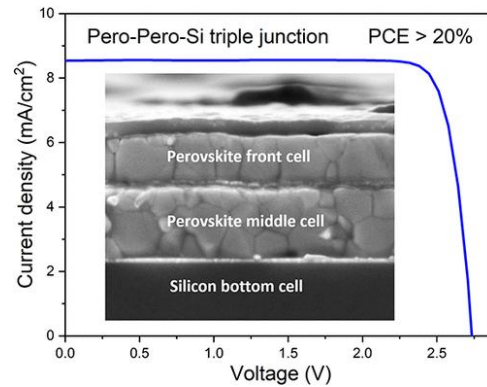


Figura 21 – Célula multicamada – Tri Junction Cell (Perovskite-Perovskite-Silício), (figura retirada de <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsenergylett.2c01556>).

As células fotovoltaicas multicamadas são mais eficientes do que as células fotovoltaicas de camada única, pois permitem que a luz seja absorvida por mais de uma camada de material semiconductor. Esta situação torna-se possível porque cada camada absorve uma faixa diferente do espectro solar, sendo que a sua eficiência já vai nuns atuais 43,5%, tendo alguns cientistas de investigação e desenvolvimento chegado aos 51,8%, ultrapassando a meta a atingir de 50% de eficiência.

Estas células fotovoltaicas multicamadas são geralmente feitas de materiais semicondutores, tal como as células fotovoltaicas de camada única, tendo como materiais o Silício, Germânio, Arsenieto de Gálio, Índio, Fósforo e Telureto de Cádmio, em que se pode constatar através da figura 22. A camada superior é geralmente feita de um material com uma banda de energia menor, que absorve a luz visível. As camadas inferiores são geralmente feitas de materiais com uma banda de energia maior, que absorve a luz infravermelha.

As células fotovoltaicas multicamadas são utilizadas numa variedade de aplicações, incluindo sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais, sistemas de energia solar de grande escala e dispositivos eletrónicos portáteis.

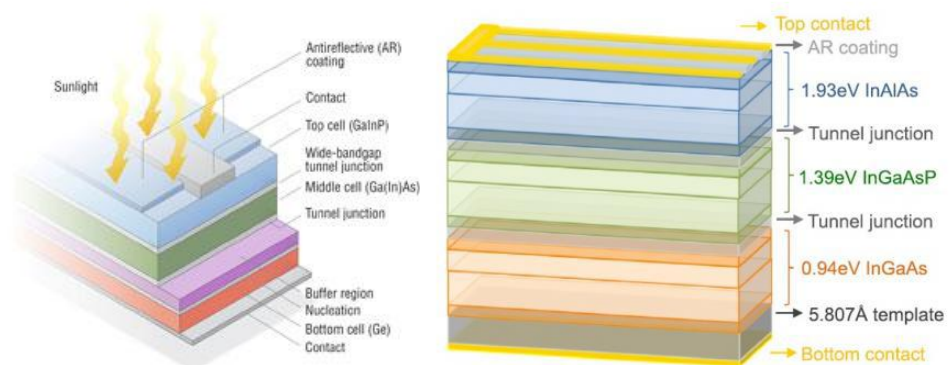


Figura 22 – Célula multicamada – Tri Junction Cell, sua constituição e produção de energia elétrica, (figuras retiradas das referências [28] e [29]).

As células fotovoltaicas multicamadas apresentam uma série de vantagens em relação às células fotovoltaicas de camada única, incluindo:

- Maior eficiência: as células fotovoltaicas multicamadas podem absorver mais luz, o que resulta em uma eficiência maior.
- Melhor desempenho em condições de baixa luminosidade: as células fotovoltaicas multicamadas são mais eficientes em condições de baixa luminosidade do que as células fotovoltaicas de camada única.
- Maior estabilidade: as células fotovoltaicas multicamadas são mais estáveis em condições adversas, como altas temperaturas e radiação UV.

No entanto, e como nem tudo são vantagens, as desvantagens das células multicamadas em relação às células fotovoltaicas de camada única, são as seguintes:

- Maior custo: as células fotovoltaicas multicamadas são mais caras de produzir do que as células fotovoltaicas de camada única.
- Maior complexidade: as células fotovoltaicas multicamadas são mais complexas de fabricar do que as células fotovoltaicas de camada única.

Relativamente a perspectivas futuras, as células fotovoltaicas multicamadas são uma tecnologia promissora que tem o potencial de melhorar a eficiência e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. As pesquisas nesta área estão focadas no desenvolvimento de novos materiais semicondutores e na redução do custo de produção, por tal, no futuro, as células fotovoltaicas multicamadas podem se tornar a tecnologia dominante no mercado fotovoltaico.

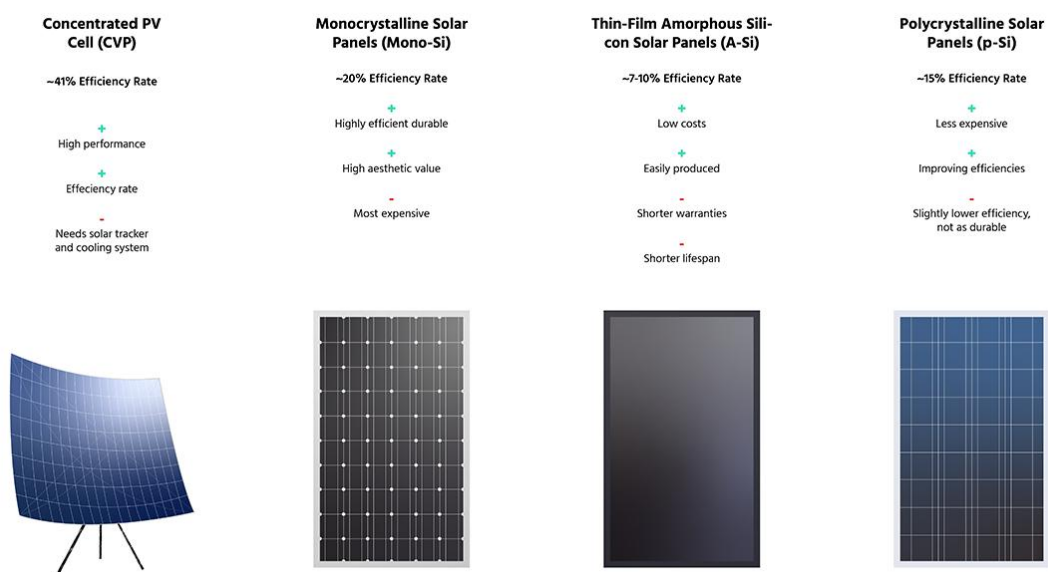


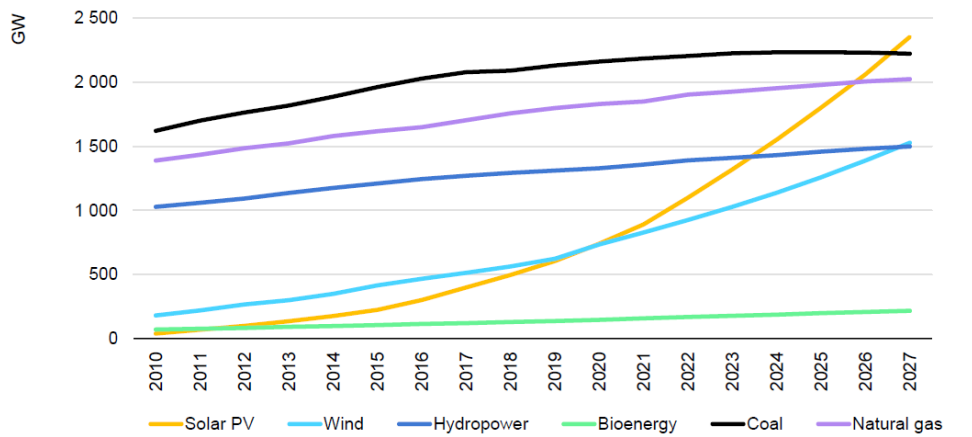
Figura 23 - Diversos tipos de painéis fotovoltaicos com diferentes tipos de constituição e construção, (figura retirada de <https://codibly.com/news-insights/solar-cell-technology/>).

Segundo a IEA (Agência Internacional de Energia) [30-35], e de acordo com o seu relatório *Renewables 2022*, os avanços no estado da arte dos painéis fotovoltaicos estão a impulsionar o crescimento da geração de energia solar, de tal forma que, em 2022 a capacidade de produção de energia solar aumentou 270 TWh, um crescimento de 26% face ao ano anterior de 2021, tendo sido responsável por 4,5% da produção de eletricidade global, mantendo o seu terceiro lugar na produção de energia, logo atrás da produção hídrica e eólica, e situou a capacidade de produção de energia solar fotovoltaica global nos, praticamente, 1 300 TWh (terawatt.hora), ultrapassando pela primeira vez a energia eólica em termos de crescimento. e em que se espera que seja atingida uma produção de 8 300 TWh (terawatt.hora) em 2030, mantendo a mesma taxa de crescimento de 26%.

Esta taxa de crescimento de 26% de geração de energia fotovoltaica corresponde ao nível previsto de 2023 a 2030 no *Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)*. Espera-se que o crescimento contínuo da atratividade económica da energia fotovoltaica, o desenvolvimento maciço da cadeia de abastecimento e o aumento do apoio político, especialmente na China, nos Estados Unidos, na União Europeia e na Índia, acelerem ainda mais o crescimento da capacidade nos próximos anos. O status de rastreamento da energia solar fotovoltaica foi, portanto, atualizado em 2023 de “é necessário mais esforço para o caminho certo”.

A manutenção de uma taxa de crescimento da produção alinhada com o *Net Zero Emissions by 2050 Scenario* exigirá o alcance de adições anuais de capacidade quase três vezes superiores às de 2022 até 2030. Alcançar isto exigirá ambição política contínua e esforço por parte das partes interessadas públicas e privadas, especialmente nas áreas de integração da rede e na abordagem dos desafios políticos, regulamentares e financeiros.

O que é o *Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)*, é um cenário normativo que mostra um caminho a seguir para o setor energético global poder atingir zero emissões de CO₂ até 2050, com as economias avançadas atingindo emissões zero antes das outras. Este cenário também cumpre os principais Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS ou SDGs) relacionados com a energia, em particular o acesso universal à energia até 2030 e grandes melhorias na qualidade do ar. É consistente com a limitação do aumento da temperatura global em 1,5 °C (com pelo menos 50% de probabilidade), em linha com as reduções de emissões avaliadas no *Sexto Relatório de Avaliação* do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC).

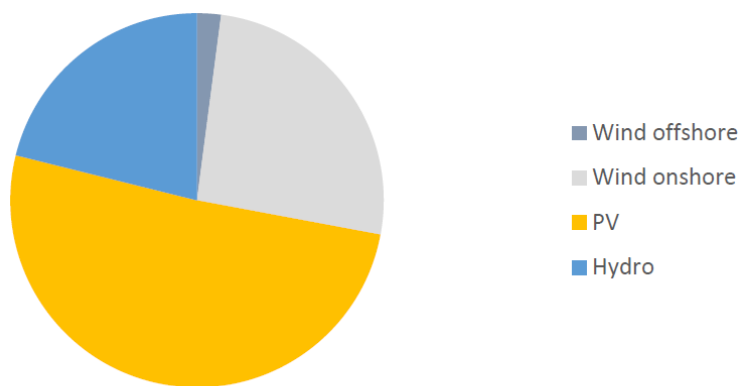


IEA. CC BY 4.0.

Source: IEA analysis based on [World Energy Outlook 2022](#). (2022), Fossil fuel capacity.

Gráfico 1 – Gráfico comparativo de capacidade de energia cumulativa por geração de energia entre 2010 e 2027, fonte IEA Renewables 2022, (gráfico retirado de ref.^a [30]).

Como se pode observar pelo gráfico 1 acima, a energia solar fotovoltaica prevê ser a maior capacidade de energia instalada em todo o mundo até 2027, ultrapassando o carvão, o gás natural e energia hidroelétrica. A capacidade fotovoltaica acumulada, tem como previsão o quase triplicar para mais de 2 350 GW até 2027, sendo que no caso principal, ultrapassará a energia hidroelétrica em 2024, o gás natural em 2026 e o carvão em 2027 para se tornar a maior capacidade elétrica instalada em todo o mundo. A energia hidroelétrica, está a cair para o terceiro lugar em termos de capacidade renovável instalada devido à rápida expansão da energia eólica, como se pode constatar através dos gráficos 2 e 3 abaixo, bem como através da tabela 2 também abaixo.



Sources: IEA PVPS, BNEF, GWEC and estimations for 2022

Gráfico 2 – Produção de eletricidade através de energias renováveis instaladas em 2022, fontes IEA PVPS, BNEF, GWEC, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref.^a [35]).



Sources: compilation of IEA PVPS, BNEF, GWEC, IRENA and estimations for 2022

Gráfico 3 – Evolução anual de instalações de energias renováveis, fontes IEA PVPS, BNEF, GWEC, IRENA, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref.ª [35]).

Tabela 2 – Top 10 dos países de potência instalada em 2022, e de potência total instalada, fonte IEA PVPS, (tabela retirada de IEA – Agência Internacional de Energia; ref.ª [35]).

FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY				FOR CUMULATIVE CAPACITY			
1		China	106 GW	1		China	414,5 GW
(2)		European Union	38,7 GW	(2)		European Union	209,3 GW
2		USA	18,6 GW	2		USA	141,6 GW
3		India	18,1 GW	3		Japan	84,9 GW
4		Brazil	9,9 GW	4		India	79,1 GW
5		Spain	8,1 GW	5		Germany	67,2 GW
6		Germany	7,5 GW	6		Australia	30 GW
7		Japan	6,5 GW	7		Spain	26,6 GW
8		Poland	4,9 GW	8		Italy	25 GW
9		Australia	3,9 GW	9		Korea	24,8 GW
10		Netherlands	3,9 GW	10		Brazil	23,6 GW

Note: The European Union grouped 27 European countries in 2022, out of which Germany, Spain, France, the Netherlands and Italy also appear in the Top Ten, either for the installed capacity or the annual installations. The European Commission is a member of IEA-PVPS through its Joint Research Centre (EU-JRC).

Source: IEA PVPS

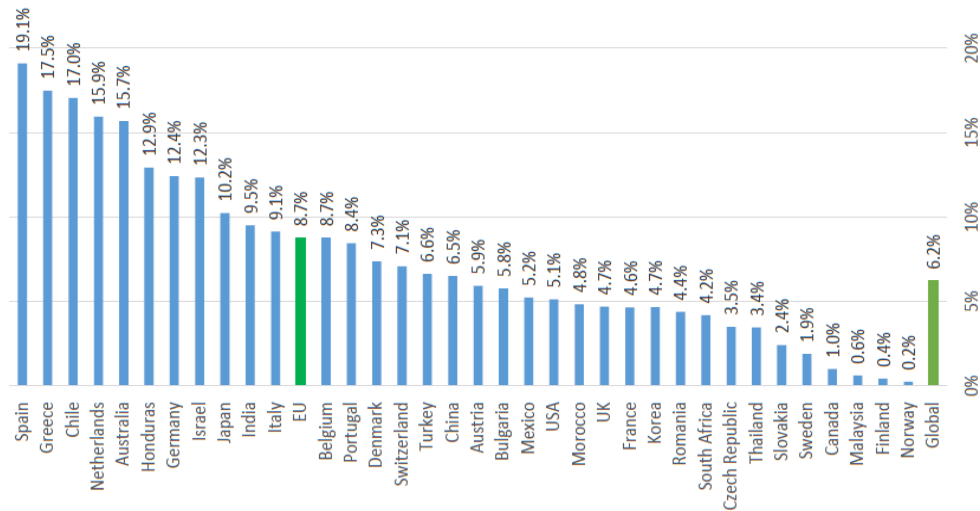
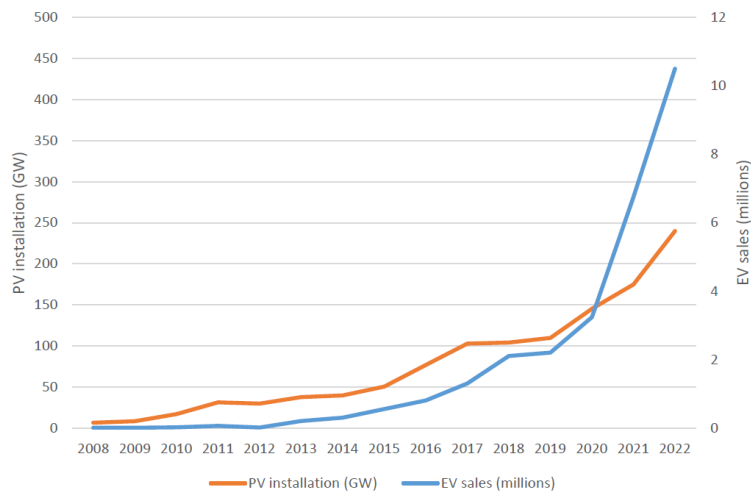


Gráfico 4 – Taxa de penetração no mercado fotovoltaico (2022), fonte IEA PVPS, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref.ª [35]).

No gráfico 4 acima, pode ser observado a taxa de penetração da energia fotovoltaica no mercado internacional de 6,2% Global, com dados da taxa de penetração pelos vários países com maior taxa de penetração, estando em primeiro lugar a Espanha com uma taxa de 191% e em último a Noruega com uns apenas 0,2%, possivelmente devido à Espanha ter uma área disponível de sol bastante maior do que a Noruega, bem como a radiação solar em Espanha ser mais elevada que na Noruega.



Source : IEA PVPS & EV Volumes

Gráfico 5 – Evolução das vendas de veículos elétricos e crescimento dos fotovoltaicos, fonte IEA PVPS, (gráfico retirado de IEA – Agência Internacional de Energia; ref.ª [35]).

Já no gráfico 5 acima, pode-se observar uma evolução muito idêntica, entre os painéis fotovoltaicos e as vendas de veículos elétricos, até sensivelmente 2020, sendo que a partir desse momento, as vendas dos veículos elétricos tiveram uma evolução abrupta, algo que se

pode constatar no nosso dia a dia, ao se verificar que o número de veículos elétricos a circular nas estradas, está a aumentar rapidamente.

Segundo a IRENA (Agência Internacional de Energias Renováveis) [36-38], através do seu relatório “Renewable Capacity Highlights” de 20 de março de 2023, e ao se observar os gráficos 6 e 7 seguintes, pode-se observar que a produção de energia global por energias renováveis foram de 3 372 GW em 2022, com um crescimento de 295 GW (+9,6%) durante o mesmo período. E que embora a energia hidroelétrica tenha representado a maior quota da capacidade global de geração de energia renovável com 1 256 GW, as energias solar com 1053 GW e eólica com 899 GW continuaram a dominar a nova capacidade de geração. Juntas, ambas as tecnologias contribuíram com 90 % para a quota de toda a nova capacidade renovável em 2022. A capacidade solar liderou com 22 % de aumento (192 GW), seguida da energia eólica, que aumentou a sua capacidade de geração em 9 % (75 GW), e a hidroelétrica com 2% de aumento (21 GW).

A energia solar fotovoltaica foi responsável por quase todo o aumento da energia solar em 2022, com um aumento na energia solar fotovoltaica de 191 450 MW e um aumento de 125 MW na energia solar concentrada.

A expansão na Ásia foi de 112 GW em 2022 (em comparação com +75 GW em 2021). Os maiores crescimentos de capacidade ocorreram na China (+86,0 GW) e na Índia (+13,5 GW). O Japão também cresceu 4,6 GW, um pouco mais do que em 2021.

Fora da Ásia, os Estados Unidos adicionaram 17,6 GW de capacidade solar em 2022, o Brasil adicionou 9,9 GW e os Países Baixos e a Alemanha adicionaram 7,7 GW e 7,2 GW, respetivamente.

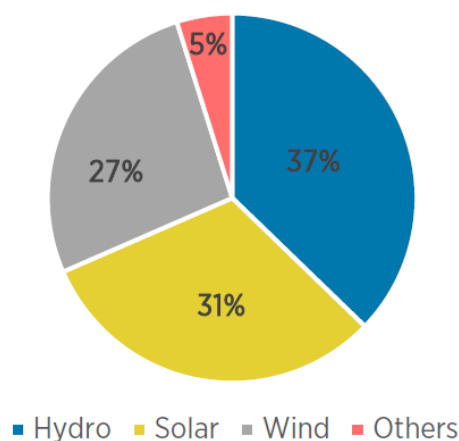


Gráfico 6 – Capacidade de produção de energias renováveis por fonte de energia em 2022, fonte IRENA Renewable Capacity Highlights, (ref.^a [36]).

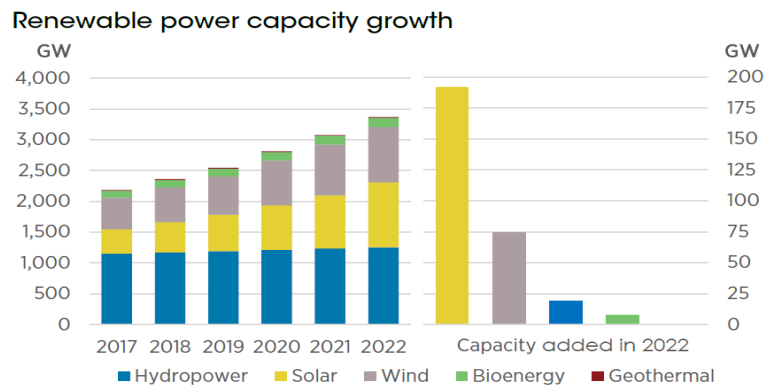


Gráfico 7 – Crescimento de potência de energias renováveis por fonte de energia em 2022, fonte IRENA Renewable Capacity Highlights, (ref.ª [36]).

3

DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO REALIZADO

O trabalho realizado, e descrito mais à frente, consiste num projeto de instalação de painéis fotovoltaicos, no edifício do *Mercado de Faro*, com uma potência de pico de instalação de 152,5 kWp para autoconsumo, e assim poder reduzir o valor a pagar de consumo ao atual fornecedor de energia elétrica, *E-REDES*.

O principal limite dos sistemas fotovoltaicos é a baixa eficiência de conversão dos painéis fotovoltaicos (*PV*), que é fortemente influenciada não só pela radiação solar disponível, mas também pela sua temperatura de funcionamento, e por falta de precisão na consideração da temperatura dos painéis fotovoltaicos aumenta o risco financeiro da instalação dos sistemas.

Assim, com o presente estudo, investiga-se os efeitos da temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos, por forma a se chegar a uma possível correlação entre a temperatura e a eficiência dos mesmos, para se poder determinar com maior exatidão a produção fotovoltaica mediante o sistema a instalar.

As tecnologias de energia solar estão cada vez mais difundidas por todo o mundo, pois tanto a captura, bem como o uso da energia solar têm muito pouco impacto no meio ambiente, fazendo com que este sistema tenha uma vantagem significativa, além do custo das células fotovoltaicas ter vindo a ser bastante reduzido devido ao seu rápido desenvolvimento.

Os recursos solares, que são equivalentes a infinitos, dão-nos a possibilidade de sustentar a economia mundial e fazer face às necessidades de eletricidade, com recurso a equipamento e investimento apropriados.

Sabe-se que um módulo fotovoltaico, é um sistema que converte fluxo de radiação solar em eletricidade. No entanto, como absorve a radiação solar, a temperatura operacional

do módulo fotovoltaico aumenta proporcionalmente, conforme mostrado em simulação e empiricamente ao longo do trabalho realizado. Pode-se constatar visivelmente que, temperaturas operacionais mais altas do módulo fotovoltaico causam uma redução na eficiência do módulo fotovoltaico.

A maioria dos estudos sobre módulos de painéis fotovoltaicos são realizados sob a perspectiva da eletricidade, onde as equações empíricas disponíveis determinam a relação da temperatura operacional do módulo fotovoltaico com a temperatura ambiente, velocidade do ar local e fluxo solar.

Aparentemente, o ângulo de inclinação, a direção do raio solar e as propriedades do ar em redor do módulo fotovoltaico também afetam a temperatura operacional do módulo fotovoltaico, no entanto, muitas das vezes, não são contabilizados nas equações existentes.

Embora a temperatura ambiente seja geralmente considerada uma temperatura constante, é sabido que a mesma pode variar muito ao longo do dia, dependendo da sua localização.

Várias equações têm sido criadas por forma a se considerar nas mesmas as temperaturas ambientes variáveis com base na aparente temperatura do céu limpo, temperatura do céu nublado, pressão de vapor de água, temperatura do ponto de orvalho, temperatura de bolbo seco e horas a partir da meia-noite.

No entanto, a velocidade do vento local também pode ser considerada em termos de arrefecimento por convecção forçada, dependendo da velocidade do ar.

Este capítulo é constituído por vários subcapítulos, nos quais descrevem os métodos de desenvolvimento do trabalho realizado, começando inicialmente pelo enquadramento legal relativamente às instalações de painéis fotovoltaicos para produção de energia em autoconsumo consoante a sua potência de instalação.

Para realização deste projeto, e por forma a se poder realizar um projeto de instalação com a máxima eficiência possível, foi utilizado nos ensaios laboratoriais o mesmo modelo de painel fotovoltaico, a instalar, para estudo da produção de energia elétrica do referido painel fotovoltaico consoante a inclinação e orientação solar, bem como a influência do sombreamento solar na produção de energia elétrica.

Para a realização do estudo foi criada uma estrutura, de suporte e acoplamento do painel fotovoltaico, de forma que permitisse alterar a inclinação do painel desde o plano horizontal (180°) até ao plano vertical (90°), bem como deslocar a própria estrutura por forma a alterar a sua orientação solar, e assim estudar a influência destes referidos fatores. Foi ainda instrumentada toda a instalação com sensores de temperatura, velocidade do vento,

analísadores de energia e ainda vários piranómetros capazes de medir a radiação solar total e difusa, no plano horizontal e inclinado.

Após todo o estudo, e com recurso ao software *AUTOCAD*, procedeu-se à projecção dos painéis fotovoltaicos na área disponível na cobertura do edifício com recurso a plantas do edifício, criação do esquema de montagem e ligações eléctricas dos painéis fotovoltaicos aos inversores, bem como as suas ligações à rede eléctrica contemplando os respectivos quadros eléctricos.

Os dados de localização do edifício do *Mercado de Faro*, estão descritos na tabela 3 seguinte.

Tabela 3 - Dados de localização do edifício "Mercado de Faro"

Dados de localização	
Local	Faro
Latitude	37,020
Longitude	-7,929
Altura [m]	22
Orientação [° a Oeste]	0
Ângulo de inclinação [°]	0

Para a criação do presente projeto, houve necessidade de se efetuarem diversos estudos, entre os quais o relativamente à necessidade energética do edifício em questão. No gráfico 8 seguinte, pode-se verificar o consumo de energia ativa para um dia típico, em que se pode constatar que o maior consumo de energia dá-se durante o dia laboral, das 8:30 até às 13:00, reduzindo depois desde as 13:00 até ao encerramento do espaço por volta das 22:00, sendo que o menor consumo de energia é durante a noite desde as 22:00 até às 6:00 do dia seguinte, começando a aumentar um pouco das 6:00 até às 8:00, voltando a repetir o ciclo de consumo. Para o projeto foi considerado o consumo detalhado, a cada 15 minutos, para todo o ano.

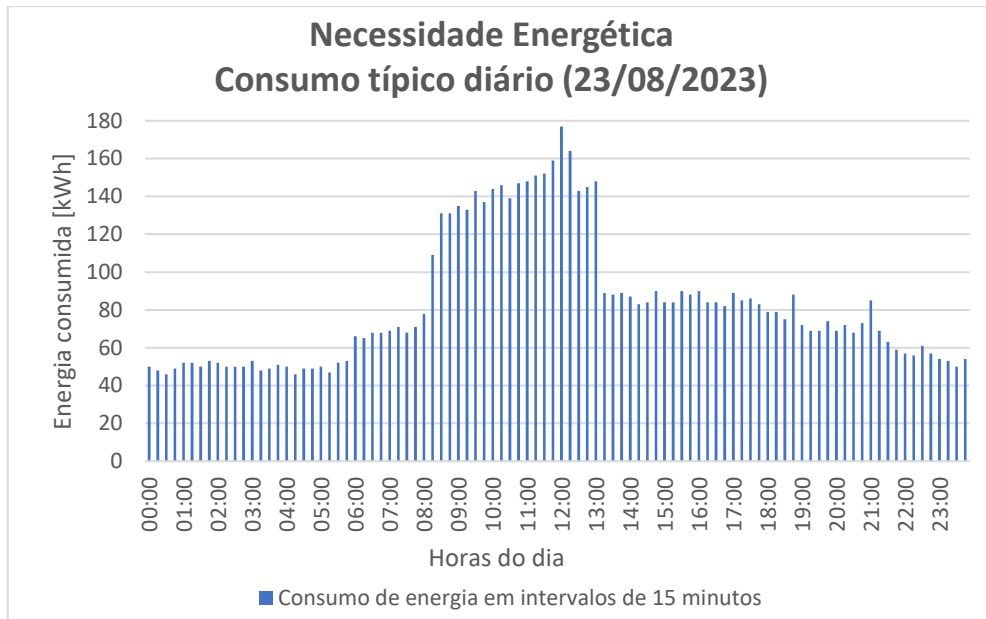


Gráfico 8 - Consumo típico diário, tendo como exemplo o dia 23 de agosto de 2023

No gráfico 9 seguinte, pode ser verificado a evolução mensal da necessidade energética do edifício, ao longo do ano de 2023.

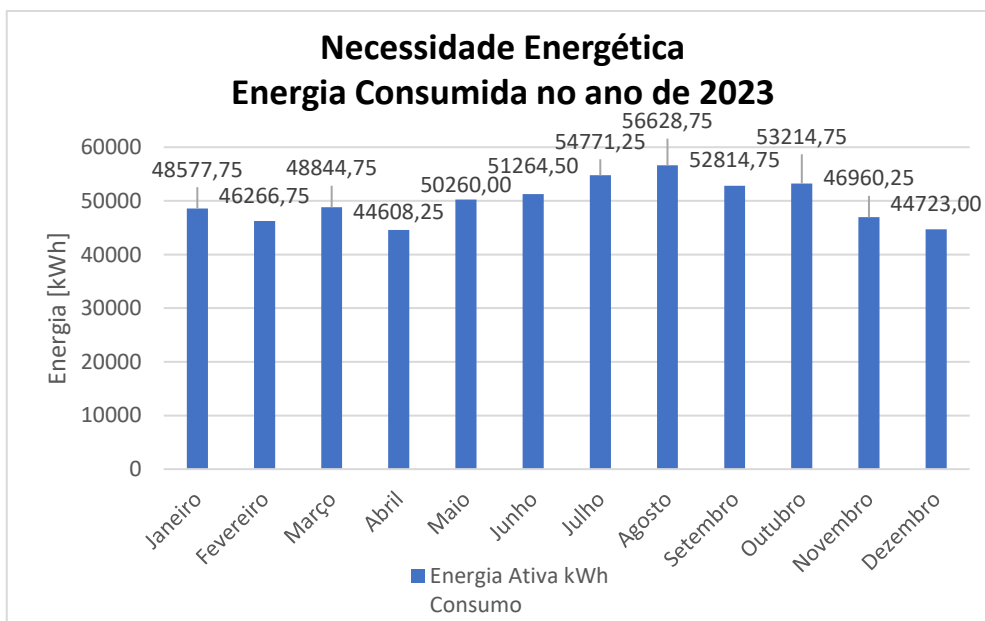


Gráfico 9 - Necessidade energética do edifício através da energia ativa consumida ao longo do ano de 2023.

O seguinte gráfico 10, demonstra a energia solar disponível, incidente na área disponível para a instalação dos painéis fotovoltaicos, ao longo do ano de 2024, com dados obtidos a partir do software online *PVGIS*. De uma forma geral, verifica-se o maior consumo nos meses de verão e durante o dia, o que se adequa à instalação de um sistema solar fotovoltaico.

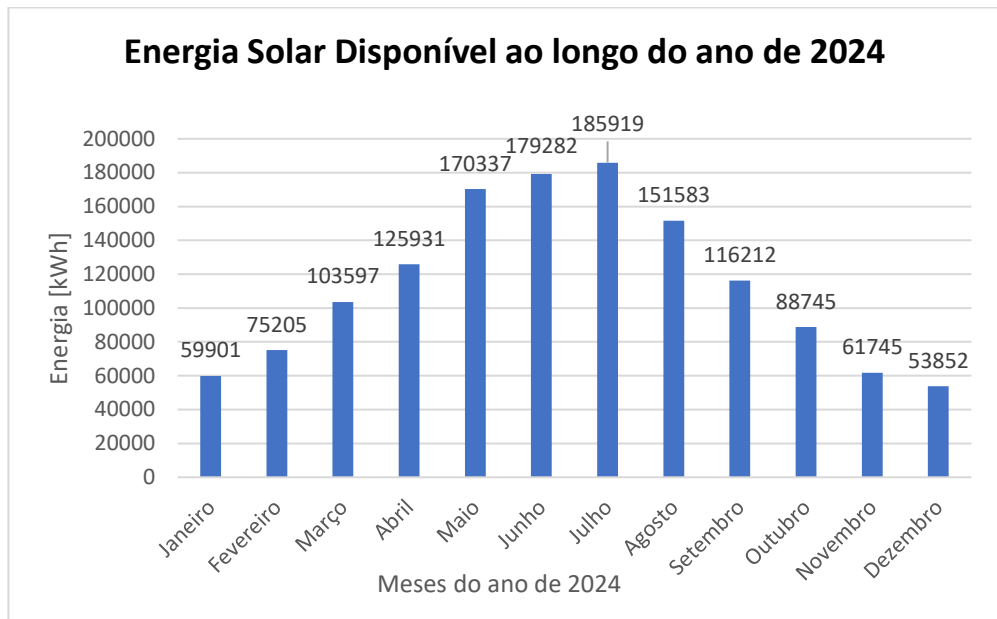


Gráfico 10 - Evolução da Energia Solar Disponível ao longo do ano de 2024

3.1. Enquadramento legal para instalação de sistemas de painéis fotovoltaicos para autoconsumo

Para se saber o enquadramento legal, foi consultado o site da *Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG)* [39], de onde foi transcrito o seguinte:

“A produção de eletricidade por intermédio de Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC) é regulada pelo **Decreto-lei n.º 15/2022**, de 14 de janeiro, que estabelece:

- o autoconsumo de energia renovável, estabelecendo a disciplina da atividade de produção associada às instalações de utilização do autoconsumidor de energia renovável;
- as comunidades de energia renovável (CER), procedendo, nesta parte, à transposição parcial para o direito interno da **Diretiva 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de dezembro de 2018**, relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis.

Nos termos do art.º 306.º do **Decreto-lei n.º 15/2022**, a regulamentação vigente e relativa aos decretos-leis revogados nos termos do artigo anterior, bem como as respetivas disposições sancionatórias, mantém-se em vigor, em tudo o que não contrarie o disposto no presente decreto-lei, até à respetiva atualização.

O **Despacho n.º 46/2019, de 30 de dezembro**, que define o procedimento para obtenção de um título de controlo prévio no âmbito da produção para autoconsumo: apresentação de mera comunicação prévia de exploração das unidades de produção para autoconsumo, pedido de registo e de certificado de exploração, nos termos dos n.ºs 2, 3, 4, 5 e 9 do artigo 27.º-B e do artigo 27.º-C do **Decreto-Lei n.º 172/2006, de 23 de agosto**, na redação dada pelo **Decreto-Lei n.º 76/2019, de 3 de junho**, e pedido de licença de produção e de exploração.

A **Portaria n.º 16/2020, de 23 de janeiro**, que estabelece o montante das taxas.

O **Despacho n.º 4/2020, de 3 de fevereiro**, que aprova o **Regulamento de Inspeção e Certificação e o Regulamento Técnico e de Qualidade**.

O **Despacho 15/2022**, que define as regras técnicas e procedimentos com vista ao correto dimensionamento e à realização de inspeções aplicáveis a instalações elétricas coletivas com unidades de produção para autoconsumo (UPAC) associadas.

O **Despacho n.º 1177/2024, de 31 de janeiro**, estabelece as condições para a isenção dos encargos correspondentes aos CIEG que incidem sobre as tarifas de acesso às

redes determinadas pela ERSE, a aplicar ao autoconsumo veiculado através da rede elétrica de serviço público (RESP).

O Regulamento n.º 8/2021, de 7 de abril, vem aprovar a regulamentação para implementação do regime do autoconsumo nas suas áreas de competência, ao abrigo do n.º 4 do artigo 13.º e dos n.ºs 14 e 15 do artigo 16.º do Decreto-Lei n.º 162/2019, de 25 de outubro, estabelece as disposições aplicáveis ao exercício da atividade de autoconsumo de energia renovável, quando exista ligação à Rede Elétrica de Serviço Público (RESP), bem como às comunidades de energia renovável que procedam à atividade de autoconsumo.

A Diretiva n.º 1/2021, de 8 de janeiro, da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) aprova as tarifas e preços para a energia elétrica e outros serviços, nomeadamente as tarifas de acesso às redes da mobilidade e as aplicáveis ao autoconsumo, a vigorar em 2021.”

No caso concreto deste projeto, a potência de pico a instalar será de 152,55 kWp, e que respeitante ao enquadramento legal podemos constatar o seguinte:

- segundo a alínea b) do n.º 3, do artigo 11º, da secção I, do capítulo II do Decreto-lei 15/2022, de 14 de janeiro, atualmente em vigência, diz que está sujeita a registo prévio e a certificação de exploração, a produção de eletricidade para autoconsumo com potência instalada superior a 30 kW e igual ou inferior a 1 MW;
- nos números de 1 a 10, do artigo 57º, da secção IX, podemos encontrar a regulamentação respeitante à certificação e ligação à rede elétrica de serviço público, nomeadamente quem está habilitado para efetuar a instalação, solicitação de inspeção à entidade inspetora competente, prazos a cumprir para se considerar aceite a submissão da conformidade da instalação, a obrigatoriedade de inspeções periódicas, sendo de 8 em 8 anos, a comunicação dos relatórios de inspeção à DGEG na plataforma correspondente, a revogação da certificação caso não sejam cumpridos os prazos de inspeções periódicas obrigatórias ou a não recorrer a entidades inspetoras competentes;

A Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (ANREEE) em conjunto com a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), disponibiliza um “Guia de Interpretação”, sendo um documento que pretende esclarecer em que determinadas circunstâncias, equipamentos podem ser considerados Equipamentos Fotovoltaicos, no âmbito do Decreto-Lei n.º 67/2014 de 7 de maio, na sequência da transposição da Diretiva 2012/19/CE.

3.2. Modelos matemáticos estudados

A produção de energia elétrica com recurso a módulos fotovoltaicos depende de vários fatores, nomeadamente da radiação solar disponível e da eficiência do painel fotovoltaico. As condições atmosféricas ambientais são consideradas dos principais fatores, que aliados à localização geográfica, determinam a radiação solar incidente numa superfície.

A radiação solar, tem o seu valor máximo de $1\,367\text{ W/m}^2$ [40] no exterior da atmosfera do nosso planeta Terra. No entanto, nem toda essa energia chega à superfície terrestre, sendo uma parte da mesma refletida, no momento da sua entrada na atmosfera, para o espaço e outra parte sendo absorvida ao longo do seu percurso a atravessar a atmosfera até chegar à superfície.

O percurso efetuado pela radiação solar na atmosfera, é ditado pela latitude do local, pela altura do ano, bem como pelo dia e a sua hora, sendo estes parâmetros que contribuem para o cálculo estimado da radiação solar em determinado local e momento [40]. Outros parâmetros de igual modo importantes, são a inclinação que a superfície do coletor realiza com a horizontal, bem como o azimute da mesma.

Por tal, foram utilizados modelos matemáticos para cálculo da radiação solar ao longo do ano, nomeadamente de *John A. Duffie* e *William A. Beckman* [40] e de *Rui Castro* [41], comparando com a radiação solar medida, e assim se poder verificar a possibilidade de utilização dos mesmos na elaboração de projetos de dimensionamento de instalações fotovoltaicas.

Além dos modelos anteriores, foram ainda estudados outros modelos matemáticos sobre a existência de correlação entre a temperatura de operação da célula, a temperatura ambiente e a radiação solar incidente, de *Leticia de Oliveira Santos et al* [42], e de *Reza Hassanian et al* [43].

Ainda se procedeu à análise da investigação do efeito da temperatura na performance de produção dos PV por *A.R. Amelia et al* [44].

Foram ainda utilizados os modelos matemáticos implementados no *Projeto ACCES4ALL*, baseados em *John A. Duffie* e *William A. Beckman* [40], do capítulo “*Dimensão sustentável da paragem de autocarro*”, de *J. Rodrigues et al* [45].

Para além do estudo empírico dos modelos matemáticos enunciados anteriormente, recorreu-se a dados medidos e registados pela estação meteorológica da Universidade do Algarve de marca *EPPLEY*, bem como a dados do site *PVGIS* internacional.

3.2.1. Modelo de radiação solar adaptado de *John A. Duffie e William A. Beckman*

Ao se consultar e estudar o artigo “*Dimensão Sustentável da Paragem de Autocarro*”, do *Projeto ACCES4ALL, Relatório Final Volume III, de J. Rodrigues et al* [45].

Verifica-se que o mesmo tem como base o enunciado e descrito por *John A. Duffie e William A. Beckman* [40] para os cálculos respeitantes à radiação solar, e por *Rui Castro* [41] para os cálculos da temperatura da célula e a sua produção fotovoltaica consoante a mesma.

Desde o estudo da radiação solar à entrada da atmosfera, passando pelas diferentes inclinações solares e do coletor, e ainda a orientação do coletor a Sul, variando entre Este e Oeste, ângulo horário, até ao cálculo das radiações solares, sejam as mesmas incidentes na horizontal ou no plano do coletor, difusa e refletida.

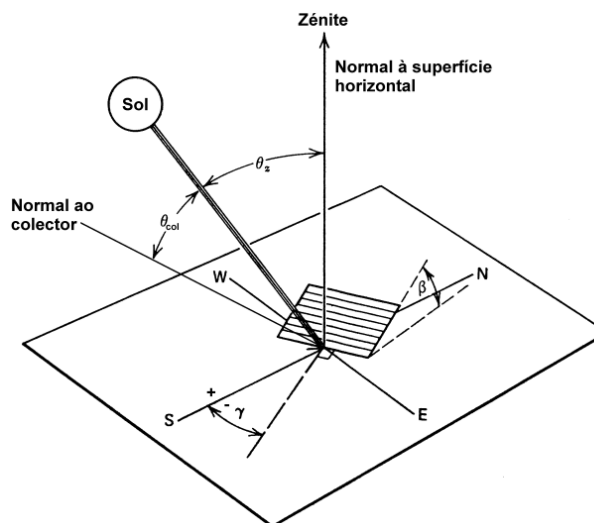


Figura 24 – Orientação do painel fotovoltaicos em relação à posição do Sol e à superfície da Terra. Fonte: *John Duffie e William Beckman* [40].

Com base na radiação média diária, a qual pode ser consultada em base de dados, tais como *EPPLEY* e *PVGIS*, pode-se estimar, considerando os parâmetros acima referidos, a radiação incidente na superfície do painel, constituída pela radiação direta, radiação difusa e pela radiação refletida no chão, sendo que nesta última parcela é fundamental estimar o valor do albedo no chão.

Para a radiação solar foi desenvolvido um modelo que apresenta a radiação solar a determinada hora de um dia juliano em uma superfície inclinada.

O ângulo de incidência da radiação numa superfície determina a intensidade da radiação. Este ângulo depende de vários parâmetros, nomeadamente, da orientação da superfície em relação à Terra e do instante considerado.

Os parâmetros que definem o ângulo de incidência θ_{col} , relativos à figura 24 anterior, são os seguintes:

- ϕ – Latitude do local.
- δ – Declinação solar, ângulo que a radiação direta ao meio-dia solar faz com o plano do equador.
- β – Inclinação que a superfície faz com o plano horizontal.
- γ – Azimute que a projeção da superfície no plano horizontal faz com o Sul. O azimute é positivo para Oeste, e negativo para Este.
- γ_c – Azimute do coletor.
- ω – Ângulo horário, posição angular do sol de Este para Oeste em relação ao Sul, sendo negativo de manhã e positivo de tarde.

A declinação solar varia consoante o dia do ano, podendo tomar valores entre $-0,4093$ a $0,4093$ radianos.

Tomando n como dia do ano no calendário Juliano, i. e., $1 \leq n \leq 365$, a declinação dada por:

$$\delta = \arcsin(0.3979 \sin \gamma) \quad (3.2.1.1)$$

Em que γ , na aproximação da órbita terrestre, é dado por:

$$\gamma \cong \gamma_0 = \frac{2\pi(n + 284)}{365.25} \quad [rad] \quad (3.2.1.2)$$

Considerando a excentricidade da órbita da Terra (Pereira & Carvalho, 1994):

$$\gamma = \gamma_0 + 0.00713 \sin \gamma_0 + 0.03268 \cos \gamma_0 - 0.000318 \sin(2\gamma_0) + 0.000145 \cos(2\gamma_0) \quad (3.2.1.3)$$

O ângulo horário ω , depende da localização geográfica do local, do meridiano de referência e se é horário de Verão ou de Inverno.

Portugal utiliza o meridiano de Greenwich como referência, no entanto, como a sua longitude situa-se entre 6° e 9° , a hora legal encontra-se adiantada face à hora solar, pelo que se torna necessário efetuar uma correção.

Desta forma, tendo em conta que a rotação da Terra é de 15° por hora, o ângulo solar toma o seguinte valor:

$$\omega = (T - 12) \frac{15\pi}{180} + \frac{\pi}{720} [4(L_{st} - L_{loc}) + E - svt] \quad (3.2.1.4)$$

Em que E é a equação do tempo, expressa em minutos, que toma em consideração as perturbações na rotação da Terra e T a hora correspondente tomando valores de 1 a 24. L_{st} e L_{loc} correspondem à longitude do meridiano de referência e longitude do local.

$$E = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (3.2.1.5)$$

Com B :

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad \text{e } n \text{ o dia do ano no calendário Juliano, } 1 \leq n \leq 365 \quad (3.2.1.6)$$

Em Portugal:

$$svt = \begin{cases} 60 \text{ minutos, horário de Verão} \\ 0 \text{ minutos, horário de Inverno} \end{cases}$$

O ângulo θ_{col} é dado pela seguinte relação:

$$\cos \theta_{col} = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma_c + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma_c \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma_c \sin \omega \quad (3.2.1.7)$$

O ângulo em que os raios solares fazem com a normal do plano horizontal θ_z , é dado pela relação:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (3.2.1.8)$$

A órbita da Terra em torno do Sol é elíptica, pelo que a distância Terra – Sol varia durante o seu movimento de translação. Desta forma, o valor da radiação solar extraterrestre oscila em torno do valor médio I_{0m} .

Para cada dia do ano toma o valor dado pela seguinte expressão (Pereira & Carvalho, 1994):

$$I_0 = I_{0m} \times \left[1 + 0,33 \cos \left(\frac{2\pi n}{365,25} \right) \right] \quad (3.2.1.9)$$

Em que n é o dia do ano no calendário Juliano (dia do ano a contar a partir de 1 de janeiro).

Dada a forma aproximadamente esférica da Terra e o seu movimento de rotação, a radiação sobre um plano horizontal fora da atmosfera varia não só com o dia do ano, mas também com a latitude do local.

O valor da energia extraterrestre sob um plano horizontal disponível para cada dia do ano, H_0 , é determinado integrando o valor da intensidade no tempo e considerando o ângulo do nascer e pôr-do-Sol, assim como a declinação dos raios solares.

$$H_0 = \frac{T}{\pi} I_0 \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s) \quad (3.2.1.10)$$

Em que:

- T – O tempo em segundos correspondentes a um dia, $T = 86\ 400\ s$
- ω_s – O ângulo horário correspondente ao nascer ou pôr-do-Sol. Ângulo da radiação em relação ao Sul.

O ângulo de nascer coincide com o ângulo de pôr-do-Sol, e é dado por:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (3.2.1.11)$$

Caso o valor da global sobre um plano horizontal seja conhecido, o índice de transparência da atmosfera pode ser calculado da seguinte forma:

$$\bar{H}_h = \bar{K}_h \cdot H_0 \quad (3.2.1.13)$$

A radiação difusa média diária é obtida por:

$$\bar{H}_d = \bar{H}_h 0,775 + 0,347 \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) - \left(0,55 + 0,261 \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) \right) \cos(2(\bar{K}_h - 0,9)) \quad (3.2.1.13)$$

Para analisar a performance de um painel solar com alguma precisão é necessário conhecer o valor médio horário da radiação. Segundo (Pereira & Carvalho, 1994), este valor pode ser estimado com base no valor médio da radiação diária. A radiação média horária num plano horizontal é dada por:

$$\bar{I}_h = \bar{H}_h \cdot r_h \quad (3.2.1.14)$$

$$\bar{I}_d = \bar{H}_d \cdot r_d \quad (3.2.1.15)$$

Com:

$$r_h = (a + b \cos \omega) \frac{\pi}{T} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3.2.1.16)$$

$$r_r = \frac{\pi}{T} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3.2.1.17)$$

Em que:

$$a = 0,409 + 0,5016 \operatorname{sen}(\omega_s - 1,047)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \operatorname{sen}(\omega_s - 1,047)$$

T é o período de uma hora expresso em segundos, $T = 3\,600\text{ s}$

O valor médio horário da radiação direta, \bar{I}_b , é dado pela diferença entre a radiação hemisférica e difusa:

$$\bar{I}_b = \bar{I}_h - \bar{I}_d \quad (3.2.1.18)$$

As radiações médias horárias apresentadas anteriormente referem-se ao plano horizontal. Para utilizar os valores da radiação num plano horizontal numa superfície inclinada é necessário efetuar uma correção que consiste em multiplicar o valor da radiação no plano horizontal por R , o qual é definido da seguinte forma:

$$R = \frac{\text{radiação total no plano inclinado}}{\text{radiação total numa superfície horizontal}} = \frac{\cos \theta_{col}}{\cos \theta_z} \quad (3.2.1.19)$$

O valor anteriormente calculado para a radiação difusa admite que esta tem um carácter isotrópico, ou seja, a intensidade é independente da direção. Contudo, a radiação difusa embora provenha de todas as direções do céu apresenta uma intensidade que varia ligeiramente com a direção, i.e., é anisotrópica.

De acordo com o modelo de *Hay (Pereira & Carvalho, 1994)*, o valor horário da radiação difusa incidente numa superfície de azimute γ e inclinação β é dado por:

$$\bar{I}_{d,anisot} = \bar{I}_{d,isot} \left[\frac{\cos \theta_{col} \bar{I}_b}{\cos \theta_z I_0} + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left(1 - \frac{\bar{I}_b}{I_0} \right) \right] \quad (3.2.1.20)$$

Além da radiação direta e difusa, incide no painel a radiação hemisférica refletida pelo chão. A radiação refletida pelo chão depende de dois fatores: o primeiro é a refletividade do chão (albedo - ρ_g) e o segundo é o fator de forma entre o coletor e o chão. Este último depende do valor de β . Finalmente, a radiação global incidente na superfície é dada por:

$$\bar{I}_{col}(\alpha, \beta) = \bar{I}_b \frac{\cos \theta_{col}}{\cos \theta_z} + \frac{1}{2} \bar{I}_h \rho_g (1 - \cos \beta) + \bar{I}_{d,anisot}(\alpha, \beta) \quad (3.2.1.21)$$

O cálculo do sombreamento solar, é efetuado com base na altura solar e na altura do horizonte, em que neste caso se exclui a componente da radiação solar direta.

3.2.2. Modelo de produção fotovoltaica de 5 parâmetros

Para o cálculo da produção fotovoltaica, estimando a mesma, e após conhecida a disponibilidade de energia solar no local de estudo, foi utilizado o modelo de cinco parâmetros e um díodo de *Rui Castro* [41], ilustrado na figura 25 abaixo.

Este modelo baseia-se nas principais características do painel fotovoltaico e estima a potência elétrica produzida em função das condições climáticas, nomeadamente a radiação solar e a temperatura ambiente.

A utilização do modelo é realizada em duas fases, sendo que na primeira fase são determinados os parâmetros m correspondendo ao fator idealidade do díodo, R_s correspondendo à resistência em série e R_{sh} correspondendo à resistência em paralelo.

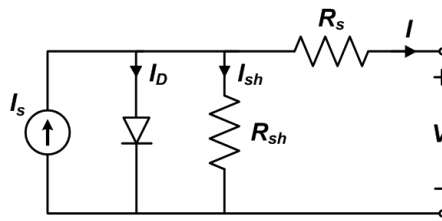


Figura 25 - Esquema do modelo de cinco parâmetros e um díodo

Utilizando dados fornecidos pelo fabricante (nomenclatura inglesa entre parêntesis), como por exemplo:

- V_{oc} – Tensão de circuito aberto de referência (*Open circuit voltage*)
- I_{sc} – Corrente de curto-circuito de referência (*Short circuit current*)
- V_{mp} – Tensão de máxima potência de referência (*Max. Power voltage*)
- I_{mp} – Corrente de máxima potência de referência (*Max. Power current*)

Os parâmetros acima referidos são calculados resolvendo o sistema das três equações abaixo apresentadas.

$$I_{MP}^r = I_{cc}^r - \frac{V_{MP}^r + R_s \cdot I_{MP}^r - R_s \cdot I_{cc}^r}{R_{sh}} - \left(I_{cc}^r - \frac{V_{ca}^r - R_s \cdot I_{cc}^r}{R_{sh}} \right) \cdot e^{\frac{V_{MP}^r + R_s \cdot I_{MP}^r - V_{ca}^r}{m \cdot V_T^r}} \quad (3.2.2.1)$$

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{\substack{I=I_{cc}^r \\ I=I_{MP}^r}} = I_{MP}^r + \frac{-\frac{(R_{sh} \cdot I_{cc}^r - V_{ca}^r + R_s \cdot I_{cc}^r)e^{\frac{V_{MP}^r + R_s \cdot I_{MP}^r - V_{ca}^r}{m \cdot V_T^r}}}{m \cdot V_T^r \cdot R_{sh}} - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s(R_{sh} \cdot I_{cc}^r - V_{ca}^r + R_s \cdot I_{cc}^r)e^{\frac{V_{MP}^r + R_s \cdot I_{MP}^r - V_{ca}^r}{m \cdot V_T^r}}}{m \cdot V_T^r \cdot R_{sh}} + \frac{R_s}{R_{sh}}} \cdot V_{MP}^r \quad (3.2.2.2)$$

$$= 0$$

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{cc}^r} = \frac{-\frac{(R_{sh} \cdot I_{cc}^r - V_{ca}^r + R_s \cdot I_{cc}^r)e^{\frac{R_s \cdot I_{cc}^r - V_{ca}^r}{m \cdot V_T^r}}}{m \cdot V_T^r \cdot R_{sh}} - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s(R_{sh} \cdot I_{cc}^r - V_{ca}^r + R_s \cdot I_{cc}^r)e^{\frac{R_s \cdot I_{cc}^r - V_{ca}^r}{m \cdot V_T^r}}}{m \cdot V_T^r \cdot R_{sh}} + \frac{R_s}{R_{sh}}} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (3.2.2.3)$$

Em seguida, na segunda fase, e tomando as condições reais de temperatura e radiação solar, são determinadas a tensão e corrente no ponto máximo de potência do painel, correspondendo ao ponto de potência máxima que o controlador de carga, conectado aos painéis fotovoltaicos, irá procurar aquando da operação do sistema fotovoltaico.

$$\frac{I_{MP}}{V_{MP}} = - \frac{\frac{(R_{sh} \cdot I_{cc} - V_{ca} + R_s \cdot I_{cc})e^{\frac{V_{MP} + R_s \cdot I_{MP} - V_{ca}}{m \cdot V_T}}}{m \cdot V_T \cdot R_{sh}} - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s(R_{sh} \cdot I_{cc} - V_{ca} + R_s \cdot I_{cc})e^{\frac{V_{MP} + R_s \cdot I_{MP} - V_{ca}}{m \cdot V_T}}}{m \cdot V_T \cdot R_{sh}} + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (3.2.2.4)$$

$$I_{MP} = I_{cc} - \frac{V_{MP} + R_s \cdot I_{MP} - R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} - \left(I_{cc} - \frac{V_{ca} - R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \right) \cdot e^{\frac{V_{MP} + R_s \cdot I_{MP} - V_{ca}}{m \cdot V_T}} \quad (3.2.2.5)$$

As equações acima apresentadas são resolvidas simultaneamente num sistema de equações não lineares, em que as condições climatéricas são incorporadas pelas seguintes equações:

$$I_{cc} = \frac{G}{G_r} [I_{cc}^r + \mu_{I_{cc}}(T - T^r)] \quad (3.2.2.6)$$

$$V_{ca} = V_{ca}^r + \mu_{V_{ca}}(T - T^r) + mV_T \ln \left(\frac{G}{G_r} \right) \quad (3.2.2.7)$$

Sendo G a radiação solar na superfície em W/m^2 , e G_r a radiação solar de referência $1\,000\,W/m^2$, T a temperatura da célula fotovoltaica em Kelvin (K) e T_r a temperatura de referência $298,15\,K$.

O potencial térmico V_T é dado pela equação seguinte:

$$V_T = \frac{1,38 \times 10^{-23} T}{1,6 \times 10^{-19}} \quad (3.2.2.8)$$

3.2.3. Modelo de balanço térmico para determinação da temperatura da célula

A temperatura da célula T é obtida através da seguinte equação, tendo como base um valor de temperatura $NOCT$ de 45 ± 2 °C:

$$T = T_{amb} + \frac{G(NOCT - 20)}{800} \quad (3.2.3.1)$$

μ_{cc} e μ_{vca} são os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto respetivamente (*Temperature Coefficient for I_{sc}* ; *Temperature Coefficient for V_{oc}*).

Foi ainda analisado o desempenho do painel fotovoltaico com relação à temperatura da célula, comparar e verificar os modelos matemáticos utilizados com a medição real, e assim validar os modelos utilizados.

Para determinar a temperatura da célula empiricamente, utilizou-se o seguinte balanço de energia, ilustrado na figura 26 abaixo:

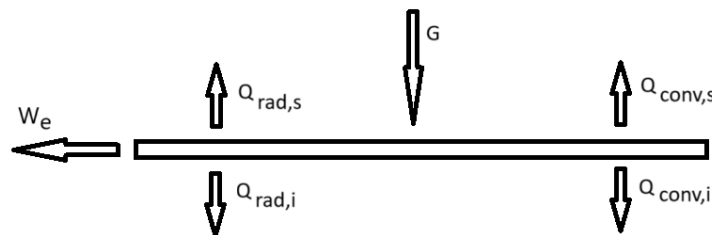


Figura 26 - Equação de balanço de energia

Considerando a radiação solar incidente no painel, G , a temperatura ambiente, T_a , a temperatura aparente do céu, $T_{céu}$, e o rendimento médio do painel η_e , as temperaturas das células do painel pode ser estimada pelo seguinte balanço de energia.

$$G = W_e + Q_{rad,s} + Q_{rad,i} + Q_{conv,s} + Q_{conv,i} \quad (3.2.3.2)$$

Em que:

$$W_e = \eta_e G \quad (3.2.3.3)$$

$$Q_{rad,s} = \varepsilon v ((T_{cel} + 273)^4 - (T_{céu} + 273)^4) \quad (3.2.3.4)$$

$$Q_{rad,i} = \varepsilon v ((T_{cel} + 273)^4 - (T_a + 273)^4) \quad (3.2.3.5)$$

$$Q_{conv,s} = h_{comb,s} (T_{cel} - T_a) \quad (3.2.3.6)$$

$$Q_{conv,i} = h_{comb,b} (T_{cel} - T_a) \quad (3.2.3.7)$$

Sendo $\varepsilon = 1$ a emissividade das superfícies, e v a contante de Stefan-Boltzmann

Em que os coeficientes de convecção são obtidos por combinação entre a convecção natural e forçada, o que depende da velocidade do vento sobre o painel.

$$h_{comb,s} = Nu_{comb,s} \frac{k}{L} \quad (3.2.3.8)$$

$$h_{comb,i} = Nu_{comb,i} \frac{k}{L} \quad (3.2.3.9)$$

$$Nu_{comb,s} = (Nu_{for}^n + Nu_{nat,s}^n)^{\frac{1}{n}} \quad (3.2.3.10)$$

$$Nu_{comb,i} = (Nu_{for}^n + Nu_{nat,i}^n)^{\frac{1}{n}} \quad (3.2.3.11)$$

$$Nu_{for} = 0,664Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad (3.2.3.12)$$

$$Nu_{nat,s} = 0,1Ra_s^{1/3} \quad (3.2.3.13)$$

$$Nu_{nat,i} = 0,1Ra_i^{1/3} \quad (3.2.3.14)$$

$$Ra_s = Gr.Pr \quad (3.2.3.15)$$

$$Ra_i = \cos(\theta) Gr.Pr \quad (3.2.3.16)$$

$$Gr = \frac{9,8\beta(T_{cel} - T_a)L^3}{\nu^2} \quad (3.2.3.17)$$

$$\beta = \frac{1}{T + 273} \quad (3.2.3.18)$$

Sendo T a temperatura média do ar entre a célula e o ambiente.

Apesar de se ter utilizado o modelo descrito, foram estudados os modelos de *Letícia de Oliveira Santos et al* [43] e de *Reza Hassanian et al* [44].

Segundo *Letícia de Oliveira Santos et al* [43], o seu modelo mostra uma, eventual, correlação entre a performance do painel fotovoltaico e a temperatura de operação da célula, tendo em conta a influência das condições ambientais.

De acordo com *Reza Hassanian et al* [44], o seu modelo matemático é um modelo de avaliação de transferência de calor, para se poder avaliar a relação entre a temperatura operacional do painel fotovoltaico e a eficiência do mesmo, visto que a literatura relata que temperaturas de operação do painel fotovoltaico mais elevadas, afetam a sua eficiência.

3.3. Painéis fotovoltaicos a instalar – Características técnicas

Os módulos de painéis fotovoltaicos a instalar são da marca *JINKO*, modelo *JKM5656N-72HL4-V*, do tipo N Mono-Cristalino, de 144 células, com as seguintes características técnicas descritas na tabela 5 e nos gráficos 11 e 12 a seguir.

Tabela 4 - Dados e características dos painéis fotovoltaicos a instalar

Dados do Painel Fotovoltaico		
Modelo	Jinko JKM5656N-72HL4-V	
Tipo	Tipo N - Mono-Cristalino	
nº células	144 (6 x 24)	
Comprimento [mm]	2 278	
Largura [mm]	1 134	
Espessura [mm]	35	
Espessura do vidro [mm]	3,2	
Especificações	STC	NOCT
Potência Máxima (P_{max}) - [W _p]	565	425
Tensão de Potência Máxima (V_{mp}) - [V]	41,92	39,38
Corrente de Potência Máxima (I_{mp}) - [A]	13,48	10,79
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) - [V]	50,60	48,06
Corrente de Curto Circuito (I_{sc}) - [A]	14,23	11,49
Eficiência do Módulo - STC [%]	21,87	20,57
Temperatura de Funcionamento [°C]	-40 ~ +85	
Máxima Tensão do Sistema {VDC} (IEC)	1000 / 1500	
Tolerância da Potência [%]	0 ~+3	
Coeficiente de Temperatura de P_{max} [%/°C]	-0,3	
Coeficiente de Temperatura de V_{oc} [%/°C]	-0,25	
Coeficiente de Temperatura de I_{sc} [%/°C]	0,046	
Temperatura Nominal de Funcionamento da Célula (NOCT) [°C]	45+/-2	

STC - 1000 W/m²; OTC – 25 °C - 0 m/s

NOCT - 800 W/m²; OTC – 20 °C - 1 m/s

Electrical Performance & Temperature Dependence

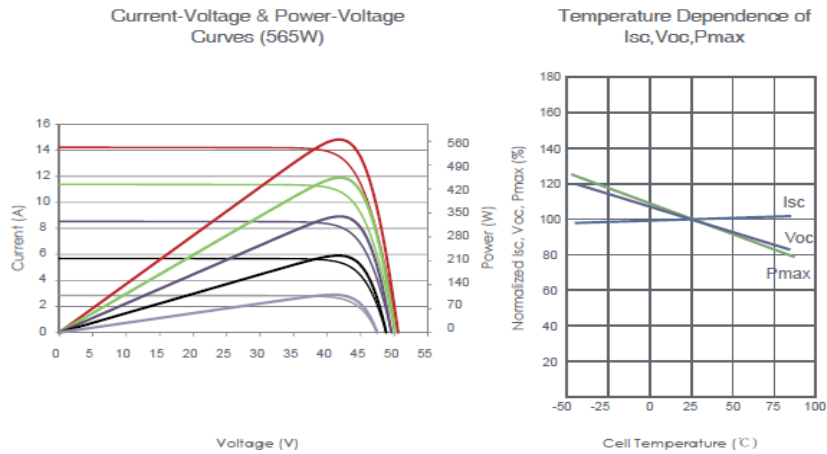


Gráfico 11 – Gráfico de eficiência elétrica (esquerda) e gráfico de dependência da temperatura

Tabela 5 – Características mecânicas do painel fotovoltaico a instalar e em estudo

Mechanical Characteristics	
Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2278×1134×35mm (89.69×44.65×1.38 inch)
Weight	28 kg (61.73 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm , (-): 200mm or Customized Length

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

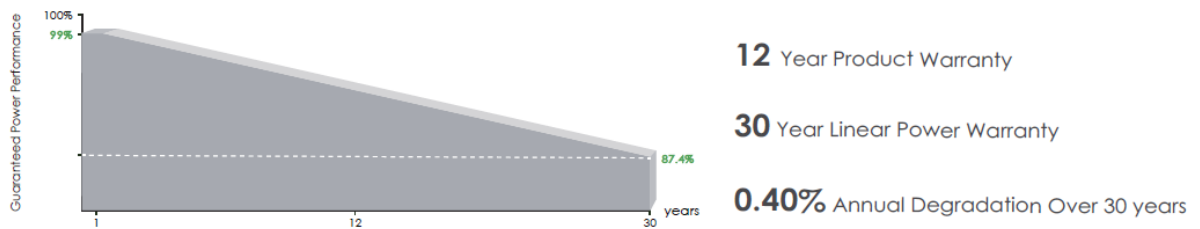


Gráfico 12 – Gráfico da vida útil do painel fotovoltaico e sua degradação ao longo da mesma

3.4. Inversores a instalar – Características técnicas

Os inversores a instalar são três, da marca *HUAWEI*, modelo *SUN2000-50KTL-M0*, com uma potência máxima de 55 kW cada, para fazer face aos 152,55 kWp de potência de pico instalada em painéis fotovoltaicos, com as seguintes características técnicas descritas na tabela 7 abaixo.

Tabela 6 – Dados e características dos inversores a instalar

Dados do Inversor	
Modelo	SUN2000-50KTL-M0
Eficiência Máxima [%]	98,7 %
Eficiência Europeia [%]	98,5 %
Input	
Tensão Máxima de Entrada DC [V]	1 100 V
Corrente Máxima por MPPT DC [A]	22 A
Corrente Máxima de Curto Circuito por MPPT DC [A]	30 A
Tensão de Início de Funcionamento DC [V]	200 V
Amplitude de Tensão de Funcionamento – MPPT DC [V]	200 V ~1 000 V
Tensão de Entrada Nominal DC [V]	600 V
Número de Entradas	12
Número de Reconhecedores de MPPT	6
Output	
Potência Ativa Nominal AC [W]	50 000 W
Potência Aparente Máxima AC [VA]	55 000 W
Potência Ativa Máxima – (cos $\phi=1$) – [W]	55 000 W
Tensão de Saída Nominal AC [V]	230 V / 400 V – 3W+N+PE
Frequência de Rede Nominal AC [Hz]	50 Hz / 60 Hz
Corrente de Saída Nominal AC [A]	72,2 A a 400 V
Corrente de Saída Máxima AC [A]	79,4 A a 400 V
Amplitude de Ajuste do Fator de Potência	0,8
Distorção Harmónica Total Máxima [%]	THD < 3 %

3.5. Estrutura e equipamentos para estudo do painel fotovoltaico

Devido à necessidade de se efetuarem diversas medições, sejam da radiação solar, das diversas temperaturas do ar ambiente e das superfícies do painel fotovoltaico, da velocidade do vento e da produção elétrica do painel fotovoltaico, em diversos ângulos de inclinação, foi criada uma estrutura de suporte do painel fotovoltaico, de forma que conseguisse cumprir com os objetivos pretendidos, como ilustrado nas figuras 27 e 28 abaixo.

Os dados obtidos com as diversas medições, serviram para verificação e confirmação dos dados do fabricante, e ainda poder criar um modelo para utilização no atual e futuros projetos.

A respectiva estrutura, bem como os equipamentos utilizados para efetuar as medições, estão descritos nos subcapítulos seguintes.



Figura 27 - Atividade de estudo do painel fotovoltaico em curso, com os diversos equipamentos de medição e leitura, bem como estrutura com inclinação regulada para estar num ângulo de estudo definido

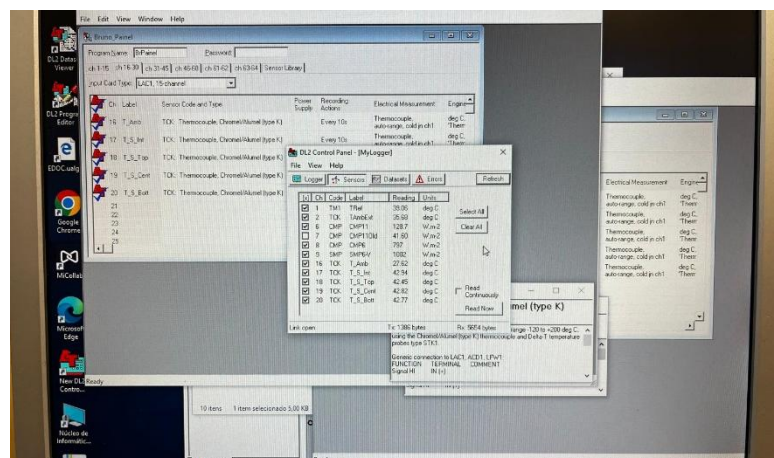


Figura 28 - Software de leitura e recolha de dados de medição da radiação solar e temperaturas ambiente e do painel fotovoltaico

3.5.1. Estrutura de suporte e acoplamento do painel fotovoltaico

Foi criada uma estrutura com recurso a cantoneiras em alumínio, cantoneiras em aço com furação para varões roscados de regulação de inclinação da respetiva estrutura, barras de alumínio com regulação de largura, varões roscados com respetivas porcas e anilhas de regulação da inclinação do painel e respetiva fixação, com o objetivo de permitir a simulação de diversos ângulos de inclinação solar, como se pode ver nas figuras 29 a 32 abaixo.



Figura 29 - Estrutura suporte para montagem do painel fotovoltaico



Figura 30 - Sistema de regulação de inclinação da estrutura suporte do painel fotovoltaico



Figura 31 - Sistema de regulação de inclinação da estrutura suporte do painel fotovoltaico



Figura 32 - Equipamento para regulação da inclinação do painel fotovoltaico em relação à altura solar

3.5.2. Equipamentos de medição de radiação solar

Para a medição da radiação solar foram utilizados três equipamentos de medição de radiação solar, denominados de piranômetros, sendo que um mediu a radiação solar global no plano do painel, outro mediu a radiação solar global no plano horizontal, e um terceiro que mediu a radiação difusa no plano do painel, ilustrados nas figuras 33 e 34 abaixo.



Figura 33 - Atividade de estudo do painel fotovoltaico em curso, com os diversos equipamentos de medição e leitura, bem como estrutura com inclinação regulada para estar num ângulo de estudo definido



Figura 34 - Piranômetro utilizado na medição da radiação solar (exemplo demonstrado no plano do painel)

3.5.3. Equipamentos de medição de temperaturas

No caso de medição das temperaturas, foram utilizados 5 termopares distribuídos pelas seguintes localizações, as quais estão ilustradas nas figuras 35 a 39 abaixo:

- Temperatura ambiente (35);
- Temperatura da superfície de incidência solar do painel no centro (36);
- Temperatura da superfície de incidência solar do painel no topo (37);
- Temperatura da superfície de incidência solar do painel no fundo (38);
- Temperatura da superfície interior do painel no centro (39).



Figura 35 - Termopar de medição da temperatura ambiente

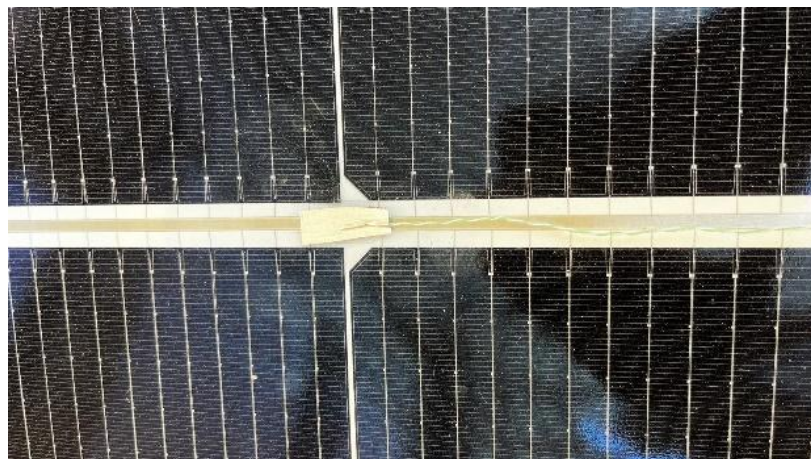


Figura 36 - Termopar de medição da temperatura no centro da superfície de incidência solar do painel fotovoltaico



Figura 37 - Termopar de medição da temperatura no topo da superfície de incidência solar do painel fotovoltaico



Figura 38 - Termopar de medição da temperatura na base da superfície de incidência solar do painel fotovoltaico



Figura 39 - Termopar de medição da temperatura no centro da superfície interior do painel fotovoltaico

3.5.4. Equipamento de medição de velocidade do vento

Para esta medição, foi utilizado um anemómetro, de marca *TESTO*, modelo 445, que mede não só a velocidade do vento, mas também a temperatura do ar ambiente, servindo assim para confirmar a mesma com o valor medido pelo termopar respetivo.

O referido anemómetro, pode ser visualizado nas figuras 40 e 41 seguintes abaixo:



Figura 40 - Anemómetro e sensor de temperatura do ar ambiente



Figura 41 - Equipamento de leitura e recolha de dados de velocidade do vento e de temperatura ambiente

3.5.5. Equipamento de inversão de corrente DC/AC – Micro Inversor

Para se poder realizar os diversos ensaios de medição da potência elétrica produzida pelo painel fotovoltaico em análise, foi utilizado um micro inversor de marca *ENPHASE IQ7+*, com uma potência de saída de pico de 295 VA, de um MPPT.

As especificações são apresentadas na tabela 8 seguinte:

Tabela 7 – Dados e características do microinversor utilizado para ensaios

Dados do Micro Inversor	
Modelo	ENPHASE
Eficiência Máxima [%]	97,5 %
Eficiência Europeia [%]	97,0 %
Input	
Tensão Máxima de Entrada DC [V]	60 V
Tensão de Início de Funcionamento DC [V]	22 V
Corrente Máxima do MPPT DC [A]	20 A
Corrente Máxima de Curto Circuito DC [A]	25 A
Amplitude de Tensão de Funcionamento – MPPT DC [V]	27 V ~ 45 V
Potência Máxima de Entrada DC [W]	235 - 440 W
Número de Entradas	1
Output	
Potência Nominal AC [VA]	290 VA
Potência Máxima AC [VA]	295 VA
Tensão de Saída Nominal AC [V]	240 V (211 – 264 V)
Frequência de Rede Nominal AC [Hz]	50 Hz (47 Hz – 68 Hz)
Corrente de Saída Nominal AC [A]	1,21 A a 240 V
Amplitude de Ajuste do Fator de Potência	0,85
Distorção Harmónica Total Máxima [%]	THD < 5 %

3.5.6. Equipamento de medição da produção do painel fotovoltaico

Para a realização desta medição, foi utilizado um aparelho analisador de redes, de marca *CHAUVIN ARNOUX*, modelo *CA8332B*, o qual serviu para medir e registrar a produção de energia elétrica em Watts, a produção de tensão em Volts, a produção de corrente elétrica em Amperes, medir a injeção de toda a produção do painel fotovoltaico na rede elétrica, por forma a se poder verificar a eficiência do painel com base na radiação solar medida e registada, figuras 42 e 43 abaixo.

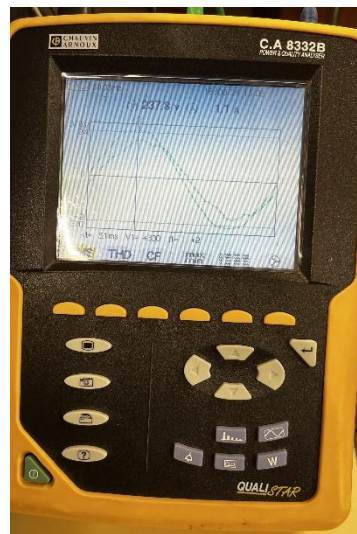


Figura 42 - Analisador de redes, Chauvin Arnoux CA8332B

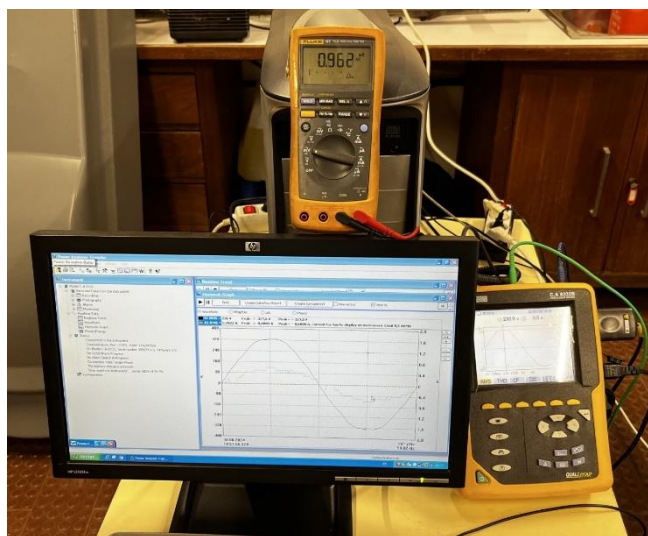


Figura 43 - Conjunto de leitura e recolha de dados de análise de redes

Foi utilizado um multímetro da marca *FLUKE*, modelo *187*, para verificar as tensões de saída do painel fotovoltaico em *DC*, e em *AC* na saída do inversor, figura 41 abaixo.

Para medir as correntes elétricas, *DC* na saída do painel para o micro inversor, e *AC* na saída do micro inversor para a rede elétrica, utilizou-se uma pinça amperimétrica da marca *RS PRO*, modelo *36T*, a qual se conecta ao multímetro e para se obter uma leitura no referido multímetro, a mesma converte o valor de amperes para volts, de modo a se poder ler sem causar dano a nenhum equipamento, figura 44 abaixo.

A utilização do multímetro e da pinça amperimétrica serviu para se confirmar os valores medido pelo analisador de redes utilizado, para se ter um grau de confiança mais elevado nos valores registados para assim se poder comparar com os dados disponibilizados pelo fabricante do painel fotovoltaico.



Figura 44 - Multímetro Fluke 187 (esuerda) e Pinça Apmerimétrica RS PRO 36T (direita)

3.6. Validação do modelo de radiação solar

Para que fosse possível a realização de um projeto de instalação de painéis fotovoltaicos para autoconsumo, com previsão de produção de energia elétrica fotovoltaica e o possível retorno de investimento, foram utilizados dados meteorológicos registados pela estação meteorológica da Universidade do Algarve - *EPPLEY*, e do software online *PVGIS* (*Photovoltaic Geographical Information System*).

Os dados meteorológicos registados que foram utilizados, têm uma linha temporal de 10 anos de registo, entre 2010 e 2020, pois o software *PVGIS* só consegue fornecer dados até 2020.

Estes dados serviram para se fazer uma comparação dos mesmos, entre as duas opções utilizadas, bem como criar o desvio padrão entre os mesmos, para assim se pudesse proceder à sua análise e obter algum grau de confiança na utilização dos mesmos.

Com base nos resultados analisados, foi possível criar uma tabela de previsão de radiação solar ao longo do ano de 2024 e assim realizar uma previsão de produção de energia elétrica fotovoltaica, como se poderá verificar nas descrições um pouco mais à frente neste documento.

3.6.1. Estação meteorológica da Universidade do Algarve - *EPPLEY*

A Universidade do Algarve (*UAlg*), tem uma estação meteorológica, *EPPLEY*, em que regista dados de condições ambientais, tais como radiação solar global, radiação solar direta, radiação solar difusa, temperatura ambiente (máxima, média e mínima), velocidade do vento (máxima, média e mínima), humidade relativa do ar (máxima, média e mínima), e ainda a precipitação (anual, dia mais chuvoso, hora mais chuvosa, mês mais chuvoso, e número de dias de chuva por ano).

Estes dados, registados pela Universidade do Algarve, servem para que alunos e professores de diversos cursos possam recorrer aos mesmos, para poderem levar a cabo a realização de diversos estudos e investigações, nos quais sejam necessários os respetivos ou alguns dos respetivos dados meteorológicos.

Nas tabelas 13 e 14 bem como nos gráficos 13 e 14, seguintes, podem ver-se exemplos de dados recolhidos pela estação meteorológica da Universidade do Algarve.

Tabela 8 - Dados registados pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve no ano de 2020

Ano 2020 - Estatística					
Valores medidos em		366 dias			
Precipitação	Total anual	641,2 mm/ano	---	---	---
	Nº dias de	71 dias/ano	---	---	---
	Dia mais chuvoso	103,6 mm/dia	ocorrida no dia	20/out	---
	Hora mais chuvosa	26,6 mm/hora	ocorrida no dia	18/set	à 7:00 h
	Mês mais chuvoso	201,4 mm/mês	no mês de	novembro	---
Temperatura do ar	Valor mín.	9,9 °C	Dia mais frio	5/dez	---
	Média Valor méd.	18,8 °C	---	---	---
	Valor máx.	30,3 °C	Dia mais	27/ago	---
	Valor mín.	11,7 °C	Ocorrida no dia	22/jan	à 14:57 h
	Máxima Valor méd.	23,0 °C	---	---	---
	Valor máx.	38,8 °C	Ocorrida no dia	27/ago	à 14:40 h
	Mínima Valor méd.	14,9 °C	Ocorrida no dia	31/dez	à 7:43 h
Humidade Relativa do ar - valores anuais	Valor mín. do ano	17,5 %	Ocorrida no dia	9/mar	---
	Valor méd. anual	69,6 %	---	---	---
	Dia mais seco	32,8 %	Ocorrida no dia	12/out	---
	Dia mais húmido	96,1 %	Ocorrida no dia	18/jan	---
Velocidade do ar	Valor máx.	18,6 m/s	Ocorrida no dia	18/mar	às 13:53 h
	66,9 km/h				
	Escala de Beaufort	8,0 Beaufort			
	36,1 nós	Dia mais ventoso	5,7 m/s	foi o dia	8/ago
Radiação global	Valor méd.	398,0 W/m2			
	Valor méd. / hora	1382,1 kJ/m2.h			
	Valor méd. /dia	18490,9 kJ/m2.dia			
	Valor máx.	1039,1 W/m2			
	Valor total/ano	6767,7 MJ/m2.ano			

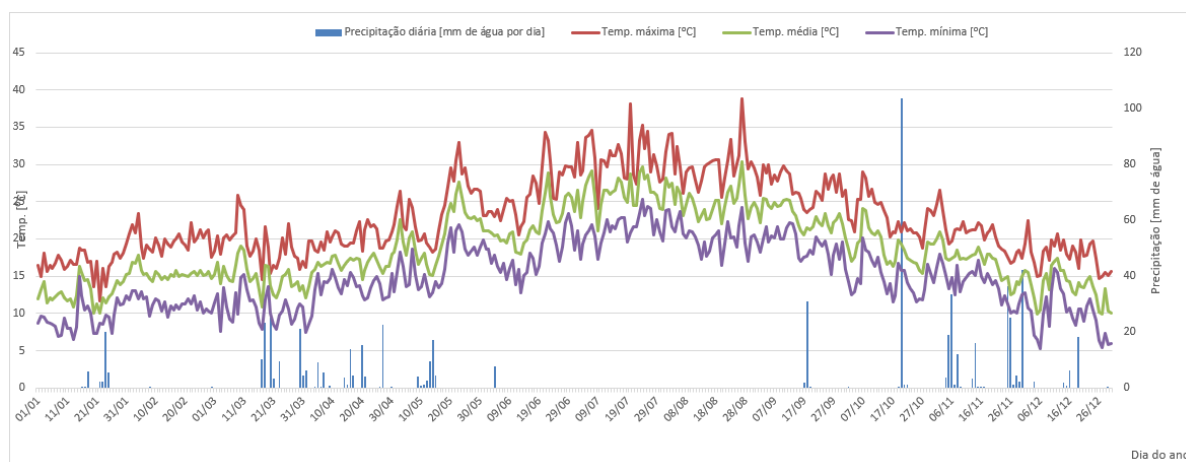


Gráfico 13 - Variação da Precipitação e Temperaturas máxima, média e mínima ao longo do ano de 2020, medidos pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve

Tabela 9 - Dados registados pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve (excerto do ano de 2020, 1 janeiro das 00:00:00 às 23:00:00)

EMA - ISE - Dados horários									
	"10CV"	"20CV"	"33CV"		"50CV"	"50CV"	"43CV"	"70CV"	"80CV"
Data Hora UTC	Tmed	HRmed	Rad.G1 (Eppley)		VVmd	VVmx	DV	PR	VBat
dd/mm/aaaa hh:mm:ss UTC			Média	Integral					
	°C	%	W/m2	KJ/m2	m/s	m/s	graus	mm/h	V
01/01/2020 00:00:00	10,59	79,06	0,26	0,94	1,22	2,43	294,20	0,00	12,80
01/01/2020 01:00:01	10,51	79,33	0,19	0,68	1,15	1,72	294,06	0,00	12,80
01/01/2020 02:00:00	10,22	80,56	0,20	0,72	0,40	1,18	41,54	0,00	12,80
01/01/2020 03:00:01	10,10	80,45	0,21	0,74	0,65	1,21	110,12	0,00	12,81
01/01/2020 04:00:00	9,89	82,56	0,39	1,39	0,60	1,62	339,82	0,00	12,80
01/01/2020 05:00:01	9,62	85,34	0,28	0,99	1,09	1,85	299,61	0,00	12,80
01/01/2020 06:00:00	8,86	89,39	0,26	0,95	1,32	2,22	294,60	0,00	12,80
01/01/2020 07:00:01	9,27	91,45	0,31	1,10	0,76	1,75	284,08	0,00	12,81
01/01/2020 08:00:01	9,66	92,00	4,22	15,07	0,64	1,55	62,19	0,00	12,80
01/01/2020 09:00:00	10,10	87,71	90,77	326,11	1,98	5,37	72,46	0,00	12,80
01/01/2020 10:00:01	12,56	76,41	243,85	877,06	2,67	4,82	49,94	0,00	12,80
01/01/2020 11:00:00	14,60	70,43	385,31	1386,50	2,76	5,21	50,64	0,00	12,80
01/01/2020 12:00:01	15,64	66,33	480,37	1729,00	3,59	7,59	70,19	0,00	12,80
01/01/2020 13:00:00	15,34	69,56	513,28	1847,80	3,92	7,47	83,65	0,00	12,80
01/01/2020 14:00:01	15,79	68,57	487,46	1755,15	3,30	5,74	81,97	0,00	12,80
01/01/2020 15:00:01	15,71	72,61	409,14	1473,41	3,16	4,98	92,51	0,00	12,79
01/01/2020 16:00:00	15,41	75,20	284,16	1023,73	2,68	4,62	87,51	0,00	12,79
01/01/2020 17:00:01	14,77	77,68	121,96	439,87	2,27	4,87	91,19	0,00	12,80
01/01/2020 18:00:00	13,59	82,47	8,90	32,26	1,07	2,58	77,96	0,00	12,80
01/01/2020 19:00:01	12,42	86,54	0,17	0,60	0,67	1,58	61,77	0,00	12,80
01/01/2020 20:00:01	11,72	86,29	0,23	0,84	0,61	1,04	330,76	0,00	12,80
01/01/2020 21:00:01	11,30	86,13	0,23	0,84	0,89	1,61	302,39	0,00	12,80
01/01/2020 22:00:00	10,47	87,41	0,27	0,96	1,31	2,76	299,24	0,00	12,80
01/01/2020 23:00:01	10,47	87,20	0,28	0,99	1,13	1,69	288,77	0,00	12,81

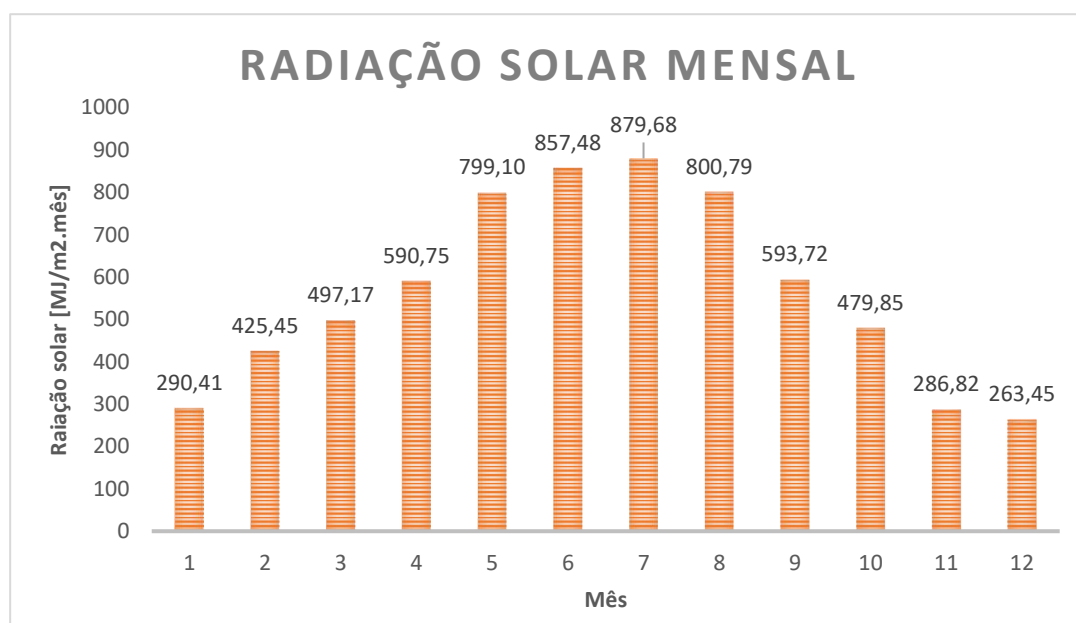


Gráfico 14 - Radiação média mensal para o ano de 2020, registados pela Estação Meteorológica da Universidade do Algarve no ano de 2020

3.6.2. Software online *PVGIS Internacional*

O software online *PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)* [46], é um software, disponibilizado gratuitamente e sem necessidade de registo, que fornece informações sobre radiação solar e desempenho de sistemas fotovoltaicos. O mesmo pode ser utilizado para calcular a quantidade de energia que se pode produzir, consoante diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos, e com a particularidade de o conseguir para quase qualquer lugar do mundo.

Este software, engloba um conjunto de ferramentas que permitem ao utilizador recolher vários tipos de dados, tais como dados sobre a radiação solar anual, mensal, diária, ou ainda horária, temperatura, previsão de produção de energia elétrica fotovoltaica, desempenho dos sistemas fotovoltaicos, e que permite a obtenção de resultados de várias formas, como por exemplo resultados demonstrados no navegador da internet em forma de gráficos ou números, podendo os mesmo serem guardados em arquivo, resultados em formato de texto *CSV*, como ainda documentos em formato *PDF*.

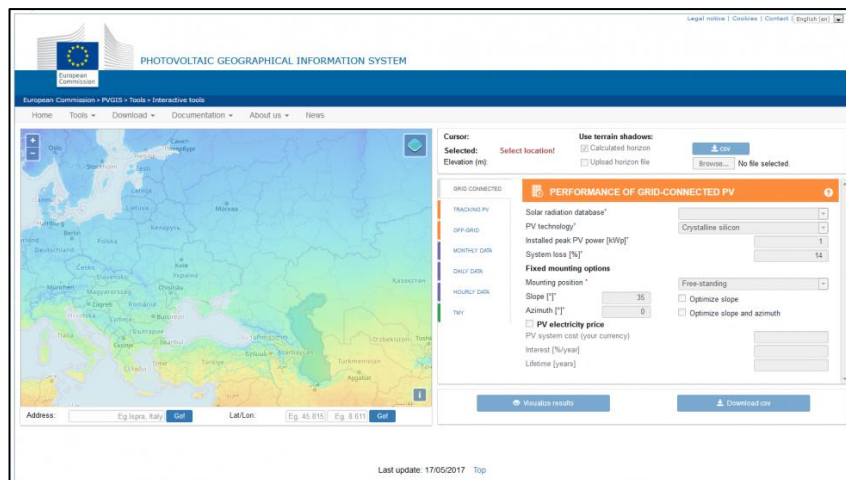


Figura 45 - Imagem de configuração de dados para simulação fotovoltaica. Fonte PVGIS.

Existem algumas áreas onde o software ainda não tem dados necessários, especialmente dados de radiação solar. Escolhendo um local onde não haja dados, aparecerá uma mensagem a vermelho à direita do mapa, com a informação "*Localização sem dados*".

Algumas áreas existem dados sobre o terreno, mas não radiação solar, dando a possibilidade de apenas se baixar a altura do horizonte, em que neste caso o aviso será de "*Localização sem dados de radiação. Apenas dados de horizonte disponíveis*".

O mapa ilustrado na figura 46 seguinte, mostra a extensão dos diferentes conjuntos de bancos de dados de radiação solar cobertos e usados no *PVGIS*.

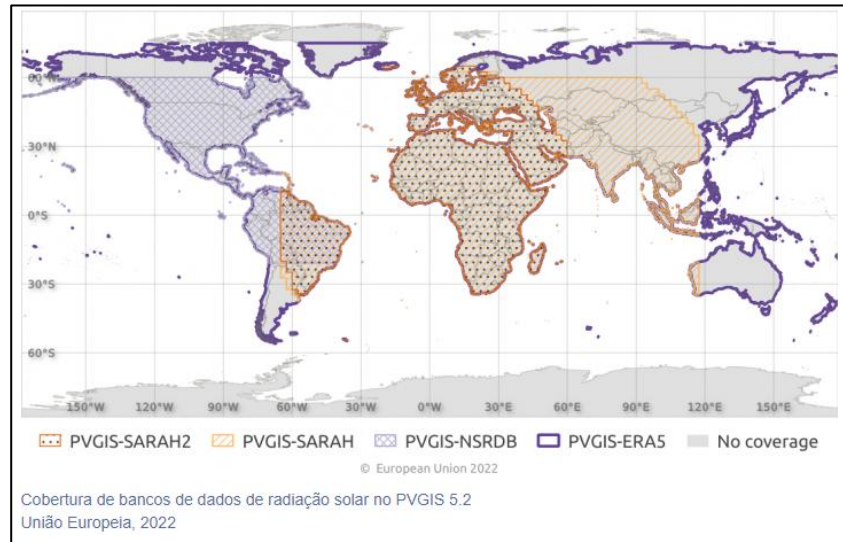


Figura 46 - Mapa de cobertura da base de dados da radiação solar. Fonte: PVGIS.

Na figura 47 seguinte, pode ser visto um mapa de cobertura de radiação solar com os bancos de dados recomendados consoante o local do planeta a estudar.

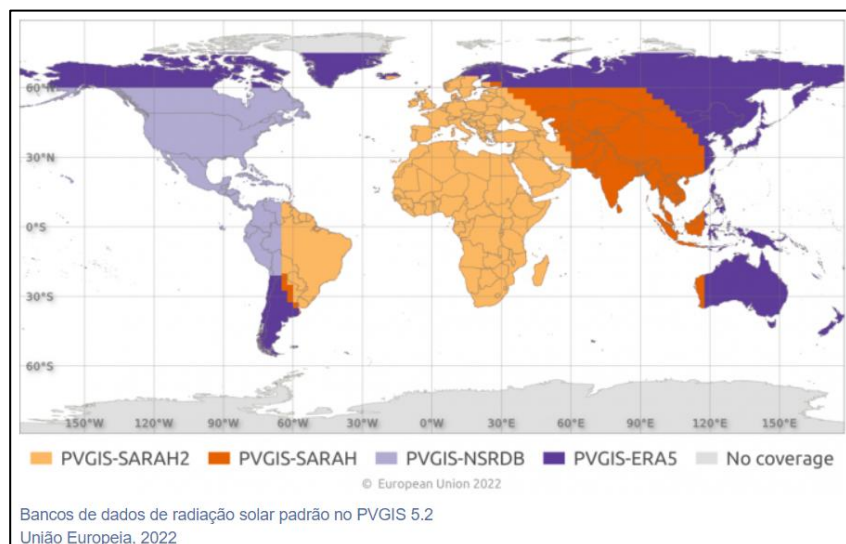


Figura 47 - Base de dados padrão da radiação solar mundial. Fonte: PVGIS.

Os bancos de dados, utilizados pelo *PVGIS*, são diferentes consoante a zona do planeta a estudar, ou a analisar, os quais são os seguintes que se podem observar na tabela 15 seguinte.

Tabela 10 - Bancos de bases de dados de radiação solar mundial. Fonte: *PVGIS*.

Os bancos de dados de radiação solar (BDs) disponíveis no *PVGIS* são:

Base de dados	Tipo	Ano de início	Fim de ano	Res. espacial.	Comentários
PVGIS-SARAH2	Satélite	2005	2020	0,05° x 0,05° (~ 5 km)	BD padrão para Europa, Ásia, África e América do Sul (abaixo de 20 S)
PVGIS-NSRDB	Satélite	2005	2015	0,038° x 0,038° (~ 4 km)	BD padrão para as Américas (acima de 20 S)
PVGIS-ERA5	Reanálise	2005	2020	0,25° x 0,25° (~ 25 km)	BD padrão para o resto do mundo sem cobertura de BDs baseados em satélite
PVGIS-SARAH	Satélite	2005	2016	0,05° x 0,05° (~ 5 km)	Este banco de dados operacional não é mais atualizado. Por favor, use PVGIS-SARAH2 em vez disso.

Todos os bancos de dados, utilizados pelo *PVGIS*, fornecem estimativas de radiação solar por hora.

A maioria dos dados de radiação solar utilizados foram calculados a partir de imagens de satélite. Foram utilizados métodos diferentes para realizar esses cálculos, consoante o satélite utilizado. As escolhas que estão disponíveis no *PVGIS* no presente momento são:

- *PVGIS-SARAH2* – Este conjunto de dados foi calculado pelo *CM SAF* para substituir *SARAH-1*. Estes dados cobrem a Europa, África, a maior parte da Ásia e partes da América do Sul.
- *PVGIS-NSRDB* – Este conjunto de dados foi fornecido pelo *Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL)* e faz parte do *Banco de Dados Nacional de Radiação Solar*.
- *PVGIS-SARAH* – Este conjunto de dados foi calculado pelo *CM SAF* e pela equipa do *PVGIS*. Estes dados têm uma cobertura similar à do *PVGIS-SARAH2*.

Existem, no entanto, algumas áreas que não estão cobertas pelos dados de satélite, especialmente no caso de áreas de alta latitude.

Por tal, foi introduzido, no *PVGIS*, um banco de dados de radiação solar adicional para a Europa, que inclui latitudes do Norte:

- *PVGIS-ERA5* – Este é um produto de reanálise do *ECMWF*. A cobertura é mundial em resolução horária e resolução espacial de $0,28^\circ$ Lat/Lon.

A maioria das ferramentas *PVGIS* (exceto a série temporal de radiação horária) irá disponibilizar um gráfico do horizonte juntamente com os resultados dos cálculos.

Este gráfico do horizonte, é mostrado como um gráfico polar com a altura do horizonte em círculo.

Pode ser observado na figura 48 seguinte um exemplo do gráfico do horizonte, em que compara o respetivo gráfico do horizonte, com uma fotografia de olho de peixe do mesmo local.

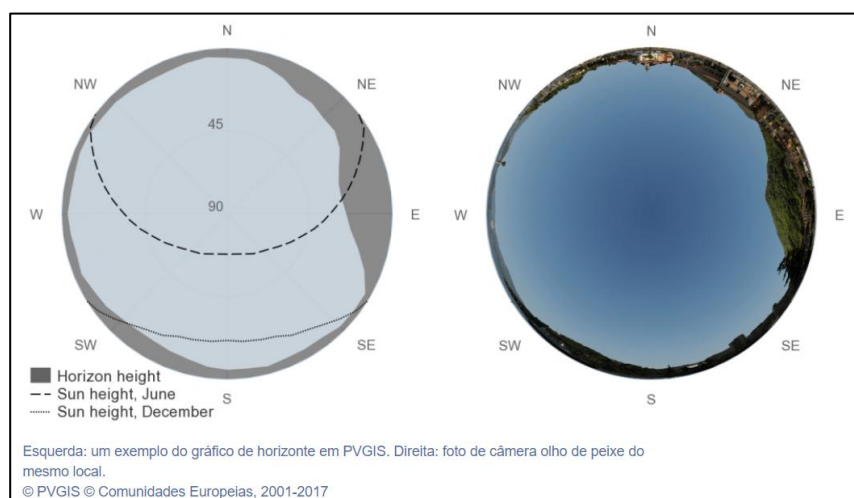


Figura 48 - Imagem demonstrativa de mapa de sombreamento local, com fotografia de horizonte. Fonte: *PVGIS*.

O *PVGIS*, correlaciona a dependência fotovoltaica com a irradiância e a temperatura do módulo, de forma em que a eficiência dos módulos fotovoltaicos depende da temperatura do módulo e da irradiação solar.

Geralmente, a eficiência diminui com o aumento da temperatura, e a força desse efeito depende da tecnologia fotovoltaica. Para a maioria dos tipos de módulos fotovoltaicos, a eficiência é praticamente constante para irradiações de cerca de 400 W/m^2 a pelo menos $1\,000 \text{ W/m}^2$ (para uma temperatura constante do módulo), no entanto, em menor irradiação solar a eficiência tende a diminuir.

Como as condições de teste padrão medem a potência do módulo com uma irradiação elevada (1 000 W/m²) e temperatura razoavelmente baixa (25 °C), o resultado geral é que, para a maioria dos locais, a eficiência média do módulo é ligeiramente inferior ao indicado pelo fabricante.

O *PVGIS* calcula os efeitos da irradiância e da temperatura do módulo com recurso a um modelo descrito em *Huld et al., 2011* [48]. A potência é considerada dependente da irradiância (G) e da temperatura do módulo (T_m), e é determinada através das equações 3.6.2.1 e 3.6.2.2 seguintes:

$$P = \frac{G}{1000} \times A \times \text{eff}(G, T_m) = \frac{G}{1000} \times A \times \text{eff}_{nom} \times \text{eff}_{rel}(G, T_m) \quad (3.6.2.1)$$

$$\text{eff}_{rel}(G', T'_m) = 1 + k_1 \ln(G') + k_2 \ln(G')^2 + k_3 T'_m + k_4 T'_m \ln(G') + k_5 T'_m \ln(G')^2 + k_6 T'_m{}^2 \quad (3.6.2.2)$$

Onde:

$$G' = \frac{G}{1000}$$

$$T'_m = T_m - 25$$

Os coeficientes k_n , que diferem consoante o tipo de módulo fotovoltaico, podem ser obtidos através da tabela 16 abaixo.

Tabela 11 - Coeficientes para utilizar em modelação numérica, consoante o tipo de painel fotovoltaico. Fonte: *PVGIS*.

Coeficiente	c-Si	CEI	CdTe
k_1	-0,017237	-0,005554	-0,046689
k_2	-0,040465	-0,038724	-0,072844
k_3	-0,004702	-0,003723	-0,002262
k_4	0,000149	-0,000905	0,000276
k_5	0,000170	-0,001256	0,000159
k_6	0,000005	0,000001	-0,000006

Quando os raios solares incidem nos módulos fotovoltaicos, a temperatura dos mesmos irá aumentar acima da temperatura do ar ambiente.

Portanto, significa que a temperatura do módulo depende tanto da temperatura do ar ambiente, como da irradiância solar (mais concretamente, a irradiância solar corrigida para refletividade, visto que a luz refletida não irá aquecer o módulo).

Além disso, se existir vento, o mesmo poderá ajudar a arrefecer os módulos fotovoltaicos.

Estes efeitos são considerados e tratados pelo *PVGIS* utilizando um modelo sugerido por *Faiman* [47].

Para determinar a temperatura do módulo fotovoltaico (T_m), o *PVGIS* recorre à seguinte equação 3.6.2.3:

$$T_m = T_a + \frac{G}{(u_0 + u_1 \times w_s)} \quad (3.6.2.3)$$

Em que, T_a é a temperatura do ar e w_s é a velocidade do vento.

A tabela 17 abaixo, mostra os coeficientes u_0 e u_1 utilizados pelo *PVGIS* na equação 3.6.2.3 anterior, considerados por *Huld T. et al* [48].

Tabela 12 - Coeficientes para cálculo da temperatura do módulo fotovoltaico. Fonte: *PVGIS*.

Tecnologia de módulos	Instalação	u_0 W/(°Cm ²)	u_1 Ws/(°Cm ³)
c-Si	Independente	26,9	6.2
	BIPV/BAPV	20.0	3.2
Cl(G)S	Independente	22,64	3.6
	BIPV/BAPV	20.0	2.0
CdTe	Independente	23,37	5,44
	BIPV/BAPV	20.0	3.2

O *PVGIS*, tem ferramentas que permitem a exportação automática de dados para o *EXCEL*, através da programação de macros. Este foi o método utilizado para automatizar a importação de dados no período em análise.

4

ESTUDO DA RADIAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O painel utilizado para obtenção dos resultados, foi o descrito no capítulo anterior sendo um painel contemplado para instalação, em que foi avaliado o seu desempenho de produção tendo o respectivo painel estado a produzir energia com uma orientação a Sul (0°) e com uma inclinação de 20° .

A obtenção dos dados de produção energia fotovoltaica pelo painel em estudo foi realizada no dia 13 de setembro de 2024, em que foram utilizados equipamentos de medição de radiação solar, equipamentos de medição de temperatura e velocidade do vento e equipamento de medição e análise de rede, nomeadamente três piranômetros para medir a radiação solar incidente no plano horizontal, no plano do painel (20°), e a radiação difusa no plano do painel, bem como temperatura ambiente, temperaturas em diferentes pontos da superfície de incidência solar do painel, na superfície interior, e ainda a velocidade do vento. Estes equipamentos utilizados, foram anteriormente descritos nos capítulos 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4 e 3.4.6.

Esses mesmo dados, foram utilizados para se poder verificar qual a radiação solar mínima necessária incidente na superfície do painel, não só para que o mesmo iniciasse a sua produção de energia elétrica, mas também para quando o mesmo deixasse de produzir.

Foi ainda possível verificar qual a consequência de haver sombreamento solar na superfície de incidência solar do painel pela envolvente, com recurso a uma objetiva de amplitude de 180° , fotografia olho de peixe, utilizando uma máquina fotográfica *SAMSUNG NX MINI*, com sensor de $1''$ e lente *FUJINON FISH EYE 1:1.8/2.7mm*.

Os dados obtidos da Estação Meteorológica da Universidade do Algarve, *EPPLEY*, e da plataforma online *PVGIS*, foram analisados com uma data cronológica de 2010 a 2020, de forma que se pudesse observar a existência de uma concordância entre os mesmos, e se tentar perceber com auxílio do desvio padrão dos mesmos, se os dados da plataforma *PVGIS* são viáveis para futuras consultas por forma a elaborar projetos de instalação de sistemas fotovoltaicos.

Para a realização da validação do modelo numérico utilizado, foram utilizados os dados obtidos na análise do painel, bem como dados retirados da plataforma *PVGIS* correspondentes ao respetivo dia de simulação, comparando com alguns anos de melhor radiação solar entre 2010 e 2020.

A análise de todos estes dados, foi realizada com recurso ao software *Microsoft EXCEL* com folhas de análise de dados, programadas para obtenção de dados online, bem como programadas com modelos numéricos, sejam eles apenas de conversão de inclinação ou orientação solar, sejam modelos numéricos totalmente empíricos tendo como base a radiação solar extraterrestre à entrada da nossa atmosfera.

Ao se compararem os resultados em análise chegou-se à validação, tanto do modelo matemático, como da plataforma *PVGIS*, podendo assim ser utilizado qualquer um dos dois para projetos futuros de dimensionamento e instalação de sistemas de produção de energia fotovoltaica, como se demonstra com os valores apresentados em tabelas e gráficos seguintes.

No gráfico 15, abaixo, observa-se a média da radiação solar no plano horizontal para o mês de setembro entre os anos de 2010 e 2020, tendo como base de análise os dados obtidos na estação meteorológica da Universidade do Algarve da marca *EPPLEY* e os dados obtidos na plataforma online *PVGIS*.

Foi também representado o desvio padrão para assim se poder analisar a confiança dos resultados obtidos no modelo numérico.

Observando o respetivo gráfico, consegue-se verificar que os desvio padrão, mesmo nos pontos com uma menor coincidência, se intercetam. Embora exista um valor elevado para o desvio padrão, em termos médios, os valores estimados pela plataforma *PVGIS* aproximam os valores registados pela estação meteorológica.

Apesar de se exemplificar com o gráfico 15 abaixo, foram criados e analisados todos os meses do ano da mesma forma, os quais podem ser consultados no capítulo Anexos, subcapítulo A.1.

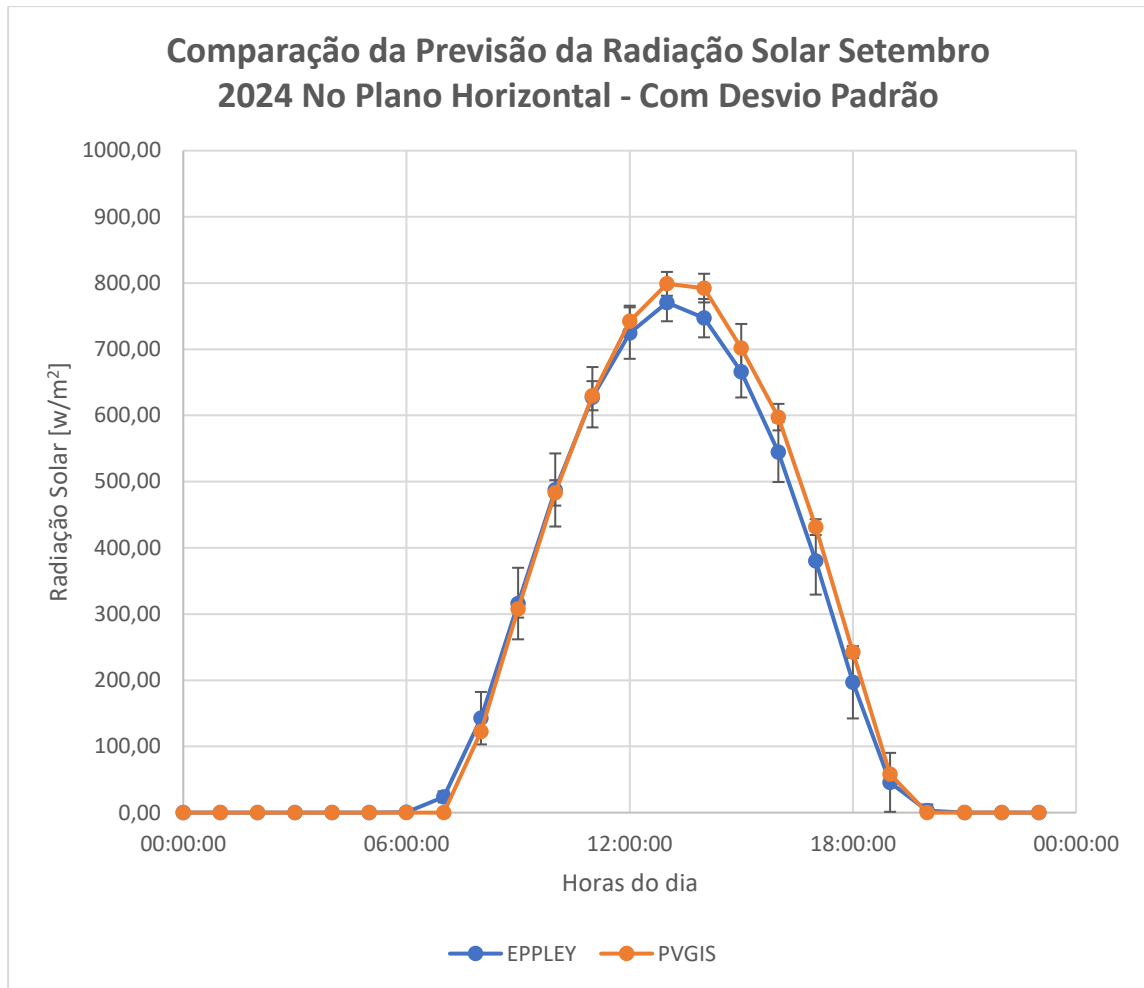


Gráfico 15 – Previsão da radiação solar para o mês de setembro de 2024 com base na radiação média entre 2013 e 2023, da análise de dados obtidos pelo EPPLEY e pelo PVGIS, e com o respetivo desvio padrão

No gráfico 16, abaixo, observa-se a previsão de radiação solar no plano horizontal para o dia 15 de setembro de 2024, tendo como base de análise os dados obtidos na estação meteorológica da Universidade do Algarve da marca *EPPLEY* e os dados obtidos na plataforma online *PVGIS*.

Para a elaboração do respetivo gráfico, foi efetuada uma média da radiação solar no plano horizontal dos dias 15 de setembro entre os anos de 2010 e 2020, bem como a criação do respetivo desvio padrão, e assim se poder analisar se as respetivas linhas médias de cada plataforma de dados se enquadravam dentro do desvio padrão uma da outra, de forma a se poder aceitar como viável e credível os futuros projetos que possam ser baseados em análises médias.

Observando o respetivo gráfico, consegue-se verificar que os desvio padrão, mesmo nos pontos com uma menor coincidência, se intercetam.

Apesar de se exemplificar com o gráfico 16 abaixo, foram criados e analisados todos os dias 15 dos meses do ano da mesma forma, os quais podem ser consultados no capítulo Anexos, subcapítulo A.2.

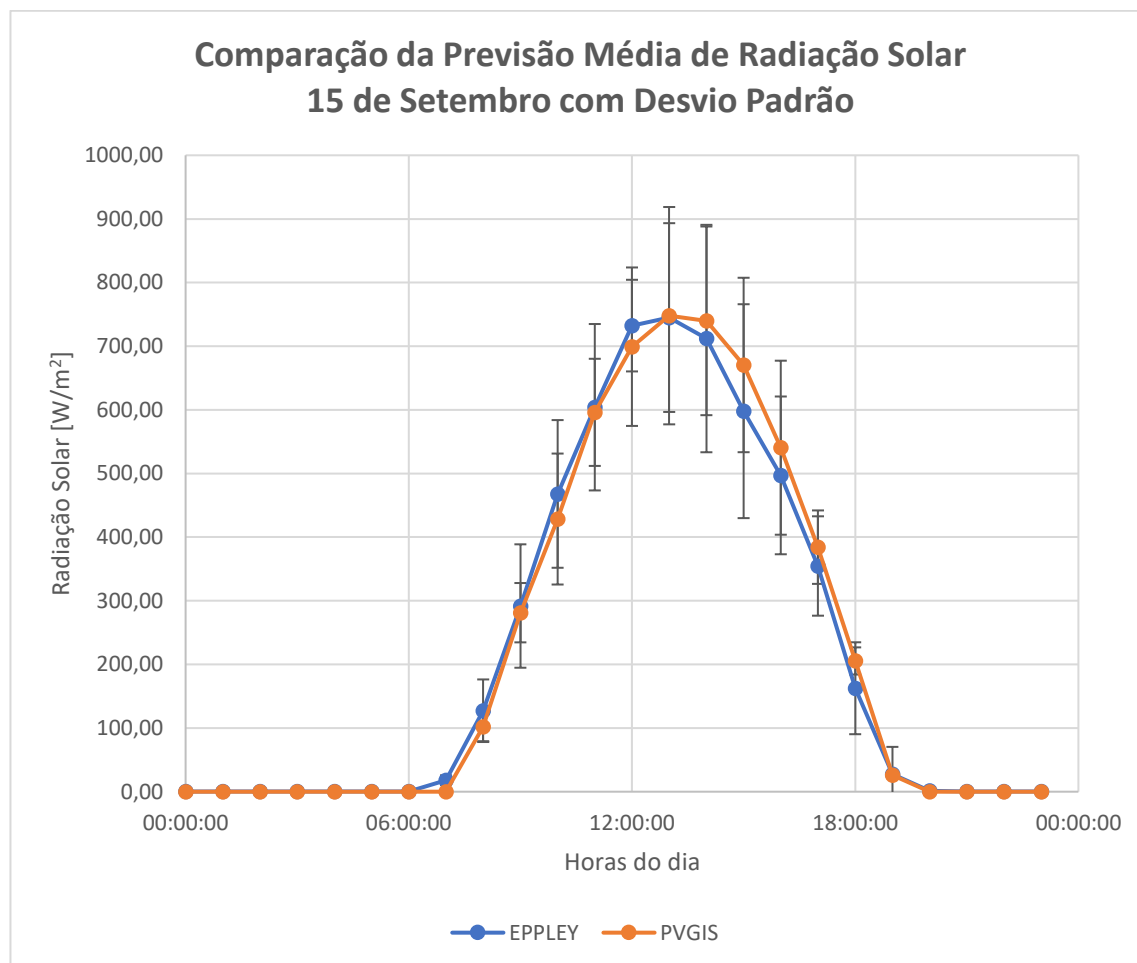


Gráfico 16 – Previsão da radiação solar para o dia 15 de setembro de 2024 com base na radiação média entre 2013 e 2023, da análise de dados obtidos pelo EPPLEY e pelo PVGIS, e com o respectivo desvio padrão

O gráfico 17, seguinte, diz respeito ao dia de análise de produção do painel fotovoltaico, e que compara os dados fornecidos pela plataforma online *PVGIS* com a radiação solar medida com recurso ao piranómetro e com a radiação solar calculada através de modelo numérico.

O que se pode observar pelo gráfico, é que apesar de existirem algumas ligeiras diferenças entre as radiações, todas elas têm basicamente o mesmo comportamento no respetivo tempo comum.

Observa-se uma diferença maior entre a linha da plataforma *PVGIS* e as linhas da radiação medida e da radiação calculada, possivelmente por no satélite do *PVGIS* poder ter aparecido alguma nebulosidade no momento de obtenção de dados pelo mesmo. No entanto, no compitio geral, as três linhas de radiação solar no plano horizontal, andam muito idênticas

ao longo do tempo. Verifica-se ainda o efeito do sombreamento até às 9:55 horas. No período seguinte o modelo numérico acompanha de perto a medição laboratorial realizada, sendo esta afetada pontualmente por alguma nebulosidade. O ensaio laboratorial terminou pelas 17:20 horas.

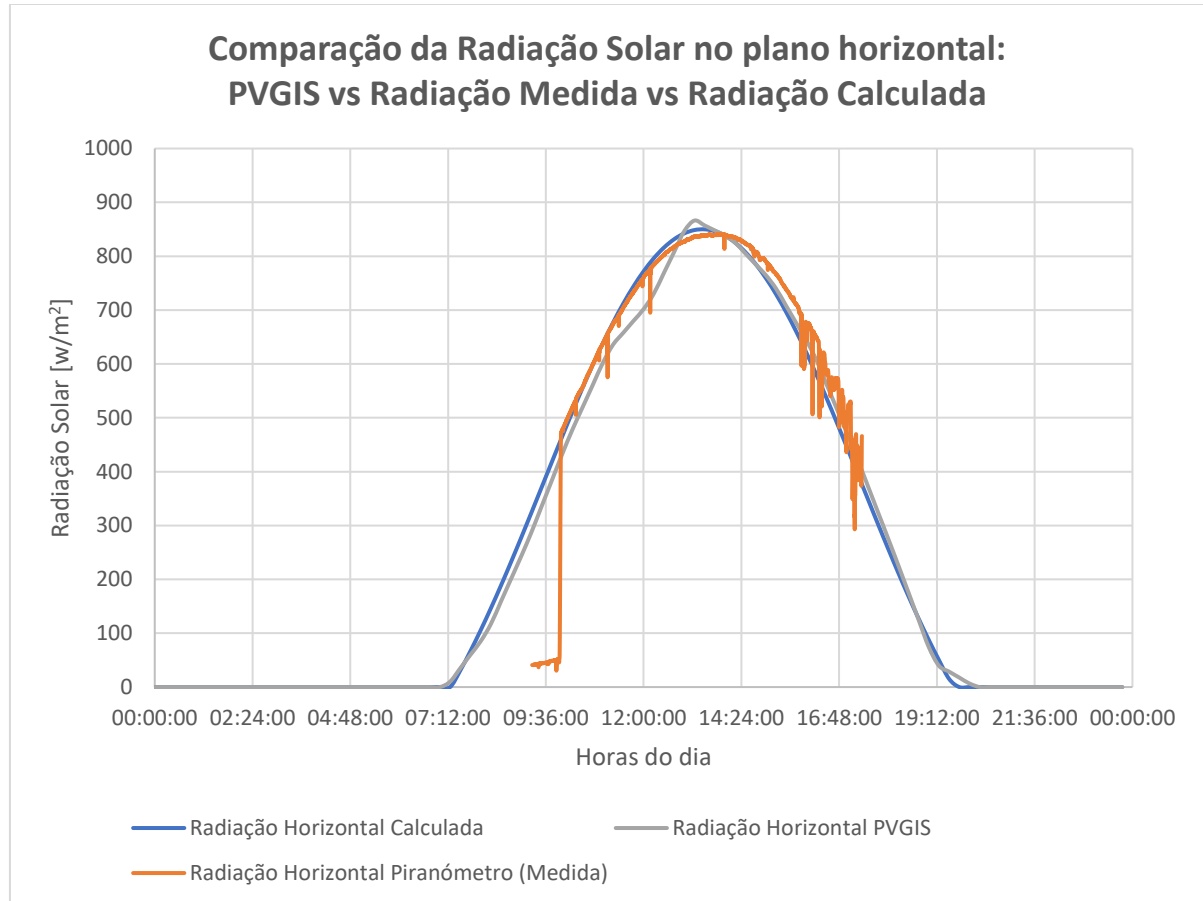


Gráfico 17 – Comparação da radiação solar no plano horizontal do painel fotovoltaico entre PVGIS vs Radiação Medida vs Radiação Calculada Empiricamente, para o dia 13 de setembro de 2023

No gráfico 18, abaixo, ilustra a comparação entre a radiação solar incidente medida no plano horizontal, a radiação solar incidente medida no plano do painel com 20° de inclinação, a radiação solar incidente no plano do painel com inclinação de 20° calculada através da conversão da medição da radiação no plano horizontal, e a radiação solar incidente no plano do painel com inclinação de 20°, sendo esta última calculada empiricamente sem recurso a dados obtidos, tenham sido através de medição ou através de plataformas online ou outras.

Pode-se observar que todas as linhas de radiação solar incidente no plano com 20° de inclinação se comportam basicamente da mesma forma, havendo muito poucas diferenças entre elas.

Constata-se ainda que a linha de radiação solar medida no plano horizontal, tem uma maior diferença com as outras linhas à medida que o Sol sobe em altura. Esta situação já seria de esperar, pois a inclinação do painel em relação ao sol faz com que haja maior incidência de

radiação no plano do painel, havendo assim um maior aproveitamento da radiação solar incidente para uma maior produção de energia fotovoltaica.

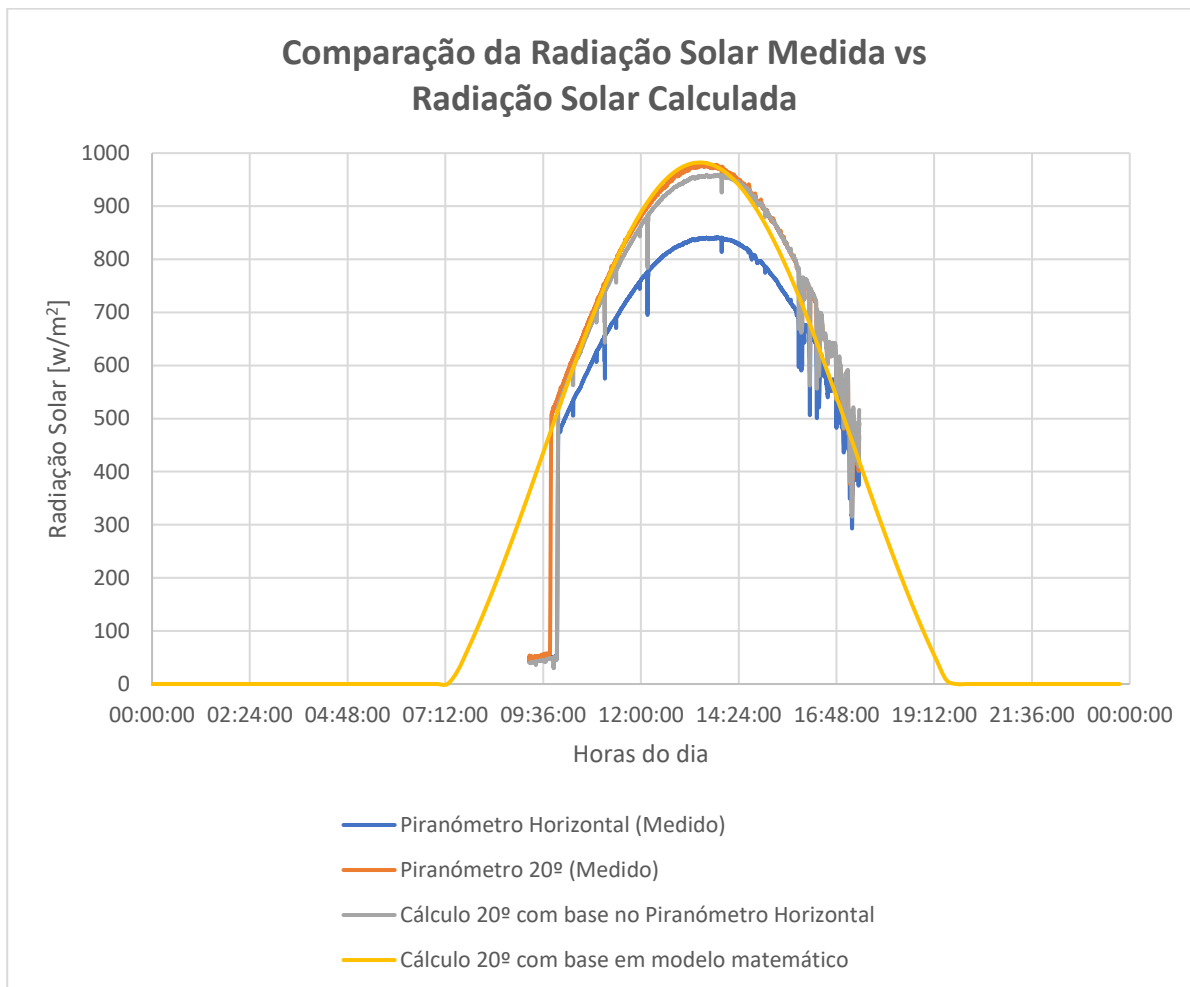


Gráfico 18 – Comparação da radiação solar entre Radiação Medida e a Radiação Calculada, para o dia 13 de setembro de 2023

Analisando o gráfico 19, seguinte, que ilustra a comparação entre a produção fotovoltaica medida e a produção fotovoltaica calculada pelo modelo numérico.

Constata-se que apesar de existirem algumas diferenças, as mesmas não são significativas, inclusive que a produção medida corresponde a um valor mais elevado do que a produção calculada.

Neste aspeto é sempre mais benéfico para um dimensionamento de instalação fotovoltaica, visto haver a hipótese de maior produção fotovoltaica real do que calculada.

Os resultados obtidos são relativos ao funcionamento de metade do painel fotovoltaico em questão, pelo motivo de o micro inversor utilizado não conseguir receber a totalidade da energia elétrica produzida pelo painel fotovoltaico. Portanto, para se saber a totalidade da produção de energia elétrica fotovoltaica total, ter-se-á de multiplicar por dois.

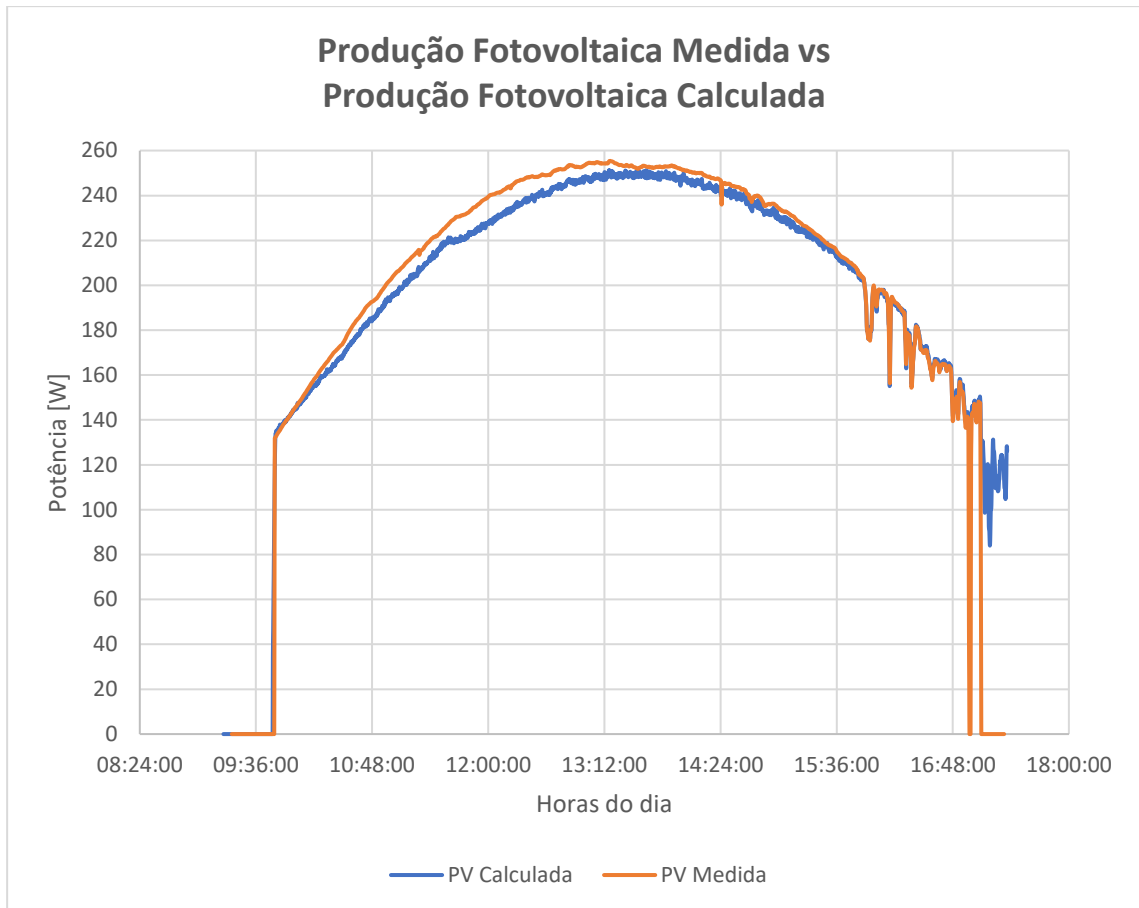


Gráfico 19 – Comparação entre a Produção Fotovoltaica Medida e a Produção Fotovoltaica Calculada Empiricamente, para o dia 13 de setembro de 2023

As equações descritas no subcapítulo 3.2.3. acima, tiveram de ser resolvidas iterativamente pelo que se utilizou o software *EES*.

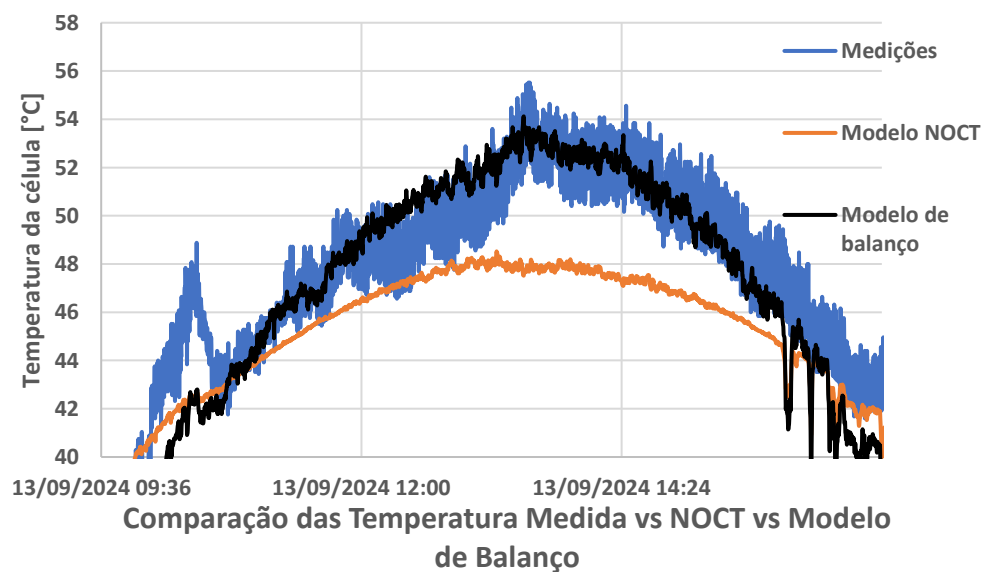


Gráfico 20 – Temperatura de funcionamento da célula, para o dia 13 de setembro de 2023

Através do gráfico 20, pode ser verificado que existe uma concordância entre as temperaturas medidas e calculadas através do modelo de balanço, mas que existe uma maior diferença com o modelo *NOCT*, podendo esta última situação dever-se ao facto de o modelo *NOCT* ser realizado em laboratório, com condições atmosféricas muito estáveis e de algum modo difíceis de igualar na realidade. No entanto, e não menosprezando nenhum dos modelos, pode-se chegar à validação dos modelos utilizados visto que todos se comportam da mesma forma, mas afetados pela temperatura como se verifica no Gráfico 21.

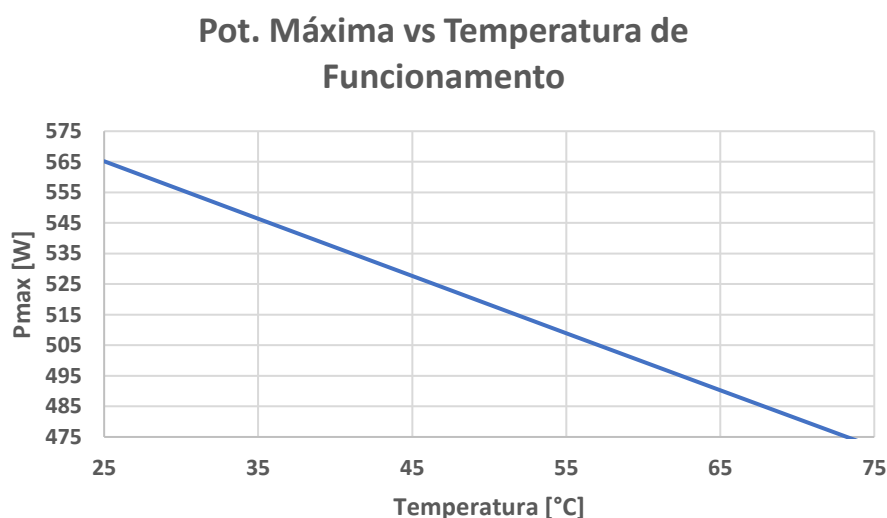


Gráfico 21 – Curva de potência máxima do painel fotovoltaico em relação à temperatura da célula

No gráfico 21 acima, pode ser visto o comportamento do painel fotovoltaico em relação à sua produção de potência máxima sendo a mesma afetada pelo aumento de temperatura da célula.

Ao se analisar este gráfico 21 em conjunto com o gráfico 20 da temperatura da célula, o gráfico 19 da produção fotovoltaica e o gráfico 18 da radiação solar, verifica-se que os dados estão todos de acordo, pois consegue-se verificar que o ponto de produção máxima do painel fotovoltaico é atingido na hora de maior radiação solar pelas cerca de 13:15 pelo gráfico 16, onde também é atingido o ponto de temperatura mais elevado de cerca de 55,7°C no gráfico 20, e que corresponde a cerca de 505 Wp (2x252Wp) pelas 13:12 no gráfico 19, e que vai de encontro ao gráfico 21.

4.1 MODELAÇÃO DA PRODUÇÃO DO *MERCADO DE FARO*

Para a modelação da produção fotovoltaica do *Mercado de Faro*, foram utilizadas as mesmas equações e o mesmo modelo numérico, utilizados pelo *Projeto ACCES4ALL* descrito no subcapítulo 3.2.1, com as equações enunciadas no mesmo, as quais, para modelar a produção fotovoltaica, foram inseridas no *EXCEL* em conjunto com os dados da radiação solar global, radiação solar incidente no plano horizontal (180°), radiação solar difusa, temperatura do ar e velocidade do ar, do ano de 2020, inserindo também a orientação desejada e a inclinação de instalação dos painéis fotovoltaicos, bem como os dados relativos ao sombreamento da envolvente local, dando lugar aos gráficos que se apresentam em seguida, e outros inseridos no capítulo Anexos, subcapítulos A.1 (25° SW) e A.2 (0° S).

Com vista à obtenção do sombreamento da envolvente local, recorreu-se a fotografias, denominadas de “olho de peixe”, que depois foram convertidas em panorama de 360° como ilustrado na figura 49 abaixo, em várias zonas da cobertura do edifício do *Mercado de Faro*, por forma a seccionar da melhor forma a montagem e ligações dos painéis fotovoltaicos, por forma a reduzir ao máximo o efeito derivado do sombreamento nos respetivos painéis fotovoltaicos.

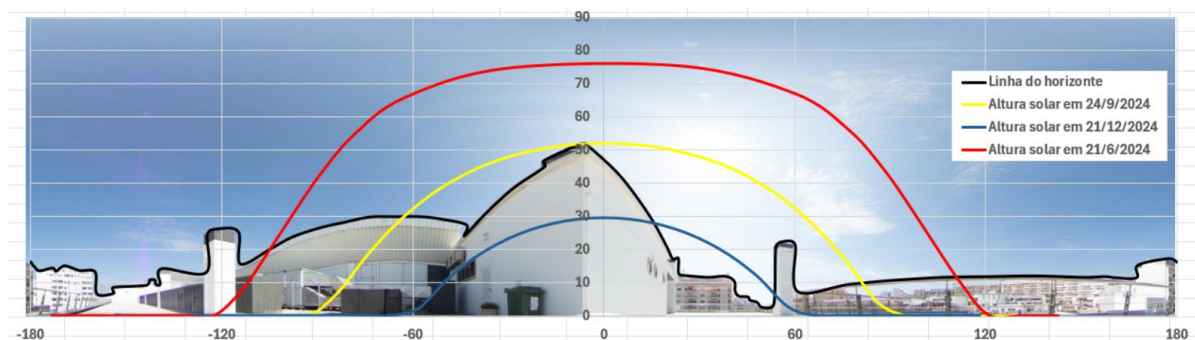


Figura 49 – Fotografia “Olho de Peixe” da zona 1 do Mercado de Faro

O gráfico 22 seguinte, demonstra a comparação da previsão de produção fotovoltaica para o ano de 2024, através de modelação numérica, com e sem sombreamento da envolvente local e para a orientação de 0° S e orientação alinhada com o edifício *Mercado de Faro*, de 25° SW.

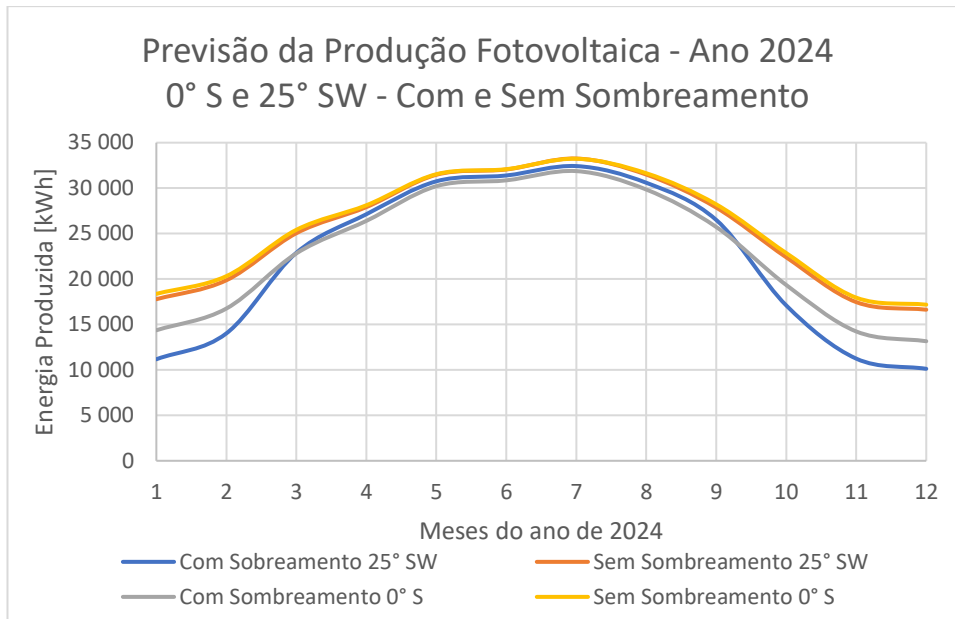


Gráfico 22 - Comparação da previsão da produção fotovoltaica com e sem sombreamento da envolvente local, para o ano de 2024, para orientação de 0° S e de 25° SW em concordância com a orientação do edifício.

No gráfico 23 seguinte, apresenta-se uma comparação da previsão de produção fotovoltaica com e sem sombreamento da envolvente local, com recurso a modelação numérica, para o dia 13 de setembro tomado como exemplo, pois foi o mesmo dia da simulação de produção de energia fotovoltaica pelo painel utilizado no presente estudo, com orientação alinhada com o edifício em questão a 25° SW.

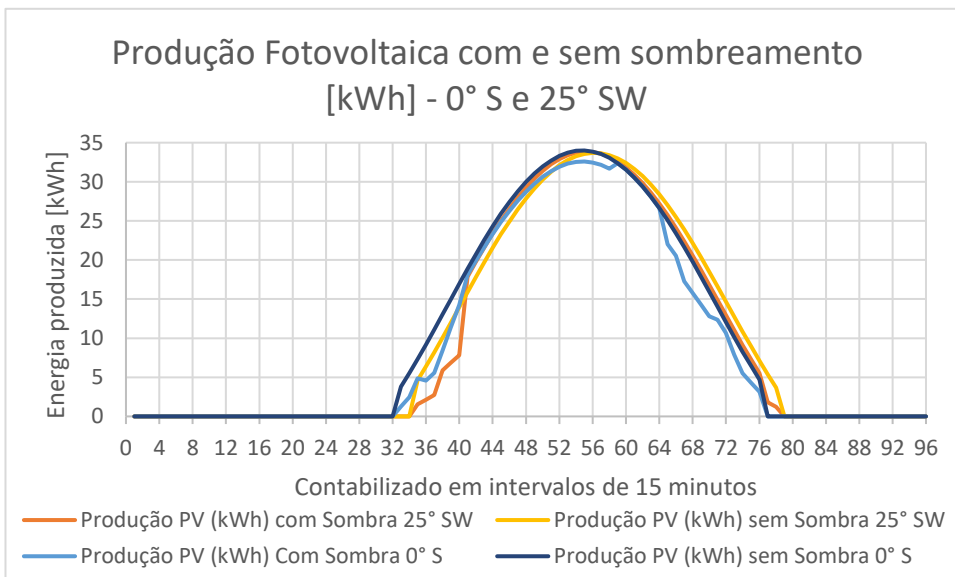


Gráfico 23 - Modelação numérica comparativa da produção fotovoltaica para o dia 13 de setembro de 2024, com e sem fator de sombreamento da envolvente local, e nas orientações de 0° S e 25° SW em concordância com a orientação do edifício.

No gráfico 24 abaixo, apresenta-se a previsão da produção fotovoltaica com e sem sombreamento da envolvente local, através de modelação numérica, para o dia 13 de setembro, bem como o consumo de energia para esse mesmo dia, dando lugar a um excedente de produção de energia fotovoltaica que pode ser vista no mesmo gráfico, excedente esse que pode ser vendido à rede.

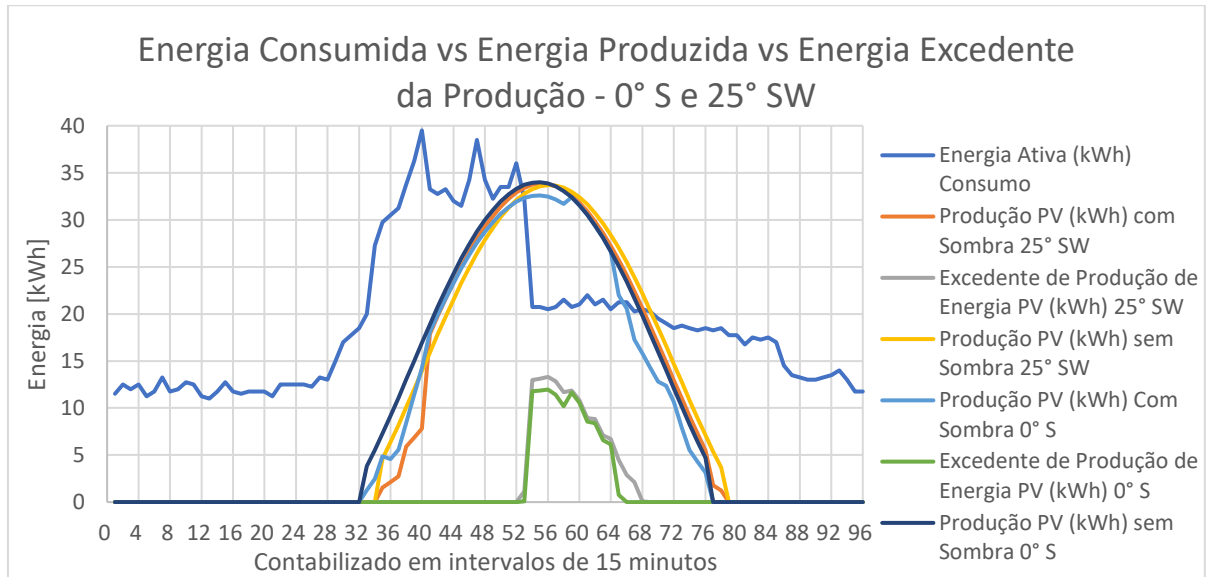


Gráfico 24 - Modelação numérica da produção fotovoltaica para o dia 13 de setembro de 2024, comparando com o consumo de energia, dando origem a um excedente de produção fotovoltaica, com e sem o fator de sombreamento da envolvente local, orientação de 0°S e 25°SW.

No seguinte gráfico 25, abaixo, apresenta-se a previsão da produção fotovoltaica, pelo método de modelação numérica, para o mês de setembro, com contabilização do sombreamento da envolvente local.

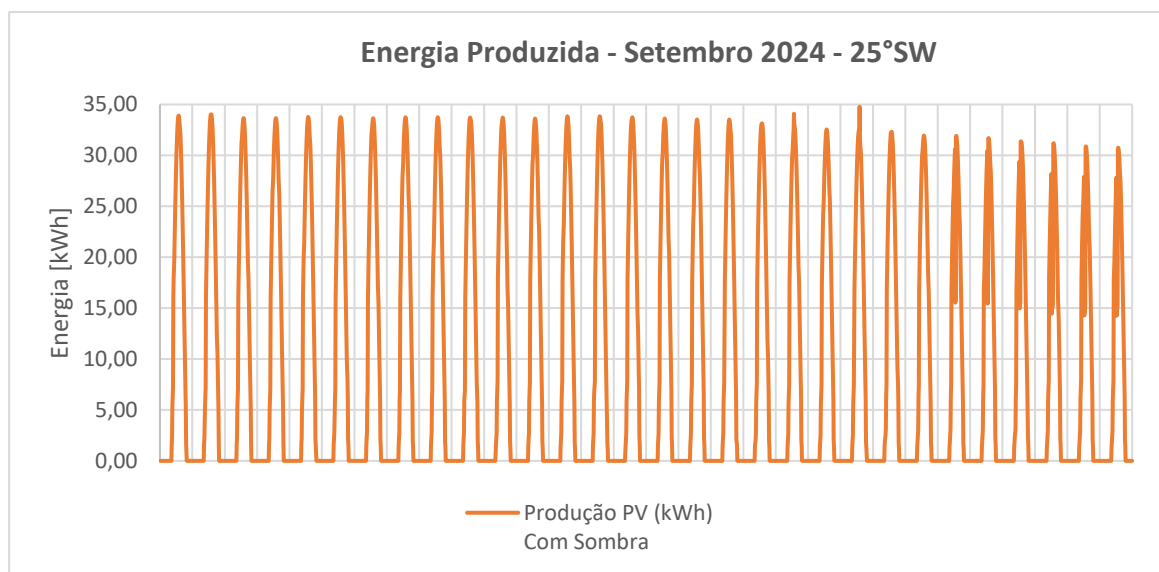


Gráfico 25 - Modelação da produção fotovoltaica para o mês de setembro de 2024, contabilizando o fator de sombreamento da envolvente local.

4.2 RESULTADOS DA MODELAÇÃO PARA O MERCADO DE FARO

Os resultados abaixo apresentados foram obtidos pelos modelos numéricos acima validados.

Com relação aos restantes dados obtidos e recolhidos pelas plataformas *PVGIS* e *EPPLEY*, os mesmos ao serem analisados, criadas previsões com base nesses dados recolhidos, quando comparados com as leituras medidas, mostram que se podem utilizar tanto a plataforma *PVGIS*, como o modelo numérico utilizado, como ainda previsões com base nas plataformas *PVGIS* e *EPPLEY*, pois com recurso à elaboração de tabelas e gráficos com desvio padrão, pelo facto de se verificar que as diferenças existentes não são significativas, inclusive em que as medições deram valores ligeiramente melhores do que os valores calculados empiricamente, as previsões calculadas com base nos dados recolhidos, e nos dados recolhidos nas respetivas plataformas para o respetivo dia, são todos fiáveis e serviram inclusive para se dar como validado o modelo numérico que se utilizou, por forma a se poder realizar dimensionamento de projetos de instalação fotovoltaica com maior precisão.

Sabe-se, no entanto, que se houver sombreamento do painel fotovoltaico, e se o mesmo afetar algumas células, irá afetar pela negativa a produção fotovoltaica em metade caso o sombreamento incida sobre alguma das metades, superior ou inferior, ou mesmo totalmente caso o sombreamento incida sobre células das metades inferior e superior. Estas duas hipóteses distintas, podem suceder devido ao facto deste tipo de painel fotovoltaico se comportar como dois painéis fotovoltaicos em paralelo.

Desta forma foi possível realizar um estudo com maior pormenor no que diz respeito à energia elétrica poupada pelo cliente *AMBIFARO*, gestor do edifício *Mercado de Faro*, reduzindo assim os seus custos com a compra de energia elétrica ao fornecedor *E-REDES*, dando ao cliente uma estimativa do tempo de retorno do investimento realizado.

Para a realização do estudo com sombreamento, foram utilizadas as fotografias “olho de peixe” e convertidas em panorama de 360°, descritas anteriormente, nas zonas da cobertura do edifício por forma a seccionar a área de instalação em 7 zonas distintas, sendo 6 afetadas pelo sombreamento e uma zona em que não é afetada, para assim se poder proceder ao projeto de ligação dos painéis fotovoltaicos mais críticos entre eles em *strings* de 15 painéis, em 6 conexões em cada inversor, o que faz um total de 90 painéis por inversor, num total de 270 painéis em três inversores. Este seccionamento e ligação das *strings*, foram efetuadas por forma haver um mínimo de perda de energia produzida devido ao sombreamento local incidente nos painéis.

O referido seccionamento por zonas pode ser visto na figura 50 abaixo, a seguir descreve-se as zonas de instalação dos painéis, e qual a zona a ligar ao seu inversor.

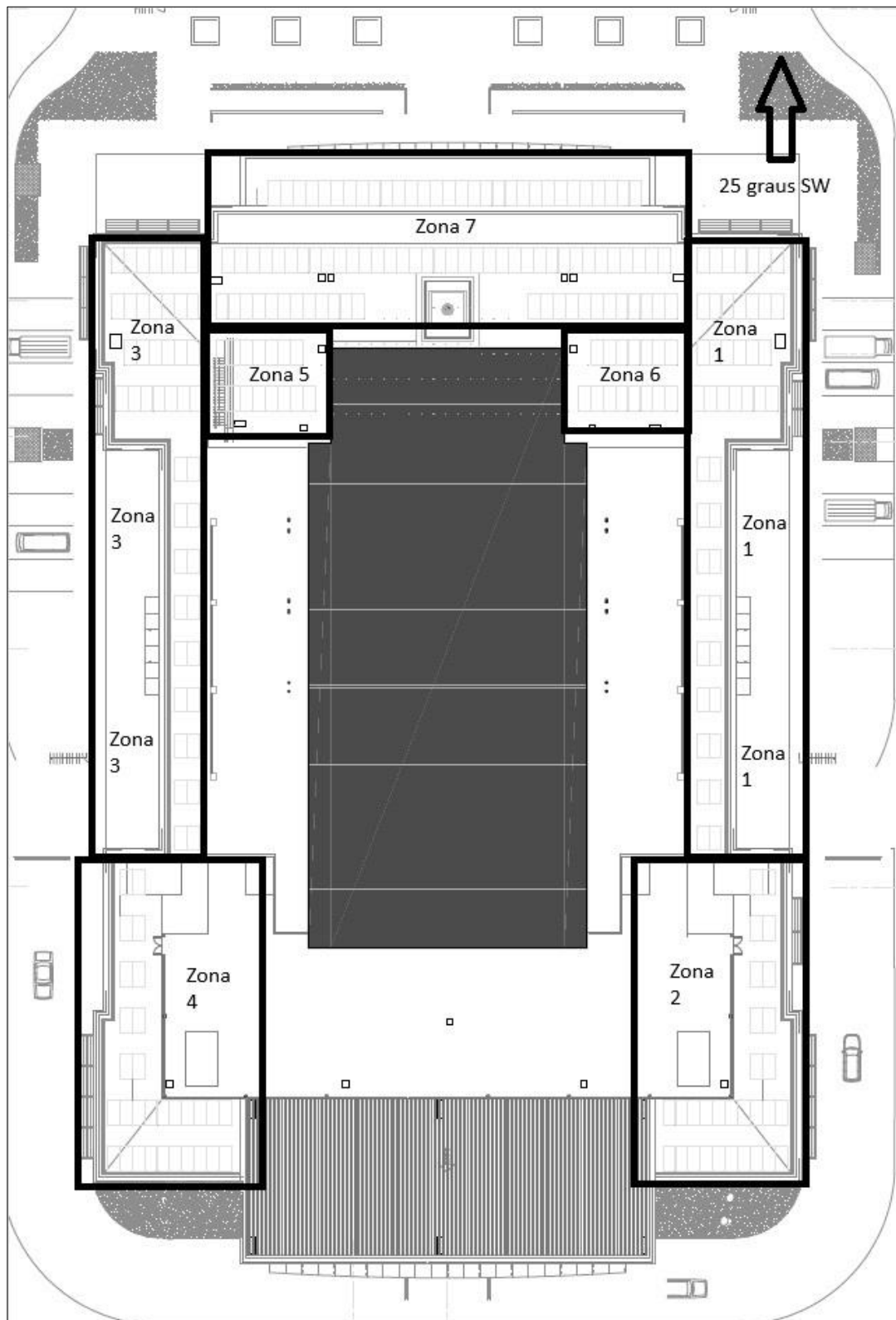


Figura 50 – Planta de instalação dos painéis fotovoltaicos na cobertura do edifício Mercado de Faro, com indicação de zonas de instalação – Orientação dos painéis fotovoltaicos a 25° SW, em concordância com a orientação do edifício.

Descrição das zonas de instalação:

- Zona 1 – 3 *strings* de 15 painéis fotovoltaicos cada, num total de 45 painéis;
- Zona 2 – 2 *strings* de 15 painéis fotovoltaicos cada, num total de 30 painéis;
- Zona 3 – 3 *strings* de 15 painéis fotovoltaicos cada, num total de 45 painéis;
- Zona 4 – 2 *strings* de 15 painéis fotovoltaicos cada, num total de 30 painéis;
- Zona 5 – 1 *string* de 15 painéis fotovoltaicos;
- Zona 6 – 1 *string* de 15 painéis fotovoltaicos;
- Zona 7 – 6 *strings* de 15 painéis fotovoltaicos cada, num total de 90 painéis.

Conexão das zonas aos inversores:

- Inversor 1 (frente) – Zona 7, 90 painéis fotovoltaicos;
- Inversor 2 (Nascente) – Zonas 3, 4 e 5, 90 painéis fotovoltaicos;
- Inversor 3 (Poente) – Zonas 1, 2 e 6, 90 painéis fotovoltaicos.

4.2.1. Comparação de energias consumida, produzida e excedente, com painéis fotovoltaicos instalados a 20° de inclinação com a mesma orientação do edifício, de 25° SW (Sudoeste):

Neste subcapítulo, e após feitas as análises de produção fotovoltaica, pode ver-se no gráfico 26 abaixo, uma comparação das energias, consumida, produzida e excedente, para todos os painéis instalados com 20° de inclinação e com a mesma orientação do edifício de 25° SW, comparando a produção fotovoltaica com e sem sombreamento da envolvente. Os diagramas de carga e energia produzida, referentes a esta orientação, 25° SW, encontram-se no apêndice A.3.

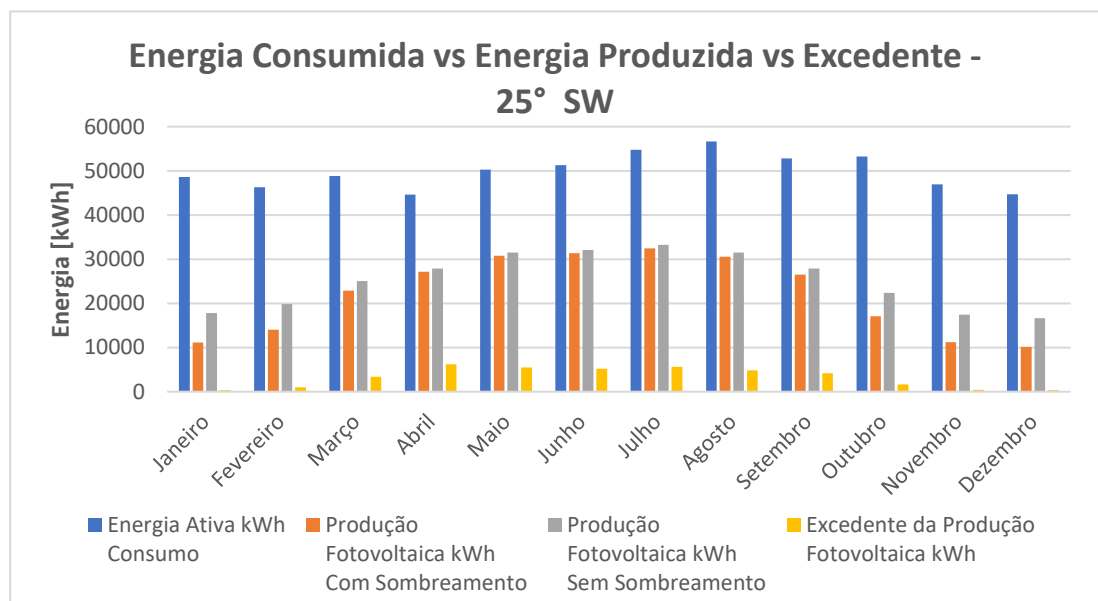


Gráfico 26 – Comparativo entre energia consumida, energia produzida, e excedente de energia produzida, com inclinação de 20° e orientação de 25° SW, igual ao edifício do Mercado de Faro.

4.2.2. Comparação de energias consumida, produzida e excedente, com painéis fotovoltaicos instalados a 20° de inclinação com orientação a Sul, de 0° S (Sul):

Neste subcapítulo, e após feitas as análises de produção fotovoltaica, pode ver-se no gráfico 27 abaixo, uma comparação das energias, consumida, produzida e excedente, para todos os painéis instalados com 20° de inclinação e com orientação de 0° Sul, comparando a produção fotovoltaica com e sem sombreamento da envolvente. Os diagramas de carga referentes a esta orientação, 0° Sul, encontram-se no apêndice A.4.

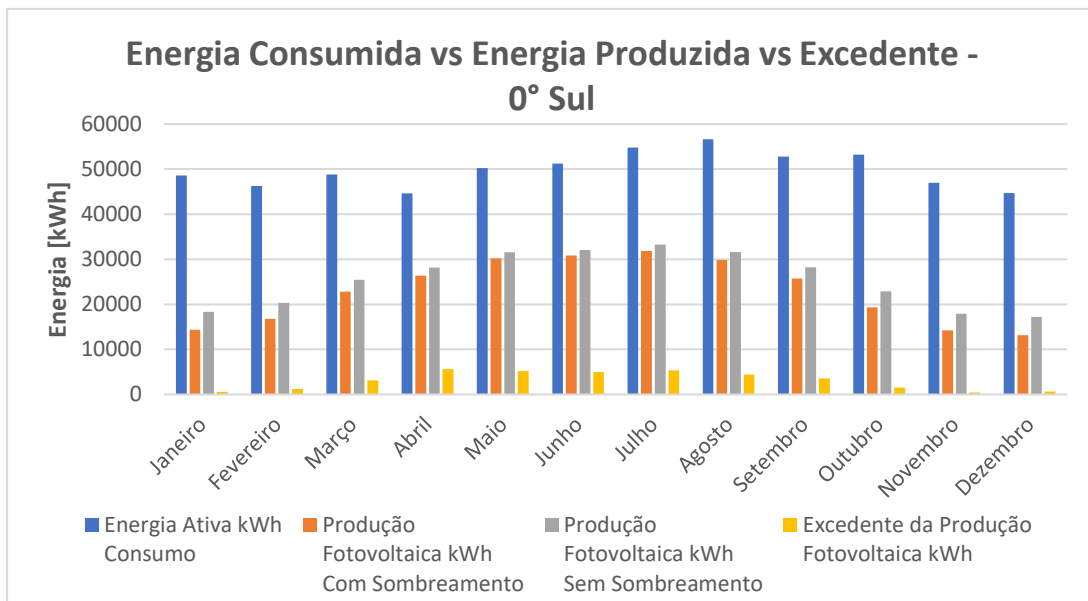


Gráfico 27 – Comparativo entre energia consumida, energia produzida, e excedente de energia produzida, com orientação a Sul, 0° S, e inclinação de 20°..

5

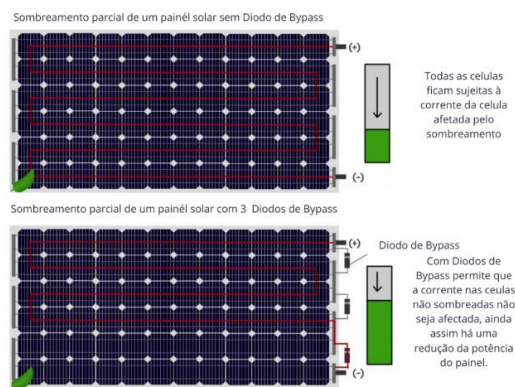
PROJETO DE INSTALAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E INSTALAÇÃO ELÉTRICA

Visto que os módulos, coletores, ou painéis fotovoltaicos, dependem diretamente da luz solar para que possam produzir energia elétrica, houve que se ter em consideração o fator de sombreamento, não só entre os painéis fotovoltaicos, mas também pela envolvente local, para que o mesmo não venha a afetar pela negativa a produção de energia elétrica.

Existem vários tipos de concepção de painéis fotovoltaicos, que dependendo da sua potência, tensão e corrente produzida, têm as suas células montadas em série, ou em série e paralelo em conjunto, tendo estes últimos fileiras de células ligadas em série para que aumentem a tensão produzida, e que por sua vez essas fileiras estão ligadas a outras fileiras em paralelo para que aumentem a corrente produzida. E, por último, em módulos fotovoltaicos com maior potência de produção elétrica, estes terão um maior número de células, sendo a maior parte das vezes o equivalente a dois módulos fotovoltaicos ligados em paralelo entre si, numa mesma estrutura, criando assim um só módulo fotovoltaico.

No caso de haver sombreamento solar em alguma célula montada em série, isto significa que essa fileira de células ligadas em série poderá deixar de funcionar, o que pode levar à não produção de energia elétrica de um módulo fotovoltaico inteiro, ou apenas reduzir a sua produção de energia elétrica, dependendo do tipo de ligações em série e paralelo entre células e respectivas fileiras, ou se essas fileiras têm díodos de *bypass* para que a corrente das células não sombreadas não seja afetada, pois o diodo ao ser polarizado inversamente devido à falta de tensão no respetivo circuito, deixa passar a corrente das outras filas por forma a não cortar na totalidade a produção de potência elétrica, ao mesmo

tempo que reduz o risco de dano(s) na(s) célula(s) afetada(s) pelo sombreamento, como ilustrado na figura 51 abaixo.



Efeito do sombreamento parcial – fonte Imagem : greensarawak.com

Figura 51 - Imagem demonstrativa do efeito de sombreamento parcial no painel fotovoltaico. Fonte: <https://greenpower.pt/hotsop-paineis-solares/>.

Existem equações matemáticas genéricas, às quais se podem recorrer para calcular a distância mínima entre painéis e assim se salvaguardar os mesmos do sombreamento entre eles, em qualquer inclinação solar ao longo do ano.

Devem-se efetuar os cálculos referentes ao, considerado, pior dia do ano, ou seja, no solstício de inverno, em que no hemisfério Norte será o dia 21 de dezembro, e no hemisfério Sul será o dia 21 de junho, como ilustrado na figura 52.

Na prática, aplicando a teoria do sombreamento do horizonte chega-se a um resultado semelhante. O menor ângulo do ano corresponde ao meio-dia solar desse dia, nas outras horas o sol vai mais baixo. Contudo, a análise abaixo é a que geralmente se realiza.

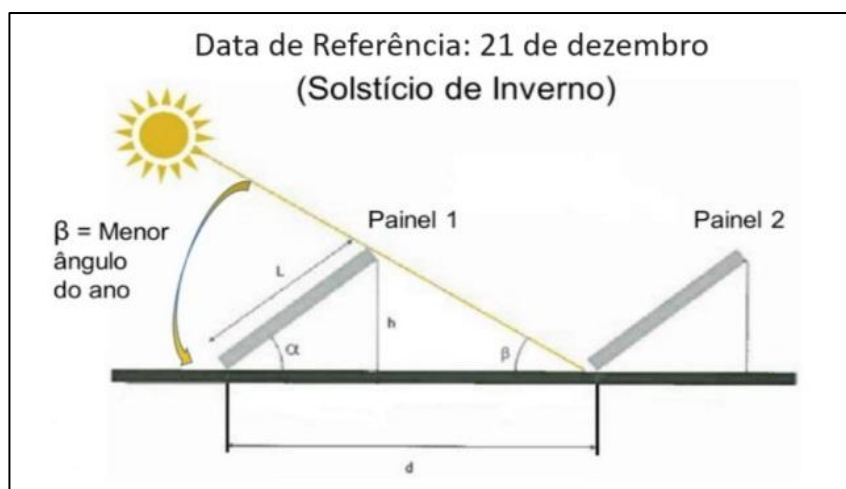


Figura 52 - Ilustração de cálculo da distância entre painéis fotovoltaicos com base no dia de menor ângulo de elevação do ano. Fonte: <https://www.passeidireto.com/arquivo/81882191/planilha-de-calculo-da-distancia-minima-entre-paineis-para-evitar-sombreamento>; adaptado para o hemisfério Norte.

As equações 5.1 e 5.2 seguintes, com base nas referências [50] e [51], determinam a distância mínima entre painéis, sem considerar o ângulo de elevação do sol, portanto são equações mais genéricas com um grau de precisão menor, mas com um coeficiente de segurança maior, logo uma distância maior entre painéis.

$$d = \frac{h}{\tan(61 - lat)} + L \cos \alpha \quad (5.1)$$

$$d = L \times \left[\left(\frac{\text{sen } \alpha}{\tan(61 - lat)} \right) + \cos \alpha \right] \quad (5.2)$$

As equações 5.3 e 5.4 seguintes, com base nas referências [52] e [53], consideram o ângulo de elevação do sol, portanto são equações com um maior grau de precisão, mas com menor coeficiente de segurança, logo uma distância menor entre painéis.

$$d = L \times \frac{\text{sen}(\beta + \alpha)}{\text{sen } \beta} \quad (5.3)$$

$$d = L \times \left[\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right] \quad (5.4)$$

Onde:

- d é a distância entre painéis fotovoltaicos;
- L é o comprimento do painel fotovoltaico;
- h é a altura do painel ao solo consoante a sua inclinação;
- α é o ângulo de inclinação do painel;
- β é ângulo de elevação do sol.

Para se obter o valor do ângulo de elevação do sol, tanto no dia do seu valor mais baixo (21 de dezembro – Solstício de Inverno), bem como no dia do seu valor mais elevado (21 de junho – Solstício de Verão), e assim se poder realizar os respetivos cálculos de distância entre os painéis fotovoltaicos, recorreu-se ao software online *Sun Earth Tools* [48], o qual fornece tabelas, 18 e 19, com diversos ângulos de inclinação solar consoante as diversas horas do respetivo dia em análise, bem como gráficos de ângulo de elevação solar de acordo com a respetivo hora e o ângulo de azimute, figuras 53 e 54.

Tabela 13 - Diversos ângulos solares, barra de luz solar, do dia 21 de dezembro de 2023. Fonte: Sun Earth Tools.

posição do sol	Elevacao	Azimute	latitudes	longitudes
21/12/2023 13:00 GMT-1	29.12°	187.96°	37.0198158° N	7.9287383° W
Crepúsculo	Sunrise	Sunset	Azimute Sunrise	Azimute Sunset
Crepúsculo -0.833°	07:41:05	17:18:16	119.15°	240.84°
Crepúsculo "Civil" -6°	07:12:00	17:47:18	114.93°	245.06°
crepúsculo náutico -12°	06:39:24	18:19:54	110.42°	249.57°
crepúsculo astronômico -18°	06:07:43	18:51:34	106.18°	253.81°
Dia	hh:mm:ss	diff. dd+1	diff. dd-1	Noon
21/12/2023	09:37:11	00:00:00	00:00:04	12:29:40

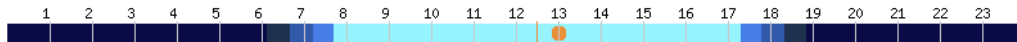


Tabela 14 - Ângulos de elevação do sol e azimute solar nas diversas horas de sol ao longo do dia. Fonte: Sun Earth Tools.

Data:	21/12/2023 GMT-1	
coordenar:	37.0198158, -7.9287383	
local:	37.01981580,-7.92873830	
Hora	Elevacao	Azimute
07:41:05	-0.833°	119.15°
8:00:00	2.41°	122.03°
9:00:00	11.98°	132°
10:00:00	20.03°	143.61°
11:00:00	25.96°	157.1°
12:00:00	29.14°	172.2°
13:00:00	29.12°	187.96°
14:00:00	25.91°	203.05°
15:00:00	19.95°	216.52°
16:00:00	11.88°	228.11°
17:00:00	2.3°	238.07°
17:18:16	-0.833°	240.84°

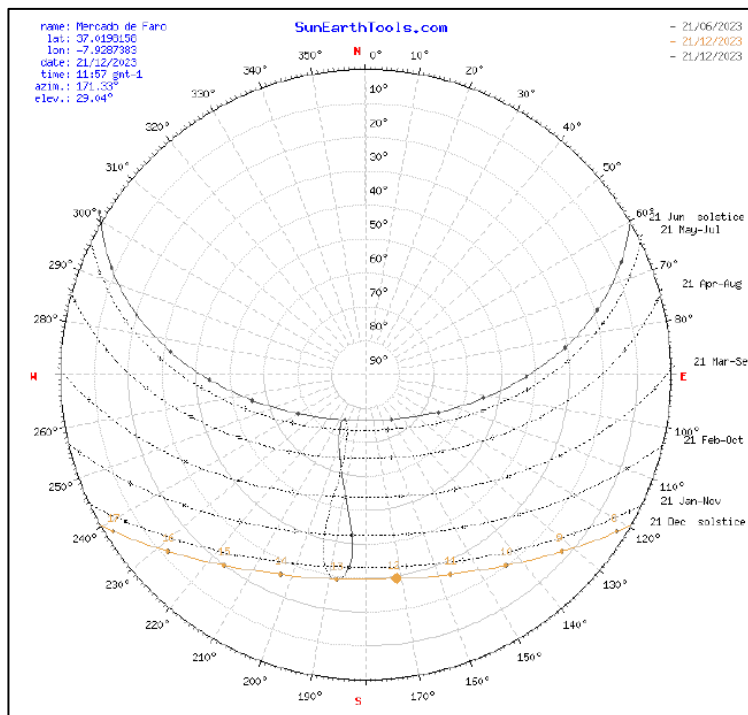


Figura 53 - Esquema de ângulo de elevação solar e azimute solar consoante a hora do dia e nos vários meses do ano, em forma de globo. Fonte: Sun Earth Tools.

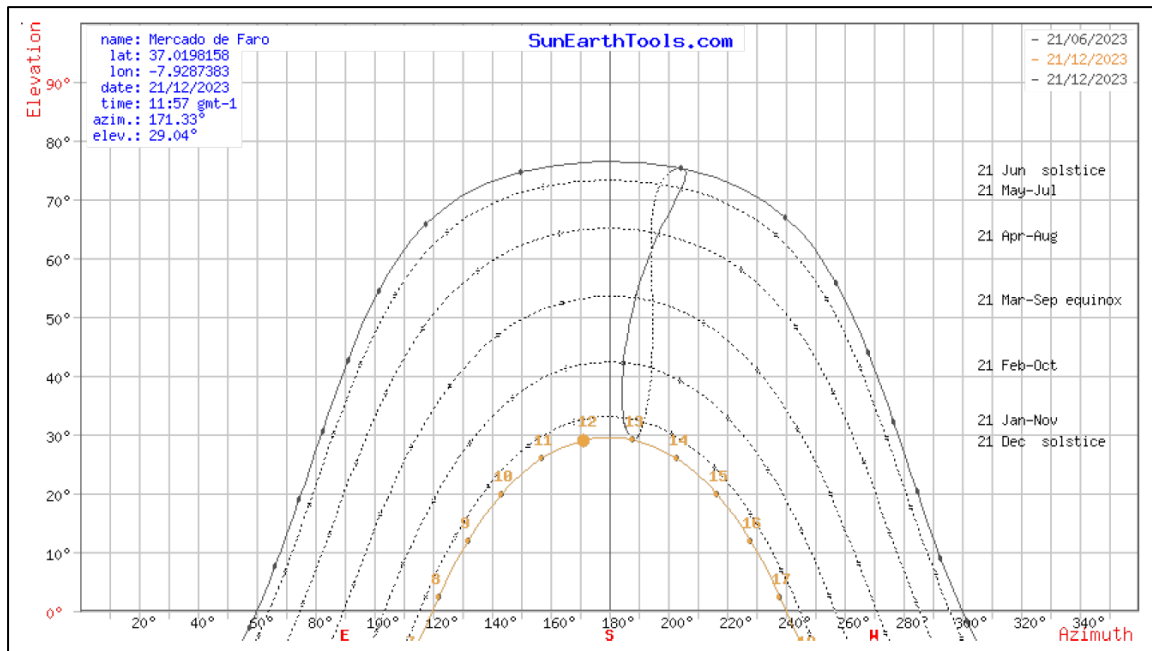


Figura 54 - Esquema de ângulo de elevação solar e azimute solar consoante a hora do dia, nos vários meses do ano, em forma de gráfico. Fonte: Sun Earth Tools.

Este mesmo software, *Sun Earth Tools*, fornece uma imagem demonstrativa do número de horas solares incidentes em determinado local, figura 55 abaixo, para assim se poder ter uma noção dos possíveis sombreamentos existentes pelos edifícios adjacentes, bem como qual a orientação solar que permita aos painéis fotovoltaicos obterem o maior número de horas de radiação solar útil incidente, para que assim se possa orientar os referidos painéis fotovoltaicos bem como orientar a sua inclinação, e obter assim a melhor otimização da instalação.

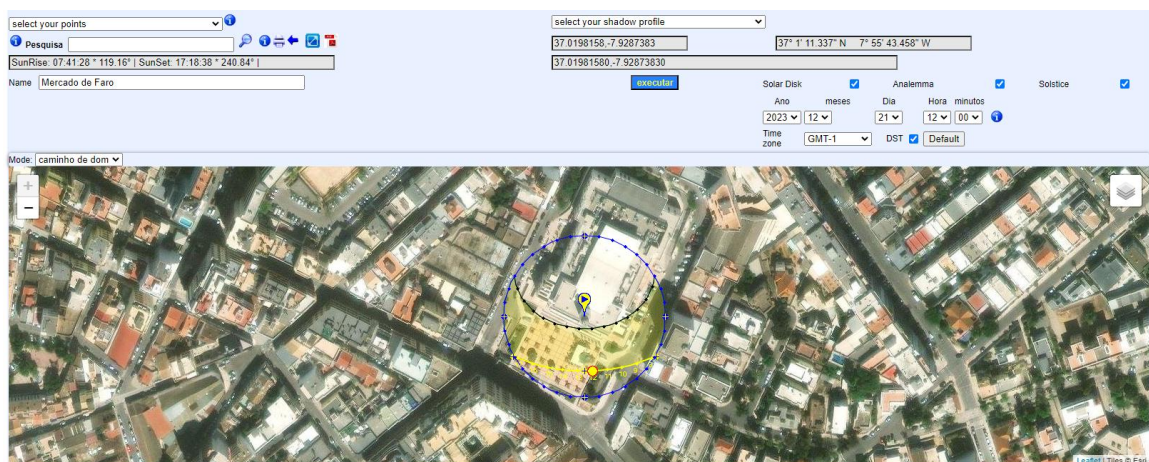


Figura 55 - Imagem da incidência solar no local escolhido, demonstrativa da incidência solar ao longo do dia. Fonte: Sun Earth Tools.

Para se proceder ao projeto de instalação dos painéis fotovoltaicos, e se poder cobrir a necessidade de autoconsumo, tanto para o Inverno, como para o Verão, tem de se ter em conta o ângulo de elevação solar no dia mais desfavorável do ano se efetuar o cálculo da distância mínima entre painéis, consoante também o ângulo de inclinação dos próprios painéis fotovoltaicos, este último consoante a otimização de produção elétrica fotovoltaica no Verão ou Inverno, consoante as necessidades energéticas.

No caso em concreto, tendo como base a distância pré-definida entre os painéis fotovoltaicas no projeto de 4,28 m entre as bases, como se mostra na figura 52 anterior, e se forem utilizadas as equações 5.1 e 5.2 para o cálculo da inclinação dos painéis para o Solstício de Inverno, dá-nos uma inclinação do painel fotovoltaico de até 25°.

Caso se utilizem as equações 5.3 e 5.4, a inclinação do painel fotovoltaico poderia chegar aos 35°.

O estudo do painel fotovoltaico foi realizado com uma inclinação de 20° de forma a privilegiar a produção de energia nos meses de verão com maior altura solar e maior disponibilidade de radiação solar, pelo facto de que a maior carga energética consumida ser durante os meses de verão.

De salientar que parte deste trabalho apresentado, tal como área de implementação e número de painéis a instalar na área disponível, projeto de instalação e ligações elétricas, bem como o orçamento final, foi desenvolvido por mim enquanto colaborador da empresa identificada nos respetivos documentos.

5.1 ÁREA DE IMPLEMENTAÇÃO E PROJETO DOS RESPECTIVOS PAINÉIS FOTOVOLTAICO

A área de implementação e instalação dos painéis fotovoltaicos, será na cobertura do edifício, em zonas sem utilização e que também não são de passagem, tal como se pode ver na figura 56, seguinte, que mostra a planta da cobertura do edifício *Mercado de Faro*.

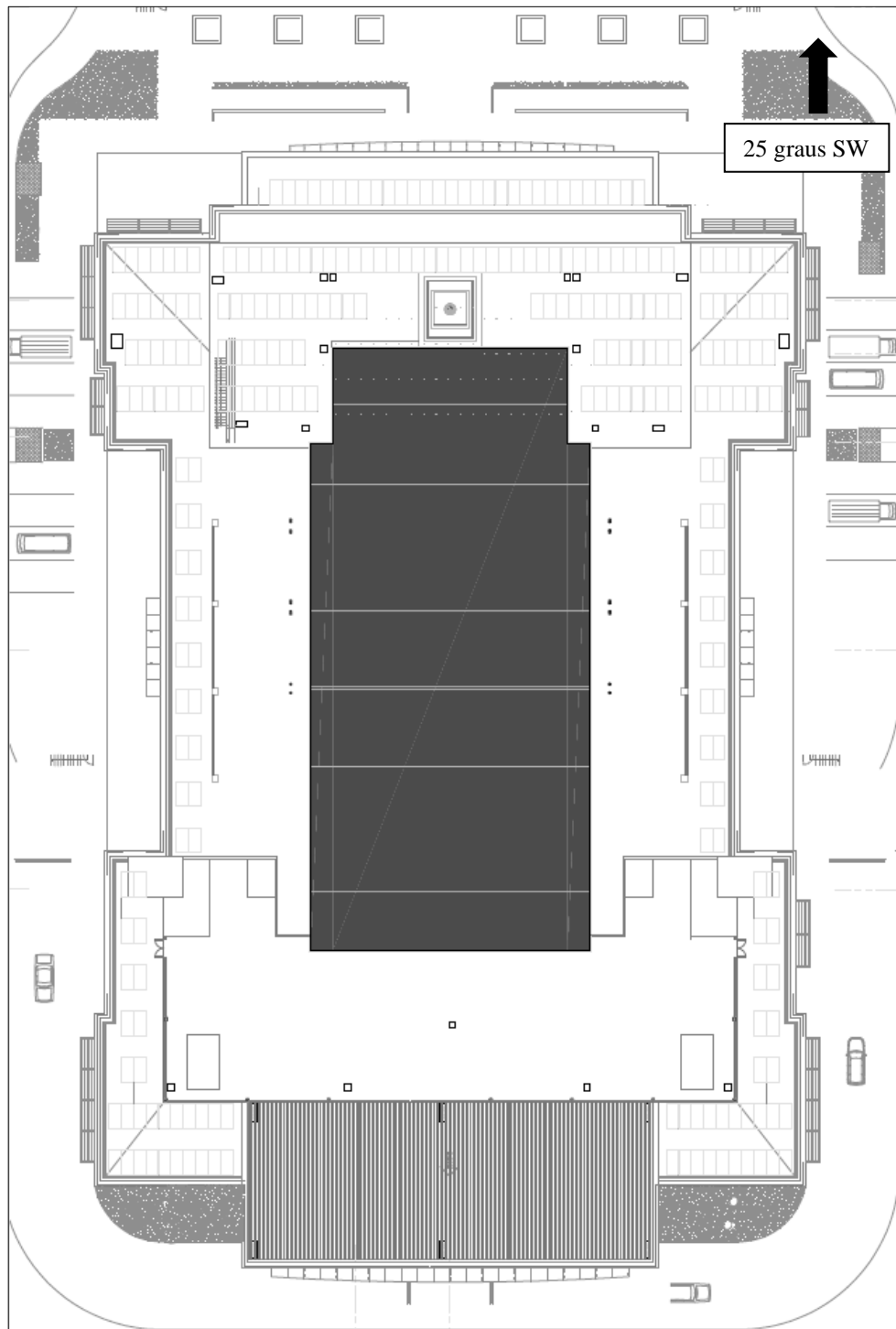


Figura 56 - Planta de instalação dos painéis fotovoltaicos na cobertura do edifício Mercado de Faro com orientação de 25° SW.

O respetivo projeto de instalação elétrica dos painéis fotovoltaicos, é realizado em concordância das especificações dos módulos, painéis, fotovoltaicos com as especificações dos inversores.

Este projeto contempla a montagem de 270 painéis fotovoltaicos de 565 Wp cada um, fazendo um total de 152 550 Wp, na cobertura do edifício denominado de *Mercado de Faro*, em Faro, sendo estes distribuídos por 3 inversores iguais, dividindo o número de painéis de igual forma entre os respetivos inversores, fazendo um total de 90 painéis por cada inversor, bem como a potência entre eles, também de igual forma, ficando 50 850 W de potência para cada inversor.

Visto que cada inversor tem uma potência de 50 000 W de potência nominal, e de 55 000 W de potência máxima, em que a sua tensão nominal de entrada tem de ser de 620 V de corrente contínua *DC*, numa utilização do inversor na sua curva de funcionamento de eficiência máxima segundo o gráfico 28 abaixo, para produzir uma corrente alternada *AC* trifásica de saída de 400 V, teve de se proceder à divisão dos 90 painéis de cada inversor, em fileiras de painéis ligados em série entre eles, por forma a conseguir cumprir com a tensão nominal de entrada de 620 V *DC*, com uma tensão máxima de funcionamento de 1 000 V *DC* e mínima de 200 V *DC*, uma corrente máxima de entrada de 22 A, tendo uma corrente de curto-circuito do *MPPT* de 30 A.

MPPT, *Maximum Power Point Tracker* ou, em português, *Localizador do Ponto de Potência Máxima*, é um equipamento eletrónico que serve para procurar e localizar o ponto de maior potência de um arranjo fotovoltaico, e mantê-lo constante. Está constantemente a monitorizar os parâmetros de entrada, da produção fotovoltaica, ajustando constantemente os mesmos em tempo real para garantir o máximo aproveitamento da energia produzida, de forma que haja o máximo de conversão de corrente contínua para corrente alternada.

Estes requisitos levaram a uma montagem organizada em 6 fileiras de 15 painéis fotovoltaicos em série, cada fileira ligada a um *MPPT* interno do inversor, em que cada inversor tem 6 *MPPT*, fazendo um total de 628,8 V *DC* (15 painéis com 41,92 V *DC* de tensão nominal cada) de entrada com 13,48 A de corrente nominal por *MPPT*, pois os painéis ao estarem ligados em série, somam as suas tensões, mas mantêm as correntes. Ora como os *MPPT* internos dos inversores estão ligados em paralelo entre si, os mesmos mantêm a tensão de entrada, de 628,8 V *DC*, mas somam as respetivas correntes de entrada, o que faz um total de 80,88 A (13,48A x 6).

Ao se multiplicar os 628,8 V *DC* de entrada por *MPPT* com a respetiva corrente de entrada nominal de 13,48 A, obtém-se o valor de 8 476 W por *MPPT*, que multiplicado este valor de potência pelo número de *MPPT* internos, que são 6, obtém-se o valor de 50 856 W de potência nominal, que é ligeiramente superior ao indicado pelo fabricante do inversor, de 50 000 W, mas ainda assim abaixo do máximo de 55 000 W, garantindo assim que o inversor funcione dentro das suas condições exigidas.

Se por alguma situação, for produzido o valor de tensão máxima, em aberto, de cada painel no valor de 50,60 V e uma corrente de máxima, de curto-circuito, no valor de 14,23 A, consegue-se na mesma manter a integridade dos inversores, pois os painéis iriam fornecer uma tensão máxima de 759 V *DC*, abaixo do valor máximo de tensão de entrada de 1 100 V *DC*, e mantendo uma corrente de 14,23 A também abaixo da corrente máxima de entrada por *MPPT* no valor de 22 A, e ainda assim abaixo do valor de corrente de curto-circuito de cada *MPPT*, no valor de 30 A.

Pode ser constatado, através do gráfico 28 seguinte, a eficiência dos inversores, consoante a tensão de funcionamento, que no caso em concreto será de 620 V *DC*, e o inversor estará sempre a funcionar na sua capacidade máxima de produção, pois este sistema é um sistema de autoconsumo sem baterias, portanto, basicamente tudo o que produz é consumido, e havendo excedente será injetado na rede.

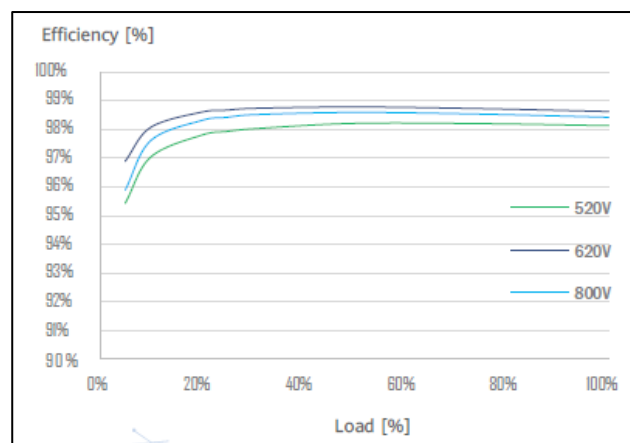


Gráfico 28 - Curvas de eficiência do Inversor a instalar, consoante a carga e a tensão.

Está previsto montar um quadro de corrente contínua, *DC*, com disjuntores de proteção de cada fileira (*string*) de painéis fotovoltaicos antes das suas conexões ao inversor, por forma a não causar dano ao mesmo no caso de haver algum curto-circuito na fileira, ou mesmo se por algum motivo a fileira fornecer corrente a mais, tal como se pode verificar na figura 57 seguinte, respeitante ao esquema de ligações elétricas de cada inversor à rede elétrica, com as suas respetivas fileiras de painéis fotovoltaicos,

quadro de corrente contínua, luzes pilotos de fases de corrente alternada, AC, em funcionamento, e as respetivas ligações da corrente alternada à rede elétrica e ao quadro geral.

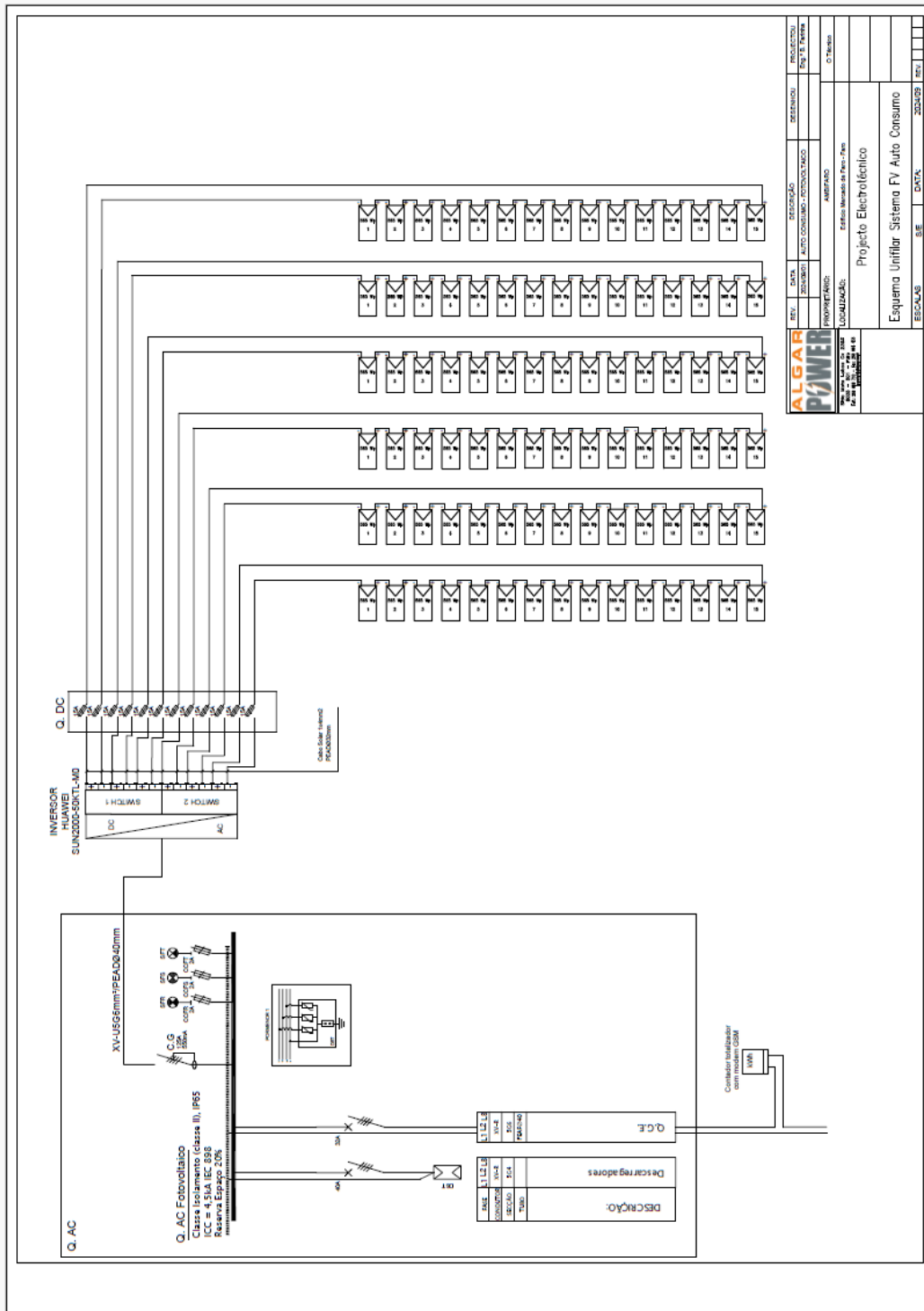


Figura 57 - Esquema elétrico de ligação elétrica dos painéis fotovoltaicos ao inversor, e respetiva ligação à rede elétrica, com os respetivos equipamentos de proteção elétrica.

5.2 CÁLCULOS E RESULTADOS DO RETORNO DO INVESTIMENTO

5.2.1 CÁLCULO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA PRODUZIDA E VALORES DE POUPANÇA PARA UMA ORIENTAÇÃO DE 0° S

Para o cálculo dos valores de poupança de energia, como se pode observar pela tabela 20 abaixo, foi contabilizado um valor médio de €0,225/kWh, obtido das tarifas cobradas pela *E-REDES* ao cliente *AMBIFARO*, consultadas numa fatura, bem como o valor de €0,040/kWh de venda de energia à rede consultado o valor de tarifa obtido a 27/09/2024 através site: <https://www.meoenergia.pt/energia-solar/venda-excedente>.

Tabela 15 – Custo do kWh a pagar por consumo, e valor de venda do kWh à rede.

Número de Painéis	270
Potência por Painel [kWp]	0,565
Custo kWh	0,225 €
Venda kWh	0,040 €

Na tabela 21 abaixo, podem ser observados os valores em kWh dos consumos de energia ativa do edifício em estudo, e as previsões de energia produzida contabilizando ou não o sombreamento da envolvente local, bem como a energia excedente da produção fotovoltaica.

Tabela 16 – Quantidade de energia consumida e energia produzida com e sem contabilização de sombreamento, e excedente de energia produzida com sombreamento.

SUL	Energia Ativa kWh Consumo	Produção Fotovoltaica kWh Com Sombreamento	Excedente da Produção Fotovoltaica kWh	Produção Fotovoltaica kWh Sem Sombreamento
Janeiro	48577,75	14361,39	555,67	18365,99
Fevereiro	46266,75	16749,50	1230,18	20312,40
Março	48844,75	22819,67	3160,92	25410,41
Abril	44608,25	26394,96	5642,71	28111,09
Maio	50260,00	30213,51	5203,95	31529,98
Junho	51264,50	30855,21	4952,41	32082,45
Julho	54771,25	31870,49	5362,54	33231,08
Agosto	56628,75	29842,98	4450,38	31634,94
Setembro	52814,75	25719,53	3582,15	28211,51
Outubro	53214,75	19338,53	1527,17	22852,51
Novembro	46960,25	14229,53	430,76	17948,27
Dezembro	44723,00	13154,81	643,44	17176,15
Total Anual	598934,75	275550,13	36186,63	306866,78

Observando a tabela 22 abaixo, podem ser observados os valores em euros relativamente à energia consumida e paga à *E-REDES*, bem como as previsões de valores de poupança pela produção da instalação fotovoltaica, tendo como comparação a existência ou não de sombreamento da envolvente local, e ainda a venda da produção de energia excedente à rede.

Pode ver-se que as poupanças em termos percentuais variam entre os 29,7% e os 62,0% dependendo do mês, e que em média ao ano existe uma poupança de 47,1%.

Tabela 17 – Contabilização de custos de energia consumida, poupança em Euro, venda do excedente em Euro, percentagem de poupança e valor a pagar de consumo final.

SUL	Custo Energia Ativa	Poupança €	Venda Excedente PV €	Poupança Total €	Poupança %	Valor a Pagar
Janeiro	10 929,99 €	3 231,31 €	22,23 €	3 253,54 €	29,8%	7 676,45 €
Fevereiro	10 410,02 €	3 768,64 €	49,21 €	3 817,85 €	36,7%	6 592,17 €
Março	10 990,07 €	5 134,43 €	126,44 €	5 260,86 €	47,9%	5 729,21 €
Abril	10 036,86 €	5 938,87 €	225,71 €	6 164,58 €	61,4%	3 872,28 €
Maior	11 308,50 €	6 798,04 €	208,16 €	7 006,20 €	62,0%	4 302,30 €
Junho	11 534,51 €	6 942,42 €	198,10 €	7 140,52 €	61,9%	4 393,99 €
Julho	12 323,53 €	7 170,86 €	214,50 €	7 385,36 €	59,9%	4 938,17 €
Agosto	12 741,47 €	6 714,67 €	178,02 €	6 892,69 €	54,1%	5 848,78 €
Setembro	11 883,32 €	5 786,89 €	143,29 €	5 930,18 €	49,9%	5 953,14 €
Outubro	11 973,32 €	4 351,17 €	61,09 €	4 412,26 €	36,9%	7 561,06 €
Novembro	10 566,06 €	3 201,64 €	17,23 €	3 218,87 €	30,5%	7 347,18 €
Dezembro	10 062,68 €	2 959,83 €	25,74 €	2 985,57 €	29,7%	7 077,10 €
Total	134 760,32 €	61 998,78 €	1 469,69 €	63 468,47 €	47,1%	71 291,85 €

5.2.2 CÁLCULO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA PRODUZIDA E VALORES DE POUPANÇA PARA UMA ORIENTAÇÃO DE 25° SW

Para o cálculo dos valores de poupança de energia, como se pode observar pela tabela 23 abaixo, foi contabilizado um valor médio de €0,225/kWh, obtido das tarifas cobradas pela *E-REDES* ao *Mercado de Faro*, consultadas numa fatura, bem como o valor de €0,040/kWh de venda de energia à rede consultado o valor de tarifa obtido a 27/09/2024 através site: <https://www.meoenergia.pt/energia-solar/venda-excedente>.

Tabela 18 – Custo do kWh a pagar por consumo, e valor de venda do kWh à rede.

Número de Painéis	270
Potência por Pannel [kWp]	0,565
Custo kWh	0,225 €
Venda kWh	0,040 €

Na tabela 24 abaixo, podem ser observados os valores em kWh dos consumos de energia ativa do edifício em estudo, e as previsões de energia produzida contabilizando ou não sombreamento da envolvente local, bem como a energia excedente da produção fotovoltaica.

Tabela 19 – Quantidade de energia consumida e energia produzida com e sem contabilização de sombreamento, e excedente de energia produzida com sombreamento.

25° SW	Energia Ativa kWh Consumo	Produção Fotovoltaica kWh Com Sombreamento	Excedente da Produção Fotovoltaica kWh	Produção Fotovoltaica kWh Sem Sombreamento
Janeiro	48577,75	11169,16	341,69	17775,57
Fevereiro	46266,75	14013,04	968,40	19860,78
Março	48844,75	22882,61	3411,61	25037,00
Abril	44608,25	27124,26	6174,52	27909,93
Mai	50260,00	30749,97	5492,50	31466,93
Junho	51264,50	31389,11	5191,34	32051,65
Julho	54771,25	32424,02	5642,89	33253,00
Agosto	56628,75	30587,64	4838,50	31488,81
Setembro	52814,75	26494,38	4173,12	27853,31
Outubro	53214,75	17091,34	1664,39	22383,54
Novembro	46960,25	11238,60	442,85	17458,11
Dezembro	44723,00	10120,62	316,22	16623,88
Total Anual	598934,75	265284,76	38658,03	303162,51

Observando a tabela 25 abaixo, podem ser observados os valores em euros relativamente à energia consumida e paga à *E-REDES*, bem como as previsões de valores de poupança pela produção da instalação fotovoltaica, tendo como comparação a existência ou não de sombreamento da envolvente local, e ainda a venda da produção de energia excedente à rede. Pode ver-se que as poupanças em termos percentuais variam

entre os 22,8% e os 63,3% dependendo do mês, e que em média ao ano existe uma poupança de 45,4%.

Tabela 20 – Contabilização de custos de energia consumida, poupança em Euro, venda do excedente em Euro, percentagem de poupança e valor a pagar de consumo final.

25° SW	Custo Energia Ativa	Poupança EA €	Venda Excedente PV €	Poupança Total €	Poupança %	Valor a Pagar
Janeiro	10 929,99 €	2 513,06 €	13,67 €	2 526,73 €	23,1%	8 403,26 €
Fevereiro	10 410,02 €	3 152,93 €	38,74 €	3 191,67 €	30,7%	7 218,35 €
Março	10 990,07 €	5 148,59 €	136,46 €	5 285,05 €	48,1%	5 705,02 €
Abril	10 036,86 €	6 102,96 €	246,98 €	6 349,94 €	63,3%	3 686,92 €
Mai	11 308,50 €	6 918,74 €	219,70 €	7 138,44 €	63,1%	4 170,06 €
Junho	11 534,51 €	7 062,55 €	207,65 €	7 270,20 €	63,0%	4 264,31 €
Julho	12 323,53 €	7 295,41 €	225,72 €	7 521,12 €	61,0%	4 802,41 €
Agosto	12 741,47 €	6 882,22 €	193,54 €	7 075,76 €	55,5%	5 665,71 €
Setembro	11 883,32 €	5 961,24 €	166,92 €	6 128,16 €	51,6%	5 755,16 €
Outubro	11 973,32 €	3 845,55 €	66,58 €	3 912,13 €	32,7%	8 061,19 €
Novembro	10 566,06 €	2 528,69 €	17,71 €	2 546,40 €	24,1%	8 019,66 €
Dezembro	10 062,68 €	2 277,14 €	12,65 €	2 289,79 €	22,8%	7 772,89 €
Total	134 760,32 €	59 689,07 €	1 546,32 €	61 235,39 €	45,4%	73 524,93 €

5.3 ORÇAMENTO DO PROJETO

Para a elaboração do orçamento a apresentar à empresa *AMBIFARO*, foram tidas em conta todas as análises previamente demonstradas, por forma a se chegar a uma instalação que cumprisse com os objetivos necessários, bem como com o menor custo de instalação.

Para tal, e após análise dos resultados de investimento e de retorno anteriormente descritos, e observando as tabelas 26 e 27 abaixo, chegou-se à conclusão de que a diferença de produção entre a instalação fotovoltaica ficar orientada a 0° Sul, ou ficar a orientada a 25° SW no alinhamento do edifício, não justifica o valor acrescido que teria para a orientação de 0° Sul, pelo facto de haver necessidade de estruturas mais onerosas por forma a manter os espaços de circulação previstos, desocupados.

Verifica-se que a diferença de tempo de retorno do investimento entre as duas orientações, é de apenas 1 mês com a contabilização do sombreamento da envolvente local.

Tabela 21 – Retorno do investimento, comparando a contabilização do sombreamento da envolvente local e sem o sombreamento, com uma orientação de 0° Sul.

SUL	Com Sombreamento	Sem Sombreamento
Custo Instalação	143 902,00 €	143 902,00 €
Poupança Anual	63 468,47 €	70 492,49 €
Retorno (anos)	2,3	2,0
Retorno (meses)	27,2	24,5

Tabela 22 - Retorno do investimento, comparando a contabilização do sombreamento da envolvente local e sem o sombreamento, com uma orientação de 25° SW, alinhada com o edifício.

25° SW	Com Sombreamento	Sem Sombreamento
Custo Instalação	143 902,00 €	143 902,00 €
Poupança Anual	61 235,39 €	69 757,89 €
Retorno (anos)	2,3	2,1
Retorno (meses)	28,2	24,8

Sendo assim, com base no estudo descrito anteriormente, segundo a poupança anual prevista pela produção de energia fotovoltaica, e segundo o estudo de retorno do investimento, foi elaborado o orçamento, bem como a carta de apresentação, com a respetiva proposta, condições técnicas e orçamento, como se apresenta nas figuras 58, 59 e 60, seguintes.


	Electricidade e Telecomunicações Sítio de Mata Lobos Cx 239Z 8005-501 Faro Tel.: 289 098 710 Fax: 289 094 433 geral@algarpower.pt															
	FAX															
Para: Ambifaro Gestão de Equipamentos	De: Eng. BRUNO FARINHA															
A/C: Municipais E.m	Data: 23 de setembro de 2024															
V/Ref.:	N/Ref.: 3710-23															
Fax.: 289 897 259	Págs.: 2 + 0															
<table border="1"> <tr> <td>ASSUNTO:</td> <td>N/ORÇAMENTO N°</td> <td>: 3710-23</td> </tr> <tr> <td></td> <td>DESCRIÇÃO</td> <td>: Execução de Infra estruturas, suporte e Instalação</td> </tr> <tr> <td></td> <td>OBRA</td> <td>: Paineis Auto Consumo para Mercado de Faro</td> </tr> <tr> <td></td> <td>DATA</td> <td>: 2023/01/23</td> </tr> <tr> <td></td> <td>VALOR</td> <td>: 143.902,70 € (Cento Quarenta Três Mil Novecentos Dois Euros Setenta Cêntimos)</td> </tr> </table>		ASSUNTO:	N/ORÇAMENTO N°	: 3710-23		DESCRIÇÃO	: Execução de Infra estruturas, suporte e Instalação		OBRA	: Paineis Auto Consumo para Mercado de Faro		DATA	: 2023/01/23		VALOR	: 143.902,70 € (Cento Quarenta Três Mil Novecentos Dois Euros Setenta Cêntimos)
ASSUNTO:	N/ORÇAMENTO N°	: 3710-23														
	DESCRIÇÃO	: Execução de Infra estruturas, suporte e Instalação														
	OBRA	: Paineis Auto Consumo para Mercado de Faro														
	DATA	: 2023/01/23														
	VALOR	: 143.902,70 € (Cento Quarenta Três Mil Novecentos Dois Euros Setenta Cêntimos)														
0460																
<p>Exm.ºs Srs.:</p> <p>Os n/s melhores cumprimentos</p> <p>No seguimento da Vossa prezada consulta, a qual desde já agradecemos, vimos por este meio submeter à Vossa apreciação a nossa melhor proposta, para o eventual fornecimento de material e mão-de-obra para a empreitada acima descrita, conforme Condições Técnicas e Comerciais e medições anexas.</p> <p>Na expectativa das v/ favoráveis notícias, e disponíveis para outros esclarecimentos, subscrevemo-nos com muita consideração e estima.</p> <p>Dep. Orçamentação,</p> <p>Eng. BRUNO FARINHA</p>																
AGP.23_00	Contribuinte n.º 509 909 566 Capital Social: 5.000,00 €															

Figura 58 - Carta de apresentação da proposta de orçamento



Electricidade e Telecomunicações

Sítio de Mata Lobos Cx 239Z
8005-501 Faro
Tel.: 289 098 710
Fax: 289 094 433
geral@algarpower.pt

Orçamento: 3710-23
Data: 2023/01/23

CONDIÇÕES TÉCNICAS E COMERCIAIS

1. VALIDADE DA PROPOSTA,

Esta proposta é válida por 30 dias;

2. PREÇOS,

Aos valores apresentados acresce o IVA à taxa legal em vigor.

3. CONDIÇÕES DE PAGAMENTO,

Pagamento a 30 dias da data da Factura com Autos de Medição Mensais ou outras .

4. PRAZO DE EXECUÇÃO,

A combinar com Vossas Ex.as.

5. EXCLUSÕES,

Exclui-se da presente proposta, fornecimento e montagem de:

- Equipamentos de Ar condicionado; Termoacumuladores; Ventiladores;
- Portão e Trinco Eléctrico;
- Parabólicas e antenas terrestres;
- Equipamentos de alarme; Equipamentos de Domótica; Equipamentos de som Ambiente;
- Válvulas eléctricas de gás e água;
- Equipamentos de detecção de incêndio; Detecção de humidade;
- Abertura e tapamento de valas, e todos os trabalhos de construção Civil (abertura e tapamento de roços).
- Despesas de vistoria da CERTIEL e ITED.

6. TRABALHOS

Todos os trabalhos serão executados de acordo com os regulamentos e normas em vigor, projectos de execução aprovados (caso existam) bem como as regras de boa arte.

A aparelhagem proposta é do tipo: Suno da Legrand, Única da Schneider, Simon 22 ou Efapel Sírius 70 Classic (BR ou MF), ou outra referida nas medições em anexo..

AGP.23_00

Contribuinte n.º 509 909 586
Capital Social: 5.000,00 €

Figura 59 - Carta de apresentação da validade da proposta de orçamento.



Orçamento nº 3710-23

Descrição: Execução de Infra estruturas, suporte e Instalação	Data: 2023/01/23
Obra: Painéis Auto Consumo para Mercado de Faro	
Cliente: Ambifaro Gestão de Equipamentos	Página nº 1/1

Pos.	Descrição	Qtd.	Unitário (€)	Total (€)
I	PAINEIS FOTOVOLTAICOS PARA AUTOCONSUMO 152,55 kWp			
1	Empreitada de execução de infra estruturas e instalação de painéis de auto consumo			
1.1	Fornecimento e montagem de painel Fotovoltaico no telhado, incluindo todo os materiais e acessórios inerentes à sua boa instalação 565Wp	270,00 Un	292,160	78.883,20
1.2	Fornecimento e instalação de Estrutura, com execução do suporte e fixações, incluindo todos os materiais e acessórios inerentes à sua boa instalação Estrutura Triangular 30° em Alumínio Estrutura metálica em ferro	1,00 vg 2,00 vg	35.807,000 1.025,000	35.807,00 2.050,00
1.3	Fornecimento e instalação de Inversores , incluindo todo os materiais e acessórios inerentes à sua boa instalação SUN200-50KTL-M0	3,00 un	4.725,000	14.175,00
1.4	Fornecimento e instalação de contador, incluindo a infra-estrutura e todos os materiais e acessórios inerentes à sua boa instalação	1,00 Un	770,000	770,00
1.5	Fornecimento e instalação de Quadro Elétrico AC, incluindo a infra-estrutura e todos os materiais e acessórios inerentes à sua boa instalação OE AC	1,00 Un	3.650,000	3.650,00
1.6	Fornecimento e instalação de Quadro de Proteção Fotovoltaico DC, incluindo a infra-estrutura e todos os materiais e acessórios inerentes à sua boa instalação OE DC	1,00 un	2.050,000	2.050,00
1.7	Fornecimento e instalação de cabos, tubos e conectores	1,00 cj	6.517,500	6.517,50
	TOTAL ORÇAMENTO (IVA NÃO INCLUIDO)			143.902,70

Orçamentação v2.16.00.006LM | Lic. s: AlgarPower, L da PT 509909566
Mod.: AGP.21_00

Figura 60 – Orçamento de instalação fotovoltaica de potência de 152 550 kW

6

DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

A realização deste trabalho consistiu em diversos estudos e análises de produção de energia fotovoltaica, para elaboração de um projeto de instalação de 152 550 W de potência de pico de produção de energia fotovoltaica por forma a conseguir produzir eletricidade para autoconsumo e assim reduzir o valor a pagar ao fornecedor de energia *E-REDES*.

Para tal realizou-se o estudo de produção, e funcionamento real, de um painel fotovoltaico igual ao contemplado no orçamento de instalação, de forma a se poder validar os modelos numéricos utilizados bem como verificar se as suas características técnicas e o seu funcionamento correspondiam ao anunciado pelo fabricante.

Com as medições efetuadas de produção de energia fotovoltaica, e dos parâmetros a que o respetivo painel fotovoltaico esteve sujeito, tais como radiação solar incidente e difusa, temperaturas ambiente e do painel, velocidade do vento, análise de rede para medir a produção do painel, conseguiu-se comparar os dados medidos com os valores modelados, bem como comparar com dados de radiação solar, e de produção fotovoltaica, obtidos através de plataformas online, nomeadamente o *PVGIS*, por forma a verificar a consistência dos dados, bem como poder validar os modelos utilizados, para se poder realizar projetos futuros com algum grau de confiança, apesar de este tipo de projeto depender essencialmente da radiação solar e das restantes condições atmosféricas.

Conseguiram-se validar, não só os modelos utilizados, mas também validar a plataforma *PVGIS*, concluindo assim que se pode recorrer a qualquer uma das duas formas para a análise da radiação em projetos futuros. Em termos médios, a previsão da radiação solar obtida com o modelo é aproximada aos valores disponibilizados na base de dados do *PVGIS* assim como aos valores medidos na estação meteorológica do *ISE (Instituto Superior de*

Engenharia). Contudo, verifica-se um elevado desvio padrão para cada dia do ano, principalmente durante o inverno devido à variação da nebulosidade.

Após estes estudos e análises, procedeu-se à realização da previsão de produção fotovoltaica anual, contabilizada diariamente e em períodos de 15 minutos, pois é em iguais períodos que os fornecedores de energia contabilizam o consumo de energia ativa e assim poderem faturar os seus clientes.

Realizaram-se diagramas de carga de consumo de energia, bem como diagramas de previsão de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, para se poder quantificar o autoconsumo e contabilizar o excedente, tudo por forma a se poder calcular a poupança no consumo da energia elétrica fornecida pela *E-REDES*, e assim se poder reduzir o valor da fatura da eletricidade, e, ao mesmo tempo, verificar se havia algum excedente que se pudesse vender.

Efetuuou-se o estudo do impacto do sombreamento da envolvente local, o que ao se realizar o projeto de instalação da instalação fotovoltaica, dividiram-se os painéis fotovoltaicos em grupos de 15 painéis por *string*, e por sua vez por inversores, sendo que cada inversor tem 6 *strings*, por forma a reduzir o impacto do sombreamento sobre os painéis fotovoltaicos, mantendo sempre alguma produção por inversor.

Após todos estas análises, procedeu-se ao cálculo do ponto de retorno do investimento, e assim a viabilidade económica da instalação.

6.1 ANÁLISE DO TRABALHO REALIZADO

A realização deste trabalho foi de extrema importância, não só para se poder elaborar um projeto de instalação fotovoltaica com um elevado grau de confiança, verificar o seu retorno para uma viabilidade económica, bem como para verificar se é válido utilizar os modelos matemáticos empíricos e/ou as plataformas online, nomeadamente o *PVGIS*, para se poderem utilizar, qualquer um deles, em projetos futuros.

Através do estudo de produção de energia elétrica fotovoltaica pelo painel fotovoltaico em análise, com recurso à medição da radiação solar incidente no plano do painel bem como à temperatura do próprio painel em diversos pontos, permitiu verificar se as características técnicas do mesmo correspondiam às anunciadas pelo fabricante, como se pode verificar através dos gráficos 20 e 21, bem como comparar com os modelos matemáticos *NOCT* e de balanço, descritos no capítulo 4.

No mesmo capítulo 4, pode ser observado e constatado através dos gráficos 17, 18 e 19, que quando comparadas as medições da radiação solar incidente efetuadas, tanto no plano horizontal como no plano do painel a 20° de inclinação, com a radiação solar calculada e a radiação solar fornecida pela plataforma *PVGIS*, todos os valores andam muito próximos uns dos outros, dando credibilidade ao modelo matemático utilizado bem como à plataforma *PVGIS*, de forma que futuramente se possa utilizar qualquer um dos dois modos de aquisição de valores de radiação solar para projetos de instalações de painéis fotovoltaicos.

Para se verificar a credibilidade da plataforma *PVGIS*, recorreu-se aos dados recolhidos pela estação meteorológica *EPPLEY*, da *Universidade do Algarve*, por um período de 10 anos para se comparar com os valores obtidos pela plataforma *PVGIS*, por igual período de tempo, e assim se poderem comparar os valores por forma a verificar se a plataforma *PVGIS* indica valores corretos para um determinado ponto de localização, em que foram feitos estudos e análises com desvio padrão para se poder observar se os valores ficavam dentro dos valores de desvio, o qual se pôde constatar que ficavam.

Através dos gráficos 15 e 16 do capítulo 4, observam-se valores comparativos entre a previsão da radiação solar no plano horizontal, para o mês de setembro 2024 e para o dia 15 de setembro 2024, com base no desvio padrão obtido pela análise dos 10 anos de valores comparados, obtidos pela estação meteorológica *EPPLEY* da *Universidade do Algarve*, e pela plataforma *PVGIS*. Nos anexos A.1 e A.2, podem observar-se os gráficos mensais das mesmas previsões para o ano de 2024, bem como os gráficos para os dias 15 de cada mês, e respetivos desvios padrão da análise dos dados de 10 anos.

Os resultados obtidos levaram a que se conseguisse concretizar este projeto com algum pormenor, e ao mesmo tempo conseguir demonstrar que este tipo de instalações podem contribuir para uma redução da fatura energética, através do autoconsumo, essencialmente se o consumo de energia elétrica for maioritariamente durante as horas de radiação solar, em que assim não há necessidade de acoplar um sistema de armazenamento de energia, através de baterias, que iriam encarecer muito a instalação, reduzindo assim a sua eficiência energética e aumentando desta forma o seu ponto de retorno.

Através dos resultados de produção de energia elétrica, com duas hipóteses diferentes de orientação, uma orientada a 0° Sul, e outra com orientação alinhada com a do edifício a 25° SW, conseguiu-se verificar que se a instalação estiver orientada a Sul, consegue uma maior produção energética anual, de 275 550 kWh, tabela 21, enquanto a instalação orientada a 25° SW, alinhada com o edifício, tem uma produção energética anual de 265 285 kWh, tabela 24.

No entanto, a instalação com a orientação do edifício de 25° SW conseguiu obter um maior valor excedente de produção energética, devido essencialmente aos meses de Verão, mas que mesmo assim não chegou para ter uma maior poupança anual em relação à orientação

a 0° Sul, pelo facto de que nos meses com menor altura solar haver uma menor produção de energia e por tal obrigar a um maior consumo da rede de fornecimento.

Verificou-se que o valor de poupança, de energia ativa em conjunto com a energia excedente vendida à rede, da instalação com orientação igual à do edifício de 25° SW será de € 61 235,39 euros com um custo anual de consumo de € 73 524,93 euros, conforme a tabela 20, e com um tempo de retorno de 28,2 meses, conforme se vê na tabela 22, ao passo que a instalação com orientação a 0° Sul, terá uma poupança anual de energia ativa de € 63 468,47 euros com um custo anual de consumo de € 71 291,85 euros, conforme a tabela 17, com um tempo de retorno de 27,2 meses, como se pode verificar pela tabela 21.

Analisando em termos percentuais as diferenças de poupança em termos de custos, verifica-se que andam na ordem dos 3,1% a 3,5%, a favor da instalação com orientação a 0° Sul.

No que concerne à diferença de produção de energia fotovoltaica entre as orientações 0° Sul e 25° SW, existe uma diferença de 3,8% com vantagem para a orientação a 0° Sul.

Relativamente à penalização de sombreamento da envolvente local, verifica-se uma penalização de 12,5% comparando com a produção de energia fotovoltaica caso não houvesse sombreamento da envolvente local.

No entanto a instalação dos painéis fotovoltaicos será com a mesma orientação do edifício de 25° SW, pois o cliente necessita manter os acessos à cobertura desimpedidos para manutenção, que caso a instalação ficasse com a orientação de 0° Sul a mesma iria obstruir esses respetivos acessos, além do cliente querer manter uma agradável estética de alinhamento com o edifício.

Pode-se verificar através da tabela 20, que a poupança de energia anual, com orientação de 25° SW, em termos percentuais, é de uns 45,4%, variando um mínimo de 22,8% a uns expressivos 63,3%.

O número de painéis a instalar, foi de acordo com a área disponível para a referida instalação fotovoltaica, visto que existem mais equipamentos na cobertura do edifício que não poderão estar cobertos, nem haver bloqueio de passagem para manutenção dos equipamentos instalados, bem como do edifício.

O painel fotovoltaico escolhido, foi devido ao facto de ser o que está com maior disponibilidade de fornecimento.

Com o presente trabalho, pode-se dizer que os objetivos foram alcançados, e que foram de elevada importância para o respetivo projeto a apresentar ao cliente *AMBIFARO* do *Mercado de Faro*.

Desta forma elaborou-se a carta de apresentação com a respetiva proposta, bem como o orçamento de fornecimento e instalação dos painéis fotovoltaicos, como se pode ver nas figuras 58, 59 e 60 anteriormente mostradas.

As tabelas 21 e 22 mostradas anteriormente, mostram o tempo de retorno do investimento em anos, bem como em meses, de acordo com o orçamento elaborado para o cliente.

Ainda com o presente trabalho, verificou-se que existe uma penalização devido ao fator do sombreamento da envolvente local, seja com orientação a 0° Sul ou a 25° SW. Com relação à diferença entre a produção de energia fotovoltaica com orientação a 0° Sul e a 25° SW, apesar de existir uma maior produção com orientação a 0° Sul comparada com orientação a 25° SW, em termos de valor é de apenas 2200 euros anuais, o que não justifica um aumento do valor de orçamento na casa dos 20% a 30% devido ao aumento de valor da instalação, além de ficar inestético com relação à orientação do edifício.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, um melhoramento que poderá ser feito é, fazer um estudo de diferentes orientações por zona, bem como com diferentes inclinações solares, por forma a otimizar a produção de energia fotovoltaica ao longo do dia, para que se reduza o impacto do sombreamento da envolvente local nos painéis fotovoltaicos, orientando-os para um melhor aproveitamento da radiação solar incidente nos mesmos.

Outra possibilidade de trabalhos futuros, será a de analisar a produção e viabilidade de se instalar painéis fotovoltaicos flexíveis na cobertura autoportante do edifício, por forma a verificar se poderá contribuir de forma significativa para a redução da fatura da energia consumida ou ainda se será viável a instalação de baterias para armazenamento da energia fotovoltaica e a sua utilização em períodos de falta de radiação solar, nomeadamente a partir do pôr do Sol até ao seu nascer.

REFERÊNCIAS

- [1] Wikipedia, "Sol", <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Sol&oldid=67188999>, Janeiro 2024, 12:00.
- [2] T. Jenkins, "A brief history of. semiconductors," *Physics Education*, vol. 40, pp. 430-439, 2005.
- [3] A. M. Vallêra, M. C. Brito —Meio século de história fotovoltaica, *I Gazeta de Física*, pp. 10-15, 2006.
- [4] U.S. Department of Energy, "The History of Solar", *Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE)*, https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf , 02/01/2024, 12:22.
- [5] PVRESOURCES, ©Denis Lenardic, 2001-2024, pvresources®, "Photovoltaics – Historical Development", <https://www.pvresources.com/en/introduction/history.php> , 02/01/2024, 12:24.
- [6] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *Journal of Applied Physics*, vol. 25, pp. 676– 677, Maio 1954.
- [7] T. M. Razykov et al., "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1580-1608, Agosto 2011.
- [8] H. W. Schock, "Thin film photovoltaics," *Applied Surface Science*, vol. 92, pp. 606-616, Fevereiro 1996.
- [9] Karel Beckman, "Solar power to the peolple", *The Best Thinkers on Energy*, energypost.eu, <https://energypost.eu/sun-also-rises/>, Outubro 17, 2014.
- [10] Bhubaneswari Parida, S. Iniyar, and Ranko Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1625-1636, Abril 2011.
- [11] Rommel Noufi and Ken Zweibel, "High-Efficiency CdTe and CIGS Thin-Film Solar Cells: Highlights and Challenges," *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, pp. 317-320, Maio 2006.
- [12] Neeraj Kant, Pushpendra Singh, "Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development", *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 3460-3470, 2022.
- [13] PE – Portal Energia, Pedro Reis, "Vantagens e desvantagens dos painéis solares fotovoltaicos", <https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-paineis-solares-fotovoltaicos/> , Maio 2019, 16:05, 03/01/2024, 12:49.
- [14] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, and Wilhem Warta, "Solar cell efficiency tables (version 37)," *Progress in photovoltaics: Research and applications*, vol. 19, pp. 84-92, Janeiro 2011.
- [15] S. Viswanathan Saji, Ik-Ho Choi, and Chi-Woo Lee, "Progress in electrodeposited absorber layer for $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) solar cells," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 2666-2678, Novembro 2011.
- [16] Senthil and Kalaiselvi C.R., "New Materials for Thin Film Solar Cells", *Coatings and Thin-Film Technologies*, ch. 10, pp. 209-221, License: CC BY 3.0, Janeiro 2019.
- [17] R. Wuerz et al., *Thin Solid Films*, vol. 517, pp. 2415-2418, Fevereiro 2009.
- [18] E.D. Jones, A. A. Allerman, D. J. Friedman, J. F. Geisz, J. F. Klem, Steven R. Kurtz, N. R. Modine, W. Shan, C. Tu, and W. Walukiewicz, "Next Generation Thin Films for Photovoltaics: InGaAsN", *Conference paper, NREL/CP-520-29589*, Abril 1999.

- [19] G. Beaucarne, “Silicon Thin-Film Solar Cells”, Hindawi Publishing Corporation, *Advances in OptoElectronics*, vol. 2007, Article ID 36970, 12 pages, Maio 2007.
- [20] G. Salman Muhammed, “Mechanism for Flexible Solar Cells”, *Solar Cells – Theory, Materials and Recent Advances*, License: CC BY 3.0, Setembro 2021.
- [21] J. Radulovic, D. Nikolic, J. Skerlic, M. Vaskovic, Jovanovic, Lj. Bojic, “Building Integrated Photovoltaics – Potencial and Application”, *Quality Festival 2019*, ISSN 2620-2832, Junho 2019.
- [22] ScienceDaily, Science News, [Online] [Citação: 20 de maio de 2011.] <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/05/110519101355.htm> , 20/05/2011, 2011.
- [23] M. Rusu, S. Doka, A. Meeder, R. Wurz, E. Strub, J. Rohrich, U. Block, P. Schubert-Bischoff, W. Bohne, Th. Schedel-Niedrig, M. Ch. Lux-Steiner, “Structural peculiarities of CCSVT-grown CuGaSe₂ thin films”, *Thin Solid Films*, 480-481 (2005), pp. 352-357, Dezembro 2004.
- [24] Ingrid Repins et al., “19,9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ solar cell with 81,2% fill factor,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, pp. 235-239, Maio 2008.
- [25] Holger Spanggaard, Frederick C. Krebs, “A brief history of development of organic and polymeric photovoltaics”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 83, pp. 125-146, Fevereiro 2004.
- [26] ε-TAY Industrial Co. Ltd, <https://www.mymagnifier.com/es/product/Fresnel-Solar-Concentrator-Optical-Acrylic-Lens-SLF16.html> , 02/01/2024, 20:32
- [27] Fernando Jesus, PE-Portal Energia, “Concentrador solar revolucionário em pirâmide para painéis solares”, <https://www.portal-energia.com/concentrador-solar-revolucionario-piramide-paineis-solares/> , Publicado em: 5/09/2023, 21:14; Atualizado em: 05/09/2023, 21:23, 02/01/2024, 20:20.
- [28] EERE (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy), “Multijunction III-V Photovoltaics Research”, *Solar Technologies Office*, Department of Energy, 05/01/2024, 15:17.
- [29] Lisa Zyga, “Multijunction solar cell could exceed 50% efficiency goal”, 20 de Fevereiro de 2013, *Phys.org*, <https://phys.org/news/2013-02-multijunction-solar-cell-efficiency-goal.html> , 05/01/2024, 22:10.
- [30] IEA (2023), *Renewables 2022 – Analysis and Forecasts to 2027*, <https://www.iea.org/corrections> , revised version, Janeiro 2023.
- [31] IEA (2022), *Solar PV Global Supply Chains*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains> , License: CC BY 4.0.
- [32] IEA (2023), *The State of Clean Technology Manufacturing*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-state-of-clean-technology-manufacturing> , License: CC BY 4.0.
- [33] IEA (2023), *Tracking Clean Energy Progress 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023> , License: CC BY 4.0.
- [34] IEA (2023), *Global Energy and Climate Model*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model> , License: CC BY 4.0.
- [35] IEA (2023), *Snapshot of Global PV Markets 2023*, IEA PVPS Strategic PV Analysis and Outreach, Report IEA-PVPS T1-44:2021, ISBN 978-3-9070281-43-7, Abril 2023.
- [36] IRENA (2023), *Renewable capacity highlights 20 March 2023*, <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023> , Março 2023.
- [37] IRENA (2023), *Renewable Capacity Statistics 2023*, ISBN: 978-92-9260-525-4, 2023.
- [38] S. Sul, “IRENA: Capacidade renovável global atinge “crescimento recorde” em 2022 e Portugal acompanha tendência”, *Edifícios e Energia*, Março 23, 2023.

- [39] DGE (Direção Geral de Energia e Geologia), <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energia-eletrica/producao-de-energia-eletrica/producao-descentralizada-autoconsumo-e-upp-mp-mn/autoconsumo-e-cer/3-enquadramento-legal/>, Julho 2024.
- [40] John A. Duffie and William A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”, 4th Edition, Wiley.
- [41] Rui Castro, “Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-Hídrica”, Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia, 35, 470pp, ISBN 978-989-8481-01-6, 4^a Edição, Outubro 2022.
- [42] Letícia de Oliveira Santos, Paulo César Marques de Carvalho, and Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho, “Photovoltaic Cell Operating Temperature Models: A Review of Correlations and Parameters”, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 12, N.º 1, Janeiro 2022.
- [43] Reza Hassan, Morris Riedel, Asdis Helgadóttir, Nashmin Yeganeh, and Runar Unnthorsson, “Implicit Equation for Photovoltaic Module Temperature and Efficiency via Heat Transfer Computational Model”, Thermo 2022, 2, 39-55, <https://doi.org/10.3390/thermo2010004>, 21 Fevereiro 2022.
- [44] A.R. Amélia, Y.Z. Irwan, W.Z. Leow, M. Irwanto, I. Safwati, M. Zhafarina, “Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance”, International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, Vol. 6, N.º 5, ISSN 2088-5334, 18 Novembro 2016.
- [45] J. Rodrigues, M. Viegas, D. Turner, R. Veiga, N. Sousa, M. C. M. Guerreiro, P. Calado, H. Lamarão, S. C. A. Rodrigues e Silva, B. J. P. Oliveira, C. Almeida e M. Rosa, “Paragem de Autocarro Inteligente e Sustentável no Aeroporto de Internacional de Faro”, Acessibilidade para todos no turismo, ACCES4ALL, Relatório Final – Volume III, Projeto de Investigação Científica e Desenvolvimento Tecnológico (IC&DT), SAIC-POL/23700/2016, pp 39-58, Outubro 2019.
- [46] PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/, última atualização em 01 de março de 2022, Junho 2024.
- [47] Faiman, D., “Avaliação da temperatura operacional externa de módulos fotovoltaicos”, Prog. Photovolt. Res. Appl. 16, 307–315, 2008.
- [48] Huld T., Friesen G., Skoczek A., Kenny RP, Sample T., Field M., Dunlop ED, “Um modelo de classificação de potência para módulos fotovoltaicos de silício cristalino”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, 3359-3369, 2011.
- [49] Sun Earth Tools, Ferramentas para designers e consumidores de energia solar, https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php, @ 2009-2024 SunEarthTools.com, Julho 2024.
- [50] Damia Solar, <https://www.damiasolar.com/blog/pt/distancia-entre-paineis-solares-como-calcular/>, Julho 2024.
- [51] Eliseu Sebastian – Energia Solar, <https://eliseusebastian.com/distancia-entre-paneles-fotovoltaicos/>, Julho 2024.
- [52] CCEEA (Centro de Capacitación Eléctrica y Energías Alternas), <https://ccea.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/calculo-de-sombra-con-el-metodo-del-solsticio-de-invierno>, Julho 2024.
- [53] Polaridad.es, <https://polaridad.es/pt/calculo-de-sombra-e-distancia-entre-paineis/>, Julho 2024.

ANEXOS

- Apêndice A – Gráficos comparativos de diagramas de carga e de produção fotovoltaica



**GRÁFICOS DE DIAGRAMAS DE CARGA E PRODUÇÃO
FOTOVOLTAICA MENSAL RELATIVOS A UM ANO**

A.1 COMPARAÇÃO DA PREVISÃO DA RADIAÇÃO SOLAR MENSAL PARA O ANO DE 2024 NO PLANO HORIZONTAL - COM DESVIO PADRÃO

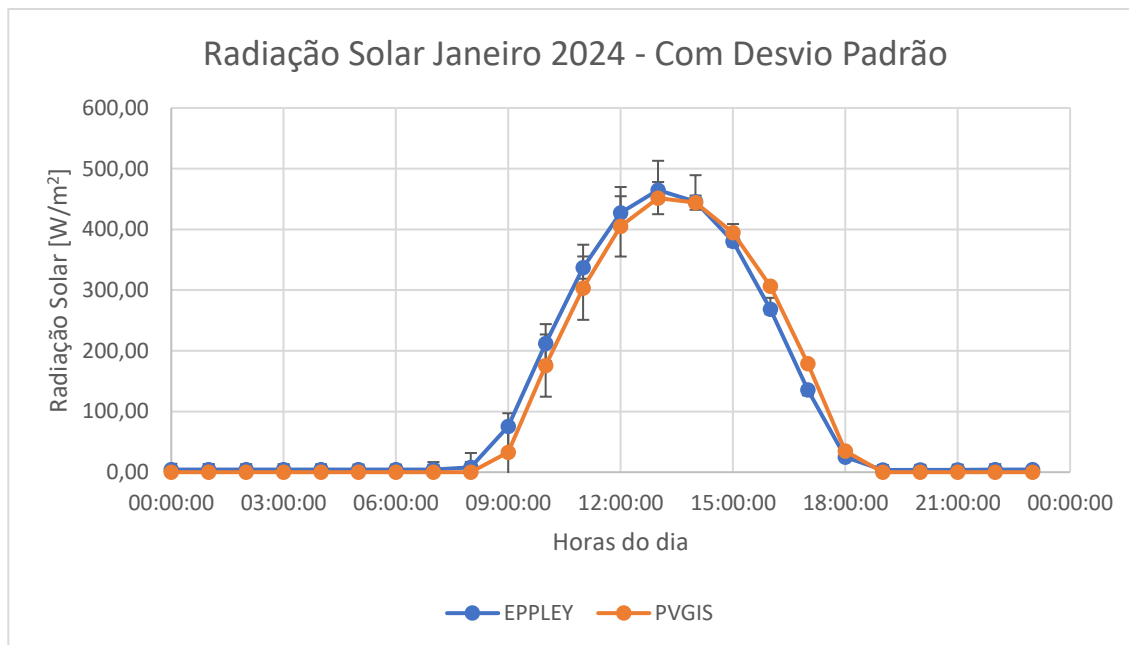


Gráfico 29 - Previsão da radiação solar para janeiro de 2024 com desvio padrão

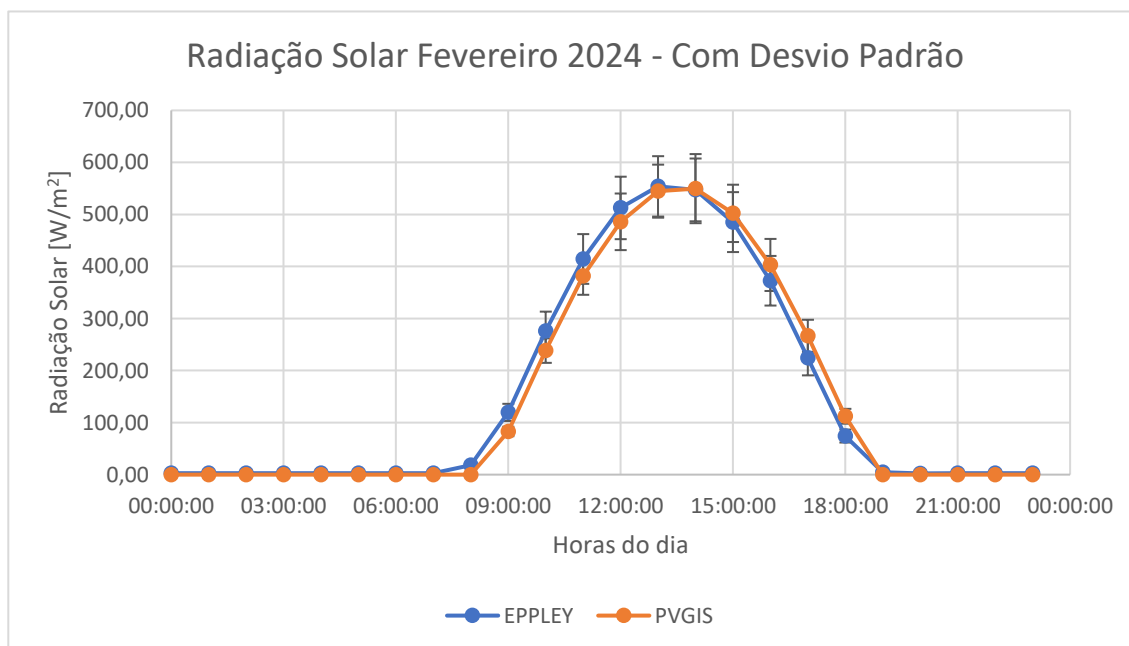


Gráfico 30 - Previsão da radiação solar para fevereiro de 2024 com desvio padrão

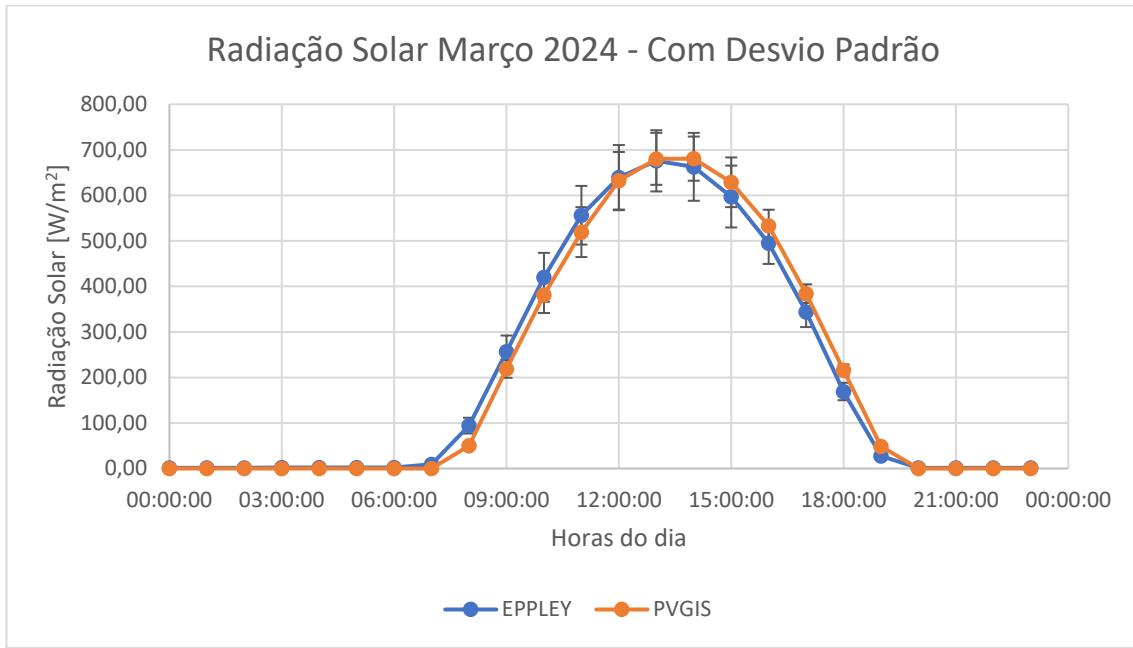


Gráfico 31 - Previsão da radiação solar para março de 2024 com desvio padrão

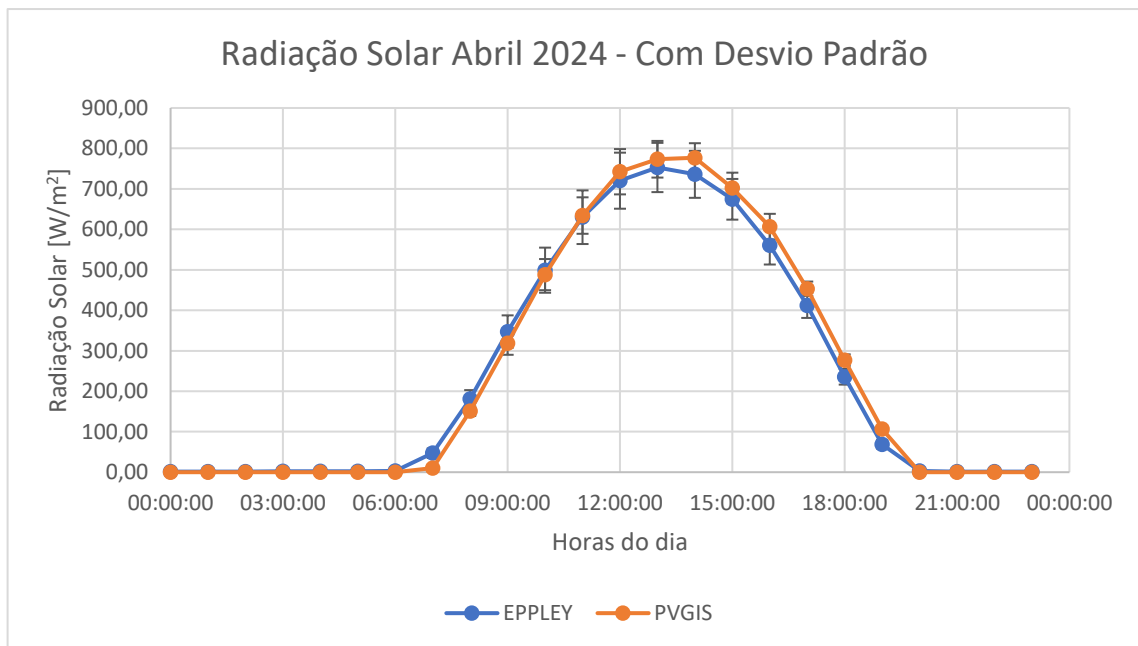


Gráfico 32 - Previsão da radiação solar para abril de 2024 com desvio padrão

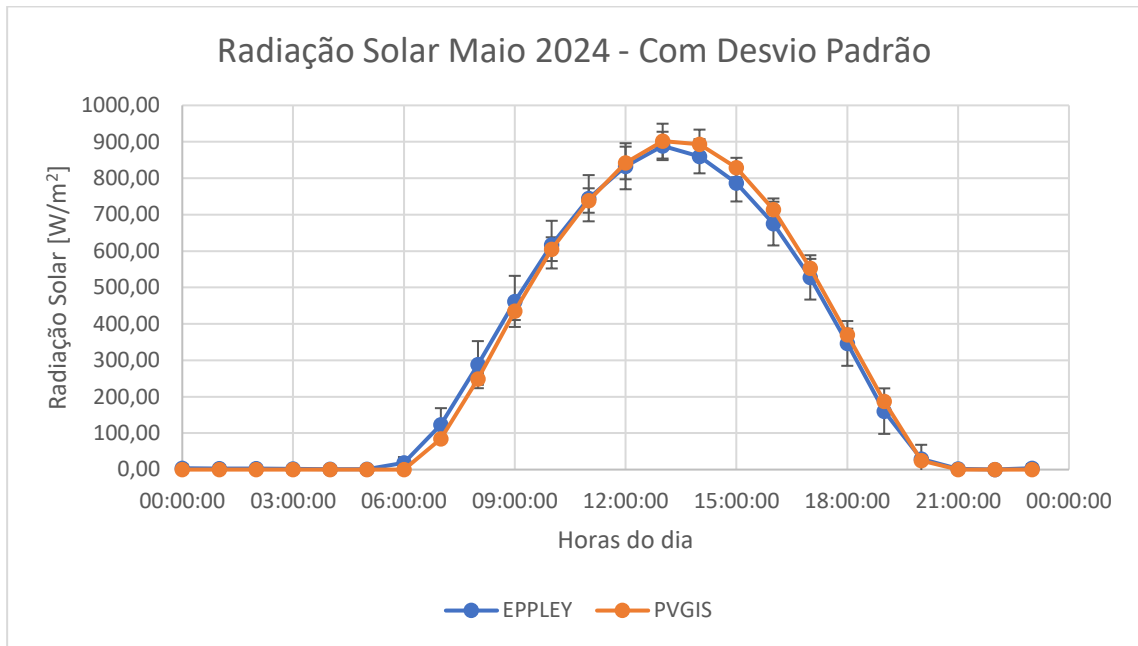


Gráfico 33 - Previsão da radiação solar para maio de 2024 com desvio padrão

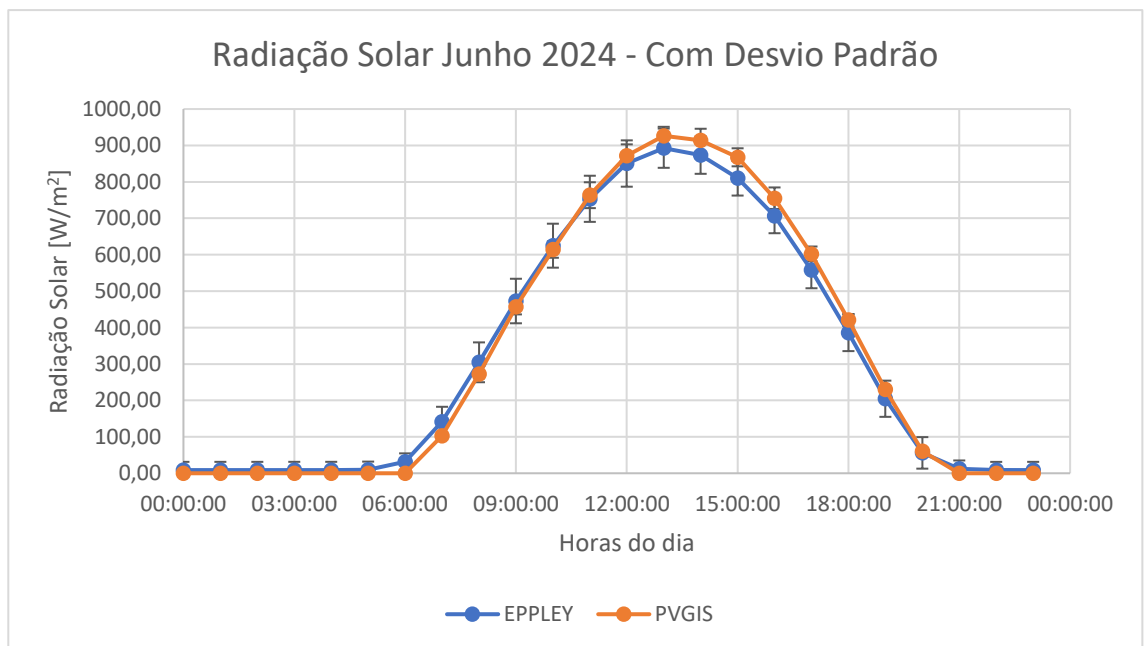


Gráfico 34 - Previsão da radiação solar para junho de 2024 com desvio padrão

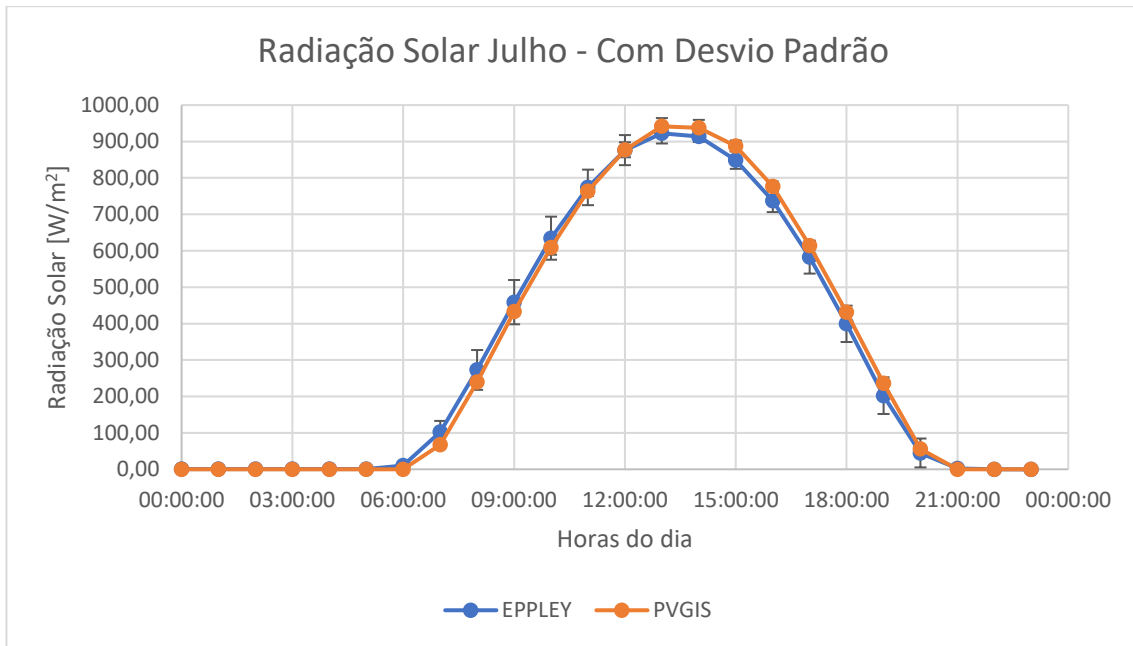


Gráfico 35 - Previsão da radiação solar para julho de 2024 com desvio padrão

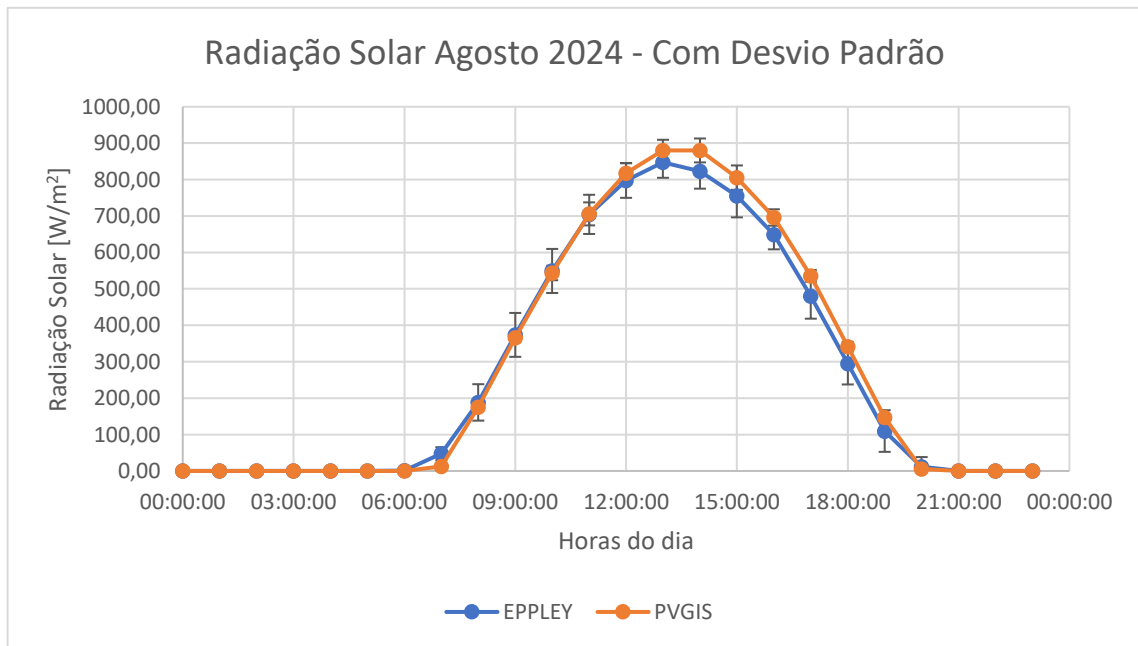


Gráfico 36 - Previsão da radiação solar para agosto de 2024 com desvio padrão

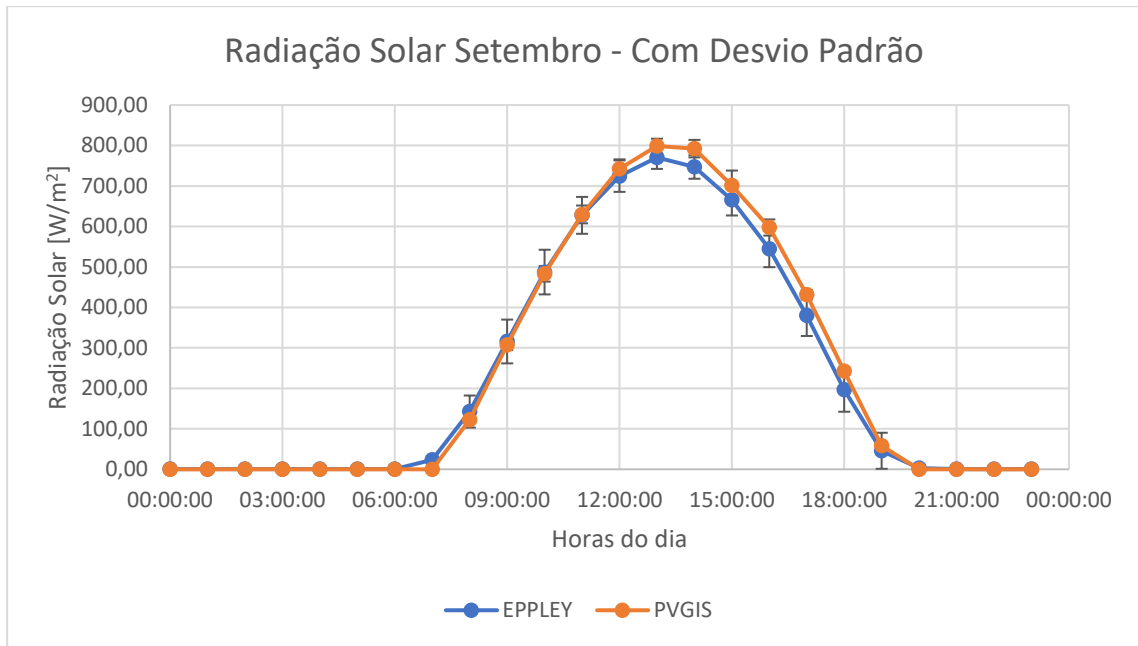


Gráfico 37 - Previsão da radiação solar para setembro de 2024 com desvio padrão

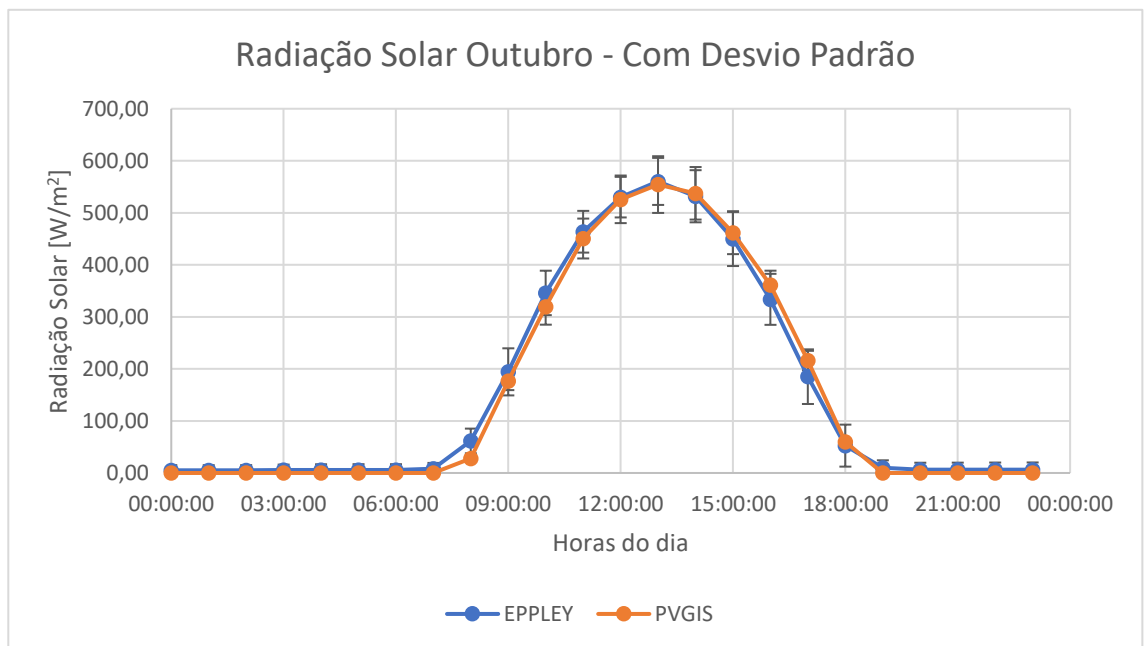


Gráfico 38 - Previsão da radiação solar para outubro de 2024 com desvio padrão

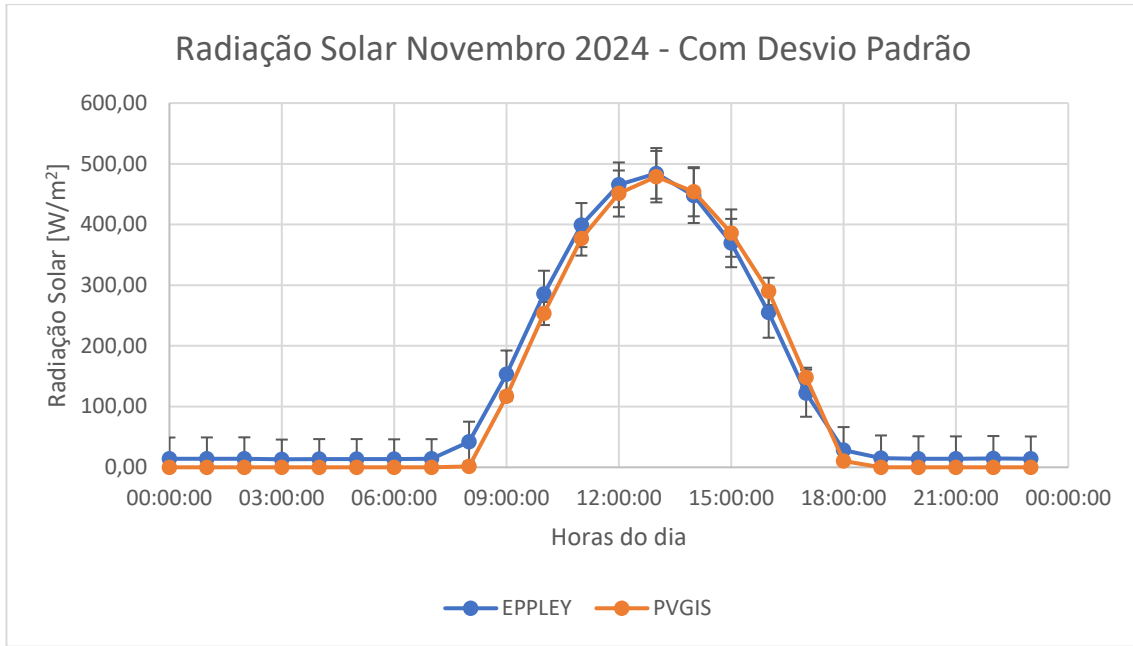


Gráfico 39 - Previsão da radiação solar para novembro de 2024 com desvio padrão

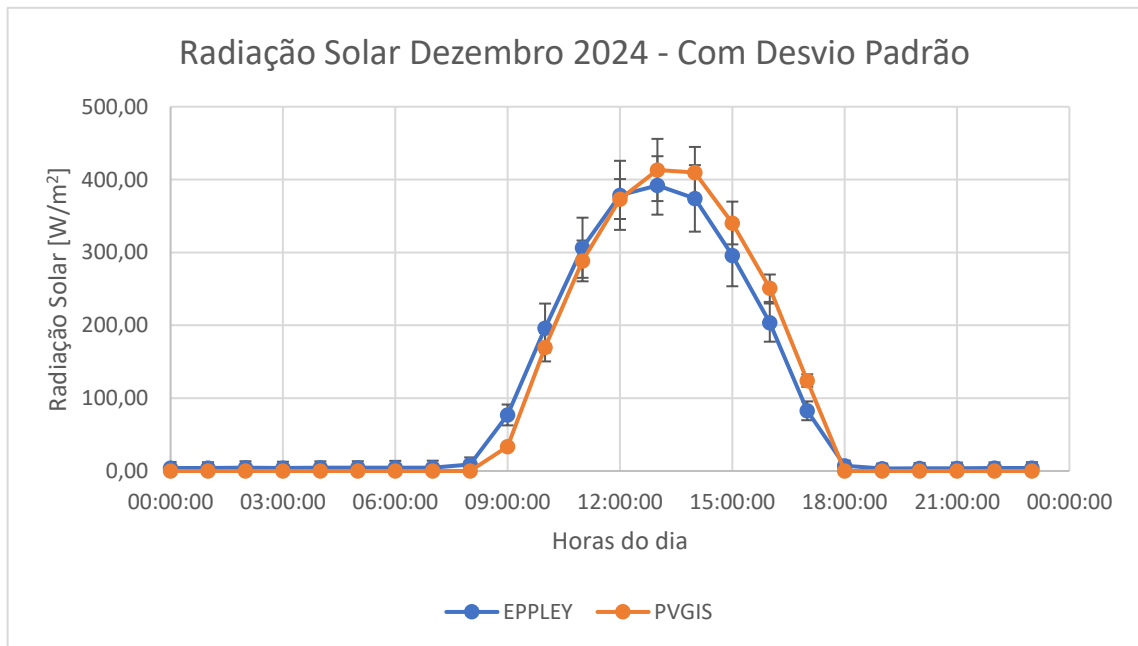


Gráfico 40 - Previsão da radiação solar para dezembro de 2024 com desvio padrão

A.2 COMPARAÇÃO DA PREVISÃO MÉDIA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA OS DIAS 15 DE CADA MÊS DO ANO DE 2024 – COM DESVIO PADRÃO

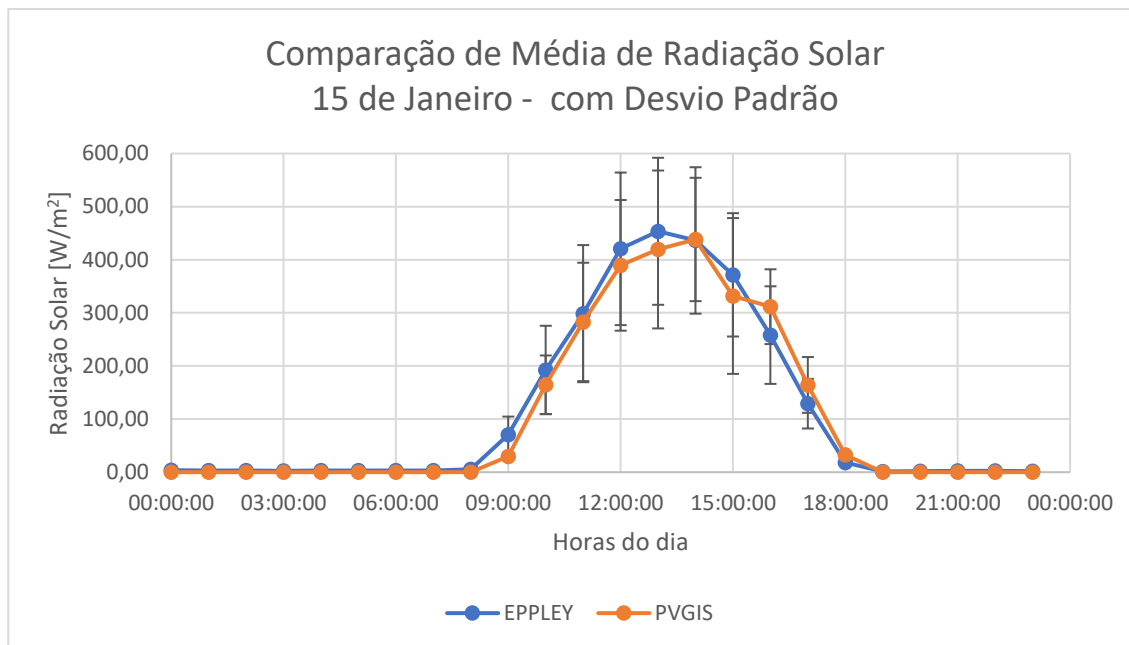


Gráfico 41 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de janeiro de 2024 com desvio padrão.

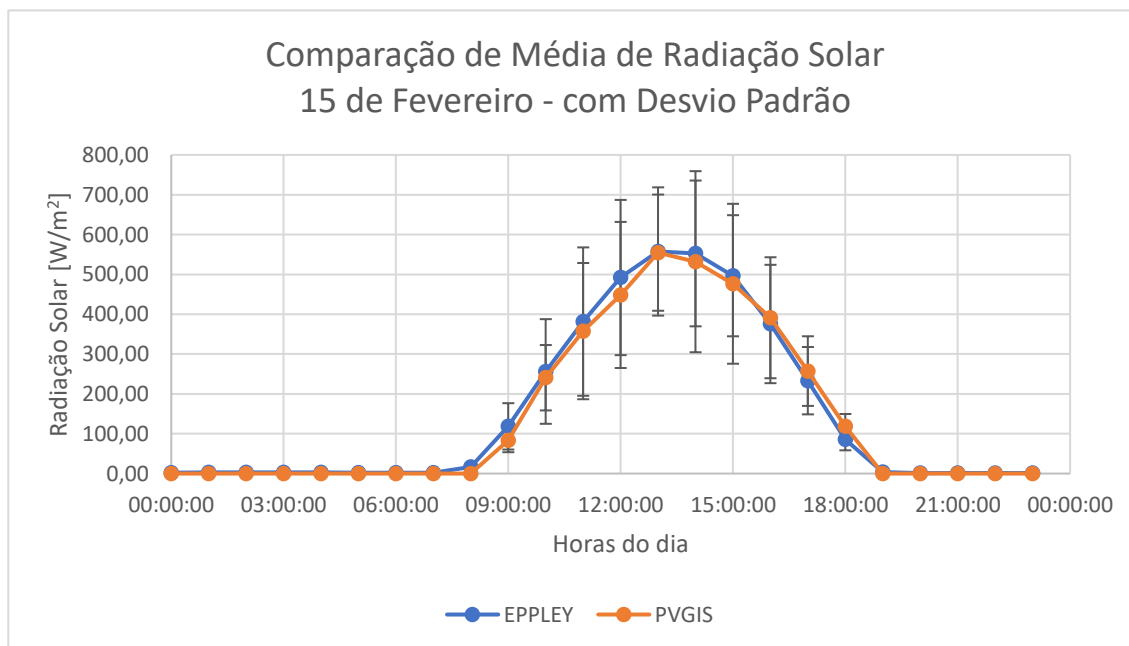


Gráfico 42 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de fevereiro de 2024 com desvio padrão.

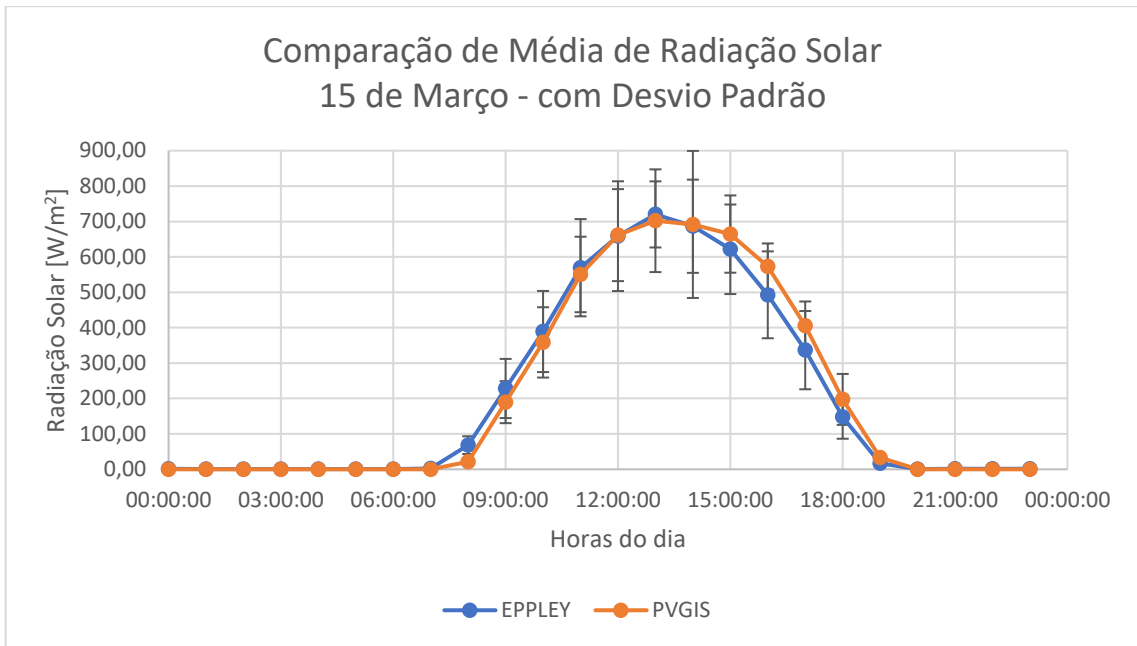


Gráfico 43 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de março de 2024 com desvio padrão.

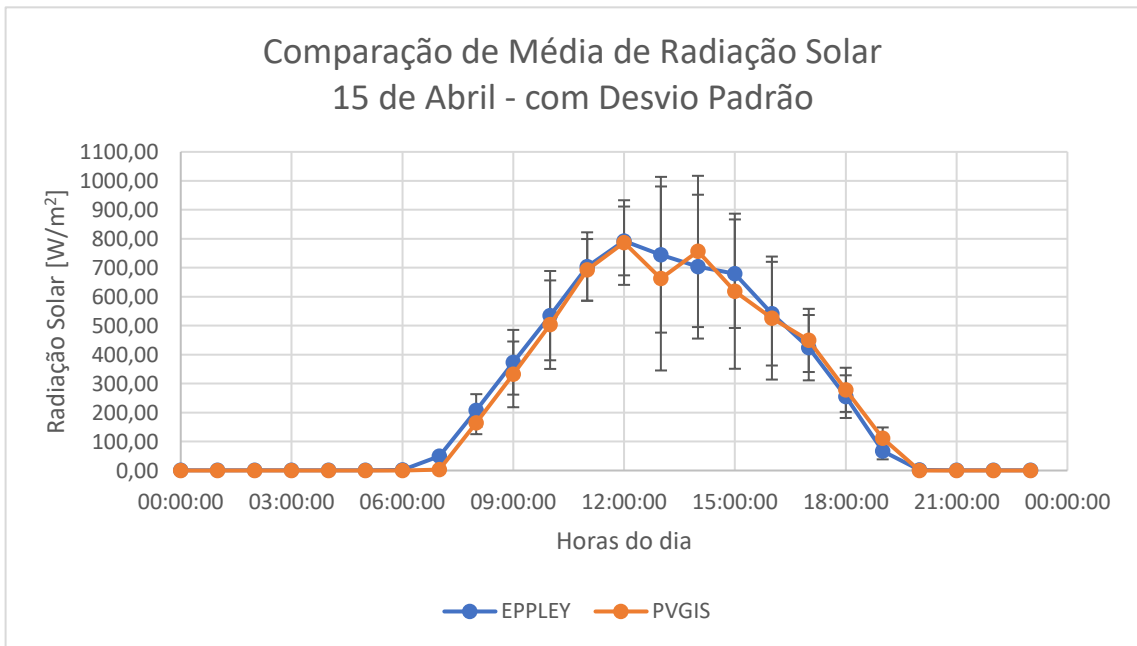


Gráfico 44 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de abril de 2024 com desvio padrão.

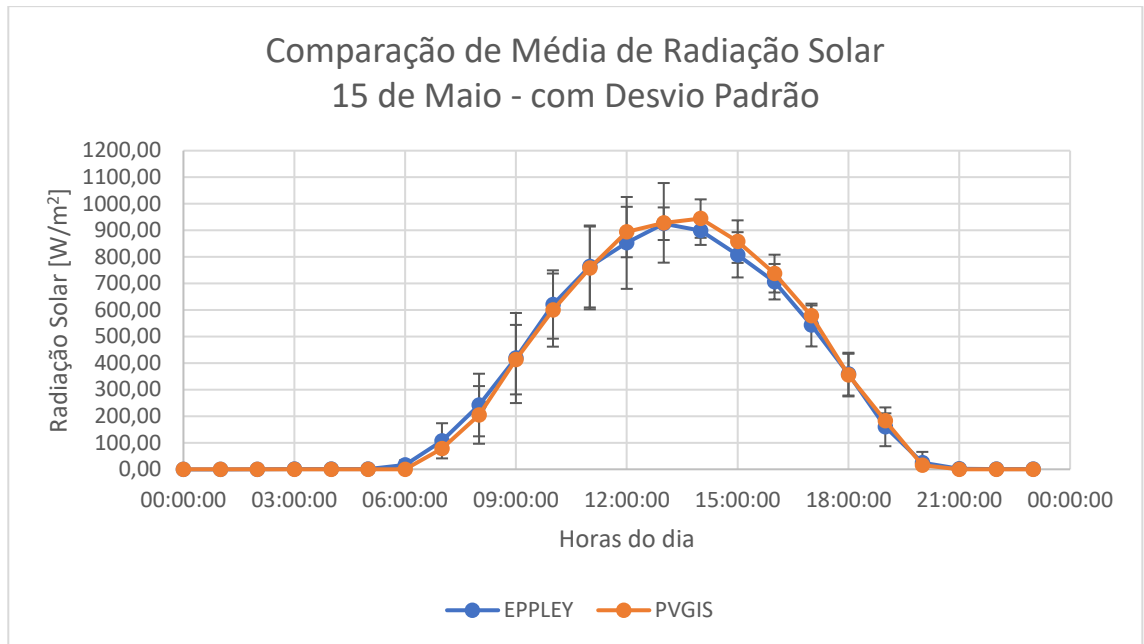


Gráfico 45 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de maio de 2024 com desvio padrão.

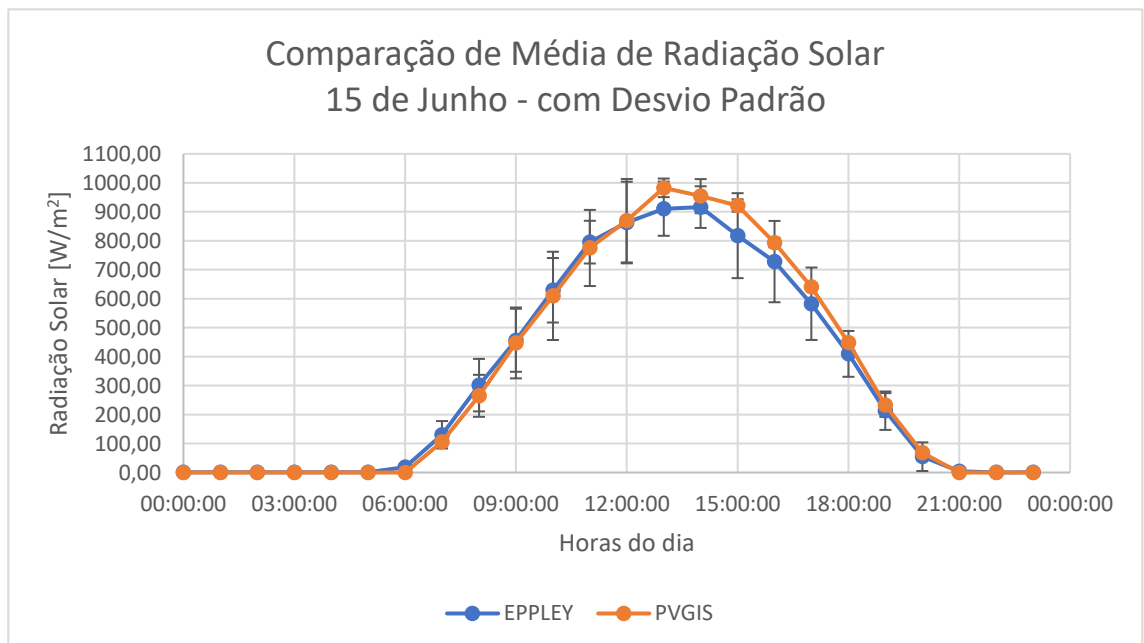


Gráfico 46 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de junho de 2024 com desvio padrão.

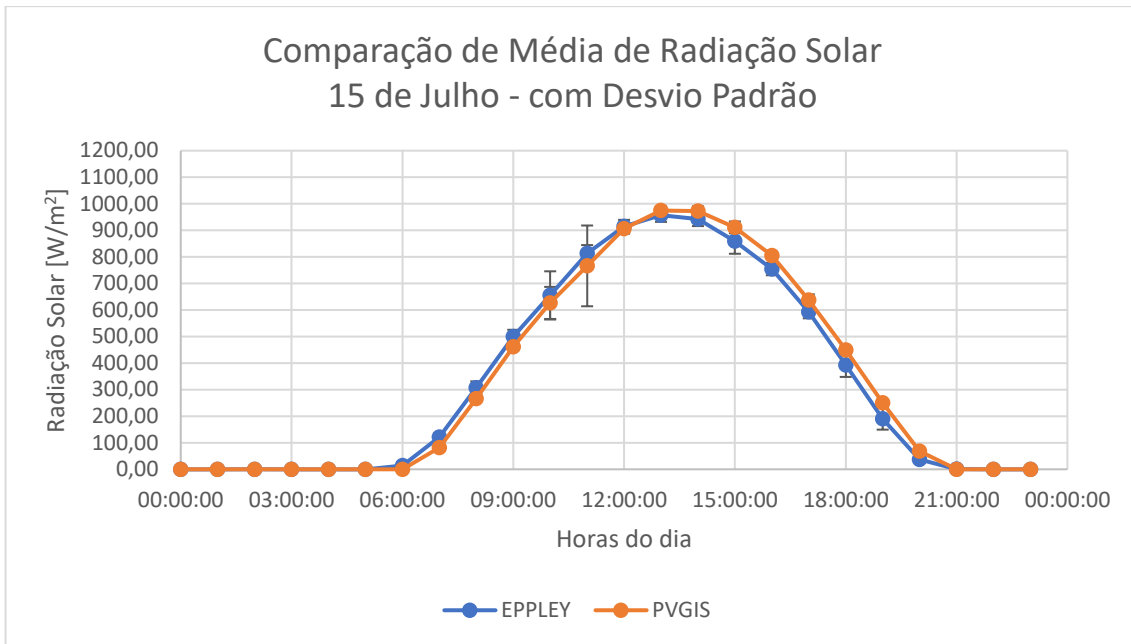


Gráfico 47 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de julho de 2024 com desvio padrão.

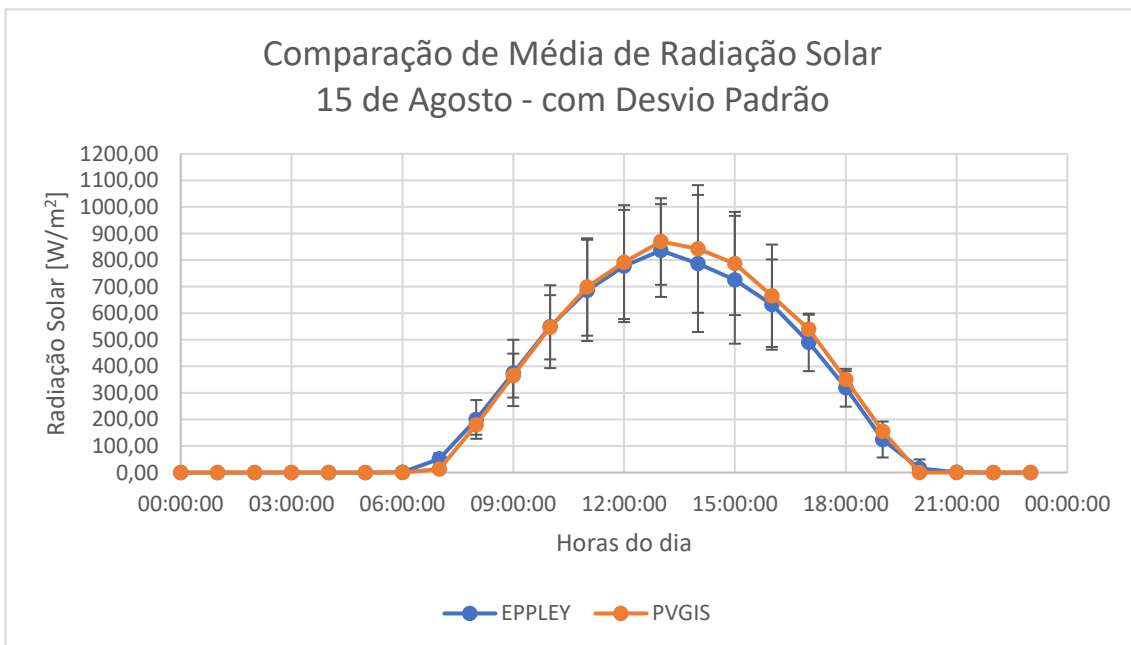


Gráfico 48 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de agosto de 2024 com desvio padrão.

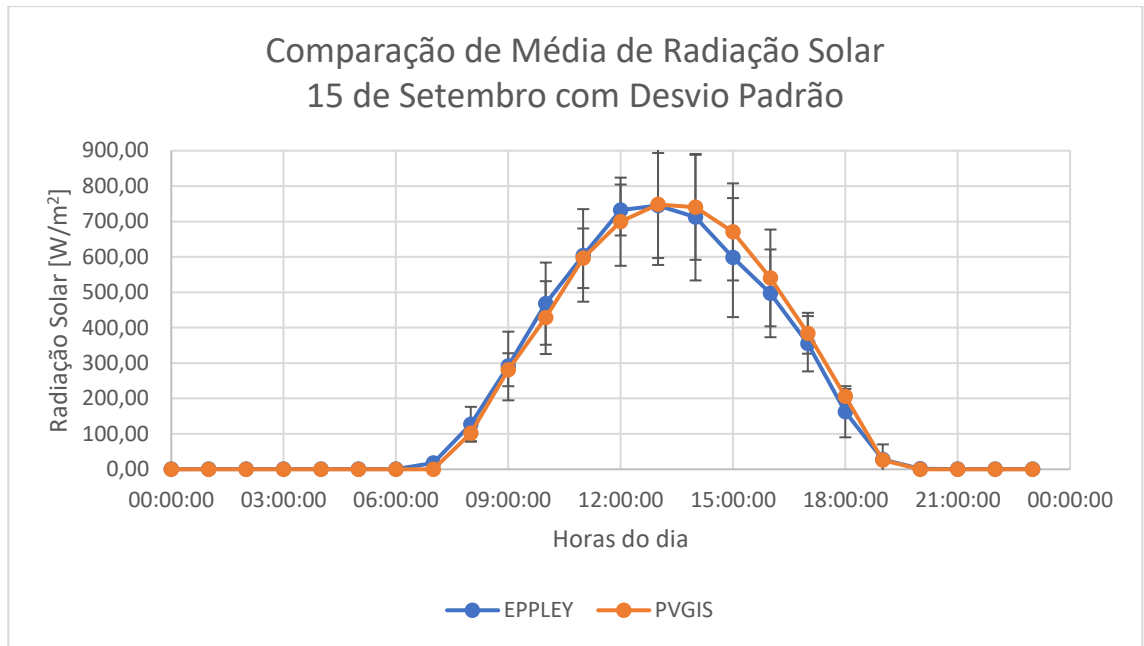


Gráfico 49 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de setembro de 2024 com desvio padrão.

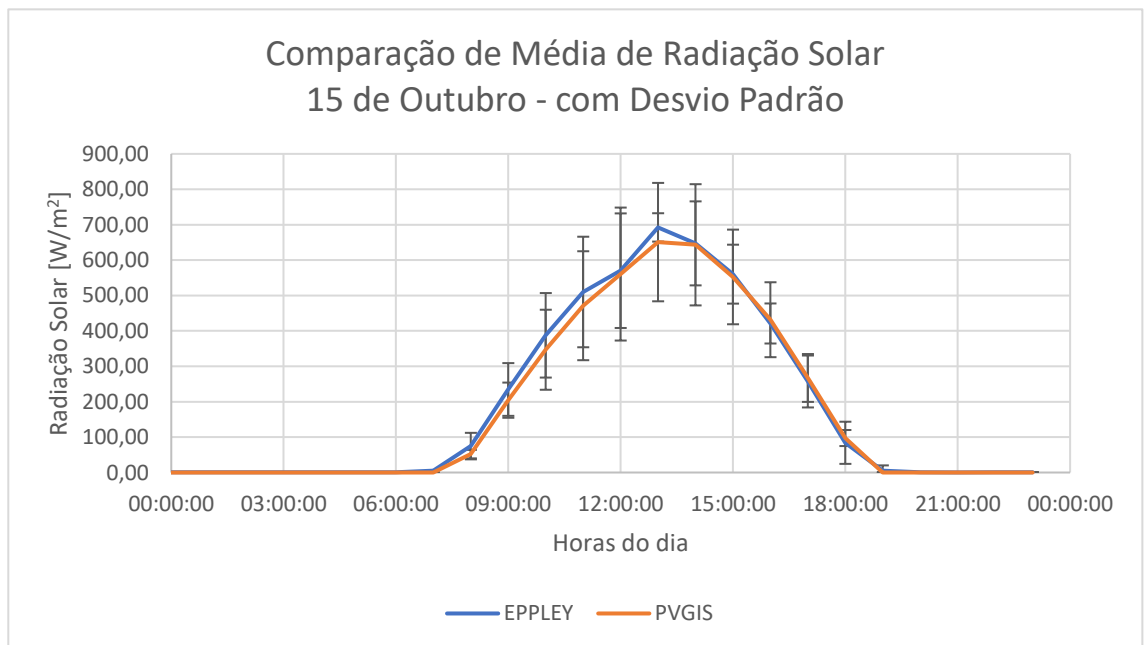


Gráfico 50 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de outubro de 2024 com desvio padrão.

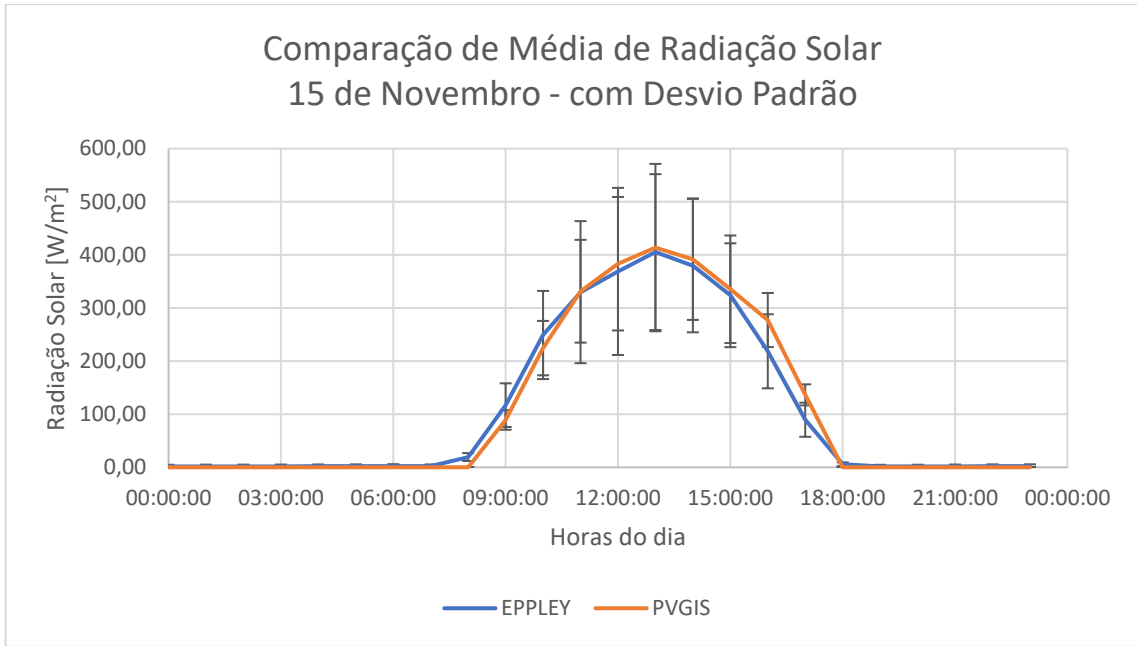


Gráfico 51 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de novembro de 2024 com desvio padrão.

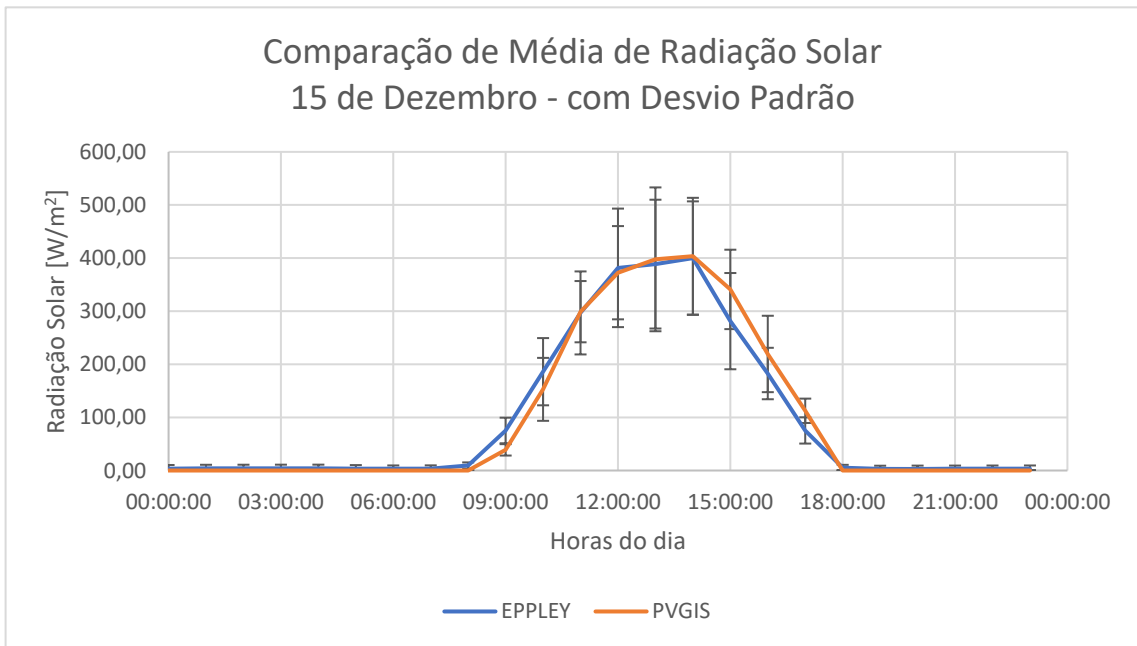


Gráfico 52 - Previsão da radiação média solar para o dia 15 de dezembro de 2024 com desvio padrão.

A.3 GRÁFICOS DE DIAGRAMA DE CARGA DE ENERGIA CONSUMIDA E ENERGIA PRODUZIDA COM ORIENTAÇÃO DE 25° SW – ALINHADA COM O EDIFÍCIO

Apresentam-se, neste apêndice A.1, os gráficos de diagramas de carga da energia consumida pelo edifício e da previsão de energia produzida, com recurso a modelação numérica enunciada no capítulo 4, subcapítulo 4.1, pela instalação fotovoltaica em análise, para uma orientação solar de 25° SW, sendo esta a mesma orientação do edifício.

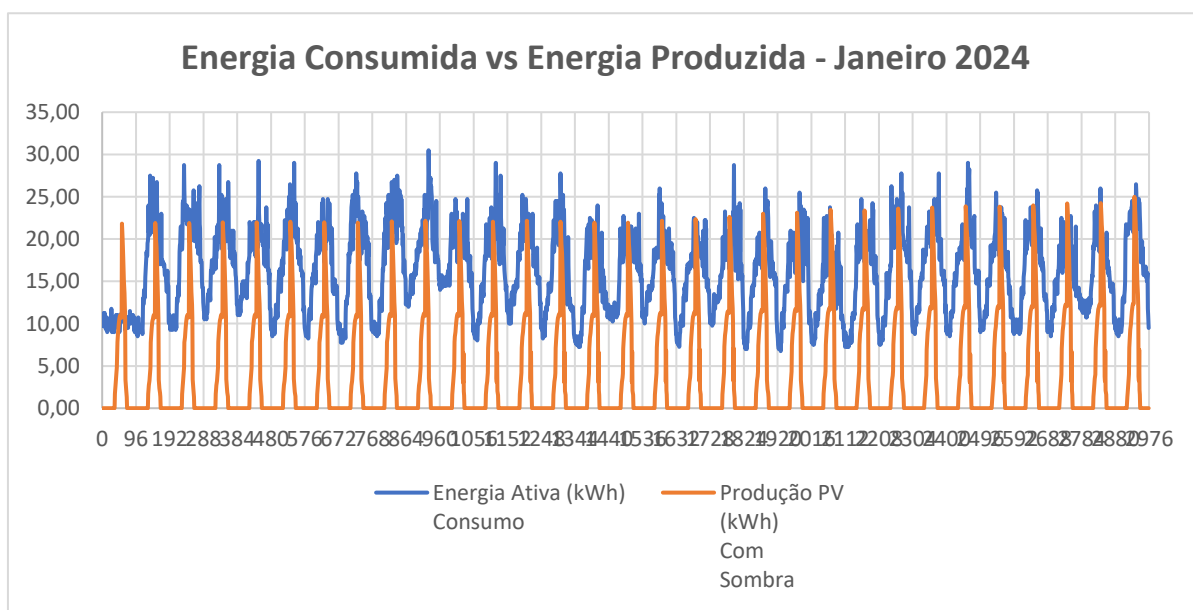


Gráfico 53 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Janeiro 2024

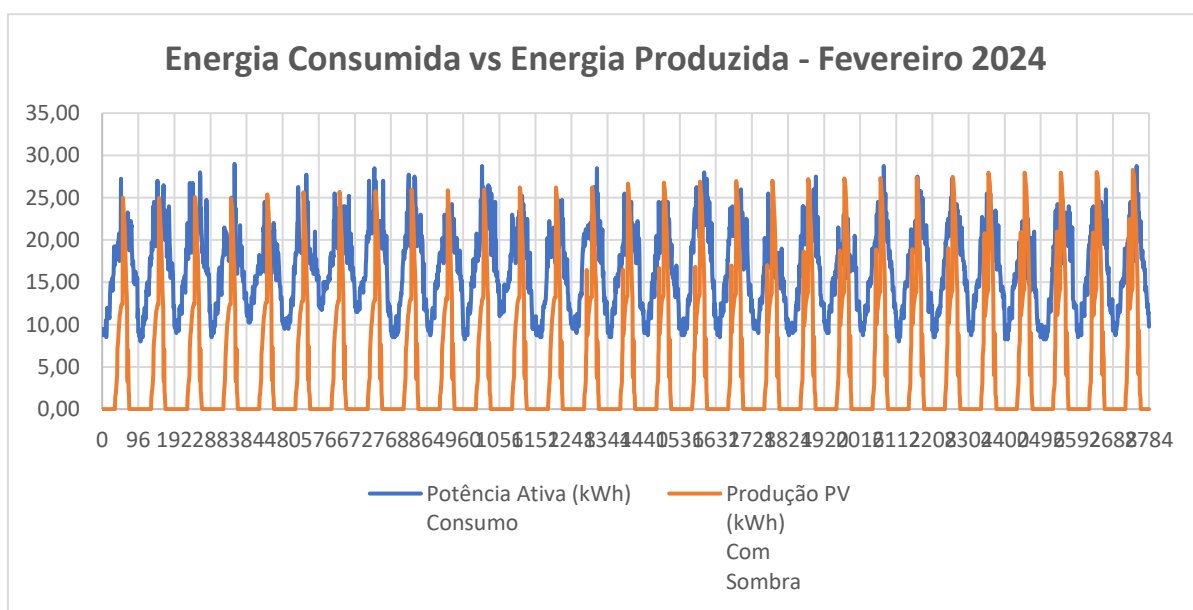


Gráfico 54 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Fevereiro 2024

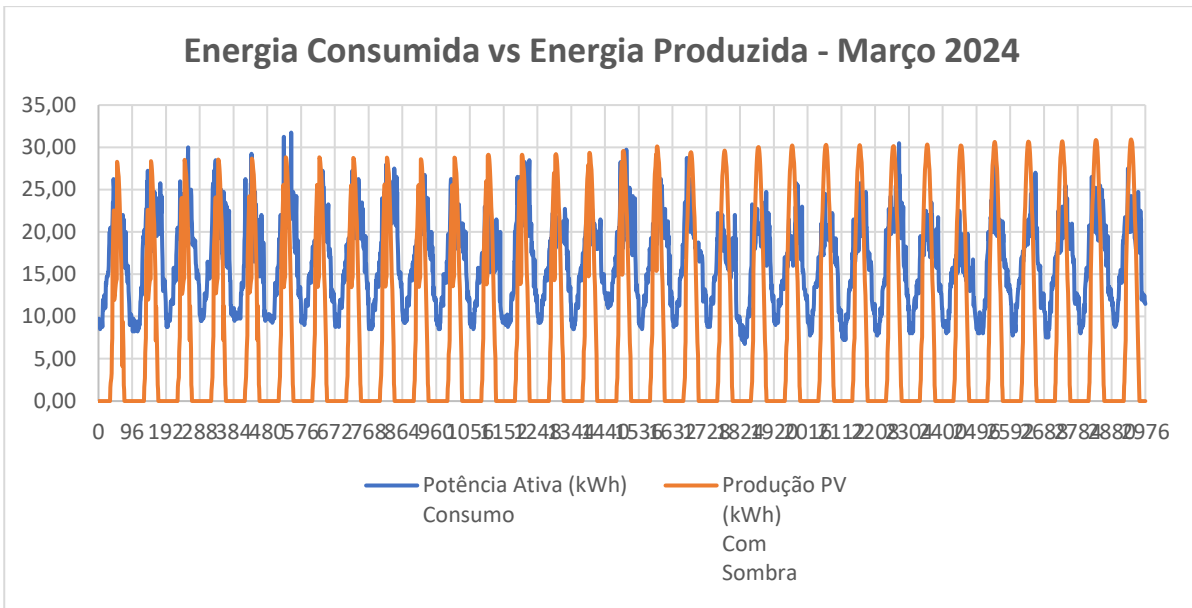


Gráfico 55 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Março 2024

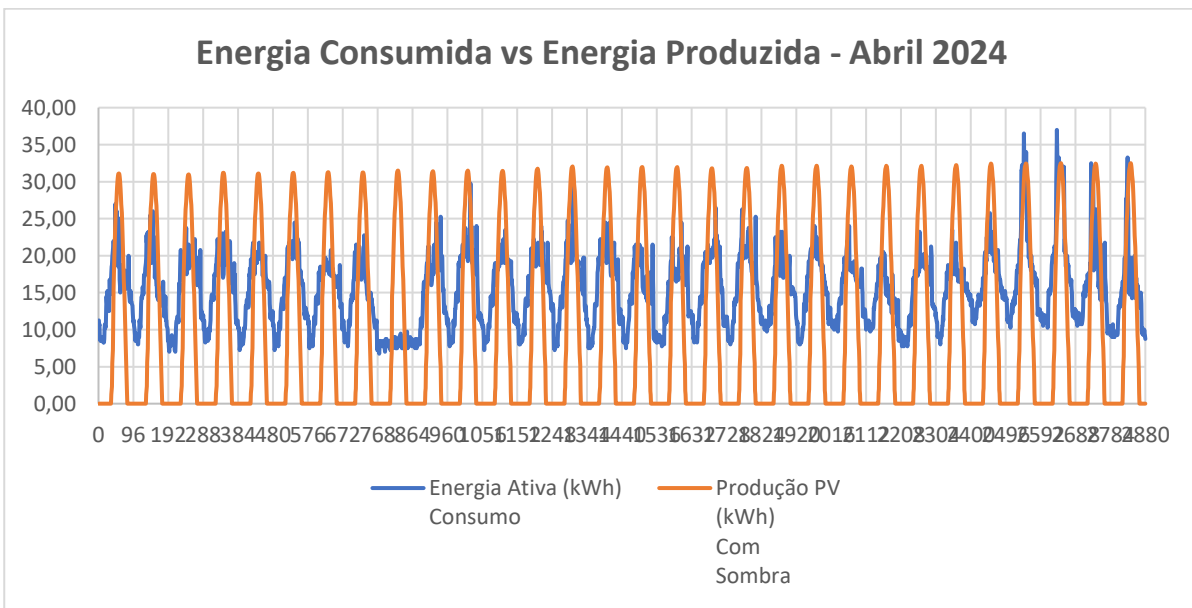


Gráfico 56 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Abril 2024

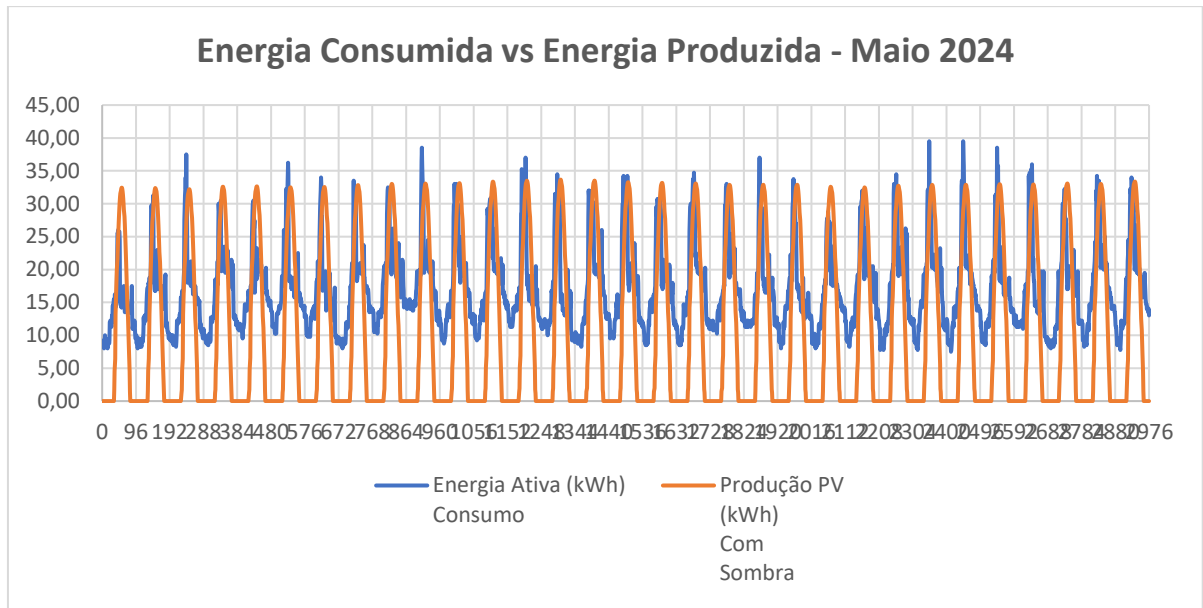


Gráfico 57 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Maio 2024

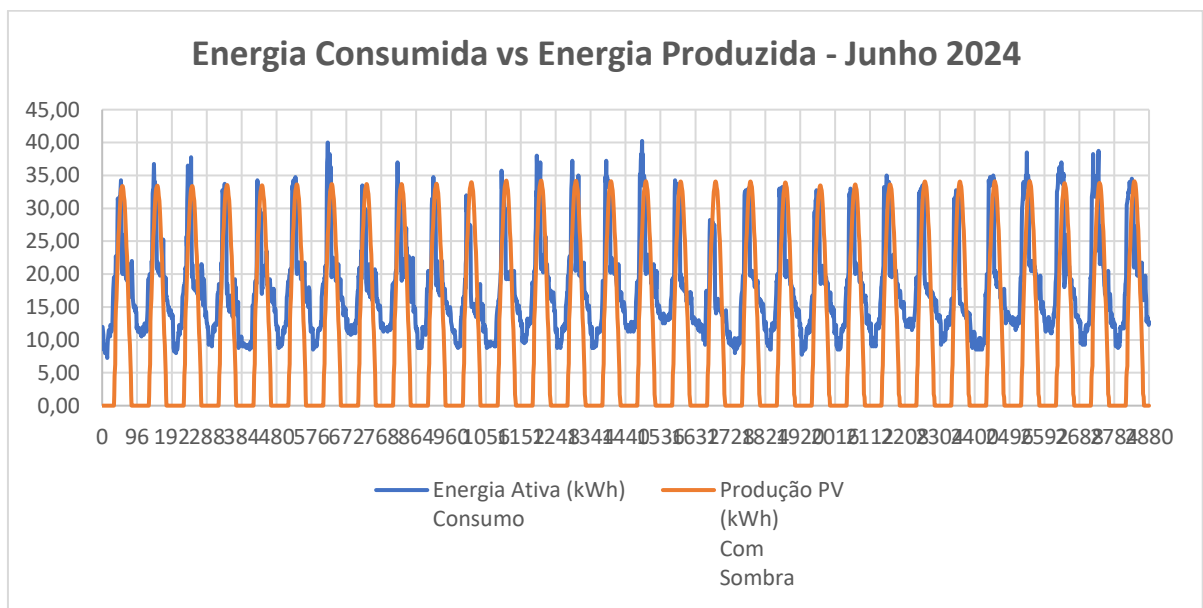


Gráfico 58 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Junho 2024

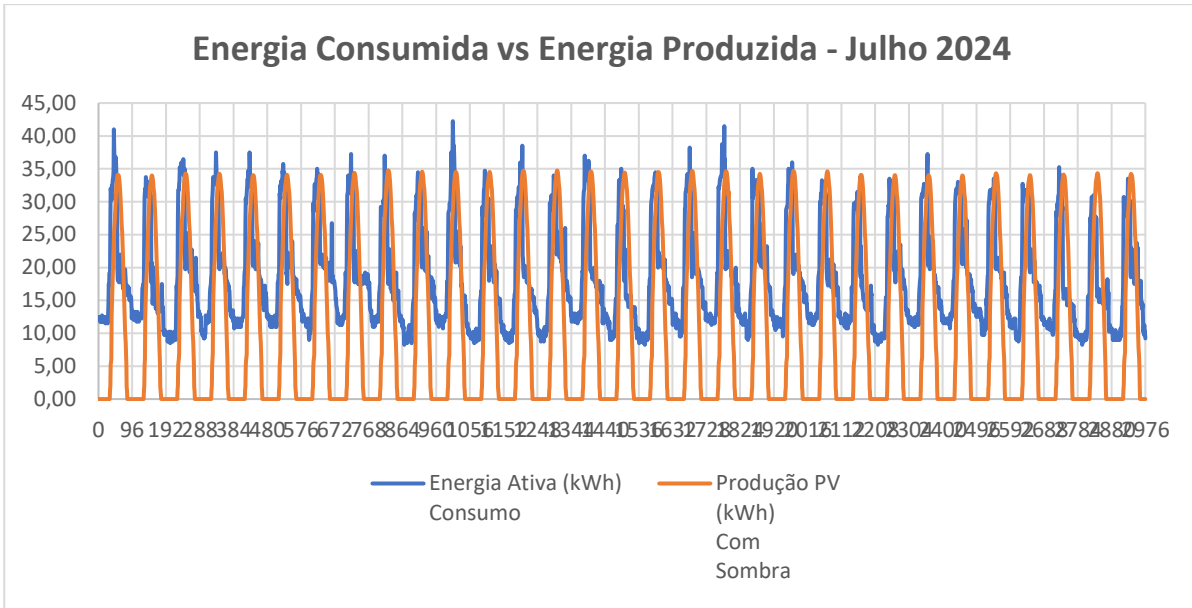


Gráfico 59 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Julho 2024

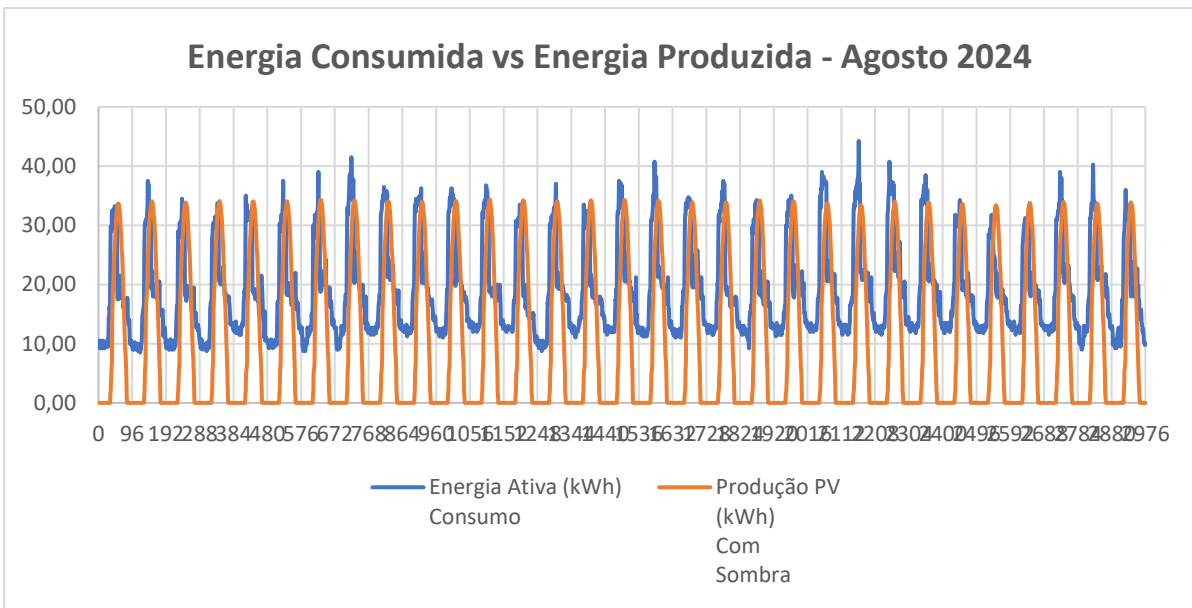


Gráfico 60 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Agosto 2024

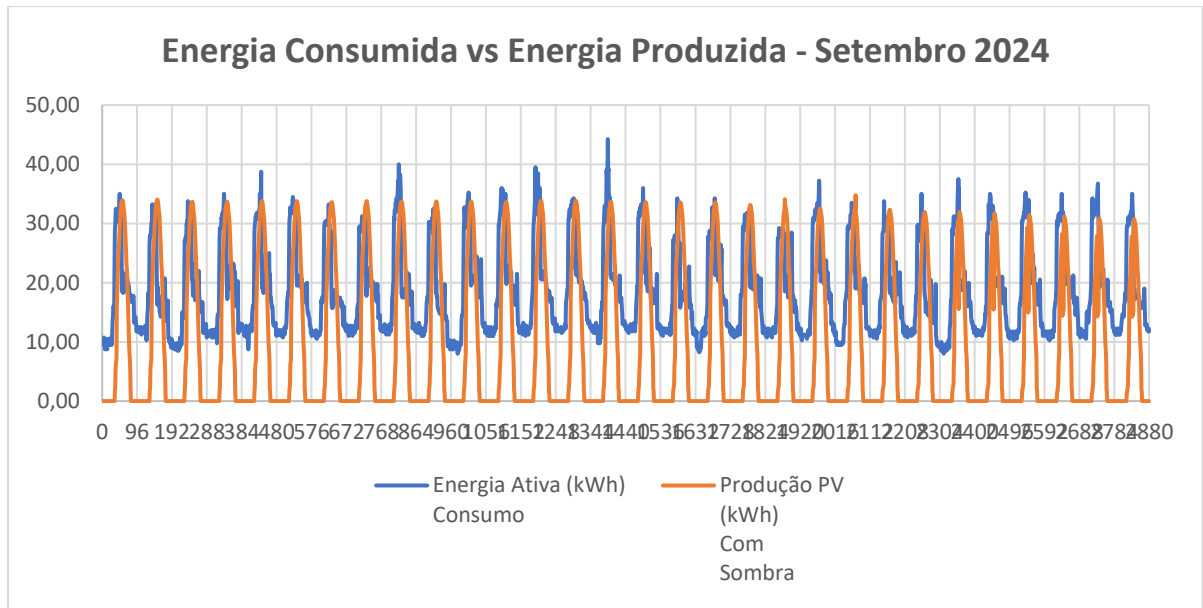


Gráfico 61 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Setembro 2024

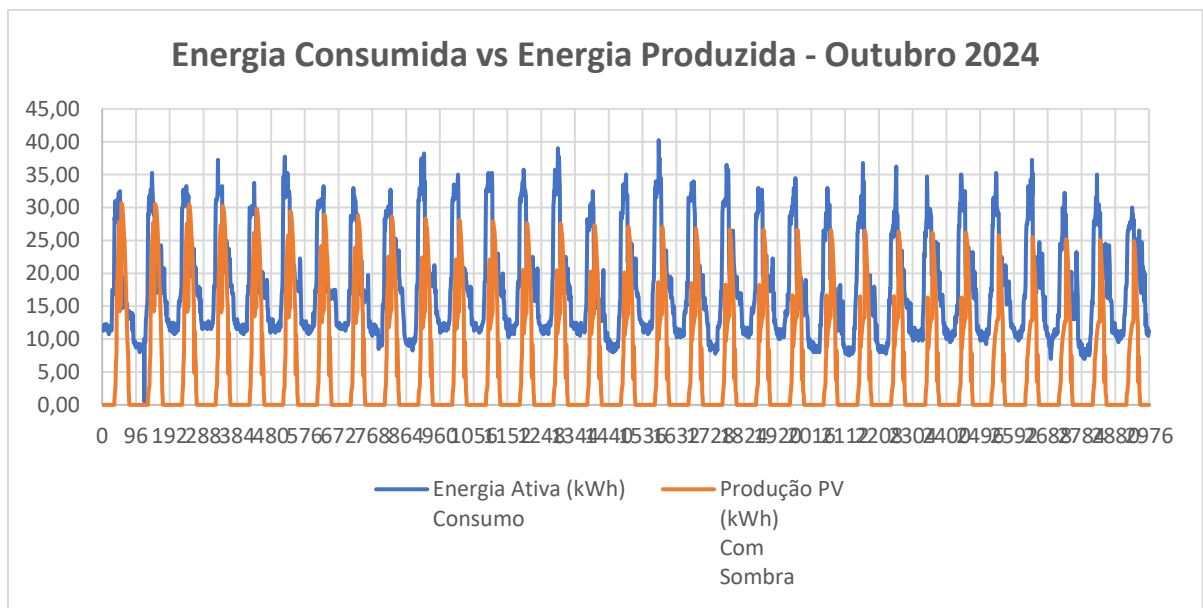


Gráfico 62 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Outubro 2024

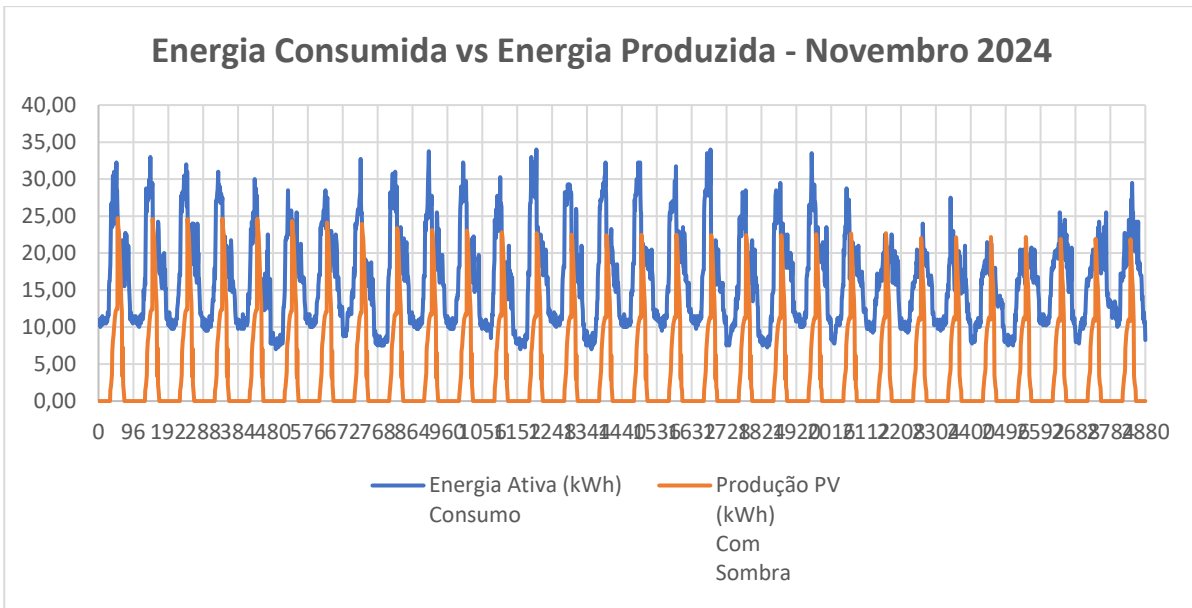


Gráfico 63 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Novembro 2024

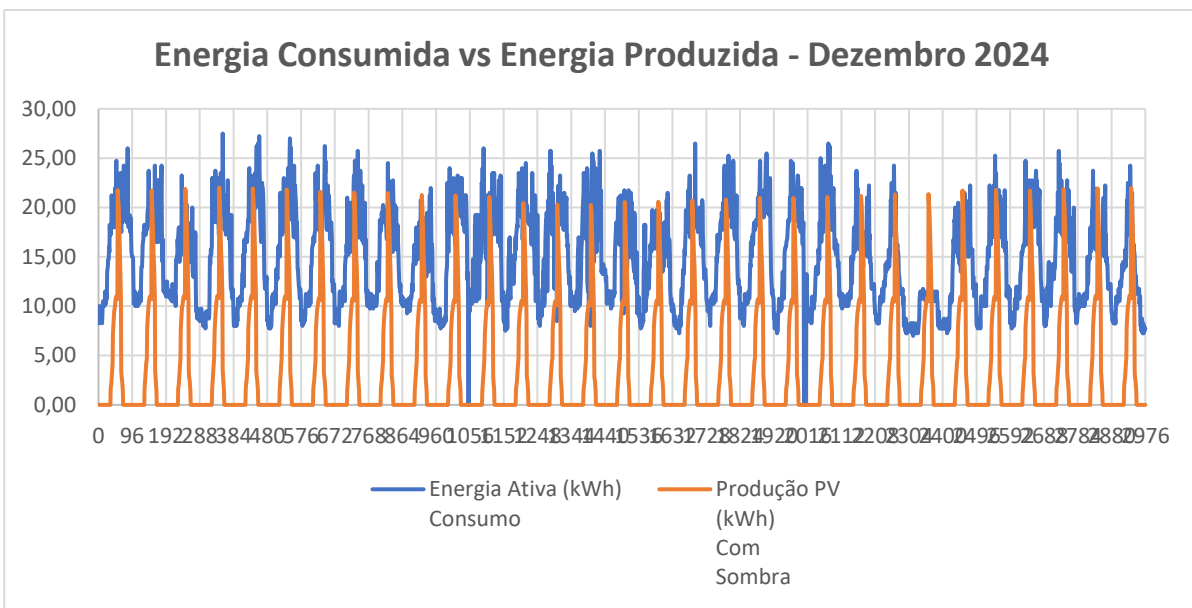


Gráfico 64 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 25° SW - Dezembro 2024

A.4 GRÁFICOS DE DIAGRAMA DE CARGA DE ENERGIA CONSUMIDA E ENERGIA PRODUZIDA COM ORIENTAÇÃO DE 0° S – ORIENTAÇÃO A SUL

Apresentam-se, neste apêndice A.2, os gráficos de diagramas de carga da energia consumida pelo edifício e da previsão de energia produzida pela instalação fotovoltaica em análise, para uma orientação solar de 0° Sul.

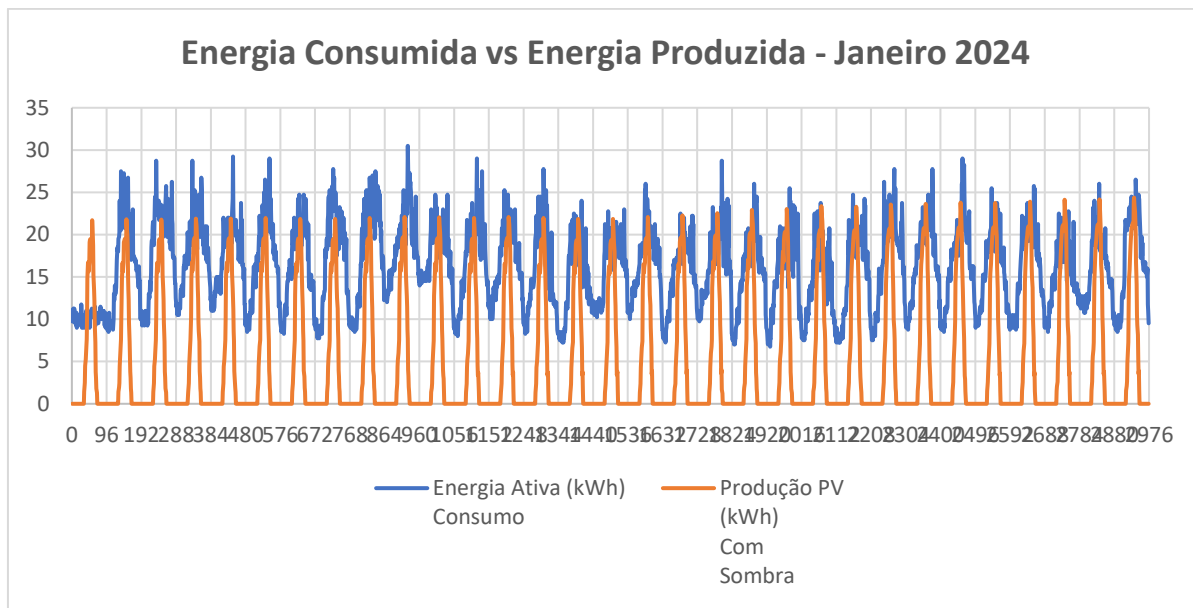


Gráfico 65 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Janeiro 2024

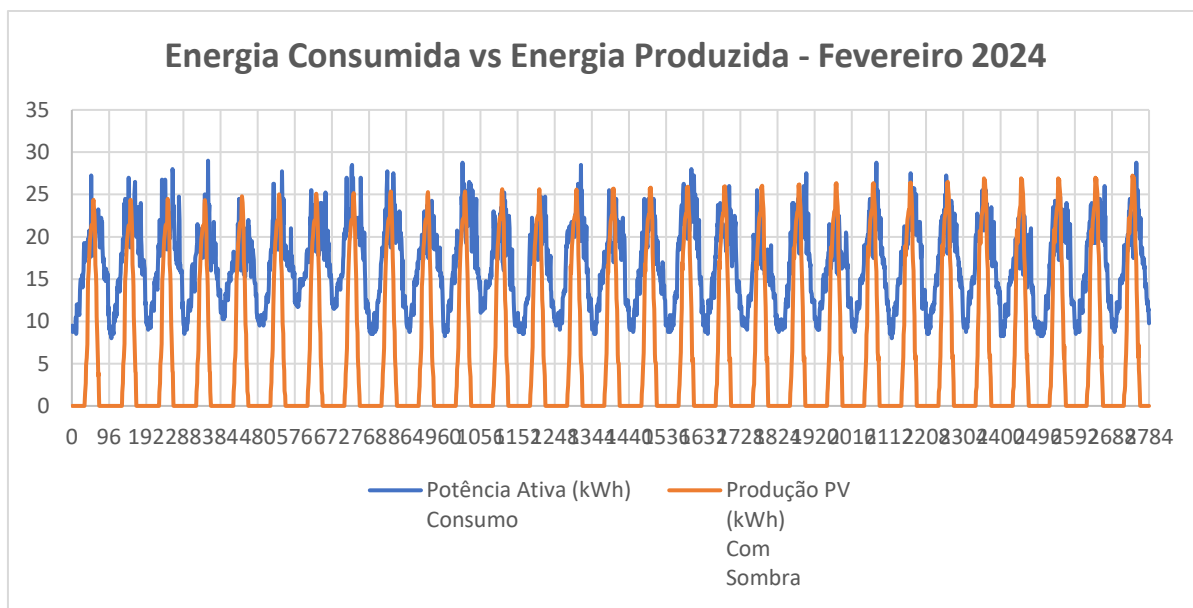


Gráfico 66 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Fevereiro 2024

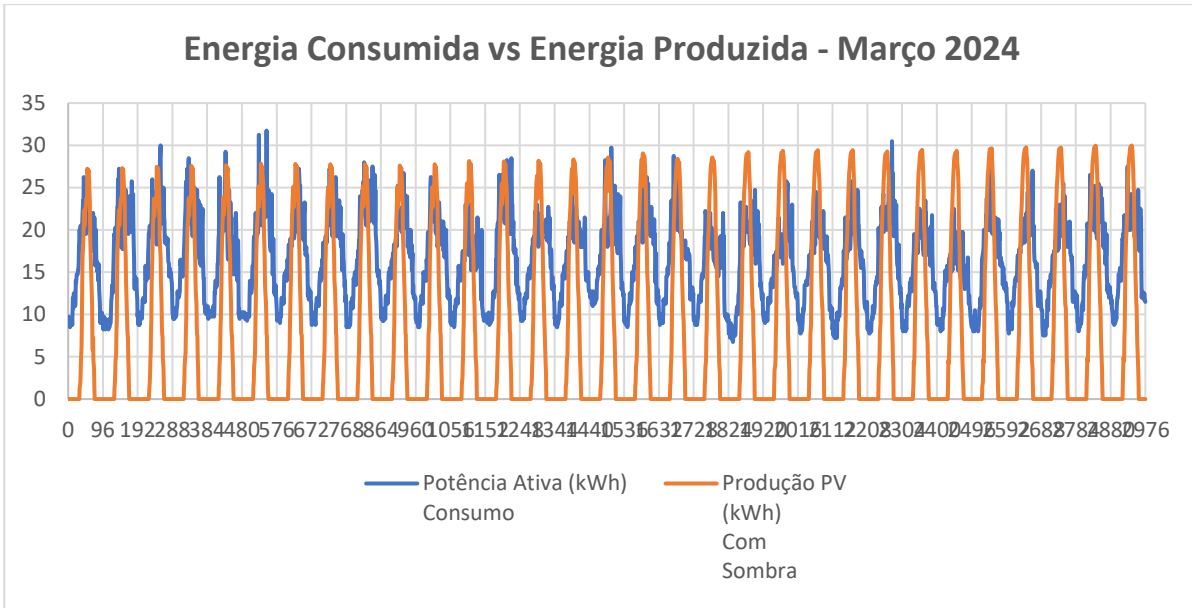


Gráfico 67 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Março 2024

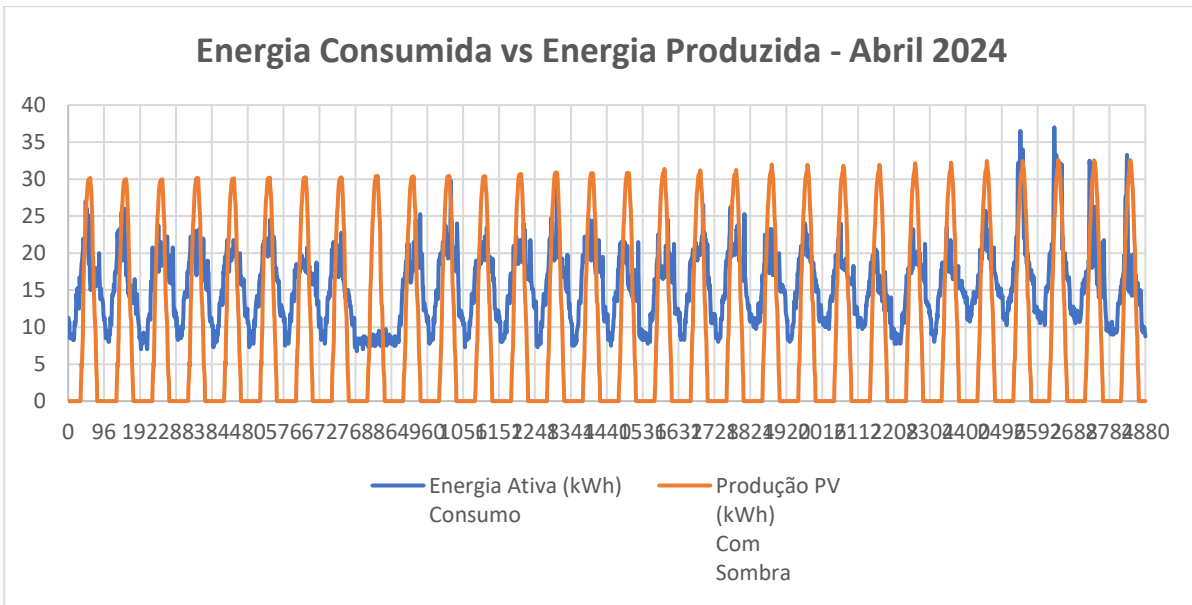


Gráfico 68 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Abril 2024

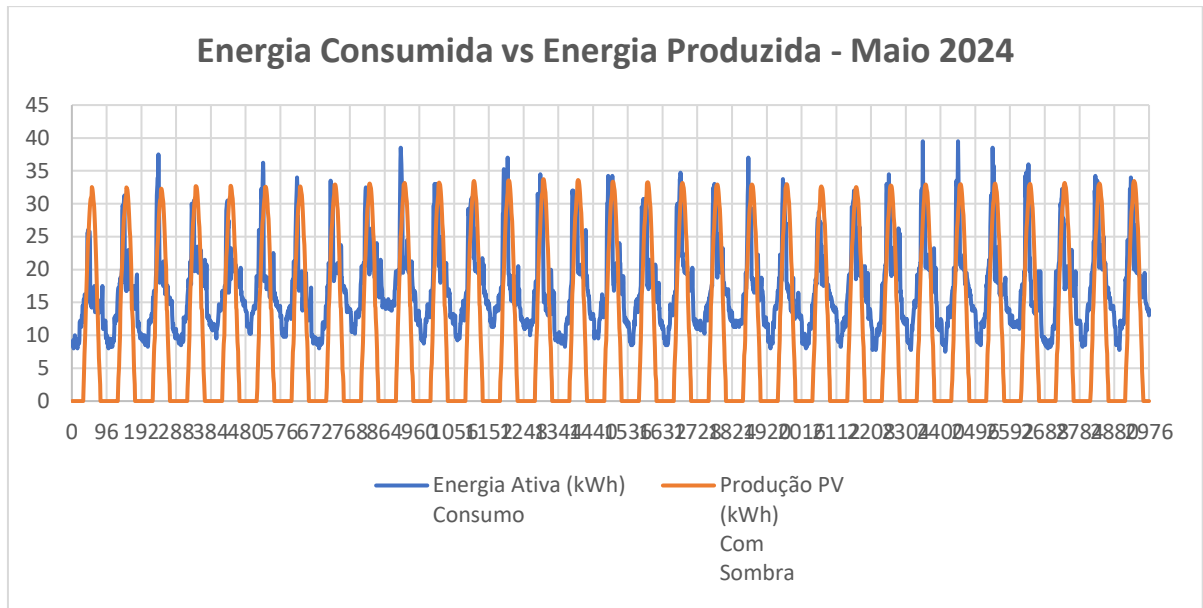


Gráfico 69 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Maio 2024

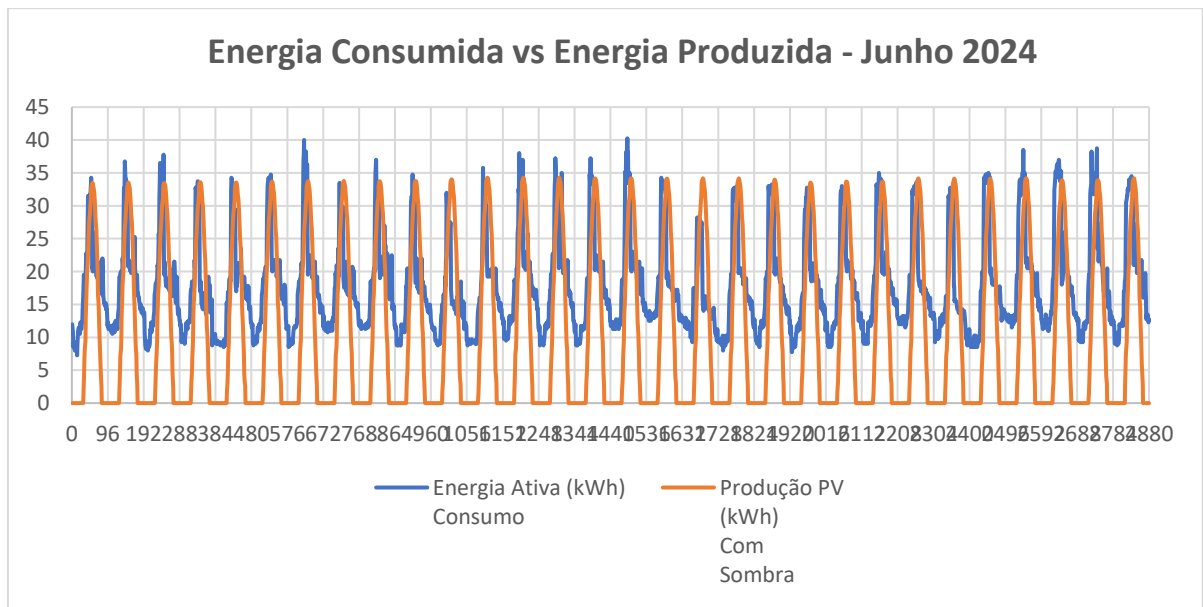


Gráfico 70 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Junho 2024

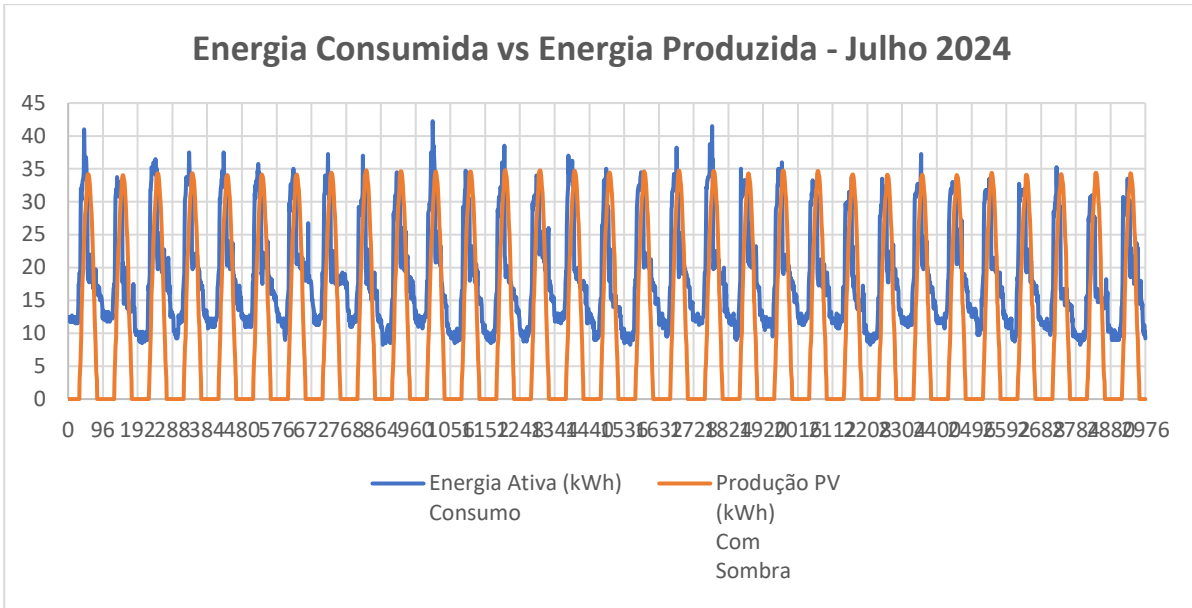


Gráfico 71 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Julho 2024

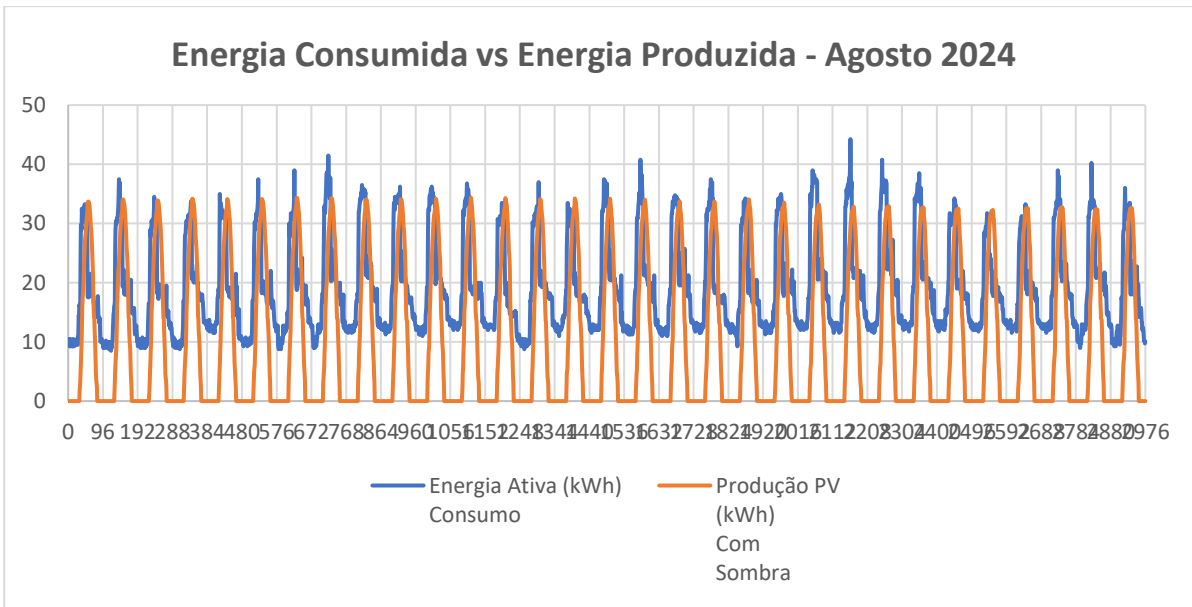


Gráfico 72 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Agosto 2024

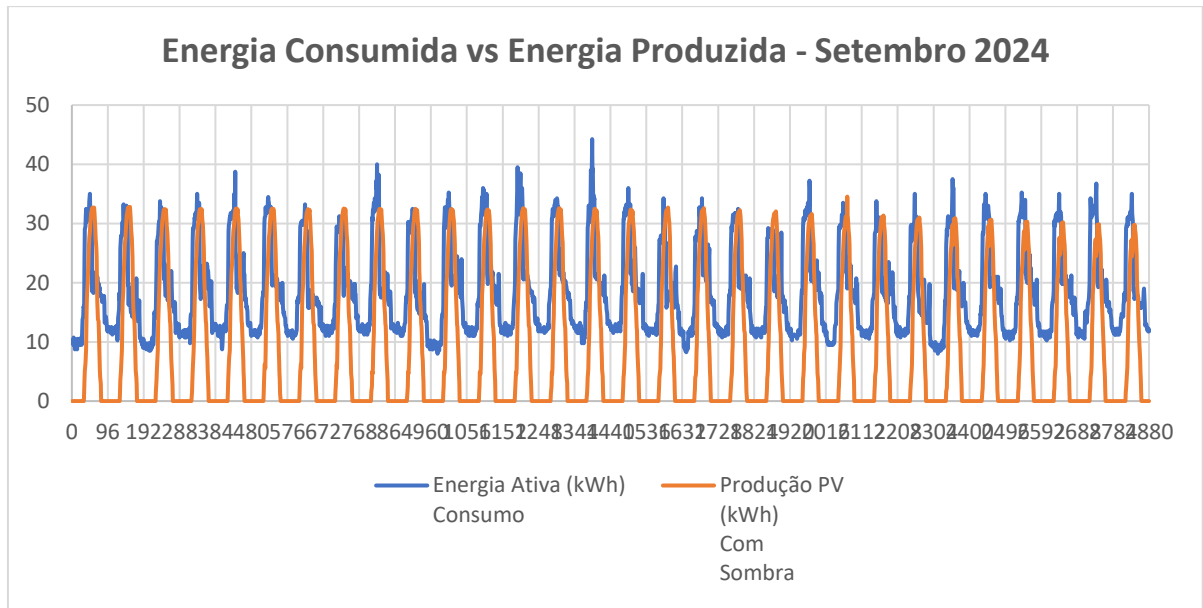


Gráfico 73 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Setembro 2024

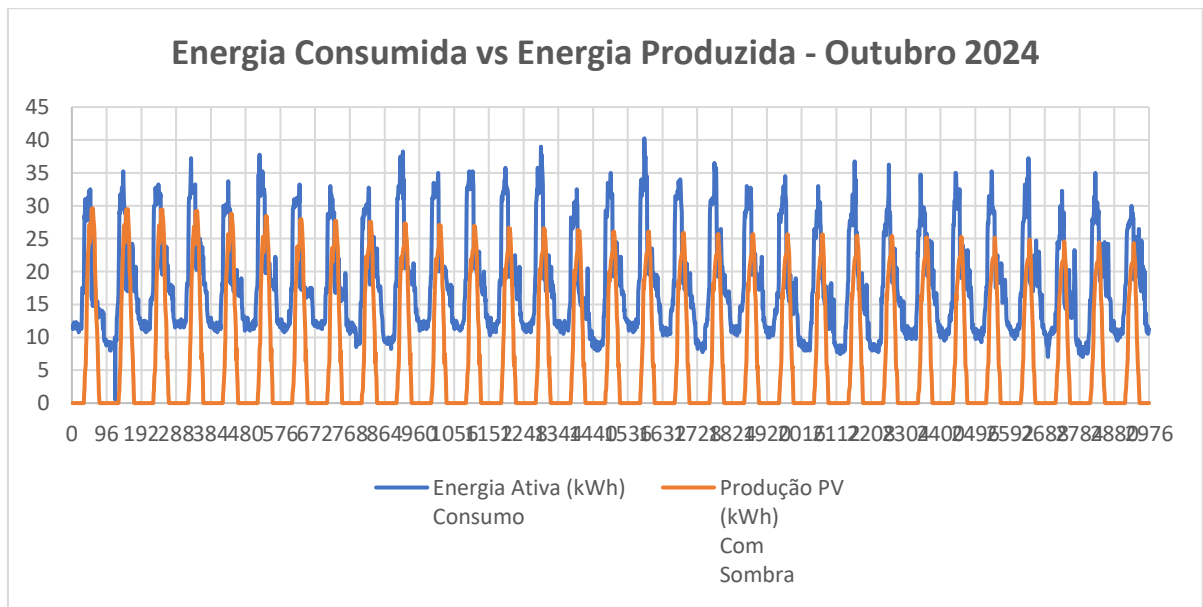


Gráfico 74 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Outubro 2024

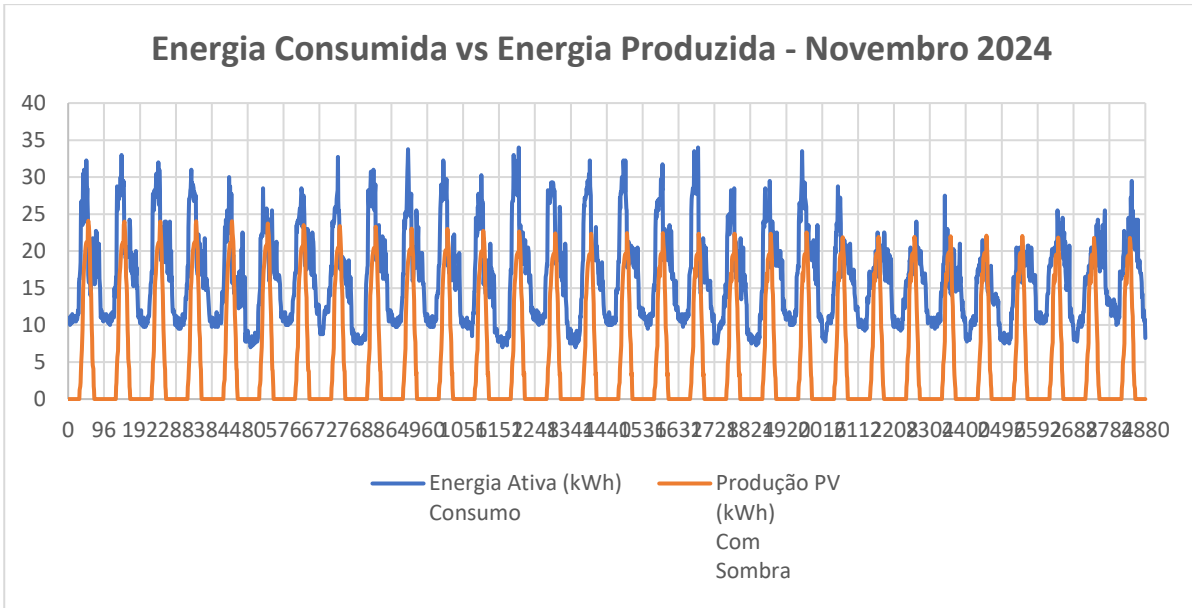


Gráfico 75 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Novembro 2024

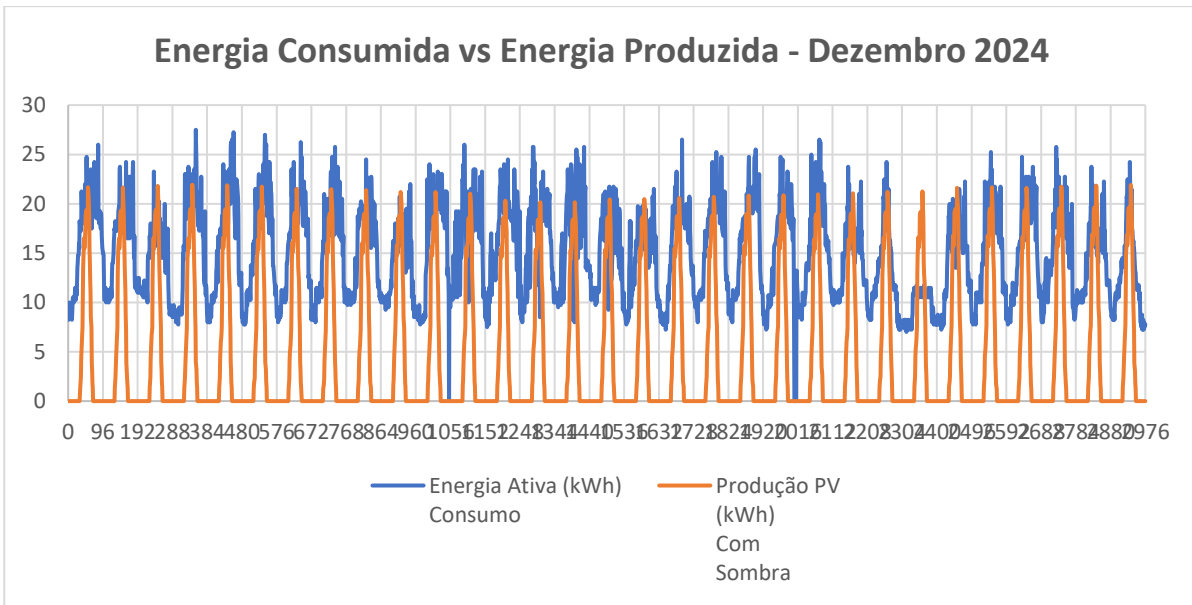


Gráfico 76 - Energia Consumida vs Energia Produzida a 0° S - Dezembro 2024