



**Politécnico  
Castelo Branco**

Escola Superior  
de Tecnologia

# ***Solar farm*-Conciliação da produção fotovoltaica com a produção agrícola: Vinhas e Pastagens**

Edu Mané

Aluno nº 20210145

## **Orientadores**

Prof. Doutora Paula Cristina Alves Pereira, Prof. adjunto

Prof. Doutor Nuno Cláudio da Rocha Meses Pedro, Prof. adjunto

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de licenciado em Engenharia das Energias Renováveis, realizada sob a orientação científica da Professora Adjunta Doutora Paula Cristina Alves Pereira, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

**Setembro de 2025**



## **Composição do júri**

Presidente do júri

Doutor José Sarreira Tomás Monteiro

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogal

Doutor António José Cerejo da Silva

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Castelo Branco

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho, à minha família. Ao meu pai e à minha mãe, pelo amor incondicional, cuidado e dedicação que deram a força necessária.

Aos meus orientadores, pela partilha de conhecimento e a disponibilidade de ajudar em todo momento.

Aos meus amigos, pela constante presença, pelas palavras de encorajamento nos momentos bons e difíceis ao longo deste percurso.

## **Agradecimentos**

Muitas pessoas contribuíram em minha vida e formação e cada uma delas tenho muito a agradecer. E quero particularizar meu agradecimento:

A minha família, em especial os meus pilares, Mãe e Pai pelo amor, pela educação e confiança.

A professora Paula Cristina Alves Pereira, que foi muito mais do que uma orientadora. Foi apoio nos assuntos escolares, assim como sociais. Obrigado, pela orientação, amizade e pelas diversas oportunidades de engrandecer minha carreira e o professor Nuno Cláudio da Rocha Meses Pedro, pelo apoio incondicional, orientação e a disponibilidade demonstrado ao longo desse processo.

E, finalmente, ao meu amigo irmão, Manuel Wilson Gomes, pela sua presença constante nem todos os momentos. A sua confiança, apoio e amizade significam mais do que palavras podem expressar.

## Resumo

O aumento da produção de energia fotovoltaica (FV) em grande dimensão é necessário para mitigação das mudanças climáticas, mas enfrenta desafios significativos por causa de crescente competição pelo uso da terra. Com aumento da população e a necessidade crescente da produção dos alimentos, a acessibilidade de terrenos para instalação dos painéis solares torna-se um problema. Neste contexto, este projeto apresenta uma alternativa conhecida como sistema agrivoltaico (AVS), que é o aproveitamento simultâneo do solo para produção de energia solar e para agricultura, proporcionando benefícios ambientais e económicos. O estudo combina a produção FV com a produção agrícola de vinhas e pastagem na quinta da Escola Superior de Agrária (ESA) no Castelo Branco, Portugal, avaliou a configuração do sistema, o efeito de sombreamento dos painéis nos rendimentos das culturas e viabilidade económica.

Na vinha, os resultados mostraram uma elevada valor de índice de equivalência de uso do solo (LER) igual a 2,50, refletindo um aproveitamento duplo vantajoso de 150% em eficiência de uso da terra. Verificou-se o aumento de 80% no rendimento agrícola face a agricultura convencional, o que associado a produção de energia, resultou uma receita anual de 5 453% superior obtida apenas com atividade agrícola convencional na mesma área de estudo e evitou cerca de 197 t CO<sub>2</sub>e, com melhoria na eficiência do uso da água (WUE) de 6 % a 16 %, apesar de produzir menos 30% de energia e apresentou custo nivelado de energia (LCOE) 33% superior comparado com o sistema convencional.

No caso da pastagem, são analisadas duas configurações, a primeira (estrutura fixa e inclinada montada no solo) e a segunda (estrutura de paredes verticais), ambas as configurações analisadas mostraram ser eficientes em termos de sinergia de uso de solo. Mas, a segunda configuração foi escolhida para o seguimento de estudo e análise financeira por apresentar maior eficiência de uso duplo de solo e menor perda na produção de forragem. A segunda configuração, apresentou o LER de 1,60, mostrando 60% da eficiência no uso do solo, apesar de uma redução de 7% na produção de forragem. Os ganhos económicos superaram essa perda, com uma receita 586% superior à de agricultura convencional praticada na mesma área e evitou cerca de 144 t CO<sub>2</sub>e. A produção de energia foi cerca de 37% inferior em relação ao sistema convencional, com o LCOE de 25% mais alto.

## Palavras-chave

Sistema Agrivoltaico (AVS); Sistema convencional; Vinha; Pastagem; Energia solar fotovoltaico

## Abstract

The large-scale expansion of photovoltaic (PV) energy production is essential for mitigation climate change; however, it faces significant challenges due to increasing competition for land use. With population growth and rising demand for food production, land availability for solar panel installation is becoming a critical issue. In this context, this project presents an alternative known as the agrivoltaic system (AVS), which enables the simultaneous use of land for both solar energy generation and agricultural production, offering environmental and economic benefits. This study combines PV production with agricultural cultivation of vineyards and pastureland at the farm of the Escola Superior Agrária (ESA) in Castelo Branco, Portugal. It assessed the system configuration, the impact of panel shading on crop yields, and its economic viability.

In the vineyard, the results showed a high Land Equivalent Ratio (LER) of 2.50, reflecting a 150% improvement in land-use efficiency through dual use. An 80% increase in agricultural yield was recorded compared to conventional farming, and when combined with energy production, it led to a revenue 5,453% higher than that generated solely through traditional agriculture in the same area. Additionally, the system avoided approximately 197 t CO<sub>2e</sub> emissions, along with a Water Use Efficiency (WUE) improvement ranging from 6% to 16%, despite producing 30% less energy than the conventional system, and it achieved a Levelized Cost of Energy (LCOE) 33% higher compared to the conventional system.

For the pasture, two system configurations were evaluated: the first, with fixed and tilted structures mounted on the ground, and the second, using vertical wall structures. Both configurations demonstrated efficient land-use synergy. However, the second configuration was selected for continued study and financial analysis due to its higher dual land-use efficiency and lower forage yield loss. The second configuration presented an LER of 1.60, demonstrating a 60% improvement in land use efficiency, despite a 7% reduction in forage production yield. The economic benefits outweighed this loss, with revenue 586% higher than that of conventional agriculture practiced in the same area, and approximately 144 tCO<sub>2e</sub> emissions were avoided. Energy production was about 37% lower compared to the conventional system, with the LCOE 25% higher.

## Keywords

Agrivoltaic System (AVS); Conventional system; Vineyard; Pasture; Photovoltaic solar energy.



# Índice geral

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 - Introdução e enquadramento .....	1
1.2 - Objetivos .....	4
1.3 - Organização do Relatório.....	4
Capítulo 2 – Sistema Agrivoltaico.....	5
2.1 - Tipos de Sistemas Agrivoltaico .....	5
2.2 - Desafios na Implementação.....	11
2.2.1 - Geração de Energia .....	11
2.2.2 - Produção Agrícola .....	12
2.3 - Impactos do Sistema Agrivoltaico (AVS) .....	13
2.4 - Métricas de desempenho.....	15
Capítulo 3 – Estudo de casos práticos de agrivoltaico .....	17
3.1 - Itália.....	18
3.2 - França .....	19
3.3 - Espanha .....	20
3.4 - Estados Unidos de América.....	22
Capítulo 4 – Dimensionamento do Sistema Solar-Farm .....	23
4.1 - Metodologia.....	23
4.1.1 - Caracterização de área em estudo.....	24
4.1.2 - Cálculos Técnicos.....	26
4.1.2.1 - Dimensionamentodos dos painéis.....	27
4.1.2.2 - Dimensionamento dos inversores.....	30
4.1.3 - Análise Financeira.....	31
4.1.2.1 - Análise de custo-benefício de sistema agrivoltaico vs sistema convencional.....	33
4.2 - Solar farm na vinha da ESA-CB .....	34
4.2.1 - Produção agrícola .....	35
4.2.2 - Descrição do sistema fotovoltaica .....	35
4.2.3 - Produção de energia.....	36
4.2.4 - Análise financeira.....	37

4.3 Solar farm na pastagem ESA-CB.....	39
4.3.1 - Primeira Configuração .....	39
4.3.1.1 - Produção agrícola .....	39
4.3.1.2 - Descrição do sistema fotovoltaica .....	39
4.3.1.3 - Produção de energia .....	40
4.3.2 - Segunda Configuração .....	41
4.3.2.1 - Produção agrícola .....	42
4.3.2.2 - Descrição do sistema fotovoltaica .....	42
4.3.2.3 - Produção de energia .....	43
4.3.3 - Comparação das configurações.....	44
4.3.4 - Análise financeira .....	45
CAPÍTULO 5 - Conclusões.....	47
5.1 Conclusão.....	47
5.2 Trabalhos futuros .....	48
REFERÊNCIAS .....	49
APÊNDICES.....	52
Apêndice A – Ficha Técnica do Painel .....	52
Apêndice B – Ficha Técnica do Inversor de Configuração de Área de Vinha e Pastagem 2 .....	54
Apêndice C – Ficha Técnica do Inversor de Configuração de Área Pastagem 1 .	56
Apêndice D – Dados PVsyst Simulação – Vinha Sistema Agrivoltaico .....	58
Apêndice E – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 1 Sistema Agrivoltaico.....	60
Apêndice F – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 2 Sistema Agrivoltaico.....	62
Apêndice G – Dados PVsyst-Simulação – Vinha Sistema Convencional.....	64
Apêndice H – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 1 Sistema Convencional ...	66
Apêndice I – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 2 Sistema Convencional...	68

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> - Tecnologias de Energia Renovável. Fonte: IRENA (2025) .....	1
<b>Figura 2</b> - Central fotovoltaica Herdade da Torre Bela, Portuga. Fonte: report24.news (2024) .....	3
<b>Figura 3</b> - Primeiros modelos de sistemas agrovoltaicos: Goetzberger e Zastrow (a), A. Nagashima (b). Fonte: Toledo et al. (2021) .....	5
<b>Figura 4</b> - Classificação de AVS com base na montagem de painéis fotovoltaicos. Fonte: Chopdar <i>et al.</i> (2024) .....	6
<b>Figura 5</b> - Estrutura montada em estacas com painéis FV inclinados em ângulo fixo Fonte: RES4Africa Foundation (2023). .....	7
<b>Figura 6</b> – Painéis FV fixos e inclinados montados no solo. Fonte: RES4Africa Foundation (2023). .....	8
<b>Figura 7</b> - Estrutura montada em palafitas com sistema de rastreamento de 1 eixo. Fonte: RES4Africa Foundation (2023). .....	9
<b>Figura 8</b> - Estrutura montada em estacas com sistema de rastreamento de 2 eixos. Fonte: RES4Africa Foundation (2023). .....	9
<b>Figura 9</b> - Estrutura com paredes verticais. Fonte: RES4Africa Foundation (2023). .....	10
<b>Figura 10</b> - Estrutura montado em estacas com painel FV semitransparente. Fonte: RES4Africa Foundation (2023). .....	10
<b>Figura 11</b> - A) Dimensões da treliça de layout de vinha treliçada localizada na fazenda experimental da Universidade Técnica de Cartagena (Espanha). B) Arranjo esquemático da solução AVS. Fonte: Padilla <i>et al.</i> , (2022) .....	20
<b>Figura 12</b> - Razão equivalente de terra (LER) para cada configuração fotovoltaica. Fonte: Padilla <i>et al.</i> (2022) .....	21
<b>Figura 13</b> – Área de vinha e pastagem.....	27
<b>Figura 14</b> – Espaçamento entre painéis de forma a evitar sombreamento. Fonte: Neto, (2025) .....	28
<b>Figura 15</b> – Configuração simplificada de estrutura montada em estacas com painéis FV fixo.....	34
<b>Figura 16</b> – Diagrama de conexão de painéis FV a um inversor .....	36
<b>Figura 17</b> - Produção de energia na pastagem com estrutura fixos e inclinados montado no solo – sistema agrivoltaico (AVS) vs sistema convencional .....	36
<b>Figura 18</b> - Evolução do Valor atualizado Líquido (VLA) ao longo dos anos de análise.....	38
<b>Figura 19</b> - Diagrama de conexão de painéis FV a um inversor.....	40
<b>Figura 20</b> - Produção de energia na pastagem com estrutura fixos e inclinados montado no solo – sistema agrivoltaico (AVS) vs sistema convencional. ....	40
<b>Figura 21</b> - Configuração simplificada de estrutura de paredes verticais com painéis FV. Fonte: O autor.....	41

<b>Figura 22</b> - Diagrama de conexão de painéis FV a inversor .....	42
<b>Figura 23</b> - Produção de energia na pastagem com paredes verticais – sistema agrivoltaico (AVS) vs sistema convencional. ....	43
<b>Figura 24</b> - Evolução do Valor atualizado Líquido (VLA) ao longo dos anos de análise de sistema agrivoltaico.....	46
<b>Figura 25</b> - Ficha técnica do Pannel. Fonte: Jinkosolar,2025 .....	53
<b>Figura 26</b> - Ficha técnica de inversor de configuração de área de vinha e pastagem 2 .....	55
<b>Figura 27</b> - Ficha técnica de inversor de configuração de área pastagem 1 .....	57
<b>Figura 28</b> - Dados de simulação de PVsist na área de vinha – sistema agrivoltaico .....	59
<b>Figura 29</b> - Dados de simulação de PVsist na área de pastagem 1 – sistema agrivoltaico .....	61
<b>Figura 30</b> - Dados de simulação de PVsist na área de pastagem 2 – sistema agrivoltaico .....	63
<b>Figura 31</b> - Dados de simulação de PVsist na área de vinha – sistema convencional .....	65
<b>Figura 32</b> - Dados de simulação de PVsist na área de pastagem 1 – sistema convencional.....	67
<b>Figura 33</b> - Dados de simulação de PVsist na área de pastagem 2 – sistema convencional.....	69

## Índice de símbolos

€	Euro
A	Ampère
CN/ha	Cabeças Normais por Hectare
GW	Gigawatt
ha	Hectare
Km	Quilômetro
kN/m <sup>2</sup>	Quilo-Newton por metro quadrado
kPa	Quilo-pascal
KVA	Quilovoltampere
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
m	Metro
m/Ωmm <sup>2</sup>	Metro por ohm vezes milímetro ao quadrado
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
mm	Milímetro
MS/ha/ano	Matéria seca por ano
MWh	Megawatt-hora
MWp	Megawatt-pico
°C	Graus Celsius
s	Segundo
t/ha	Tonelada por hectare
t CO <sub>2</sub> e	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
V	Volt
W	Watt

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Problemas de geração de energia em AVS. Fonte: Mamun et al. (2022). .....	11
<b>Tabela 2</b> - Comparação de tipos AVS com base em vantagens e desvantagens. Fonte: Zahrawi <i>et al.</i> (2024).....	14
<b>Tabela 3</b> - Desempenho da integração energética e de cultura para diferentes LER. Fonte: Toledo et al. (2021). .....	15
<b>Tabela 4</b> - Potencial do AVS em diferentes partes do mundo. Fonte: Chopdar et al. (2024).....	17
<b>Tabela 5</b> - Valores da temperatura e precipitação média ao longo do ano. Fonte: PGUCB (2021) .....	25
<b>Tabela 6</b> - Valores de números de horas da insolação ao longo do ano.Fonte: PGUCB (2021) .....	25
<b>Tabela 7</b> – Enquadramento dos valores de análise financeira.....	31

## Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

AVS	Sistema Agrivoltaico
BLINDx2	Veneziana com ângulo de ripa otimizado para geração de energia
BLINDx3	Veneziana com ângulo de ripa modificado para maximizar a capacidade instalada
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> - Investimento inicial
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
CQNUAC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas
FER	Fontes de Energia Renovável
FV	Fotovoltaico
Imp	Corrente máxima de operação de painel
INE	Instituto Nacional de Estatística
Isc	Corrente de curto-circuito
LAOR	<i>Land Occupation Rate</i> - Taxa de Ocupação da Terra
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i> - Custo Nivelado de Energia
LER	<i>Land Equivalent Ratio</i> - Índice de equivalência de uso do solo
mc-Si	Silício cristalinos
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> - Despesas operacionais
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
PGUCB	Plano Geral Urbano de Castelo Branco
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
PRI	Período de Recuperação de Investimento
RAN	Reserva Agrícola Nacional
RNC2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
ROOF	Tipo telhado
V-BI	Bifacial vertical
VLA	Valor Atualizado Líquido
V-MONO	Monofacial vertical
VPD	Défice de pressão de vapor
WUE	<i>Water Use Efficiency</i> - Eficiência do Uso da Água



## Capítulo 1 - Introdução

### 1.1. Introdução e enquadramento

A terra é um bem fundamental para a manutenção dos ecossistemas, preservação da biodiversidade e a regulação do ciclo da água, incluindo a captura de CO<sub>2</sub> (Mamun *et al.*, 2022) e também para economias baseadas na agricultura. Porém, o aumento da produção de energia fotovoltaica (FV) em grande dimensão, segundo Agência Internacional para Energia Renováveis (IRENA) no final de 2024, a capacidade global de energia renovável era de 4 448 GW, a energia solar FV, por ser a tecnologia de geração de energia de crescimento rápido e uma das mais baratas desde 2017 (Ferreira *et al.*, 2024), facilitou a capacidade total instalada que atingiu 1 865 GW global, mais de 451 GW de nova capacidade de energia FV foram adicionados somente em 2024, representando a maior adição de qualquer fonte de energia renovável (FER) e foi responsável por mais de três quartos de todas as adições de capacidade renovável no mesmo ano com 41,8% como indica a figura 1 (IRENA, 2024) e a previsão de energia FV que deverá atingir os 8 519 GW até 2050, tornando assim, a principal fonte de eletricidade renovável (RES4Africa Foundation, 2023), este aumento cria um potencial conflito entre a produção dos alimentos e a geração de energia, uma vez que ambas competem pelo uso da terra. Esta situação piora pelo aumento da população mundial, que cresce a uma taxa de 1,15% ao ano (Mamun *et al.*, 2022) e pelas transições energéticas mundiais um caminho em evolução para alcançar um futuro climaticamente seguro, em consonância com os objetivos do Acordo de Paris.

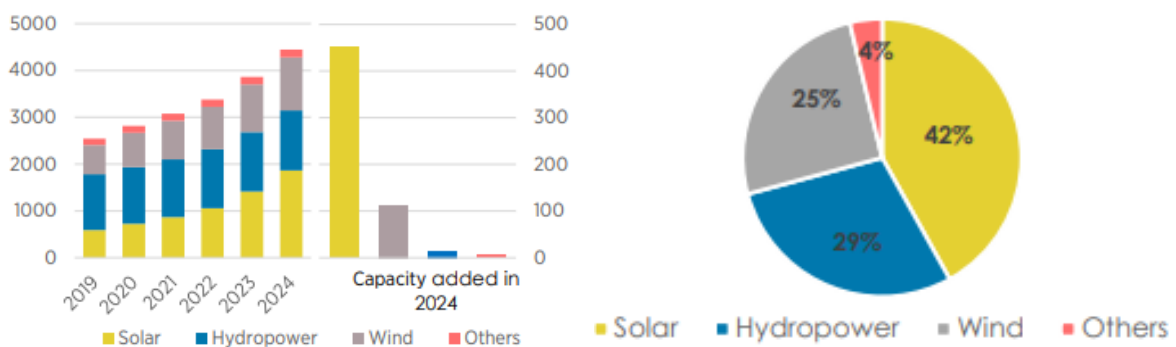


Figura 1 - Tecnologias de Energia Renovável. Fonte: IRENA (2025)

Atualmente, o setor agrícola ocupa aproximadamente 1,6 mil milhões de hectares, correspondente 12% das terras globais para cultivo de culturas, e a procura por espaço continua a crescer (Mamun *et al.*, 2022). A disputa pelo uso da terra não afeta apenas a produção agrícola, mas também impacta a segurança alimentar, visto que o uso da terra agrícola para outros fins pode levar ao aumento dos preços dos alimentos e, conseqüentemente, à fome.

Portanto, o equilíbrio entre a cultura agrícola e a produção de energia tornou-se uma questão prioritária e necessária. Desta forma, surgiram estudos para instalar painéis FV sobre campos agrícolas, permitindo uso mais eficiente da terra, beneficiando simultaneamente onexo Alimento-Energia-Água no mesmo espaço. Este conceito foi inicialmente proposto por Goetzberger e Zastrow no Instituto Fraunhofer, na Alemanha em 1982. Eles sugeriram a elevação da estrutura dos painéis solares em cerca de 2 m do solo e o espaçamento entre filas em aproximadamente três vezes a altura dos painéis. O objetivo dessa configuração era garantir uma distribuição uniforme da radiação solar no solo e, ao mesmo tempo, permitir a passagem de maquinaria agrícola (Toledo *et al.*, 2021). Deste então, o conceito ganhou destaque e adquiriu várias designações conhecido como “Compartilhamento Solar” na Índia, “Agrofotovoltaico” na Alemanha, “Agricultura Fotovoltaico” na China (Mamun *et al.*, 2022) e para este projeto adaptei o termo “Sistema Agrivoltaico” (AVS).

Nos últimos 20 anos houve a redução do preço médio dos módulos FV por Watt. Em 2000, o preço médio por watt de um módulo FV rondava os 4,35€/W, enquanto em 2020 esse valor caiu por cerca de 0,17€/W (RES4Africa Foundation,2023). Esta queda substancial de preço tornou a tecnologia dos sistemas agrivoltaico (AVS) mais acessível, representando solução viável para desafios persistentes como as alterações climáticas, os conflitos pelo uso do solo, a escassez de alimentos e água, e a dependência de combustíveis fósseis. No entanto, AVS, devido à necessidade de estruturas mais elevadas e outros com sistemas de rastreamento, apresentam custo mais elevado em comparação com os sistemas FV convencionais montados no solo. Segundo, um estudo feito na Alemanha avaliou a viabilidade económica deste sistema e concluiu que o Custo Nivelado de Energia (LCOE-*Levelized Cost of Energy*) de AVS é superior ao dos painéis solares convencionais montados no solo (Mamun *et al.*, 2022).

Portugal é um dos países europeus com maior aposta em FER. Em 2016, na Conferência das Partes (COP) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC), o país assumiu o objetivo de atingir a Neutralidade Carbónica até 2050 (RNC2050), tendo desenvolvido a visão, as trajetórias e as linhas de orientação para as políticas e medidas a concretizar nesse horizonte temporal. A ambição e a determinação do país para estar na frente da transição energética materializa-se em metas ambiciosas pelo que o contributo para a meta vinculativa da União Europeia de atingir pelo menos 42,5% de energia renovável em 2030 em termos da quota de FER no consumo final bruto de energia (PNEC, 2024), sendo que o solar FV terá, neste âmbito, um papel fundamental. Para atingir este objetivo sem prejudicar as terras agrícolas, a implementação do AVS apresenta-se como uma solução viável, permitindo a instalação de painéis solares em áreas da Reserva Agrícola Nacional (RAN) que nenhuma lei seja violada (Ferreira *et al.*, 2024), diferente do que acontece em Torre Bela, como mostra a figura 2, a deflorestação de quase 856 hectares e a remoção de animais para a instalação de central FV com potencia máxima de 272 MWp (report24.news, 2024), levantando questões importantes sobre a sustentabilidade de grandes projetos de energia solar que não considera a integração com o meio ambiente e as atividades existentes, como agricultura ou a preservação da biodiversidade. Este caso mostra a necessidade de abordagens mais equilibradas e sustentáveis para alcançar as metas do Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC), minimizando impactos negativos, como a perda de habitats naturais e a destruição de terras agrícolas



**Figura 2** - Central fotovoltaica Herdade da Torre Bela, Portugal. Fonte: report24.news (2024)

## **1.2. Objetivos**

O objetivo específico do projeto é analisar o efeito de nível de sombreamento provocado pelos painéis FV nos rendimentos das culturas e eficiência de uso de água, juntamente com a configuração de estrutura que tem menor impactor na conciliação da produção de energia FV com a produção agrícola, vinha e pastagem. Mostrar, o equilíbrio entre a cultura agrícola e a produção de energia, beneficiando simultaneamente o nexo Alimento-Energia-Água no mesmo espaço. Por fim, verificar a viabilidade deste sistema do ponto de vista técnica, ambiental e económico.

## **1.3. Organização do Relatório**

A organização deste projeto, começa desde elementos prétextuais e elementos textuais organizados por capítulos:

O capítulo 1, começa com introdução onde são apresentados o enquadramento do tema, os objetivos e a forma como o relatório é organizado;

O Capítulo 2, ainda continua com o conceito de AVS nomeadamente tipos de estruturas, desafios da sua implementação, seus impactos e assim como os parâmetros essenciais para avaliar eficácia do sistema;

O capítulo 3, mostra alguns exemplos e estudos práticos que foram implementados em alguma parte do mundo;

O capítulo 4, nesse capítulo são apresentados de forma clara as metodologias definidas e apresentação dos cálculos feitos no excel para o dimensionamento do AVS na vinha e pastagem, comprovando como esse sistema pode ter impactos nas duas culturas;

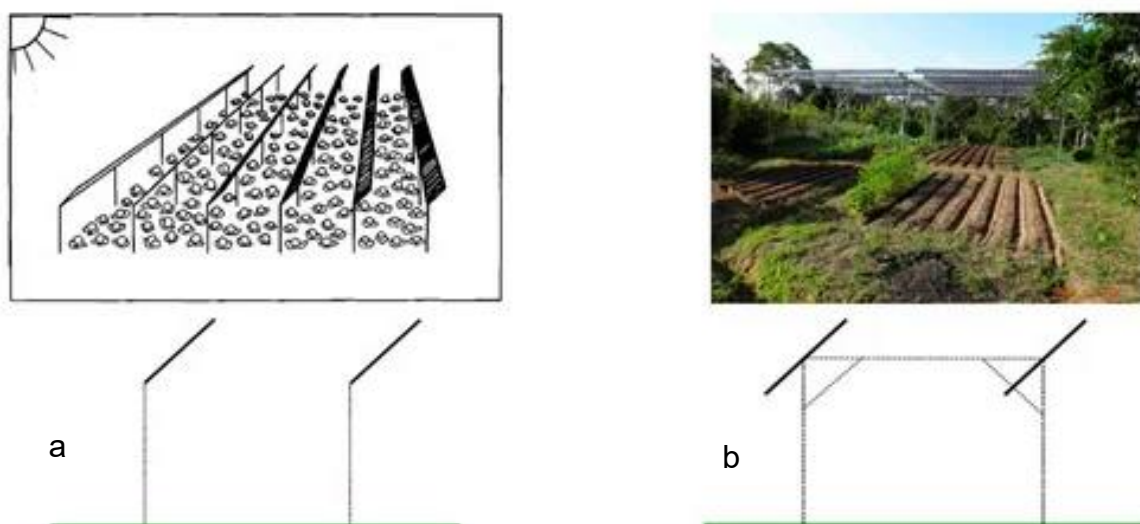
O capítulo 5, são apresentadas as conclusões chegas e trabalhos futuros.

E por ultimo, os elementos pós textuais, em que serão apresentadas todas as referências bibliográficas utilizadas ao longo da realização do projeto e apêndices.

## Capítulo 2 – Sistema Agrivoltaico

### 2.1. Tipos de Sistemas Agrivoltaico

O primeiro modelo de AVS foi teoricamente idealizado por Goetzberger e Zastrow no Instituto Fraunhofer na Alemanha em 1982. Em 2004, o engenheiro japonês Akira Nagashima desenvolveu o primeiro AVS, designado “Compartilhamento Solar”, utilizando uma estrutura semelhante a uma pérgola de jardim. Nagashima, implementou vários campos experimentais com diferentes níveis de sombreamento, tendo por base o conceito de ponto de saturação de luz das culturas. Como as plantas utilizam uma pequena fração da luz solar incidente entre 3% e 6% da radiação total ao fim de atingir a sua taxa máxima de fotossíntese (Toledo *et al.*, 2021), sendo assim o Nagashima sugeriu a partilha do excesso de radiação solar com sistemas FV, possibilitando assim a produção de eletricidade sem prejudicar a produtividade agrícola. As representações das ambas as soluções propostas são apresentadas na figura 3.

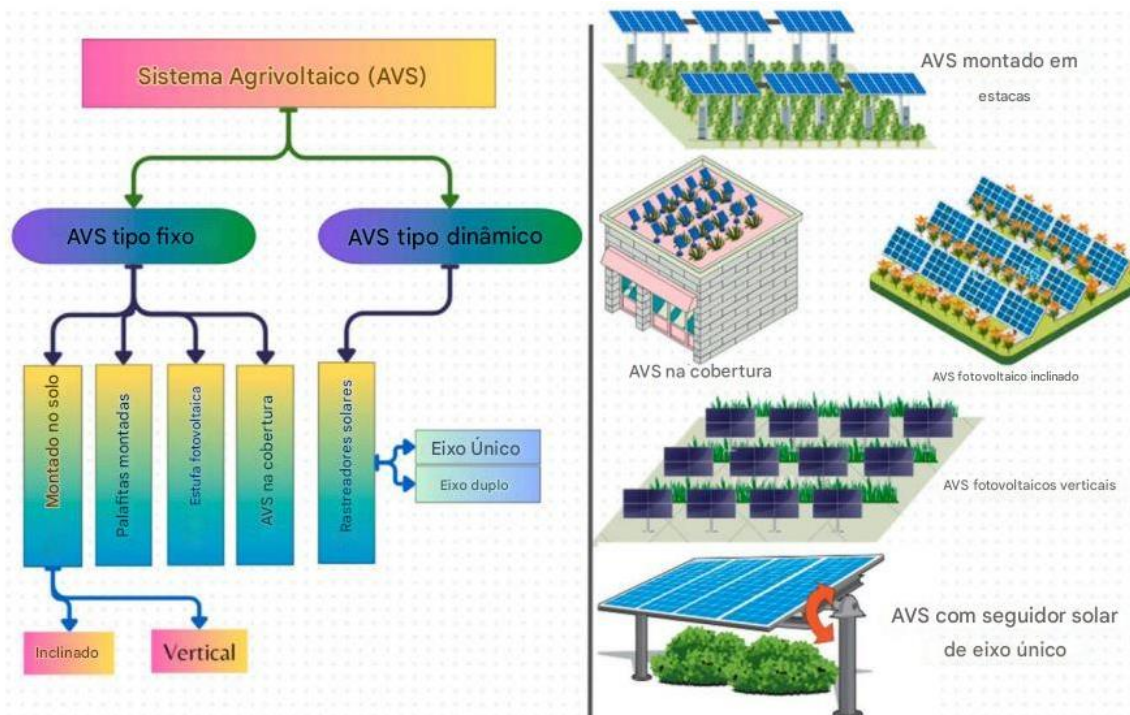


**Figura 3** - Primeiros modelos de sistemas agrovoltaicos: Goetzberger e Zastrow (a), Akira Nagashima (b). Fonte: Toledo *et al.* (2021)

Os AVS podem ser estruturados de diferentes formas para serem compatíveis com diferentes aplicações, tipos de agricultura, estruturas, flexibilidades e as condições locais. A altura de estrutura e o espaçamento adequado entre as filas dos painéis são fatores críticos que influenciam tanto a eficiência da geração de energia, assim como a produtividade agrícola e mantendo uma iluminação equilibrada para o crescimento das plantas (Zahrawi *et al.*, 2024).

Os AVS podem ser classificados em dois tipos principais, fixos e dinâmicos como mostra a figura 4. Os fixos são estruturas imóveis, requerem menos investimento inicial e ocupam mais espaços no terreno em comparação com dinâmicos. Incluem, painéis montados no solo, em estacas, em estufas FV ou em telhados. Os que estão montados no solo podem ser instalados em inclinação ou na vertical (Chopdar *et al.*, 2024). As estruturas montadas em estacas com painéis fixos e inclinados é um dos primeiros a ser instalados na Europa, sendo amplamente estudado na Alemanha (RES4Africa Foundation, 2023).

Por outro lado, os sistemas dinâmicos ajustam a posição dos painéis solares para acompanhar o movimento aparente do sol. Estes podem ter rastreadores de eixo simples e duplo, permitindo otimização na captação da luz solar e requerem mais investimento inicial (Chopdar *et al.*, 2024). Este tipo de sistema é particularmente vantajoso para culturas que necessitam de maior luz solar



**Figura 4** - Classificação de AVS com base na montagem de painéis fotovoltaicos. Fonte: Chopdar *et al.* (2024)

As estruturas mais eficientes para vinhedos são aquelas em que os painéis são montados a uma altura mínima de 2 m do solo, permitindo a circulação de ar e a passagem de maquinaria agrícola. Os sistemas dinâmicos, mostram melhor desempenho na regulação da radiação solar, otimizando a produção agrícola e a geração de energia elétrica (Magarelli *et al.*, 2024). No caso das pastagens, as estruturas podem variar entre sistemas fixo elevados e configurações dinâmicas, que permitem ajustes dos painéis para melhor controle da luz e temperatura do solo. Sistemas com painéis verticais, deixando áreas abertas, também mostraram ser eficazes para garantir um crescimento equilibrado da vegetação (Toledo *et al.*, 2021). Como o foco do projeto são sistemas abertos vale destacar seis exemplos com aplicação em diferente cultura:

O primeiro é uma estrutura montada em estacas com painéis FV inclinados em ângulo fixo. É um dos primeiros projetos agrivoltaico instalados na Europa com filas espaçadas de painéis FV inclinados em um ângulo fixo. Este sistema é usado principalmente para culturas que são cultivadas em toda a área do campo, como trigo ou milho. A altura e o espaçamento das linhas FV são projetados para permitir que máquinas agrícolas padrão operem sob a estrutura e forneçam a quantidade adequada de luz às culturas. Este sistema tem sido amplamente experimentado e estudado, especialmente na Alemanha, e atualmente é projetado e instalado por diversas empresas na Europa.



**Figura 5** - Estrutura montada em estacas com painéis FV inclinados em ângulo fixo Fonte: RES4Africa Foundation (2023).

O segundo são os painéis FV fixos e inclinados montados no solo. Este tipo de instalação também é um dos primeiros AVS instalados na Europa, pois usa estruturas de montagem padrão semelhantes às instalações FV montadas no solo, com a diferença de aumentar o espaço entre cada fila de painéis, permitindo um espaço aberto para cultivo de culturas de campo ou como pasto para gado. Este tipo de instalação limita o uso de máquinas agrícolas pesadas em comparação com estruturas montadas em palafitas. As interações e os benefícios potenciais para as culturas são limitados, mas este projeto tem sido cada vez mais usado para gado, pois pode fornecer um abrigo temporário para os animais em caso de eventos climáticos extremos.



**Figura 6** – Painéis FV fixos e inclinados montados no solo. Fonte: RES4Africa Foundation (2023).

O terceiro é uma estrutura montada em palafitas com sistema de rastreamento de um eixo. Esse oferece flexibilidade adicional no gerenciamento da quantidade de luz transmitida às plantações. Ao contrário do comportamento de rastreamento usual, que consiste em seguir o caminho do sol para produzir mais energia, o algoritmo de rastreamento nos sistemas é dinâmico e reage em tempo real às condições climáticas para otimizar a quantidade de luz transmitida e proteger fisicamente as plantações em caso de eventos climáticos extremos, como granizo ou temperaturas anormalmente altas. Essa tecnologia foi desenvolvida e experimentada principalmente em vinhedos, especialmente no sul da França, mas agora está sendo testada em outros tipos de culturas de campo, como tomate, trigo e milho. O uso de tal sistema implica um desenvolvimento específico do algoritmo de rastreamento para cada tipo de cultura e localização geográfica do campo e um maior custo de investimento da instalação AVS.



**Figura 7** - Estrutura montada em palafitas com sistema de rastreamento de 1 eixo. Fonte: RES4Africa Foundation (2023).

O Quarto exemplo é a estrutura montada em estacas com sistema de rastreamento de dois eixos, foi desenvolvida e está sendo usada principalmente na Itália. Ela é usada para culturas de campo. Apesar do sistema de rastreamento garantir uma produção de energia ideal dos painéis FV graças à grande distância entre as filas de painéis de 8 a 12 m, a sua baixa Taxa de ocupação da terra (*LAOR-Land Occupation Rate*) não pode oferecer uma proteção física consistente das culturas em caso de eventos climáticos extremos. Este sistema envolve custos de investimento mais altos devido ao equilíbrio do sistema estrutural.



**Figura 8** - Estrutura montada em estacas com sistema de rastreamento de 2 eixos. Fonte: RES4Africa Foundation (2023).

O quinto são as paredes verticais com painéis FV bifaciais. O desenvolvimento recente de painéis FV bifaciais tornou possível esse projeto de AVS. Os painéis são colocados verticalmente como paredes com uma orientação ótima Leste-Oeste. Devido à sua taxa de cobertura de solo muito baixa, esse projeto é adequado para uma variedade de culturas de campo, culturas de pomares e pecuária. Ele foi especialmente experimentado com batatas e aveia para encontrar o espaçamento ideal entre as fileiras FV. Deve-se notar que esse projeto oferece uma produção de eletricidade mais constante ao longo do dia em comparação aos painéis inclinados tradicionais, o que pode ser um argumento importante do ponto de vista econômico devido ao menor uso de sistemas de armazenamento de energia.



**Figura 9** - Estrutura com paredes verticais. Fonte: RES4Africa Foundation (2023).

O sexto é o painel FV semitransparente montado em estacas. Este projeto foi desenvolvido e estudado especificamente para cultivos de pomares por institutos de pesquisa em colaboração com fabricantes de painéis FV. O uso de painéis semitransparentes colocados diretamente acima das árvores envolve um nível específico de semitransparência para cada tipo de cultivo. Portanto, o nível de transparência dos painéis FV deve corresponder à quantidade de luz necessária para que os cultivos atinjam seu nível ótimo de fotossíntese. Este projeto é um dos mais recentes desenvolvidos na Europa e ainda está em fase de desenvolvimento e análise, porém é um projeto muito promissor, pois é o único projetado especificamente para culturas de pomares.



**Figura 10** - Estrutura montado em estacas com painel FV semitransparente. Fonte: RES4Africa Foundation (2023).

## 2.2. Desafios na Implementação

A implementação do AVS enfrenta desafios significativos relacionados tanto à geração de energia como à integração com a produção agrícola. Estes problemas surgem da necessidade de equilibrar entre a produção de eletricidade com a produtividade agrícola e a gestão eficiente dos recursos naturais.

### 2.2.1 Geração de Energia

A eficiência dos sistemas FV convencionais, assim como em contextos AVS é determinada por fatores como a radiação solar, a temperatura do ambiente, o acúmulo de poeira e tipo de painéis selecionado para o sistema, visto que, a produção de eletricidade varia consoante o tipo de painel. Além disso, a quantidade de energia gerada pelos painéis FV é influenciada pela escolha de ângulo de inclinação e o ângulo de orientação (azimute) (Mamun *et al.*, 2022). O ângulo de inclinação e azimute são fundamentais para maximizar a captação de radiação solar. No hemisfério norte, recomenda-se que os painéis sejam orientados a sul, enquanto no hemisfério sul devem estar voltados para a norte, garantindo a maior incidência de radiação ao longo do dia. Esses fatores são resumidos na tabela 1.

**Tabela 1** - Problemas de geração de energia em AVS. Fonte: Mamun *et al.* (2022).

Problemas	Impactos
Radiação solar	Embora alguns materiais de células FV utilizem bem a radiação difusa, geralmente a radiação direta é mais eficaz para a geração de eletricidade.
Inclinação e azimute	O desempenho dos painéis FV é influenciado pela sua orientação e inclinação, que afetam a quantidade de energia produzida.
Temperatura ambiente	A eficiência FV diminui a uma taxa de aproximadamente 0,5% à medida que a temperatura do ar aumenta 10 °C. Num estudo de simulação, durante o dia nas estações de cultivo centrais, a temperatura do painel FV em AVS foi encontrada aproximadamente 8,9°C. Com cerca de 0,2 °C mais fria do que em parques FV convencionais
Acumulação de poeira	A geração de eletricidade diminui com o aumento da acumulação de poeira, conforme a taxa de acumulação em função do tamanho das partículas de poeira e da densidade da poeira depositada.
Fatores de instalação	A altura ao solo, a distância entre pilares e a altura da colheita são as principais preocupações do AVS.

## 2.2.2 Produção Agrícola

A instalação de painéis FV na agricultura e pecuária pode ser analisada através da avaliação de fatores situacionais que influenciam a produção agrícola, assim como a seleção das culturas e tomando em consideração nível de sombreamento. Segundo os resultados de uma revisão sistemática da pesquisa mostra impactos dos principais fatores situacionais que influenciam a produtividade agrícola em AVS que são (Mamun *et al.*, 2022):

- A temperatura do ar - Temperatura do ar em redor do AVS instalado, é significativamente menor, em comparação com sistemas FV convencionais devido a presença de culturas;
- A humidade do ar - A variação diária da humidade durante o verão foi diminuída em locais com AVS. A Diferenças significativas em relação humidade foram observadas como resultado de cultivo de culturas em sistemas FV, independentemente da altura dos painéis ao solo;
- A humidade do solo - Diferença na humidade do solo foram observados resultante de uma irregularidade padrão de sombra dos AVS;
- A velocidade e direção do vento - O crescimento das plantas sob painéis FV foi significativamente impactado pela velocidade do vento e o crescimento de culturas em sistemas FV causou diferenças significativas na direção do vento independentemente da distância ao solo dos painéis. Os AVS de maior dimensão podem alterar o perfil da velocidade do vento;
- A temperaturas das culturas - Como resultado das variações da temperatura do solo, é notável as diferenças na taxa de emissão foliar foram encontradas em pepinos e alfaces três semanas após a plantação;
- A Temperatura da colheita e taxa de crescimento - A temperatura da colheita não se alterou consideravelmente sob sombreamento e a taxa de crescimento foi considerada semelhante em as instalações FV comparadas com atividades agrícolas convencionais;
- O déficit de pressão de vapor (VPD) - Durante a estação de crescimento, o VPD foi sempre 0,52 kPa, cerca de 0,15 kPa mais abaixo em um AVS comparado com um ambiente convencional;
- A Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) - Para a produção de tomate 50% de radiação solar incidente deve ser PAR. A PAR disponível em terreno sombreado notou-se que era drasticamente menor do que em condições sem sombra.

A seleção das culturas para este sistema é um fator muito fundamental e deve levar em conta a tolerância à sombra e as condições microclimáticas que vão ser criados pelos painéis. Apesar dos efeitos de níveis de sombreamento varia consoante a cultura, as culturas com elevada eficiência fotossintética e tolerante ao sombreamento são mais indicadas para estes sistemas, tendo em conta que a evapotranspiração diminui sob os painéis solares devido à menor exposição à luz solar. O sombreamento causado pelos painéis solares é fator determinante para produtividade agrícola. A radiação disponível sob AVS pode ser reduzido entre 15% e 40%, esse nível é considerado moderado para maioria das culturas agrícolas. As culturas tolerantes ao sombreamento, perdas de rendimento só ocorrem quando a redução da radiação ultrapassa 30% e acima de 50%, a fotossíntese de algumas plantas pode ser comprometida (Mamun *et al.*, 2022).

### **2.3. Impactos do Sistema Agrivoltaico (AVS)**

Os AVS podem ser aplicados em diferentes setores agrícolas, incluindo apicultura, estufas, pecuária e horticultura. Dependendo do tipo de cultivo, a configuração dos painéis pode ser adaptada para maximizar a produção de alimentos, assim como de eletricidade. Esta prática de aproveitamento do solo pode tornar os agricultores mais autossuficientes, já que, a eletricidade produzida pode ser usada para alimentar sistema de bombagem de água, equipamentos agrícolas e pode ser injetada na rede para venda (Ferreira *et al.*, 2024).

Os benefícios do AVS no crescimento e produtividade das plantas variam conforme a configuração do sistema e as condições microclimáticas locais e apresenta um enorme potencial como FER produtiva e eficiente, especial em regiões densamente povoadas com escassez de terras agrícolas. A implementação deste sistema pode aumentar o rendimento agrícola em até 30%, desde que sejam escolhidas culturas adequadas para diminuir as perdas causadas pelo sombreamento dos painéis (Toledo *et al.*, 2021). Ainda, o AVS tem um papel fundamental na preservação da biodiversidade, criando condições favoráveis para diversas espécies vegetais e animais, uma vez que a vegetação nativa prospera em áreas sombreadas pelos painéis e cria microclimas diversificados que favorece a presença de polinizadores e apresentam maior diversidade de insetos e flora espontânea em comparação com campos abertos, o que pode melhorar a resiliência do ecossistemas agrícola e reduzir a necessidade de defensivos químicos (Zahrawi *et al.*, 2024). O maior potencial desse sistema é nas regiões semiáridas e áridas, nessas zonas, devido a radiação solar elevada e a escassez de água dificultam a produtividade agrícola, mas os AVS podem proporcionar rendimentos agrícolas ao reduzir a evaporação de água, mantendo o solo mais húmido e otimizando o uso de água de irrigação ao fornecer sombra parcial.

Os estudos realizados em Montpellier, França e Nagpur, Índia, indicam que a aplicação do AVS no cultivo de alface e uva pode tornar o solo mais produtivo e valioso. Em vinhedos, constatou que AVS pode reduzir a incidência de doenças fúngicas ao limitar o excesso de humidade causado pela evaporação intensa (Magarelli *et al.*, 2024), também a proteção contra a radiação excessiva facilita que as videiras tenham um ciclo de maturação mais equilibrado, resultando em uvas de melhor qualidade para a produção dos vinhos. Enquanto, nas pastagens o sombreamento proporcionado pelos painéis reduz a taxa de evaporação de água no solo, causando a maior retenção de humidade, facilitando o desenvolvimento das plantas forrageiras e pode aumentar a biomassa das pastagens, melhorando a sustentabilidade de alimentos para os animais e a produção pecuária (Toledo *et al.*, 2021).

Apesar dos benefícios, a eficiência desse sistema depende de adaptação da tecnologia as características das culturas e as condições ambientais, já que não existe um nível de sombreamento universal que funcione para todas as plantas e cada local exige uma abordagem específica para equilibrar a produção de energia e a produtividade agrícola como indica a tabela 2.

**Tabela 2** - Comparação de tipos AVS com base em vantagens e desvantagens. Fonte: Zahrawi *et al.*(2024)

Tipo Agrivoltaico	Vantagens	Desvantagens
Culturas	Gestão do consumo de água. Proteção do granizo e das circunstâncias naturais. Microclimas controláveis ajudam no rendimento das culturas.	Sombreamento em alguns tipos de culturas. Erosão do solo devido à distribuição da água. Reduz as porosidades do solo.
Animais	Providenciar um lugar mais fresco no verão e mais quente no inverno. Maior produção e bem-estar de cordeiros.	Alguns tipos de cabras podem mastigar os cabos.
Estufas	85% da energia ideal do projeto de estufa está funcionando passivamente. Reduz a evapotranspiração e a perda de água.	Os painéis solares de placa diminuem a luz nas plantações. É necessário aumentar a temperatura na estufa e ventilação.
Diferentes aplicações	Disponibiliza sombra em parques solares e cria lugares mais frescos para as pessoas.	Obstáculo para atividades desportivas específicas. Possibilidade de danificar a relva do jardim.

## 2.4. Métricas de desempenho

Como o AVS é conjugação de geração de eletricidade com a produção agrícola, apresentando um grande potencial para otimizar o uso da terra. O impacto da intensidade bem-sucedido desta tecnologia requer um equilíbrio entre eficiência energética, rendimento agrícola e viabilidade económica. A índice de equivalência de uso do solo (LER-*Land Equivalent Ratio*) e a Eficiência do Uso da Água (WUE-*Water Use Efficiency*) são parâmetros essenciais para avaliar a eficácia do sistema (Toledo *et al.*, 2021).

Para avaliar o desempenho do AVS em comparação com o convencional, os investigadores sugerem o uso do parâmetro LER. Este indicador verifica o rendimento da combinação da agricultura e da energia solar se é superior ao que seria obtido se as mesmas áreas de terra fossem usadas separadamente. Esta comparação pode ser observada na tabela 3 e é calculado da seguinte forma:

$$LER = \frac{Y_{AVS}}{Y_{agri}} + \frac{E_{AVS}}{E_{FV}} \quad [2.1]$$

Onde:

- $Y_{AVS}$ , representa a produtividade agrícola no AVS (Kg/ha)
- $Y_{agri}$ , representa a produtividade agrícola no monocultivo (mesma área sem painéis solares) (Kg/ha)
- $E_{avs}$ , geração de energia no AVS (kWh/ha)
- $E_{FV}$ , geração de energia em um sistema FV convencional (kWh/ha)

**Tabela 3** - Desempenho da integração energética e de cultura para diferentes LER. Fonte: Toledo *et al.* (2021).

LER=1	Os AVS e sistema convencional estão mostrando os mesmos resultados
LER>1	O AVS está a mostrar melhores resultados do que o sistema convencional
LER<1	O sistema convencional está a mostrar melhores resultados do que o AVS

Por outro lado, a Taxa de Ocupação da Terra (LAOR-*Land Occupation Rate*) é definida pela razão entre a área coberta pelos painéis e a área total do terreno do AVS. Altos valores de LAOR maximiza a produção de eletricidade, mas podem comprometer o rendimento agrícola devido a redução da luz disponível para a fotossíntese. Por outro lado, menores valores de LAOR favorece o crescimento das culturas, mas reduz a eficiência energética (Zahrawi *et al.*,2024).

### Capítulo 3 – Estudo de casos práticos de agrivoltaico

Em alguns partes do mundo foram pesquisados e implementados estudos práticos do AVS com diferentes configurações em diferentes culturas que mostraram o potencial e o impacto do AVS, como indica a tabela 5. Os estudos feitos em Montpellier, França e Nagpur, India mostram que implementação dos painéis FV ao cultivo de alface e uva pode tornar o solo muito mais produtivo e valioso em relação a sistema convencional, enquanto nos Estados Unidos realça a importância de ajustar o valor de LAOR para melhorar o rendimento das colheitas (Chopdar *et al.*,2024).

**Tabela 4** - Potencial do AVS em diferentes partes do mundo. Fonte: Chopdar *et al.* (2024)

ANO	Tipo de sistema	Localização	Cultura	Potencia	Resultados
2017	Rastreador Solar	Montpellier, França	Alface	-	Os painéis FV dinâmicos podem aumentar a biomassa de alface por unidade de área. Em dias ensolarados, o modo de seguimento solar aumentou a produção de energia por área (+74%) em comparação com o modo estacionário meia densidade e o LER foi sempre maior que 1.
2019	Fixo, montado em estacas	Japão	Milho Doce	4,5 kW	A configuração de baixa densidade produziu mais 4,9% de biomassa de palha de milho e rendeu mais 5,6% de milho por m <sup>2</sup> .
2019	Fixo, inclinado	Nagpur, Maharashtra, Índia	Uva	168,64 kW	O valor económico poderia aumentar 15 vezes maior em relação à agricultura convencional, produzindo ao mesmo tempo a mesma produção. Se for adaptado à escala nacional, irá satisfazer as necessidades energéticas de mais de 15 milhões de pessoas.
2021	Fixo, inclinado	Universidade Estadual de Oregon, Corvallis, OR, EUA	Tomate	482 kW	O rendimento total da cultura foi mais elevado nas áreas de controlo e diminuiu à medida que o sombreamento aumenta.

### 3.1. Itália

O estudo realizado no AVS na região da Puglia, em Itália, com uma área total de 5400 m<sup>2</sup> mostrou a viabilidade e os benefícios na integração dos painéis solar com o cultivo da videira. O sistema é composto por painéis FV montados numa estrutura fixa elevada sobre as videiras, com um espaço livre inferior a meio metro entre o topo da copa das plantas e a parte inferior dos painéis, orientado norte-sul. Os painéis cobrem 43% da superfície do solo e possuem uma largura de 1,07 m, permitindo a passagem de máquinas e praticas agrícolas (Magarelli *et al.*, 2025).

O sombreamento proporcionado pelos painéis resultou num aumento significativo da humidade do solo, reduzindo as perdas de evaporação comuns nas regiões semiáridas e a eficiência de interação de luz pelas vinhas. A melhoria nas condições hídricas contribuiu para um maior rendimento das videiras, com o aumento de 277% na produção de uvas (Magarelli *et al.*, 2025), assim como a fertilidade das gemas manteve-se elevada, especialmente em regiões de baixa sombra, em relação às plantas cultivadas a pleno sol, também houve moderação da temperatura do solo pelos painéis, criando assim, um microclima mais favorável para o crescimento das videiras.

Ainda que, a temperatura do ar tenha sido mínima, verificou-se uma redução na velocidade do vento e no VDP, fatores que beneficiam o desenvolvimento vegetativo das plantas. Por fim, o sistema mostra a sua eficiência e potencial para otimizar o uso do solo em regiões de clima mediterrâneo com elevado valor LER igual a 3,54 e gera aproximadamente 53 kWh/m<sup>2</sup>/ano (Magarelli *et al.*, 2025).

### 3.2. França

A Sun'Agri, uma das principais empresas de investigação e desenvolvimento dos sistemas agrivoltaico realizou um estudo em Piolenc, França, para testar o impacto de sombreamento causados pelos painéis FV na cultura da vinha. A instalação foi feita sobre videiras plantadas com uva Grenache Noir numa área de 1000 m<sup>2</sup> dos quais 600 m<sup>2</sup> foram cobertos pelo AVS dinâmico (Sun'Agri, 2023). OS painéis oferecem sombras, que por sua vez diminuiu o consumo de água e contribuiu para melhorar tanto a qualidade como a quantidade da produção das vinhas.

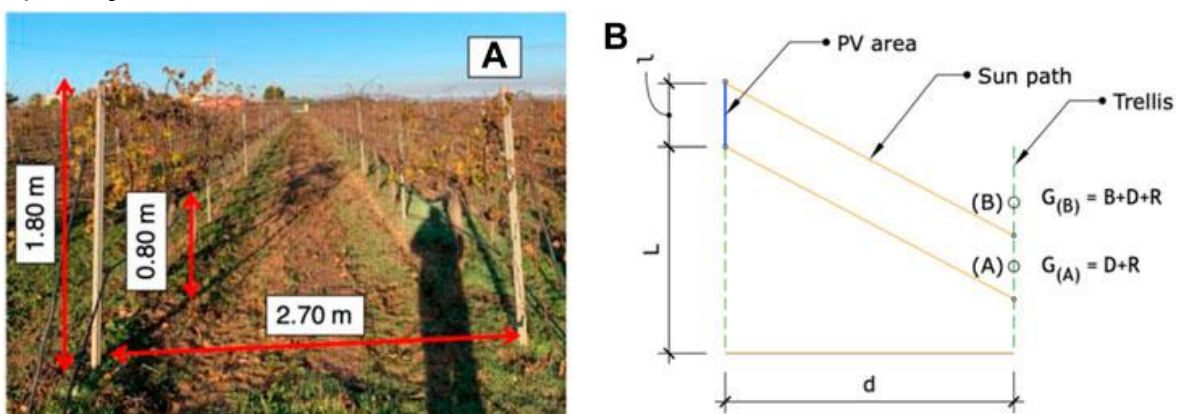
O sistema tem a capacidade de produzir 84 kW, onde os painéis são conectados com um algoritmo capaz de determinar a inclinação ideal dos painéis de acordo com as necessidades de insolação e água da viticultura, o modelo de crescimento da cultura, a qualidade do solo e as condições climáticas e foram colocados a uma altura de 4,2 m acima do solo, permitindo a passagem das máquinas agrícolas (pv-magazine, 2020).

Os resultados são positivos, indicando que as videiras sob os painéis sofrem menos stress hídrico, com as reduções das necessidades hídricas que variou em 12% a 34%, graças à redução da evapotranspiração em 40% (Sun'Agri, 2023), garantindo a mais eficiência na utilização de água.

A influência do sombreamento provocada pelos painéis FV refletiu-se na qualidade de produção. O peso das bagas aumentou 17%, enquanto o teor de antocianinas foi 13% a mais que contribuiu para uma melhor coloração e estabilidade do vinho (pv-magazine, 2020). O nível de acidez total foi entre 9% e 14% superior ao das uvas cultivadas sem proteção, com otimização de equilíbrio aromático, com teor de açúcar reduzido em 2 a 3 graus Brix (Sun'Agri, 2023). Assim, o Sun'Agri demonstra a eficácia deste sistema na regulação térmica, oferecendo uma redução de até 5°C na temperatura das videiras durante períodos de extremo calor e ainda ofereceu proteção contra as geadas, mantendo uma temperatura média 2°C superior em condições de extremo frio, minimizando os riscos associados ao abrolhamento precoce (Sun'Agri, 2023).

### 3.3. Espanha

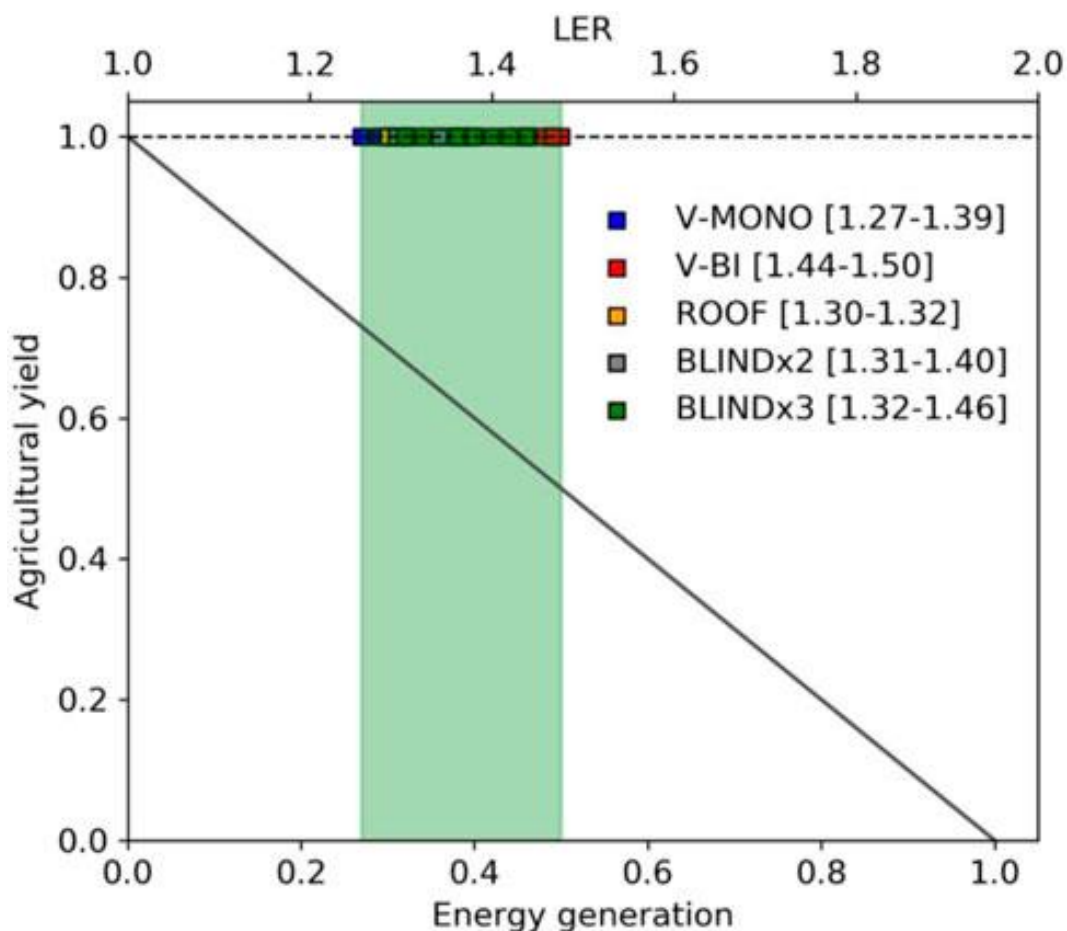
A investigação sobre AVS conduzida na Universidade de Córdoba, em Espanha, baseado em um estudo de simulação que analisa os padrões de sombreamento e a geração de energia fotovoltaica de diferentes configurações de projeto FV, sugeriu a integração corporativa de sistema FV nas treliças metálicas anteriormente construídas nas vinhas, de modo a reduzir a intervenção no solo, impacto visual, custos de instalação e a necessidade de construção de novas estruturas. As estruturas têm espaçamento de 2,7 m entre fileiras e altura de 1,8 m, resultando numa razão de 1,5 m, como mostra a figura 11, este valor foi utilizado como referência para assegurar que os resultados obtidos possam ser aplicados a outras configurações de vinhedos (Padilla *et al.*, 2022). O nível de sombreamento foi analisado em diferente altura para garantir a viabilidade de sistema e as perdas de sombra sobre a estrutura da treliça devido à instalação dos painéis em 0,2 m; 0,4 m; 0,6 m e 0,8 m de altura, variando de 4% para 0,2 m a 16% para 0,8 m. No entanto, estes valores aumentam consideravelmente devido à influência dos meses com baixos ângulos de elevação solar, que coincidem com o período de dormência no Inverno. Portanto, os meses de março a agosto são usados como critérios, pois incluem os períodos de crescimento das folhas, floração, amadurecimento dos frutos e colheita. Sob este critério, para 0,6 m e 0,8 m de altura de painéis FV instalada, as sombras na zona da uva representam menos de 2% e 3%, respetivamente. Se for considerada apenas a altura da videira acima do tronco de 0,8 m, onde se localiza a área foliar e a zona do fruto e o efeito das sombras pode ter impacto na cultura, as perdas anuais por irradiação diminuem para menos de 1% e 2% e indicando a maioria das perdas anual por sombreamento ocorre abaixo de 1,2 m de alturas (Padilla *et al.*, 2022), o que corresponde com altura média dos trocos das videiras, confirmando que o sombreamento não afeta significativamente a produção de uvas.



**Figura 11** - A) Dimensões da treliça de layout de vinha treliçada localizada na fazenda experimental da Universidade Técnica de Cartagena (Espanha). B) Arranjo esquemático da solução AVS. Fonte: Padilla *et al.*, (2022)

Relativamente ao desempenho energético, são analisadas diferentes configurações de painéis para identificar melhor solução para o sistema, entre as principais são analisadas: monofacial vertical (V-MONO), bifacial vertical (V-BI), veneziana com ângulo de ripa otimizado para geração de energia (BLINDx2), veneziana com ângulo de ripa modificado para maximizar a capacidade instalada (BLINDx3) e tipo telhado (ROOF). Dos quais, testados a melhor configuração encontrada foi de painéis bifaciais orientado no sentido Leste-Oeste. A produção anual de energia elétrica variou entre 44% e 63%, sendo a geração máxima estimada em até 500 MWh/ha/ano.

O estudo também verificou o desempenho e eficiência do AVS utilizando o LER, que variou de 1,2 a 1,50, isto significa que, mesmo no pior cenário um AVS pode oferecer benefícios adicionais quando analisada de uma perspectiva global, apresentado na figura 12.



**Figura 12** - Razão equivalente de terra (LER) para cada configuração fotovoltaica. Fonte: Padilla *et al.* (2022)

### 3.4. Estados Unidos de América

O estudo de experimento de pastejo foi realizado no AVS na Oregon State University em Corvallis, EUA na primavera de 2019 e 2020 com o objetivo de testar o efeito de sombreamentos nos pastos e nos cordeiros. As parcelas experimentais estavam localizadas dentro da Rabbit Hills Solar Farm, uma fazenda agrivoltaico de 2,4 h e 1,4 MW que combina pastagem de ovelhas com produção de energia solar. O sistema é composto por painéis fotovoltaicos de 1,65 m de largura são orientados de leste a oeste e inclinados para o sul em um ângulo de 18°. A borda mais baixa do painel está a 1,1 m acima do solo e as fileiras de painéis estão a 6 m de distância. Os locais de experimento tinham 50% de áreas parcialmente sombreadas, 50% totalmente sombreadas e mais zona de controle totalmente aberto (Andrew *et al.*,2021).

Os resultados de experimento, mostram as temperaturas médias do ar e do solo, assim como o teor de humidade do solo seguiram uma tendência semelhante em áreas abertas e parcialmente sombreadas durante todo o período do experimento. O sombreamento proporcionado pelos painéis FV nas áreas totalmente sombreadas resultou na menor temperatura média do ar e a temperatura do solo durante os meses de primavera e verão em comparação com áreas totalmente abertas. A área totalmente sombreada mostra uma redução significativa na produção de forragem e piorou com pisoteamento das forragens pelos cordeiros e que resultou na diminuição de forragens de 9 a 33% (Andrew *et al.*,2021) em comparação com as pastagens abertas que apresentaram maior massa média de forragem. As taxas de crescimento das pastagens sob os painéis solares tiveram uma tendência crescente em direção ao verão por motivos das baixas temperaturas no início da primavera e a maior disponibilidade de humidade do solo no final da primavera. No geral, as taxas de produção e crescimento dos cordeiros não foram afetadas mostrando semelhantes em ambos os sistemas de produção. Os cordeiros em pastagens solares passaram cerca 96% das atividades de ruminação e repouso sob a sombra provocados pelos painéis FV, enquanto 45% de sua atividade de pastejo ocorreu na sombra diretamente sob os painéis solares (Andrew *et al.*,2021). O consumo diário de água dos cordeiros nos dois tipos de pastagem na primavera de 2019 foi semelhante durante o início da primavera, mas os cordeiros em pastagens abertas consumiram mais água do que os que pastavam sob painéis solares no final da primavera devido às sombras que os painéis disponibilizam (Andrew *et al.*,2021). O estudo mostrou a eficiência no uso da terra no AVS, conforme indicado pelo LER da produção de forragem na primavera que variou de 1,67 a 1,70 (Andrew *et al.*,2021).

## Capítulo 4 – Dimensionamento do Sistema Solar-Farm

### 4.1. Metodologia

Com vista a concretização dos objetivos definidos para realização deste projeto, na quinta da Escola Superior de Agrária (ESA) em Castelo Branco, Portugal, foi escolhido por apresentar características agronómicas e de pecuária. As culturas da vinha e pastagem foram selecionadas, com base na sua representatividade da ocupação do solo agrícola em Portugal e pelo fato de serem de baixo porte que vai diminuir o investimento inicial através das estruturas e também são alvos de estudos de sistema agrivoltaico (AVS).

Sabendo que, a integração dos painéis FV com atividades agrícolas no mesmo espaço pode haver prejuízo para crescimento e conseqüentemente a produção agrícola, foram desenvolvidas abordagens de forma sistemática que começa pela análise das bases de dados bibliográficas revistas por pares para selecionar aqueles que seguem os critérios de dupla funcionalidade entre a agricultura e a energia FV, com levantamentos de todas as tipologias de sistemas possíveis em foco sistemas abertos identificando suas vantagens e desvantagens associadas, feito nos capítulos anteriores. Esse passo, permite avaliar quais são os projetos, quais são os sistemas de instalação que permitam reduzir ou mitigar os impactos negativos. De seguida a caracterização do local em estudo de forma abrangente, que inclui análise das condições climáticas que pode ter impacto no desenvolvimento das culturas e fatores que influenciam no dimensionamento desse sistema, sobretudo a radiação solar e a precipitação que são dois fatores principais que influenciam diversos processos ambientais, assim como processo de fotossíntese. E por último os cálculos técnicos e financeiro para verificar viabilidade económica, ambiental e eficiência do projeto através do indicador LER.

O plano do estudo foi em duas áreas, uma de vinha e a outra da pastagem. Em cada área foi considerado o conceito de AVS e o sistema convencional, denominado zona de comparação com apenas praticas agrícolas e energia solar. A zona de comparação foi apenas uma simulação projetada com o objetivo de apoiar a análise comparativa da produção de energia, produção agrícola, eficiência na utilização de solo através de LER e do LCOE.

Para a área da vinha, além de considerar práticas agrícola existente, foram feitos dois dimensionamentos com painéis FV. A primeira é com o conceito de AVS, montando painéis FV acima da vinha e na segunda zona de comparação (área considerada totalmente aberta sem existência das atividades agrícolas). Enquanto, a área da pastagem foi dividida em dois blocos e cada bloco tem uma configuração diferente. O primeiro bloco é composto por estrutura fixa e inclinado montado no solo e o segundo bloco feito com estrutura de paredes verticais. Em cada configuração foi feita a mesma repetição igual a vinha, com o conceito AVS e zona comparação, além de considerar agricultura convencional no mesmo espaço.

As duas configurações foram usadas com o objetivo de verificar a configuração que apresenta maior eficiência no uso da terra, através do indicar LER e menor perda na produção de forragem.

O sistema todo é composto por painéis FV bifaciais de JinkoSolar para maximizar a eficiência da produção energética. O modelo selecionado foi de 72HL4-BDV 570-590 Watt de 580W, como apresenta a figura 25 de apêndice A. As estruturas escolhidas para este estudo é das convencionais Ultra Strong de 16 painéis N2V, projetadas para áreas com vento até 28 m/s e carga de neve de 1,6 kN/m<sup>2</sup> para facilitar nas estimativas de viabilidade económica do projeto, visto que as empresas que fabricam as estruturas de montagem dos painéis FV do AVS geralmente personalizam conforme o estudo do cliente em diferentes formatos e tamanhos para acomodar diferentes tipos de painéis, assim como o sistema de fixação ao solo para reduzir ao mínimo alterações nas características do perfil do solo.

A estimativa e simulação da produção de energia ao longo do ano, foi feita utilizando a ferramenta PVsyst V8.0.12. O processo de análise envolve a inclusão das informações de coordenadas geográficas, dados climáticos de cada área, potencia instalada, inclinação e orientação de painéis.

#### **4.1.1 Caracterização de área em estudo**

Castelo Branco é capital de distrito de Castelo Branco, situa-se na região centro de Beira Baixa e sub-região da Beira Interior Sul, ocupa uma área de 1 438,19 km<sup>2</sup> de área e com 52 272 habitantes, segundo o censo de Instituto Nacional de Estatística (INE) em 2021. A cidade fica aproximadamente 50 km da fronteira com Espanha e fica a uma distância de 100 km da cidade da Guarda e 80 km da cidade de Portalegre, as capitais de distrito mais próximas. O Município é limitado a Norte pelo município do Fundão, a Leste por Idanha-a-Nova, a Sul pela Espanha, a Sudoeste por Vila de Ródão e a Oeste por Proença-a-Nova e por Oleiros, composto por 19 freguesias (CM-Castelo Branco, 2025).

Segundo revisão de Plano Geral Urbano de Castelo Branco (PGUCB) em 2021, o clima no município de Castelo Branco é temperado mediterrânico, com característica moderadamente chuvosa e seca e é influenciado pela continentalidade, pelo que apresenta amplitude térmica de 17,1°C e pouca humidade ao longo do ano, sendo uma das zonas mais quentes de Portugal o que resulta numa humidade reduzida durante a maior parte do ano com dois a três meses secos e concentração significativa de precipitação no outono atingindo aproximadamente 37,5% do total anual que se situa nos 758,3 mm e os verões são marcados por secura com valores de precipitação baixa. Por essa razão, os meses com mais evaporação são de julho a setembro representando mais de 56,6% da evaporação total com pico em julho, sendo período mais quente e seco perto de agosto,

e os meses com menos evaporação são dezembro e janeiro correspondendo a época de maior disponibilidade hídrica no solo e totalizando um valor médio anual de 1994,4mm e queda de neve ocasional.

A cidade regista a temperatura média anual de 15,7°C, os meses de julho e agosto são mais quentes com médias mensais superior a 24°C, e os meses de dezembro a fevereiro apresentam valores abaixo de 10°C, atingindo a sua média mínima em janeiro que ronda 3,9°C e máxima em julho com 32,1°C, conforme mostra a tabela 5.

**Tabela 5** - Valores da temperatura e precipitação média ao longo do ano. Fonte: PGUCB (2021)

<b>TEMPERATURA</b>												
MÉDIA DIÁRIA (°C)												
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
7,9	9,6	12,7	13,1	16,8	21,0	25,0	24,4	21,3	16,3	11,7	9,0	<b>15,7</b>
MÉDIA MÁXIMA DIÁRIA °C												
11,8	14,0	18,0	18,6	22,3	27,3	32,1	31,6	27,3	21,0	15,7	12,5	<b>21,0</b>
MÉDIA MÍNIMA DIÁRIA °C												
3,9	5,2	7,5	8,0	11,2	14,6	17,9	17,2	15,2	11,6	7,7	5,6	<b>10,5</b>
<b>PRECIPITAÇÃO</b>												
MÉDIA DA QUANTIDADE TOTAL (mm)												
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
108	58,7	36,9	58,1	65,1	25,2	8,9	8,4	36,5	106	118,8	128,2	<b>758,3</b>

A insolação é um fator notável na região, como mostra a tabela 6, com o total anual da radiação global médio que ronda as 153,5Kcal/cm<sup>2</sup>, cerca de 2.795 horas, distribui-se de forma desigual ao longo do ano, sendo que 54,3% ocorre entre maio e setembro. Os meses de julho e agosto, atingem os valores máximos com mais de 30% da insolação anual que corresponde 156 dias com insolação maior igual a 80% (PGUCB,2021).

**Tabela 6** - Valores de números de horas da insolação ao longo do ano.Fonte: PGUCB (2021)

<b>INSOLAÇÃO</b>												
Nº DE HORAS DE INSOLAÇÃO												
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
152	168	243	232	268	316	355	335	252	196	154	123	<b>2794,6</b>
Nº DE HORAS DE INSOLAÇÃO=0%												
4,9	2,3	0,9	0,7	0,3	0,1	0,1	0,0	0,4	1,4	3,6	6,9	<b>21,6</b>

A velocidade média dos ventos anual é de 9,9km/h que equivale a 2,75 m/s, as direções encontram-se distribuída de uma forma quase harmoniosa entre os diversos quadrantes. Os dias de vento muito forte superior a 60 Km/h totalizam em média 24 por ano, sendo mais frequente entre novembro e janeiro, as rajadas máximas médias atingem valores entre 96 Km/h e 105 Km/h (PGUCB,2021). Quanto, aos hidrometeoros, nomeadamente geadas e granizo são fracas. As geadas iniciam-se em outubro, com pouca intensidade e prolonga-se até maio e com total do número médio de dias que não ultrapassam os 28 dias anual, ao passo que o granizo e saraiva é ocasional que não sendo suficiente para ultrapassar um dia por mês e anualmente a apresenta valores médio de 2,2 dias (PGUCB,2021).

#### **4.1.2 Cálculos técnicos**

Segundo o Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, I. P (IVDP,I.P)(s.d) a produtividade média de 1 ha de vinha é cerca 4,1 t/ha. As pastagens de regadio podem produzir anualmente de 2,5 a 10 t MS/ha/ano (Freixial *et al.*,2012). Para efeitos de estimativa dos rendimentos previsto para culturas em análise, foi utilizado essas referências e dados de estudo de caso práticos. Na vinha foi referenciado dados de estudo em Piolenc, França para as reduções das necessidades hídricas que variou em 12% a 34% e o estudo na Puglia, em Itália para rendimentos agrícolas de 277%. Enquanto, na pastagem foram utilizados dados de estudo realizado no AVS na Oregon State University em Corvallis, EUA para redução na produção de forragem de 33% e LAOR de 43% numa revisão feita para pequenos ruminantes (Vaughan *et al.*,2024), assumindo a proporcionalidade entre os valores em causa e o LAOR da configuração do estudo.

A produção de energia FV evita a emissão de CO<sub>2</sub> ao substituir fontes de combustíveis fósseis. Para estimar essa redução de emissões, o fator de emissão de eletricidade em Portugal é de 0,47 kgCO<sub>2</sub>e/kWh, conforme estabelecido no Despacho nº17313/2008 (Portugal, 2008). Como as árvores têm um impacto muito positivo no ambiente, pelo contributo à biodiversidade, produção de oxigénio e absorvem quantidade consideráveis de CO<sub>2</sub> ao longo da sua vida. Para traduzir este ganho ambiental em termos de absorção por árvores, considerou-se uma árvore conífera média, com 10 anos, numa zona urbana sujeita a condições específicas de sementeira, plantação e transplantação, absorve cerca de 39 kg de CO<sub>2</sub> (Helexia, s.d).

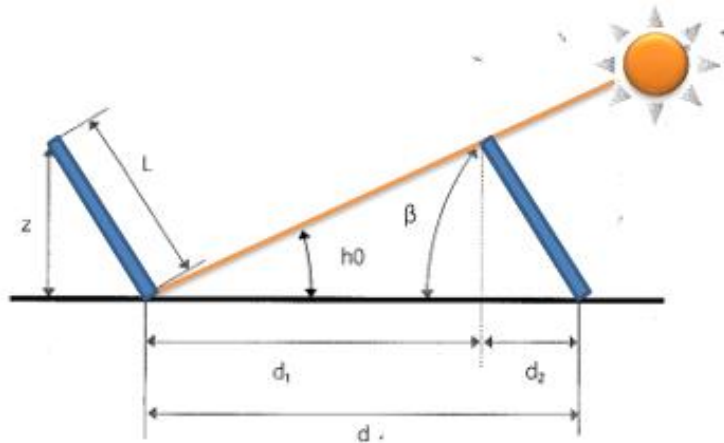
#### 4.1.2.1 Dimensionamento dos painéis

Para o dimensionamento dos painéis FV foi realizado uma análise de locais em estudo com a ferramenta Google Earth Pro. Com essa ferramenta foram feitas as medições das áreas de cada local, considerando comprimento do solo, como mostra a figura 13, posto isto, são determinados a distância entre fileiras de painéis, quantidades de filas, quantidades de painéis e potência total instalada, levando em consideração a posição solar ao meio-dia do dia mais desfavorável a sombra, o solstício de inverno, 21 de dezembro (Neto, 2025). Esta fase do ano, com menor incidência solar, representa o cenário mais crítico na projeção de sombreamento, garantindo que os painéis não prejudiquem significativamente o desenvolvimento das culturas e garantir que as filas entre os painéis não provocam sombreamento uns aos outros, consequentemente afetar a produção de energia mesmo nas condições menos favoráveis de insolação. Quanto à estrutura com paredes verticais, considera-se a primeira linha dos painéis como obstáculos da segunda para determinar a distância mínima que previna o sombreamento entre eles.



Figura 13 – Área de vinha e pastagem.

Para os efeitos de cálculos da distância mínima entre filas dos painéis, como mostra a figura 14, para além de considerar o aumento da distância em 25% que se recomenda para sistema convencionais, considera-se também um aumento de margem de segurança de 2 m e aumento de 0,5 m nas larguras dos painéis com objetivo de permitir incidência da radiação solar nas plantações para facilitar o processo de fotossíntese e a passagem do vento, visto que o objetivo é equilibrar a produção de energia e a produção agrícola.



**Figura 14** – Espaçamento entre painéis de forma a evitar sombreamento. Fonte: Neto, (2025)

As fórmulas aplicadas nesta fase do cálculo, são baseados nos estudos de Muhammad Iqbal (Neto, 2025), com seguintes indicadores:

O dia números ( $d_n$ ), é o dia número do ano é igual 1 no dia 1 de janeiro ( $d_n=1$ ) e 365 no dia 31 de dezembro ( $d_n=365$ ), considerando o mês de fevereiro com 28 dias.

Ângulo do dia ( $\Gamma$ )

$$\Gamma [^\circ] = \frac{360 \cdot (d_n - 1)}{365} \quad [4.1]$$

O Declinação Solar, a posição angular do sol, ao meio-dia solar, em relação plano do equador.

$$\begin{aligned} \delta [^\circ] = & (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(\Gamma) + 0,070257 \cdot \sin(\Gamma) - 0,006758 \cdot \cos(2\Gamma) \\ & + 0,000907 \cdot \sin(2\Gamma) - 0,002697 \cdot \cos(3\Gamma) + 0,00148 \cdot \sin(3\Gamma)) \\ & \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \end{aligned} \quad [4.2]$$

Ângulo de altura solar( $\alpha$ ), ângulo formado pelos raios solares com o plano horizontal

$$\alpha [^\circ] = \sin^{-1}(\sin(\delta) \cdot \sin(\Phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\omega)) \quad [4.3]$$

O ângulo de inclinação dos painéis ( $\beta$ ), é a inclinação da superfície em relação à horizontal.

$$\beta [^\circ] = \Phi - 5^\circ \quad [4.4]$$

Em que:

$\Phi$ , latitude local em grau;

$\omega$ , ângulo horário, ao meio-dia é igual a 0.

A distância mínima ( $d$ ) entre fileiras de painéis na figura 14, lembrando que altura máxima do Sol ( $h_0 = \alpha$ ).

$$Z [m] = L \cdot \sin(\beta) \quad [4.5]$$

$$d [m] = d_1 + d_2 = \frac{Z}{\tan(\alpha)} + \frac{Z}{\tan(\beta)} \quad [4.6]$$

A secção da cablagem das fileiras foi dimensionada tendo como base a perda máxima de energia inferior ao limite de 1%, com a condutividade do condutor de cobre utilizando o método das quedas de tensão de corrente contínua (DC) do sistema ligado à rede e com seguinte fórmula (Pereira,2024):

$$S_{fileira} = \frac{2 \cdot L_{fileira} \cdot I_{fileira}}{1\% V_{MPP} \cdot \sigma} \quad [4.7]$$

Em que:

- $S_{fileira}$ , é a secção do cabo da fileira DC em  $mm^2$ ;
- $L_{fileira}$ , comprimento da cablagem da fileira em m;
- $I_{fileira}$ , corrente nominal proveniente da fileira em A;
- $\sigma$ , condutividade do condutor ( $\sigma_{cobre}=54m/\Omega mm^2$ ;  $\sigma_{aluminio}=34m/\Omega mm^2$ )
- $V_{MPP}$ , valor de tensão proveniente da fileira em V;
- O 2 vezes, porque o condutor é ida e volta.

#### 4.1.2.2 Dimensionamento dos Inversores

Para o dimensionamento dos inversores, começa-se por caracterizar os dados das especificações de Condições Padrão de Teste (STC-*Standar Test Conditions*) do painel e dos inversores. Para que as configurações dos strings respeitem os limites e os parâmetros do inversor, calcula-se número máximo e mínimo de painéis por strings e as correntes, com as seguintes fórmulas:

Número máximo de painéis por string:

$$N^{\circ}_{m\acute{a}x} = \frac{V_{max_{inv}}}{V_{OC_{painel}}} \quad [ 4.8 ]$$

Onde:

- $N^{\circ}_{m\acute{a}x}$ , número máximo de painéis string;
- $V_{max_{inv}}$ , tensão máxima de entrada do inversor (V)
- $V_{OC_{painel}}$ , tensão de circuito aberto (Voc) de painel (V)

Número mínimo de painéis por string:

$$N^{\circ}_{min} = \frac{V_{min_{inv}}}{V_{mp_{painel}}} \quad [ 4.9 ]$$

Onde:

- $N_{min}$ , número mínimo de painéis por string;
- $V_{min_{inv}}$ , tensão mínima de entrada do inversor (V)
- $V_{mp_{painel}}$ , tensão no ponto de máxima de potência (Vmp) de painel (V)

Corrente total de curto-circuito (Isc) por cada entrada de MPPT do inversor

$$I_{IscMPPT} = N^{\circ}_{string//} \cdot I_{sc_{painel}} \quad [ 4.10 ]$$

Onde:

- $I_{IscMPPT}$ , corrente total de curto-circuito (Isc) por MPPT (A)
- $N^{\circ}_{string//}$ , números de strings em paralelo (A)
- $I_{sc_{painel}}$ , corrente de curto-circuito (Isc) de painel (A)

Corrente máxima total de operação de painel por MPPT

$$I_{MPPT} = N^{\circ}_{string//} \cdot I_{mp_{painel}} \quad [ 4.11 ]$$

Onde:

- $I_{MPPT}$ , corrente máxima total de operação de painel por cada entrada de MPPT do inversor (A)
- $N^{\circ}_{string//}$ , Números de strings em paralela (A)
- $I_{mp_{painel}}$ , corrente máxima de operação de painel (A)

### 4.1.3 Análise financeira

Para análise financeira, na pastagem tendo-se em consideração a configuração com maior valor de LER. Como as estruturas usadas de referência nos cálculos financeiros são de sistema convencional que apresenta custo inferior ao das estruturas específicas de AVS, devido as exigências específicas de altura, resistência e integração agrícola. Para vinha foi considerado um valor de três vezes superior à estrutura convencional, devido a maior complexidade e por ter mais altura, e para pastagem, um custo de duas vezes superior. O objetivo é ajustar os valores aos custos reais de estrutura de AVS.

Para os preços da venda de energia, recorreu-se ao mínimo dos preços praticados para potência contratada de 6,9 kVA e um ciclo horário simples pelos uns dos cinco maiores fornecedores de eletricidade em Portugal em julho de 2025, nomeadamente Iberdrola, Galp, Endesa, Edp e Goldenergy (selectra.pt, 2025), cujo valor situa em torno de 0,1424 €/kWh. A taxa de despesas operacionais (OPEX-*Operational Expenditure*) para sistema convencional considera-se 2% ao de custo de investimento inicial (CAPEX-*Capital Expenditure*). No AVS, considera-se a mesma taxa de 2% ao CAPEX, acrescenta mais 2% relativo ao custo de gestão agrícola, totalizando uma taxa de 4% ao ano do CAPEX. A taxa de atualização para determinação de Cash Flow Atualizado, os preços de uva, números de animais por hectare e mão de obra, são apresentados na tabela 7.

**Tabela 7** – Enquadramento dos valores de análise financeira

	SISTEMA CONVENCIONAL	SISTEMA AGRIVOLTAICO
Taxa de atualização	15%	
Preço de Uva	0,50 €/Kg	
Preço de leite	0,45€/l	
Número de gado	2 CN/ha	
Mão de obra	2 500,00 €	5 000,00 €

Os indicadores financeiros que foram usados para verificar a viabilidade financeira AVS ao longo de ano de operação são:

O CAPEX, refere ao montante total aplicativo para concretização do projeto, incluindo a mão de obra.

O Valor Atualizado Líquido (VLA), avalia a viabilidade de um projeto, ao considerar os fluxos de caixa descontados ao longo de tempo e a taxa de retorno esperado, calculado da seguinte formula (Pedro,2024):

$$VLA = \sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+i)^t} + \sum_{t=0}^n \frac{R_t - D_t}{(1+i)^t} + \frac{V_R}{(1+i)^n} \quad [4.12]$$

Onde:

- $I_t$  representa os valores investidos em cada período  $t$ ;
- $R_t$  as receitas geradas no período  $t$ ;
- $D_t$  as despesas operacionais no mesmo período;
- $V_R$  o valor residual do projeto ao final do período  $n$ ;
- $i$  a taxa de desconto aplicada.

O Período de Recuperação de Investimento (PRI), mostra quantos anos são necessários para que um investimento inicial seja recuperado através de fluxos de caixa acumulativa e é calculado da seguinte formula (Number Analytics, s.d):

$$PRI = t + \frac{I - VLA_t}{FC_{t+1}} \quad [4.13]$$

Onde:

- $t$ , é o último ano em que o valor acumulado dos fluxos de caixa atualizado ainda inferior ao investimento inicial;
- $I$ , é o investimento inicial;
- $VLA_t$ , é o valor acumulado atualizado até o ano  $t$ ;
- $FC_{t+1}$ , é o fluxo de caixa atualizado no ano seguinte( $t+1$ )

#### 4.1.3.1 Análise de custo-benefício de sistema agrivoltaico vs sistema convencional

Em comparação de AVS e sistema, envolve a realização de uma análise de custo benefício, com o indicador LCOE. O LCOE os custos unitários, em €/kWh para diferentes tecnologias de diferentes potências de base ao longo da sua vida útil de operação. Para o cálculo, utiliza parâmetros como investimento inicial (CAPEX-*Capital Expenditure*), despesas operacionais (OPEX-*Operational Expenditure*), energia produzida e taxa de degradação painel ao longo da sua vida útil. O painel selecionado, apresenta uma taxa de degradação de 1% no primeiro ano de operação, após o período inicial, a degradação segue um padrão linear médio de 0,4% ao ano, conforme especificações de fabricante apresentado na no apêndice A. Calcula-se o LCOE através de fórmula simplificado (cunha,2023):

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n OPEX}{\sum_t E_0 \cdot (1 - d)^t} \quad [4.14]$$

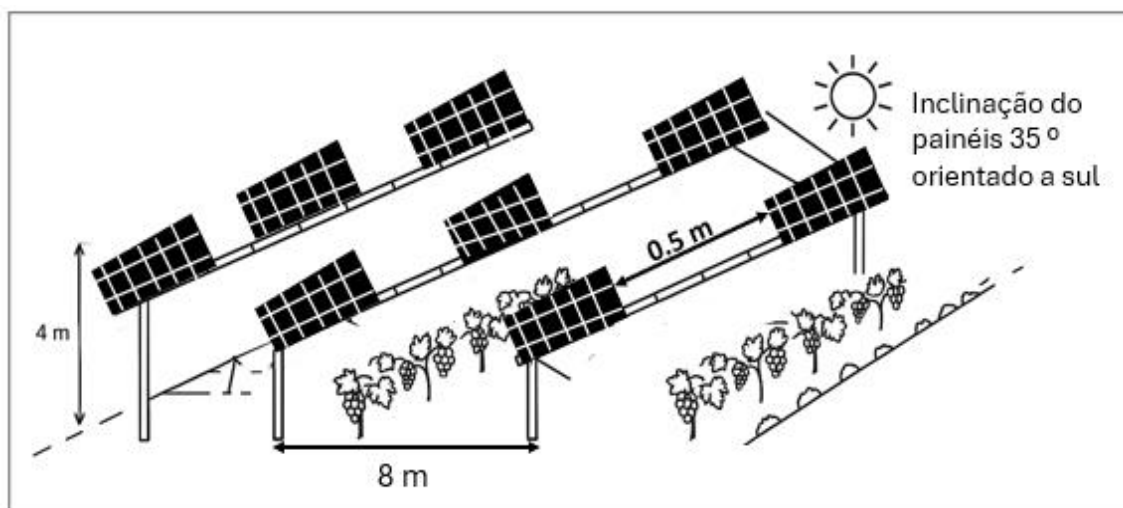
Onde

- LCOE, custo nivelado de energia (€/kWh)
- CAPEX, investimento inicial total do sistema (€);
- OPEX, custo operacionais anuais no ano t (€);
- E<sub>0</sub>, produção anual estimada no primeiro ano (kWh);
- d, taxa de degradação anual de painel FV;
- n, vida útil de sistema.

## 4.2. Solar farm na vinha da ESACB

O estudo realizado no sector da vinha localizada nas coordenadas 39°49'36.9092" N; 7°27'48.9209" W. A instalação foi realizada numa área aproximadamente 5 415 m<sup>2</sup>, sendo que 28% de área total foi coberto com painéis FV, distribuídos de forma equilibrada para maximizar a captação de energia solar e ao mesmo tempo diminuir os efeitos negativos das condições microclimáticas que vão ser criados pelos painéis. O sistema proposto é composto por estrutura montada em estacas com painéis FV fixos elevados a 4 m de altura do solo, permitindo que todas as atividades agrícolas decorram sem quaisquer obstáculos ou limitação, garantindo a plena funcionalidade da exploração. A solução implementada baseia-se no estudo realizado em Piolenc, França pela empresa Sun'Agri que já provou ser eficaz em contextos agrícolas reais.

Os painéis foram instalados com o ângulo da inclinação de 35° (equação 4.4) e orientados a sul, tanto para o AVS como na zona de comparação (sistema convencional). No AVS, a distância mínima entre filas dos painéis foi de 8 m (equação 4.6) e 0,5 m entre os próprios painéis, como mostra a figura 15, esta configuração permite preservar, ou até melhorar o rendimento agrícola, diferente de sistema convencional que se considera 6 m de distância mínima entre filas. Desta forma, assegura-se a eficiência nas captações de energia solar ao longo de todo o dia e em todas as estações. Tendo em conta a área da vinha, foi projetado um sistema FV com uma potência instalada de 235,48 kWp no caso de AVS e de 433 kWp no sistema convencional.



**Figura 15** – Configuração simplificada de estrutura montada em estacas com painéis FV fixo.

#### 4.2.1 Produção agrícola

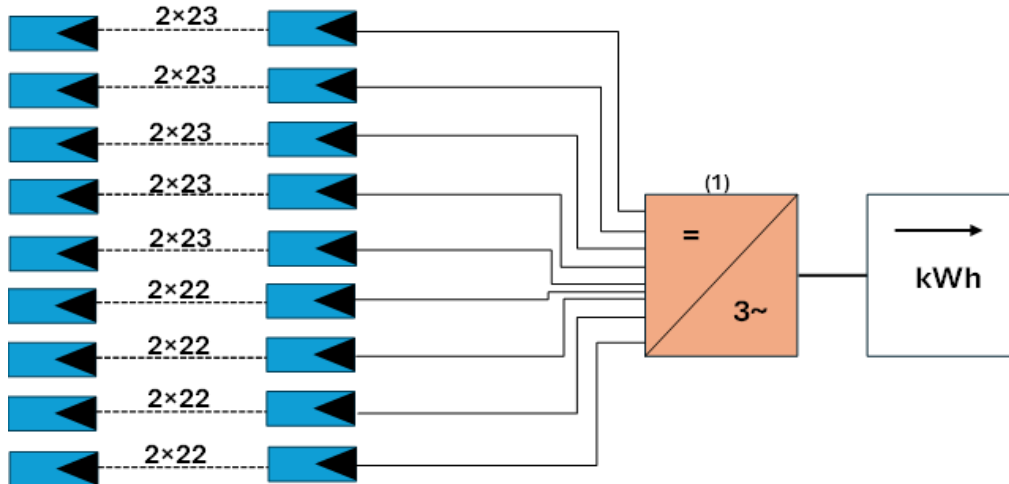
O sector vitivinícola estima-se a capacidade de produção anual média de 2,22 t/ha de uva. Na instalação proposta, as condições microclimáticas que vão ser criados pelo sombreamento proporcionado pelos painéis FV prevê-se o aumento da humidade do solo, redução das perdas de evaporação, sobretudo entre mês de julho a setembro épocas que apresentam mais de 56,6% da evaporação na cidade (PGUCB,2021) e a proteção das uvas por excesso de insolação nos meses de julho e agosto que atingem os valores máximos com mais de 30% da insolação anual (PGUCB,2021). Espera-se ainda uma melhoria WUE entre 6% a 16%, a qual contribuiu significativamente para o aumento da produtividade das videiras, resultando a produção anual de 3,99 t/ha, num rendimento de 1,77 t/ha, equivalente a 80% em comparação com agricultura convencional no mesmo espaço. O mesmo foi verificado num estudo conduzido na região de Puglia, em Itália, que tem 15% a mais no LAOR que melhorou as condições hídricas e contribuiu para um maior rendimento de 277% na produção de uvas. O estudo mostrou o desempenho e eficiência muito alta no uso da terra, combinando a produção agrícola e geração de energia FV com o valor de LER igual a 2,50 (equação 2.1), isso representa um ganho de 150% em eficiência de uso da terra no AVS relativamente à utilização convencional, ou seja, usar o terreno apenas para agricultura ou apenas para produção energética.

#### 4.2.2 Descrição do sistema fotovoltaica

As perdas de tensão na cablagem foram de 0,44%, (equação 4.7), permanecendo dentro do limite aceitável de 1%. Este valor permite a utilização de cabos com secção de 4 mm<sup>2</sup> e condutividade de cobre de 56 m/Ωmm<sup>2</sup>, garantindo a eficiência de sistema elétrico.

O comprimento total dos cabos foi de 664 m ligados aos painéis FV distribuídas de forma equilibrada em 7 filas. Estes painéis estão ligados a um inversor do modelo SUN2000-215KTL-H0, com potência de 200 kW (9 MPPT e 18 entradas, 2 entradas por MPPT), como apresenta na figura 26 do apêndice B. O máximo número de painéis em série é 28,5 (equação 4.8), usou-se entre 22 e 23 painéis por string, de forma a manter uma margem de segurança face as limitações de tensão do inversor e a tensão mínima de operação de MPPT exige no mínimo 12 painéis por string (equação 4.9) e cada strings é composto por painéis conectados em série, com corrente de operação (Imp) de 13,22 A e corrente de curto-circuito (Isc) de 13,95 A. Cada MPPT recebe duas strings ligadas em paralelas, o que resulta numa Imp total de 26,44 A (equação 4.11), com Isc total por MPPT de 27,9 A (equação 4.10), ambos valores estão abaixo do limite de inversor.

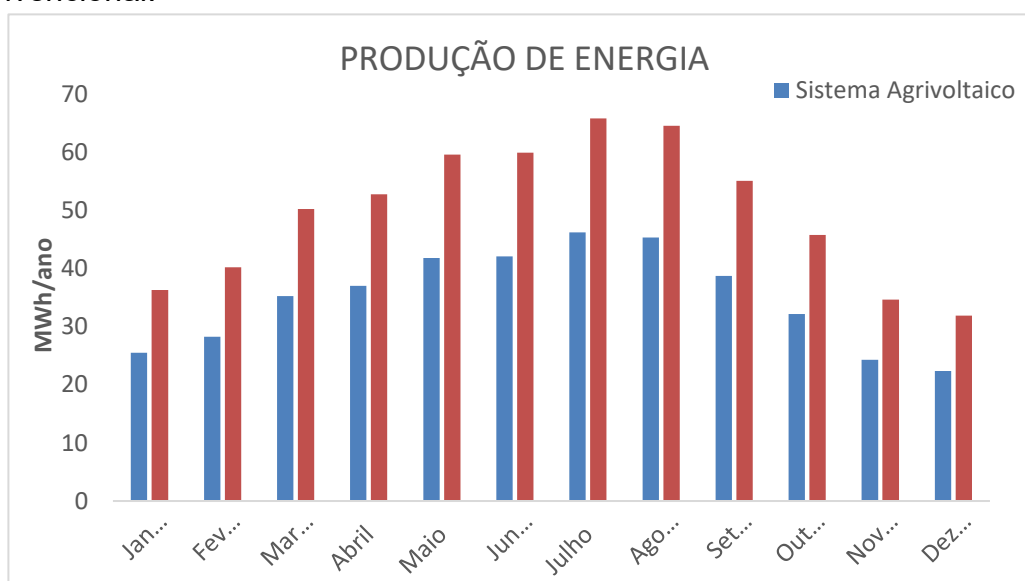
Como apresenta a figura 16, os painéis estão organizados num total de 18 strings, 10 strings com 23 painéis e 8 strings com 22 painéis, garantindo a utilização de todos os 406 painéis e mantendo todas as strings a operar dentro da faixa da faixa nominal do inversor.



**Figura 16** – Diagrama de conexão de painéis FV a um inversor

#### 4.2.3 Produção de energia

No que diz respeito a produção de energia, ambos os sistemas seguem o regime sazonal de radiação solar, sendo maior no verão e menor no inverno, como indica a figura 17. O AVS registou uma produção de 418,82 MWh/ano, o que traduziu numa poupança de aproximadamente 197 t CO<sub>2</sub>e/ano, valor comparável de sequestro de cerca de 5 047 árvores ao longo de 10 anos. Em comparação, o sistema convencional, atingiu a produção de 596,52 MWh/ano. Isto representa uma diferença de produção de cerca de 30% a menos em relação ao sistema convencional.



**Figura 17** - Produção de energia na pastagem com estrutura fixos e inclinados montado no solo – sistema agrivoltaico (AVS) vs sistema convencional

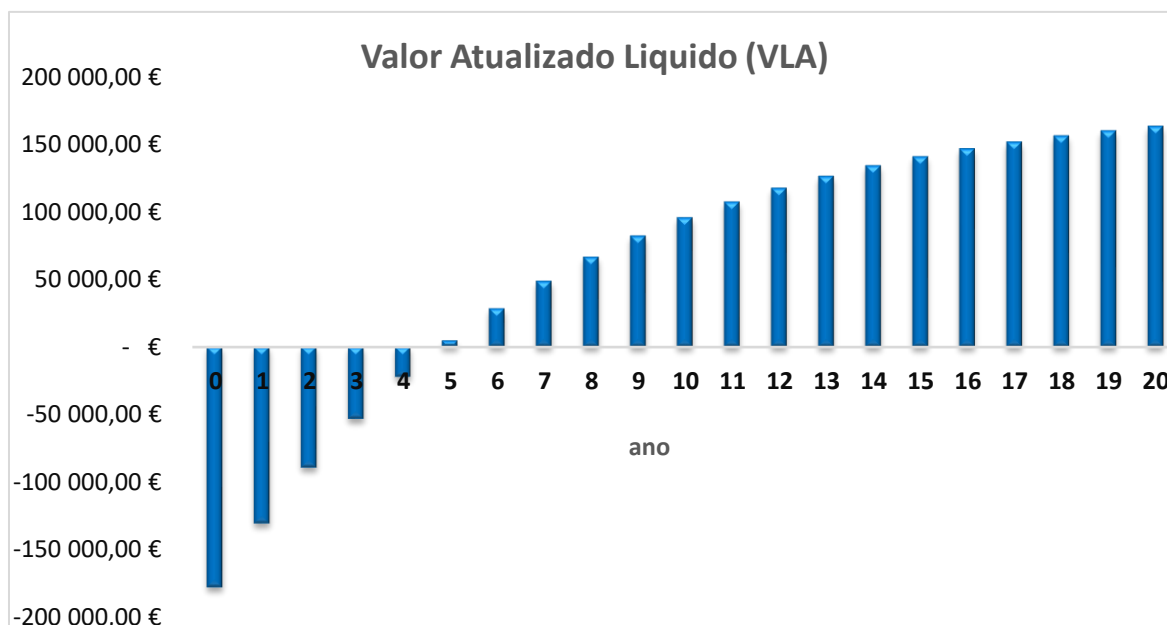
#### 4.2.4 Análise financeira

Com base na análise dos dados, o AVS apresenta o CAPEX na ordem dos 177 974,48 €, enquanto os custos de OPEX são estimados em 7 118,98 €/ano. Já o sistema convencional apresentou um CAPEX mais elevado, totalizando 256 738,90 €, o que representa uma diferença de aproximada de 44% no investimento inicial entre os dois sistemas. Esta diferença está relacionada com a estimativa de maior quantidade de materiais e equipamentos necessário para a configuração de sistema convencional, que possui a maior densidade de painéis e potência instalada. Apesar de maior CAPEX, os custos de OPEX foram ligeiramente inferiores aos do AVS, fixando-se nos 5 134,78 €/ano.

Ao considerar o custo de LCOE, verifica-se que o sistema convencional apresenta um valor de 0,04 €/kWh, enquanto o AVS regista um LCOE de 0,03 €/kWh. Isso indica que energia de sistema convencional é mais vantajosa financeiramente, já que o custo por unidade de energia no AVS é aproximadamente 33% superior. O mesmo foi verificado num estudo desenvolvido na Sicília, Itália, que analisou as sinergias entre a produção agrícola e geração de energia. Nesse caso, o AVS apresentou o LCOE de 0,11€/kWh e sistema convencional registou LCOE inferior de 0,09 €/kWh (SAIS Perspectives,2025). Ainda assim, é importante lembrar que as vantagens de AVS vão além dos limites dos cálculos de LCOE. O AVS oferece vantagens adicionais importantes, como sinergia entre produção de energia e atividade agrícola, otimização do uso de solo, proteção das culturas contra condições climáticas extremas e preservação da biodiversidade.

A análise financeira realizada para o AVS mostra ser eficiente ao longo de 20 anos projetado, demonstrando viabilidade económica a medio prazo. Em termos da produção agrícola, a cultura sob o AVS mostra o aumento significativo na produtividade, gerando a receita anual de 1 995,00 € com venda de uvas, enquanto a agricultura convencional, nas mesmas condições, apresenta uma receita anual de 1 110,00 €. Isso significa um acréscimo de cerca de 80% nas receitas agrícolas obtidas com o AVS. Considerando a sinergia entre a venda de energia eléctrica a rede e a produção agrícola, o AVS apresentou uma receita anual total de 61 634,97 €. Esse valor representa um aumento muito maior na receita anual de aproximadamente 55,5 vezes ou 5453% em comparação com a receita de apenas atividade agrícola convencional praticada na mesma área de estudo.

Ao analisar evolução de VLA, como mostra a figura 18, o ano zero, é o período de CAPEX. Nos três primeiros anos de operação, o VLA permaneceu em zona negativo, determinando o período de investimento e retornos negativos. No entanto, a partir de quarto ano, começa se verifica a mudança dessa tendência, apresentando retornos positivos acumulados. Este comportamento marca o ponto de equilíbrio financeiro, com o PRI de 4 anos e 10 meses (equação 4.9). A partir de sexto ano, o VLA cresce quase de forma linear, alcançando no vigésimo o valor de 1 256 443, 46 € (equação 4.12).



**Figura 18** - Evolução do Valor atualizado Líquido (VLA) ao longo dos anos de análise.

### **4.3. Solar farm na pastagem ESACB**

No caso de sector da pastagem as duas configurações estão localizadas nas coordenadas 39°49'19,7451" N ;7°27'23,0265" W. As instalações propostas foram realizadas numa área que tem mais de 6 580 m<sup>2</sup>, com a capacidade estimada de produzir anualmente 6,58 t MS/ha de forragem.

#### **4.3.1 Primeira Configuração**

A primeira configuração proposta é composta por estrutura fixa e inclinada montada no solo, semelhante a sistema convencional, elevada a 2,5 m de altura do solo. Os painéis foram instalados com o ângulo da inclinação de 35° (equação 4.4) e orientadas a sul. No AVS, a distância mínima entre filas de painéis é de 8 m (equação 4.6) e 0,5 m entre os painéis, permitindo a instalação de uma potencia de 287,68 kWp. Na zona comparação (sistema convencional), a distância mínima foi de 6 m (equação 4.6) entre filas de painéis e foi instalada uma capacidade 574 kWp.

##### **4.3.1.1 Produção agrícola**

As condições microclimáticas geradas pelo sombreamento proporcionado pelos painéis, com 28 % de LAOR, prevê-se menor temperatura média do ar e a temperatura do solo, sobretudo na época verão. E ainda se estima uma produção de 5,18 t MS/ha/ano, representando uma redução de 1,41 t MS/ha/ano equivalente a 22% em relação ao seu potencial máximo (agricultura convencional), esta redução nas perdas resultou num valor de LER é igual a 1,29 (equação 2.1), representado um ganho 29% em eficiência de uso da terra em comparação a usar o mesmo terreno apenas para agricultura ou apenas para produção FV.

##### **4.3.1.2 Descrição do sistema fotovoltaico**

As perdas de tensão na cablagem foram de 0,44%, (equação 4.7), permanecendo dentro do limite aceitável, permitindo a utilização de cabos com secção de 4 mm<sup>2</sup> e condutividade de cobre de 56 m/Ωmm<sup>2</sup>, garantindo a eficiência de sistema elétrico. O comprimento total dos cabos foi de 811 m ligados aos painéis FV distribuídas de forma equilibrada em 8 filas. Estes painéis estão ligados a um inversor de modelo SUN2000-330KTL-H1 de 250 kW (6 MPPT com entradas distribuídos em 4/5/5/4/5/5), como apresenta na figura 27 do apêndice B. O máximo número de painéis em série é 28,5 (equação 4.8), usou-se entre 20 e 21 painéis por string, de forma a manter uma margem de segurança face as limitações de tensão do inversor e a tensão mínima de operação de MPPT exige no mínimo 12 painéis por string (equação 4.9) e cada strings é composto por painéis conectados em série, com I<sub>mp</sub> de 13,22 A e I<sub>sc</sub> de 13,95 A.

A instalação utiliza todos os 496 painéis disponíveis, organizados em 26 strings, 16 strings de 21 painéis e 8 strings com 20 painéis, como mostra a figura 19. Cada MPPT recebe quatro strings ligadas em paralelo, o que resulta de  $I_{mp}$  total de 52,88 A (equação 4.11), abaixo de limite de 65 A, e  $I_{sc}$  total por MPPT de 55,8 A (equação 4.10) também dentro do limite de máximo permitido de 115 A. Assim, todas as strings operam dentro da faixa nominal do inversor, garantindo operação segura, compatível e eficiente do sistema.

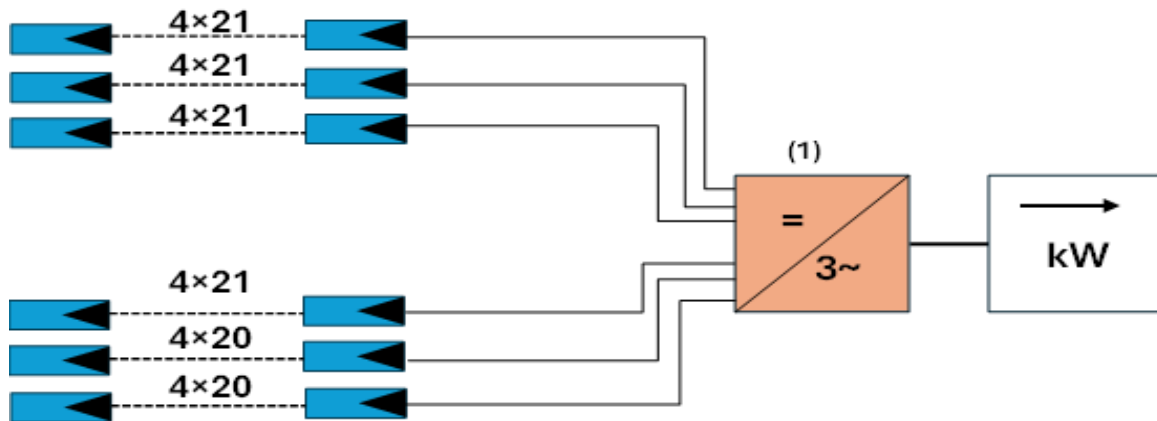


Figura 19 - Diagrama de conexão de painéis FV a um inversor

#### 4.3.1.3 Produção de Energia

Em termos da produção de energia, ambos os sistemas seguem o regime sazonal de radiação solar local, sendo maior no verão e menor no inverno, como mostra a figura 20. O AVS produziu 519,96 MWh/ano, evitando assim a emissão de 244 t  $CO_2$ /ano, o que corresponde a capacidade de absorção de cerca de 6266 árvores ao longo de dez anos e o sistema convencional produziu 1019,1 MW/ano. Essa diferença na produção de energia entre os dois sistemas, mostra que o AVS apresentou uma produção inferior de 49% em relação ao sistema convencional.

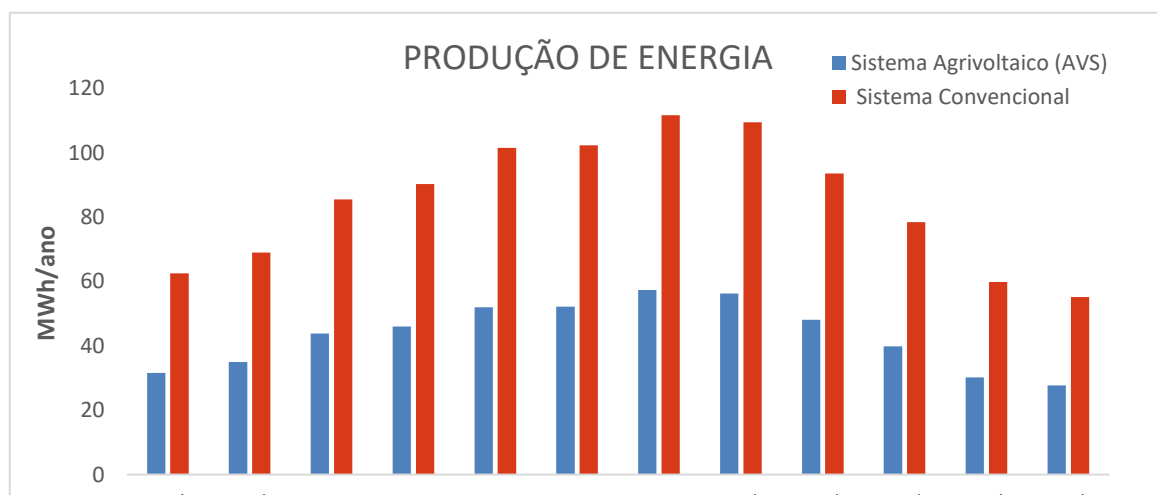
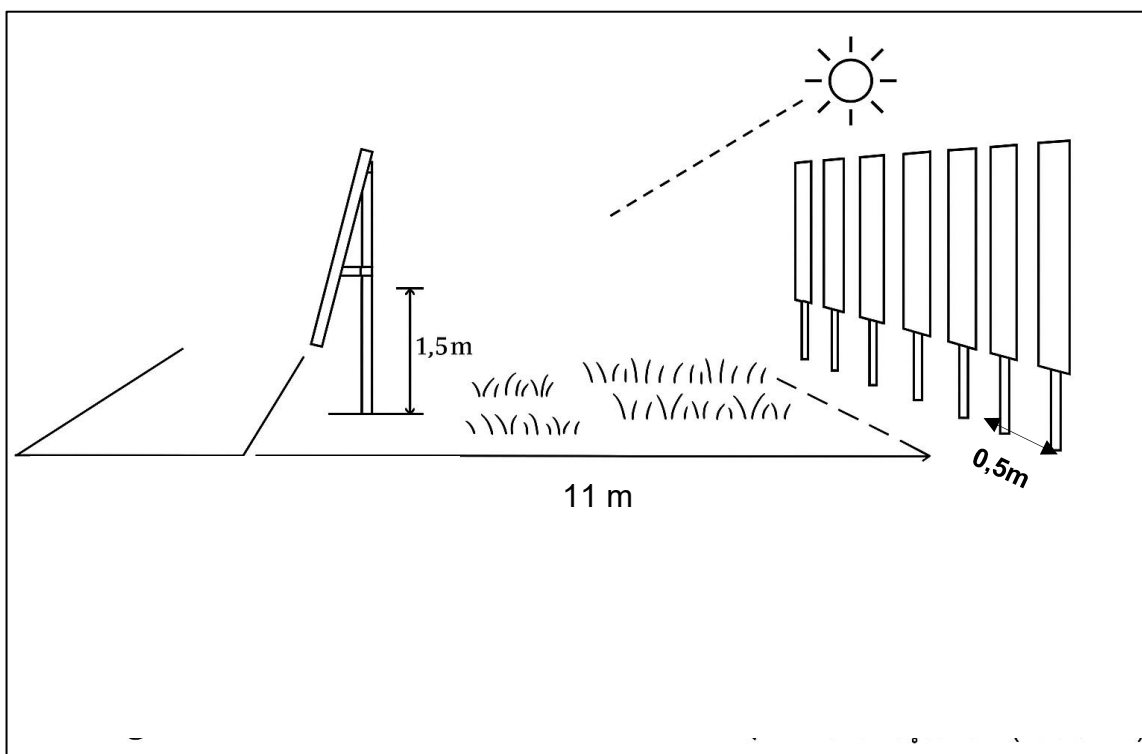


Figura 20 - Produção de energia na pastagem com estrutura fixos e inclinados montado no solo – sistema agrivoltaico (AVS) vs sistema convencional.

### 4.3.2 Segunda Configuração

A segunda configuração proposta é composta por estrutura de paredes verticais com painéis FV elevada a 1,5 m do solo, com ângulo de inclinação de  $90^\circ$  e orientados a Leste-Oeste. No AVS, a distância mínima entre filas dos painéis foi de 11 m de (equação 4.6) e 0,5 m entre os painéis, como mostra a figura 21, diferente de sistema convencional que tem 10 m de distância mínima entre fileiras. Desta forma, tendo em conta a área de pastagem, foi instalado uma potência de 208,8 kWp no AVS e 336 kWp no sistema convencional.



**Figura 21** - Configuração simplificada de estrutura de paredes verticais com painéis FV. Fonte: O autor

### 4.3.2.1 Produção agrícola

As condições microclimáticas criadas pelo sombreando provocado pelos painéis no local, com o LAOR de 9%, estima-se uma produção anual de 6,13 t MS/ha, representado uma diminuição na produção anual de forragem de cerca de 0,45 t MS/ha/ano o que corresponde a uma perda de 7% de produção anual. Esta redução nas perdas resultou num valor de LER de 1,6 (equação 2.1), isso representa um ganho de 60% em comparação com uso separada de solo. Também se espera menor temperatura média do ar e a temperatura do solo, sobretudo na época verão.

### 4.3.2.2 - Descrição do sistema fotovoltaica

As perdas de tensão na cablagem foram de 0,44%, (equação 4.7), permanecendo dentro do limite aceitável de 1%. Este valor permite a utilização de cabos com secção de 4 mm<sup>2</sup> e condutividade de cobre de 56 m/Ωmm<sup>2</sup>, garantindo a eficiência de sistema elétrico. O comprimento total dos cabos foi de 589 m ligados aos painéis FV distribuídas de forma equilibrada em 9 filas. Estes painéis estão ligados a um inversor do modelo SUN2000-215KTL-H0, com potência de 200 kW (9 MPPT e 18 entradas, 2 entradas por MPPT), como apresenta na figura 26 do apêndice B. O máximo número de painéis em série é 28,5 (equação 4.8), usou-se 20 painéis por todo string, de forma a manter uma margem de segurança face as limitações de tensão do inversor e a tensão mínima de operação de MPPT exige no mínimo 12 painéis por string (equação 4.9) e cada strings é composto por painéis conectados em série, com  $I_{mp}$  de 13,22 A e  $I_{sc}$  de 13,95 A .Cada MPPT recebe duas strings ligadas em paralelo, o que resulta de  $I_{mp}$  total de 26,44 A (equação 4.11), com  $I_{sc}$  total por MPPT de 27,9 A (equação 4.10), ambos valores estão abaixo do limite de inversor. Como apresenta a figura 22, os painéis estão organizados em 10 strings com 23 painéis e 8 strings com 22 painéis, totalizando 18 strings, garantindo a utilização de todos os 580 painéis e mantendo todas as strings a operar dentro da faixa da faixa nominal do inversor.

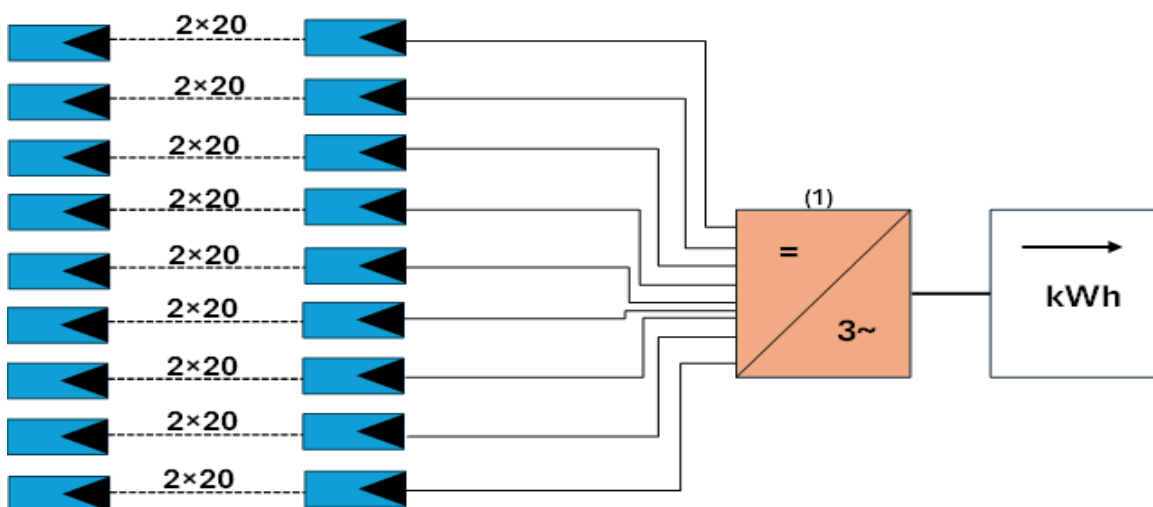
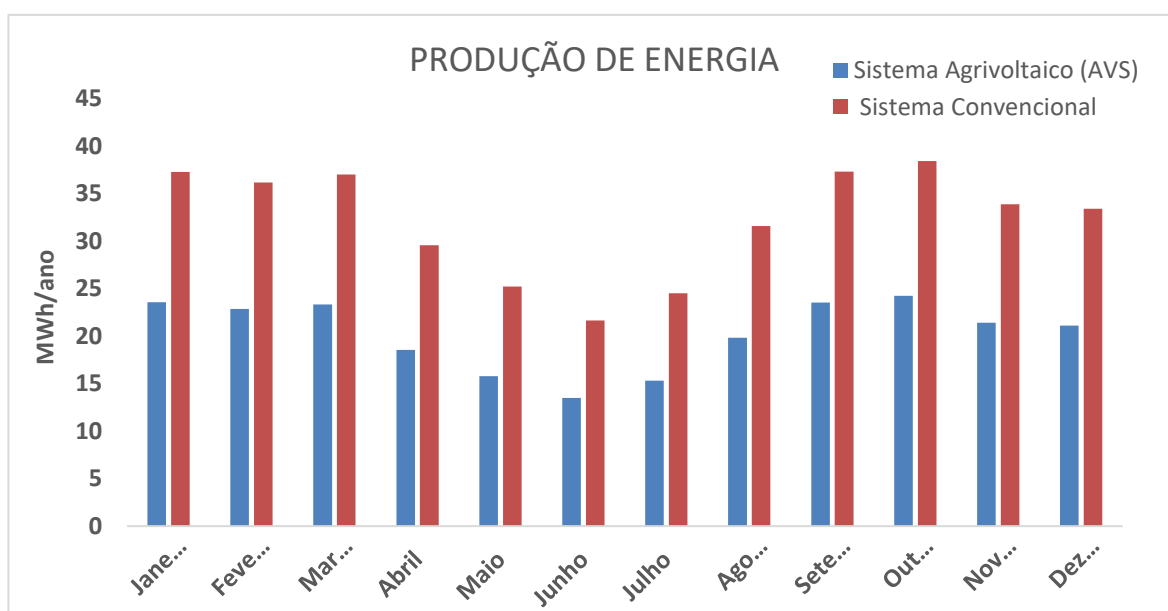


Figura 22 - Diagrama de conexão de painéis FV a inversor

### 4.3.2.3 Produção de energia

Relativamente a produção de energia, os dois sistemas produzem menos energia nos meses de verão. Esta redução não por falta de radiação solar no verão, que pelo contrário é bastante intensa nessa estação do ano, mas sim pelo ângulo de incidência da luz solar, que torna desfavorável a posição de 90°. Durante o verão, o ângulo de elevação solar é significativamente mais elevado do que as restantes estações do ano, o que afeta diretamente o desempenho dos painéis inclinado a 90° como mostra a figura 20. O AVS, registou uma produção de 242,98 MWh/ano de energia. Esta produção permite evitar cerca de 144 t CO<sub>2</sub>e/ano, valor que corresponde à capacidade de absorção de cerca de 2 928 árvores ao longo de 10 anos. Por sua vez, o sistema convencional produziu 385,90 MW/ano, o que significa que o AVS produz menos de 37% de energia em comparação ao sistema convencional.



**Figura 23** - Produção de energia na pastagem com paredes verticais – sistema agrivoltaico (AVS) vs sistema convencional.

### 4.3.3 Comparação das configurações

Em comparação das duas configurações de pastagem no AVS, a configuração com maior perda e menor valor de LER é a estrutura fixa e inclinada montada no solo, com perda de 22% na produção agrícola que resultou num valor de LER é igual a 1,29. A outra configuração com estrutura de paredes verticais, apresenta menor perda de produção agrícola em relação a configuração anterior com valor de 7% e o valor de LER de 1,6, representando um acréscimo de 31% face a configuração anterior no uso separada da terra. Os valores LER mostram que o AVS mesmo na pior da hipótese pode oferecer benefícios adicionais quando analisada de uma perspectiva global e mostra que o AVS eficiente, onde a produção agrícola e energia pode ser produzido simultaneamente na mesma terra sem comprometer o desenvolvimento das plantas, depende de uma boa configuração do sistema.

As diferenças observadas na perda de produção de forragem e nos valores de LER estão diretamente relacionadas com a variação no valor de LAOR, o que foi confirmado por Vaughan *et al.*(2024), ao indicarem que sombra parcial pode permitir exposição adequada à luz solar necessária para a fotossíntese e o crescimento das plantas. Os resultados são semelhantes ao experimento realizado no AVS na Oregon State University em Corvallis, EUA, que relataram uma redução significativa na produção de forragem em áreas sombreadas pelos painéis FV (Andrew *et al.*,2021).

Portanto, a segunda configuração é mais equilibrada e eficiente para um projeto de AVS com o valor de LER superior e menor efeito negativo no rendimento da cultura, motivo pela qual foi escolhido para seguimento de projeto e análise financeira.

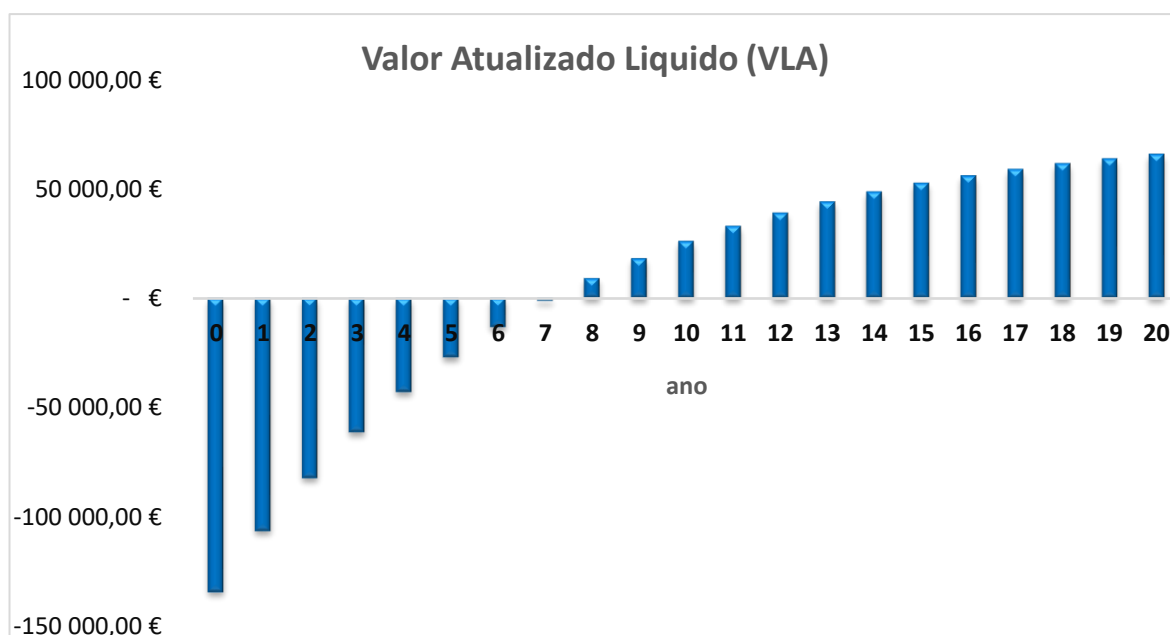
#### 4.3.4 Análise financeira

De acordo com os resultados analisados, o AVS tem o CAPEX de 134 304,07 €, sendo os custos de OPEX estimados em 5 372,16 €/ano. O sistema convencional apresenta o CAPEX mais elevado, totalizando 197 781,99 €. Os custos de OPEX anual foram inferiores aos do AVS com 3 955,64 €. O sistema convencional apresenta 47,26 % de CAPEX mais em comparação com o AVS, esta diferença está relacionada com a estimativa de maior quantidade de materiais e equipamentos necessário para a configuração de sistema convencional, que possui a maior potência instalada.

Comparando o custo de LCOE, como é esperado o sistema convencional apresenta o valor de 0,04 €/kWh, inferior do AVS que apresenta o LCOE de 0,05 €/kWh. Essa diferença mostra que o custo por unidade de energia no AVS é aproximadamente 25% superior do sistema convencional, isso mostra que energia de sistema convencional é mais vantajosa financeiramente, o que foi confirmado por Mamun *et al.* (2022) num estudo feito na Alemanha que avaliou a viabilidade económica deste sistema e concluiu que o LCOE de AVS é superior ao dos painéis solares convencionais montados no solo. Contudo, é importante sublinhar que análise do LCOE, não reflete todos os benefícios ligados a AVS. O AVS oferece vários benefícios, nomeadamente benefícios ambientais, praticas agrícolas mais sustentáveis e otimização no uso do solo. Por isso, alinham-se a vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) de Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente aqueles ligados a segurança alimentar, energia limpa e ação climática, nomeadamente, Erradicar a fome (ODS 2), Água Potável e Saneamento (ODS 6), Energia Renováveis e Acessíveis (ODS7), Trabalho Digno e Crescimento Económico (ODS 8), Indústria, Inovação e Infraestrutura (ODS 9), Produção e Consumo Sustentáveis (ODS 12), Ação Climática (ODS 13) e Proteger a Vida Terrestre (ODS 15). O mesmo foi afirmado por Walston *et al.* (2022) num estudo de oportunidades para os sistemas AVS atingirem as necessidades sinérgicas de alimentos, energia e meio ambiente e atenderem às metas de sustentabilidade.

A análise financeira efetuada a sinergia entre produção de energia e produção agrícola, mostra-se eficiente ao longo do período projetado. No contexto da produtividade agrícola, a cultura sob painéis FV, mostra a redução na produção de forragem que afeta nos números dos animais na pastagem, gerando a receita anual de 2 722,50 € com venda de leite. Já o pasto convencional registra uma receita superior à do AVS, alcançando um valor de 5 445,00 €, o que apresenta o dobro da receita obtida no AVS. Analisando o AVS numa visão geral, que integra tanto a componente agrícola como a produção de energia, o AVS apresenta uma receita anual de 37 325,70 €, representando um desempenho de aproximadamente 586% maior que atividade pecuária convencional praticado na mesma área, superando a perda na produção de forragem.

Ao analisar a evolução de VLA ao longo de período de 20 anos, verifica-se que o AVS atinge o PRI aos 7 anos e 6 meses (equação 4.13). O ano zero, corresponde a fase de CAPEX. Nos primeiros seis anos de operação, o VLA, apresenta o período de investimento e retornos negativos. No sétimo ano, o valor de VLA quase atingiu o valor de CAPEX. A partir desse momento, o sistema começa a apresentar retornos positivos acumulados, com ritmo de crescimento quase linear a partir de oitavo ano. No vigésimo ano, o VLA atinge o valor de 106 700,95 € (equação 4.12), como mostra a figura 24.



**Figura 24** - Evolução do Valor atualizado Líquido (VLA) ao longo dos anos de análise de sistema agrivoltaico.

## CAPÍTULO 5 - Conclusões

### 5.1 Conclusão

Este projeto mostra que o AVS eficiente, onde a produção agrícola e de energia pode ser produzido simultaneamente na mesma terra sem comprometer o desenvolvimento das plantas, depende da seleção correta das culturas e uma boa configuração do sistema, sobretudo na determinação do valor de LAOR.

Análise global do AVS aplicado na vinha e a pastagem permitiu concluir que esta solução apresenta o elevado potencial económico e ambiental, destacando-se como uma alternativa promissora para o futuro da agricultura sustentável e de produção de energia renovável em simultânea.

Na vinha, os resultados mostram um elevado valor de LER igual a 2,5, refletindo um aproveitamento duplo vantajoso de 150% em eficiência de uso da terra. Verificou-se o aumento de 80% no rendimento agrícola face a agricultura convencional, o que associado a produção de energia, resultou uma receita anual de 5 453% superior obtida apenas com atividade agrícola convencional na mesma área de estudo e evitou cerca de 197 tCO<sub>2e</sub>, apesar de produzir menos 30% e apresentou LCOE 33% inferior comparado com o sistema convencional, reforçando que energia de sistema convencional é mais vantajosa financeiramente, quando comparado apenas para produção FV.

No caso da pastagem, ambas as configurações analisadas mostraram ser eficientes em termos sinergia de uso de solo. Mas, a segunda configuração, composto por estrutura de paredes verticais foi escolhida para o seguimento de estudo por apresentar maior eficiência de uso duplo de solo e menor perda na produção de forragem.

A segunda configuração, apresentou o LER de 1,60, mostrando também um uso eficiente do solo, apesar de uma redução de 7% na produção de forragem, os ganhos económicos superaram essa perda, com uma receita 586% superior à de agricultura convencional praticada na mesma área e evitou cerca de 144 tCO<sub>2e</sub>. A produção de energia foi cerca de 37% inferior em relação ao sistema convencional, com o LCOE de 25% mais baixo, mostrando mais uma vez que se foi analisado só pela produção de energia, o sistema convencional é mais vantajoso financeiramente.

Portanto, conclui-se que o AVS é uma solução equilibrada, sustentável e economicamente viável, além de aumentar a sustentabilidade no uso do solo terra que é um bem fundamental para a manutenção dos ecossistemas, preservação da biodiversidade e a regulação do ciclo da água e vai evitar a disputa de um potencial conflito entre a produção de alimentos e a geração de energia FV, uma vez que o aumento da produção de energia FV em grande dimensão é necessário para mitigação das mudanças climáticas e obtenção de energia limpa e sustentável.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados alcançados neste projeto serem o que se esperava em termos agrícolas. O estudo fornece uma base sólida para compreender o desempenho das diferentes configurações de AVS, reconhece-se ainda que no futuro , será essencial fazer um acompanhamento mais rigoroso onde serão envolvidos os agrónomos de modo analisar os impactos de sombreamento nas culturas procurando novas alternativas que possam corrigir a situação, através de monitorização de longo prazo com dados mais reais em campo, para validar ou ajustar as projeções de produção energética, rendimento ou perdas agrícolas e eficiência de uso de água, com aquisição de materiais e equipamentos, como estrutura padronizadas, sensores e tecnologias digitais para ajudar na obtenção de dados mais confiáveis sobre microclimas, crescimento das culturas e comportamento das sombras.

## REFERÊNCIAS

- Andrew A.C., Higgins C.W., Smallman M.A., Graham M. & Ates S. (2021). *Herbage Yield, Lamb Growth and Foraging Behavior in Agrivoltaic Production System*. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:659175. Volume 5 - 2021 | <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.659175>
- Altamira.(2025). *Estrutura de solo para módulos solares*. <https://www.e-altamira.pt>
- Chopdar, R.K., Senga, N., Giri,N.C., & Halliday, D. (2024). *Comprehensive review on agrivoltaics with technical, environmental and societal insights*,*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,Volume 197,2024,114416,ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114416>.
- Cunha, T. M. da C. (2023,outubro). *Cálculo do custo nivelado de energia em sistemas fotovoltaicos para diferentes localizações* (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto). <http://hdl.handle.net/10400.22/24007>
- Ferreira,R.F., Lameirinhas,R.A.M., Correia,C.P.V.B.,Torres,J.P.N., & Santos, M. (2024). *Agri-PV in Portugal: How to combine agriculture and photovoltaic production*,*Energy for Sustainable Development*,Volume 79,2024,101408,ISSN 0973-0826, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101408>.
- Helexia. (s.d). *Como calculamos os indicadores dos projetos Helexia*. Recuperado em 26 de julho de 2025, de <https://helexia.pt/como-calculamos-os-indicadores-dos-projetos-helexia/>
- Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, I. P.(IVDP,IP). (2025).*produtividade de vinha*.<https://www.ivdp.pt/pt/vinha/cultura-da-vinha/>
- IRENA. (2025). *Estatísticas de capacidade renovável*. [https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA\\_DAT\\_RE\\_Capacity\\_Highlights\\_2025.pdf](https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf)
- Jinkosolar.(2025).[https://www.jinkosolarpvs.com/Products?gad\\_source=1&gad\\_campaignid](https://www.jinkosolarpvs.com/Products?gad_source=1&gad_campaignid)
- Magarelli, A., Mazzeo, A., & Ferrara, G. (2024). *Espécies de culturas frutíferas com sistemas agrovoltaicos: uma revisão crítica*. *Agronomia*, 14(4), 722. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040722>
- Magarelli, A., Mazzeo, A., & Ferrara, G. (2025). *Explorando o Sistema Agrovoltaico da Uva: Modulação Climática e Benefícios da Videira na Região de Puglia, Sudeste da Itália*. *Horticultura*, 11(2), 160. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020160>

Mamun, M.A.A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N.A., & Abdul Aziz, A. (2022). *review of research on agrivoltaic systems*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 161, 2022, 112351, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>.

Neto, L. (2024). *Apontamentos da disciplina de Energia Solar Térmica: Conceitos básicos de geometria solar (by Muhammad Iqbal) [Material não publicado]*. Curso de Engenharia das Energias Renováveis, Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Number Analytics. (s.d). *Mastering discounted payback period: A practical guide*. *Number Analytics blog*. <https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-discounted-payback-period>.

Padilla, J. Toledo, C. & Abad, J. (2022). *Enovoltaics: Symbiotic integration of photovoltaics in vineyards*. *Front. Energy Res. Espanha* 10:1007383. Volume 10 - 2022 | <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1007383>

Pedro, N. (2024). *Apontamentos da disciplina de Seminário: Análise financeira [Material não publicado]*. Curso de Engenharia das Energias Renováveis, Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Pereira, P. (2024). *Apontamentos da disciplina de Seminário: Dimensionamento de Fotovoltaico cálculo de secção da cablagem das fileiras [Material não publicado]*. Curso de Engenharia das Energias Renováveis, Instituto Politécnico de Castelo Branco.

PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030). (2024, 1 de outubro). *Atualização/Revisão (de acordo com o definido no artigo 14º do Regulamento (UE) 2018/1999, de 11 de dezembro)*

Portugal. (2008, 26 de junho). *Despacho nº 17313/2008 (2ª.série, n.º122)*. Diário da República. Recuperado de <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho/17313-2008-3397117>

Pv-magazine.(2020). *Primeiros resultados do experimento agrivoltaico Sun'Agri em Piolenc*. <https://www.pv-magazine.fr/2020/03/31/premiers-resultats-de-lexperimentation-agrivoltaique-de-sunagri-a-piolenc/>

Report24.news.(2024). *Portugal:865 Hektar Abholzung und Massentiermord für Photovoltaik-Anlage*. <https://report24.news/portugal-865-hektar-abholzung-und-massentiermord-fuer-photovoltaik-anlage/>

RES4Africa Foundation. (2023). *Agrivoltaics: Harvesting Solar Energy in the Mediterranean*. Enel Green Power SpA. <http://www.res4africa.org>

Revisão do Plano Geral Urbano de Castelo Branco. (2021, Novembro). *capítulo 03, caracterização Biofísica, pag.2 de 20*.

Ricardo M. C. Freixial, R.M.C., & Barros, J.F.C. (2012). *Texto de apoio para as Unidades Curriculares de Sistemas e Tecnologias Agropecuários: Noções Básicas de Agricultura e Tecnologia do Solo e das Culturas*. Universidade de Évora

SAIS Perspectives. (2025). *Sinergias entre Agricultura e Energia: Liberando o Potencial da Energia Agrovoltáica nos Vinhedos da Sicília*. <https://www.saisperspectives.com/202425-issue/2025/3/27/agriculture-and-energy-synergies-unlocking-the-potential-of-agrivoltaics-in-sicilian-vineyards?utm>.

Selectra.pt, (2025). *Preço de energia*. <https://selectra.pt/energia/precos/kwh>

Solar.Huawei.(2025). *Ficha técnica de inversor* <https://solar.huawei.com/en-GB/download? 215KTL-H0.pdf>

Souenergylar. *Ficha técnica de inversor* (2025). [https://static.souenergy.com.br/catalog/product/file/ DATASHEET\\_PT\\_BR - SUN2000-250KTL-H1 Datasheet - PT\\_BR.pdf](https://static.souenergy.com.br/catalog/product/file/ DATASHEET_PT_BR - SUN2000-250KTL-H1 Datasheet - PT_BR.pdf)

Sun'Agri. (2023) *Principais conclusões-Videira*. <https://sunagri.fren/Key findings – vine growing ->. Sun'Agri

Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). *Projeto e Avaliação de Sistemas Agrovoltáicos: Uma Revisão Crítica e um Modelo Descritivo para uma Visão de Paisagem Sustentável (Padrões Agrovoltáicos Tridimensionais)*. *Sustentabilidade*, 13(12), 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>

Vaughan, A., & Brent, A. (2024). *Agrovoltáicos for small ruminants: A review*, *Small Ruminant Research*, Volume 241, 2024, 107393, ISSN 0921 4488, <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2024.107393>.

Walston, L.J., Barley, T., Bhandari, I., Campbell B., McCall, J., Hartmann, H.M. & Dolezal, A.G. (2022). *Oportunidades para sistemas agrovoltáicos atingirem necessidades sinérgicas de alimentos, energia e meio ambiente e abordarem metas de sustentabilidade*. *Frente. Sustentar. Sistema Alimentar.*, 16 setembro 2022 Sec. Sistemas Alimentares Inteligentes para o Clima. Volume 6 - 2022 | <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.932018>

Zahrawi, A. A., & Aly, A. M. (2024). *Uma revisão dos sistemas agrovoltáicos: enfrentando desafios e aprimorando a sustentabilidade*. *Sustentabilidade*, 16(18), 8271. <https://doi.org/10.3390/su16188271>

# APÊNDICES

## Apêndice A – Ficha Técnica do Painel

www.jinkosolar.com



# TIGER Neo

## 72HL4-BDV

570-590 Watt

BIFACIAL MODULE WITH DUAL GLASS

N-type



### N-type Technology

N-type modules with Tunnel Oxide Passivating Contacts (TOPCon) technology offer lower LID/LeTID degradation and better low light performance.



### HOT 2.0 Technology

N-type modules with JinkoSolar's HOT 2.0 technology offer better reliability and efficiency.



### Dual-Sided Power Generation

Dual-sided power generation gain increases with backside exposure to light, significantly reducing LCOE.



### Mechanical Load Enhanced

Certified to withstand:  
5400 Pa front side max static test load  
2400 Pa rear side max static test load



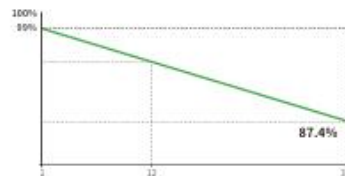
### SMBB Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



### Anti-PID Guarantee

Minimizes the chance of degradation caused by PID phenomena through optimization of cell production technology and material control.



**12 Year** Product Warranty | **30 Year** Linear Power Warranty | **1%** First-year Degradation | **0.4%** Annual Degradation Over 30 Years

- IEC61215 (2016) / IEC61730 (2016)
- IEC61701 / IEC62716 / IEC60068 / IEC62804
- ISO9001:2015: Quality Management System
- ISO14001:2015: Environment Management System
- ISO45001:2018: Occupational health and safety management systems



**JKM570-590N-72HL4-BDV-F8-EN**

## 72HL4-BDV 570-590 Watt

### Mechanical Characteristics

Cell Type	N- type Mono-crystalline
No. of cells	144 (72×2)
Dimensions	2278×1134×30 mm
Weight	31.0 kg
Front Glass	2.0 mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	2.0 mm, Heat Strengthened Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Protection Class	Class II
IEC Fire Type	Class C
Output Cables	4.0 mm <sup>2</sup> (+): 400 mm , (-): 200 mm or Customized Length

### Packaging Configuration

Pallet Dimensions	2338×1140×1251 mm
Packing Detail ( Two pallets = One stack )	36 pcs/pallets, 72 pcs/stack, 720 pcs/ 40'HQ Container

### Specifications (STC)

Maximum Power - Pmax [Wp]	570	575	580	585	590
Maximum Power Voltage - Vmp [V]	43.58	43.73	43.88	44.02	44.17
Maximum Power Current - Imp [A]	13.08	13.15	13.22	13.29	13.36
Open-circuit Voltage - Voc [V]	52.10	52.30	52.50	52.70	52.90
Short-circuit Current - Isc [A]	13.83	13.89	13.95	14.01	14.07
Module Efficiency STC [%]	22.07	22.26	22.45	22.65	22.84
Power Tolerance	0 ~ + 3 %				
Temperature Coefficients of Pmax	-0.29 %/°C				
Temperature Coefficients of Voc	-0.25 %/°C				
Temperature Coefficients of Isc	0.045 %/°C				

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, AM=1.5

### Specifications (NOCT)

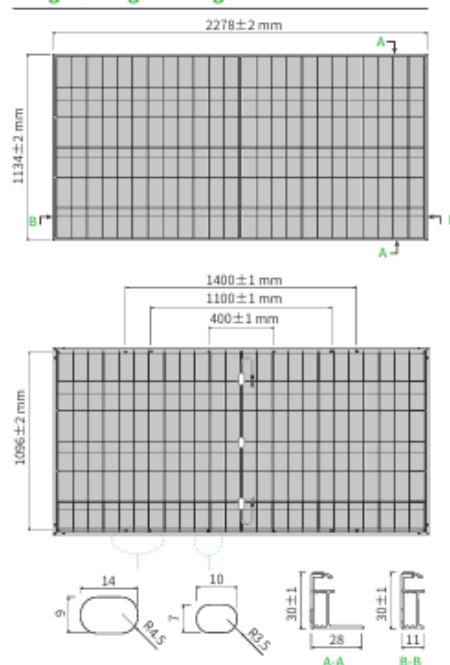
Maximum Power - Pmax [Wp]	430	433	437	441	445
Maximum Power Voltage - Vmp [V]	40.56	40.73	40.89	41.05	41.21
Maximum Power Current - Imp [A]	10.59	10.64	10.69	10.74	10.79
Open-circuit Voltage - Voc [V]	49.49	49.68	49.87	50.06	50.25
Short-circuit Current - Isc [A]	11.16	11.21	11.26	11.31	11.36

NOCT: Irradiance 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, AM=1.5, Wind Speed 1m/s

### Application Conditions

Operating Temperature	-40 °C ~ +85 °C
Maximum System Voltage	1500 VDC (IEC)
Maximum Series Fuse Rating	30 A
Nominal Operating Cell Temperature -NOCT	45±2 °C
Refer. Bifacial Factor	80±5 %

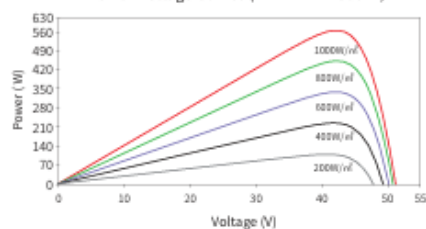
### Engineering Drawings



Note: For specific dimensions and to tolerance ranges, please refer to the corresponding detailed module drawings.

### Electrical Performance

#### Power-Voltage Curves (72HL4-BDV 580 W)



#### Current-Voltage Curves (72HL4-BDV 580 W)

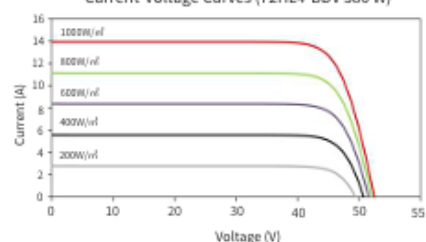


Figura 25 - Ficha técnica do Painel. Fonte: Jinkosolar,2025

## Apêndice B – Ficha Técnica do Inversor de Configuração de Área de Vinha e Pastagem 2

SUN2000-215KTL-H0  
Smart String Inverter



  
9  
MPP Trackers

  
Max. Efficiency  
≥99.0%

  
Smart String-Level  
Disconnecter

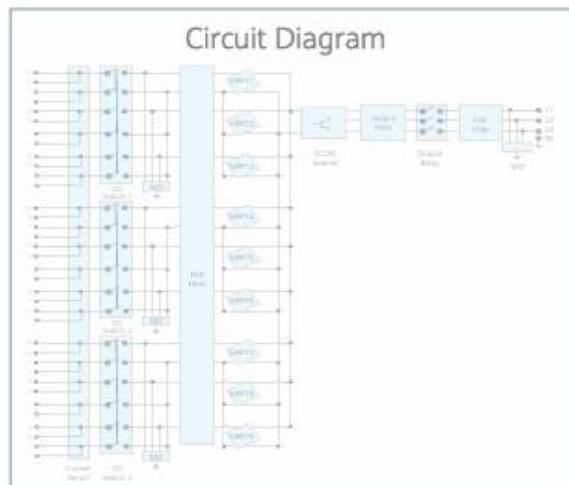
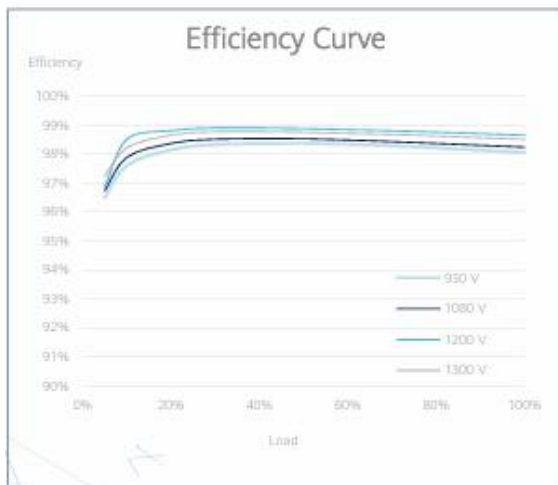
  
Smart I-V Curve  
Diagnosis Supported

  
MBUS  
Supported

  
Fuse Free  
Design

  
Surge Arresters for  
DC & AC

  
IP66  
Protection



SUN2000-215KTL-H0  
**Technical Specifications**

Efficiency	
Max. Efficiency	99.00%
European Efficiency	98.80%
Input	
Max. Input Voltage	1,500 V
Max. Current per MPPT	30 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	50 A
Start Voltage	550 V
MPPT Operating Voltage Range	500 V ~ 1,500 V
Nominal Input Voltage	1,080 V
Number of Inputs	18
Number of MPP Trackers	9
Output	
Nominal AC Active Power	200,000 W
Max. AC Apparent Power	215,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)	215,000 W
Nominal Output Voltage	800 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current	144.4 A
Max. Output Current	155.2 A
Adjustable Power Factor Range	0.8 LG ... 0.8 LD
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%
Protection	
Input-side Disconnection Device	Yes
Anti-islanding Protection	Yes
AC Overcurrent Protection	Yes
DC Reverse-polarity Protection	Yes
PV-array String Fault Monitoring	Yes
DC Surge Arrester	Type II
AC Surge Arrester	Type II
DC Insulation Resistance Detection	Yes
Residual Current Monitoring Unit	Yes
Communication	
Display	LED Indicators, WLAN + APP
USB	Yes
MBUS	Yes
RS485	Yes
General	
Dimensions (W x H x D)	1,035 x 700 x 365 mm (40.7 x 27.6 x 14.4 inch)
Weight (with mounting plate)	≤86 kg (189.6 lb.)
Operating Temperature Range	-25°C ~ 60°C (-13°F ~ 140°F)
Cooling Method	Smart Air Cooling
Max. Operating Altitude without Derating	4,000 m (13,123 ft.)
Relative Humidity	0 ~ 100%
DC Connector	Staubli MC4 EVO2
AC Connector	Waterproof Connector + OT/DT Terminal
Protection Degree	IP66
Topology	Transformerless

**Figura 26** - Ficha técnica de inversor de configuração de área de vinha e pastagem 2

## Apêndice C – Ficha Técnica do Inversor de Configuração de Área Pastagem 1

SUN2000-250KTL-H1

Inversor String Inteligente



Eficiência Máx.  
≥99.0%



Smart Self-Cleaning Fan



Smart DC Connector  
Temperature Detect



Smart String Level  
Disconnection



28 Detectores de corrente de  
String com alta precisão



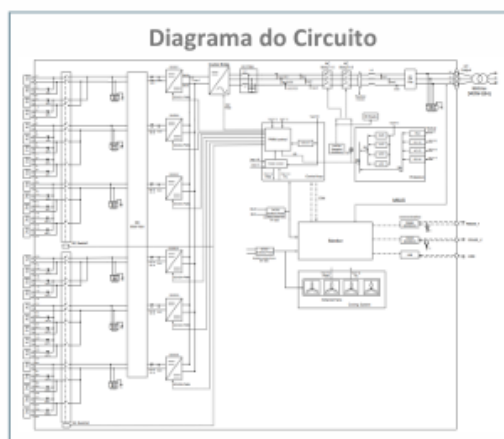
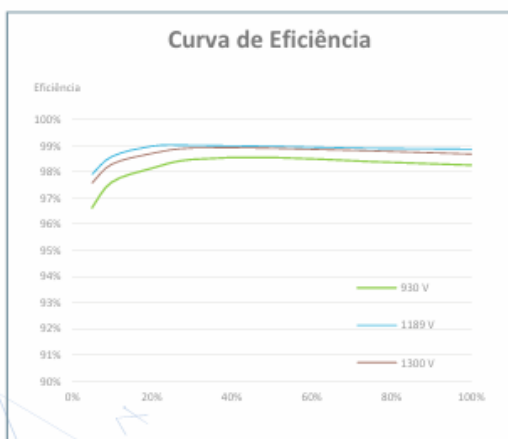
Diagnóstico de  
Curva IV integrado



Proteção IP 66



Dispositivos de proteção  
contra surtos CA e CC



SUN2000-330KTL-H1

## Especificações Técnicas

Eficiência	
Eficiência máx.	≥99,0%
Eficiência Europeia	≥98,8%
Entrada	
Tensão de entrada máxima	1500 V
Quantidade de MPP Trackers	6
Corrente máxima por MPPT	65 A
Corrente de curto circuito máxima por MPPT	115 A
Quantidade máxima de entradas por MPPT	4/5/5/4/5/5
Tensão de partida	550 V
Intervalo de operação da tensão do MPPT	500 V ~ 1500 V
Tensão de entrada nominal	1080 V
Saída	
Potência ativa CA nominal	250 kW
Potência aparente CA máxima	275 kVA
Potência ativa CA máxima (cosφ=1)	275 kW
Tensão de saída nominal	800 V, 3L + PE
Frequência	50 Hz / 60 Hz
Corrente de saída nominal	180,5 A
Corrente de saída máxima	198,5 A
Intervalo de ajuste do Fator de Potência	0,8 adiantado ... 0,8 atrasado
Distorção Máxima Harmônica Total	< 1%
Proteção	
Smart String-Level Disconnectors(SSLD)	Sim
Proteção Anti-ilhamento	Sim
Proteção contra sobrecorrente CA	Sim
Proteção contra polaridade reversa CC	Sim
Monitoramento de falhas na String	Sim
Dispositivo de proteção contra surtos (DPS) CC	Classe II
Dispositivo de proteção contra surtos (DPS) CA	Classe II
Monitoramento da resistência de isolamento CC	Sim
Proteção contra falhas no aterramento CA	Sim
Monitoramento de corrente residual	Sim
Comunicação	
Display	Indicadores LED , WLAN + APP
USB	Sim
MBUS	Sim
RS485	Sim
Geral	
Dimensões (L x A x P)	1048 x 753 x 395 mm
Peso (com suporte de fixação)	≤112 kg
Temperatura de operação	-30 °C ~ 60 °C
Método de resfriamento	Resfriamento inteligente
Altitude máxima sem derating	4000 m (13123 ft.)
Umidade relativa	0 ~ 100%
Conector CA	Conector à prova d'água + terminais OT/DT
Grau de proteção	IP 66
Topologia	Sem transformador

Figura 27 - Ficha técnica de inversor de configuração de área pastagem 1

## Apêndice D – Dados PVsyst Simulação – Vinha Sistema Agrivoltaico



Project: VINHA

Variant: New simulation variant

**PVsyst V8.0.12**

VC0, Simulation date:  
12/06/25 09:31  
with V8.0.12

**Project summary**

Geographical Site	Situation		Project settings	
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA(ESA), CASTELO BRANCO	CASTELO BRANCO	39.83 °(N)	Albedo	0.20
Portugal	Longitude	-7.46 °(W)		
	Altitude	0 m		
	Time zone	UTC		

**Weather data**

ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA(ESA), CASTELO BRANCO  
Meteonorm 8.2 (2001-2020), Sat=100% - Synthetic

**System summary**

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings		
<b>Orientation #1</b>	<b>Near Shadings</b>		<b>User's needs</b>
Fixed plane	no Shadings		Unlimited load (grid)
Tilt/Azimuth	35 / 0 °		
<b>System information</b>			
<b>PV Array</b>		<b>Inverters</b>	
Nb. of modules	407 units	Nb. of units	2.5 units
Pnom total	236 kWp	Total power	200 kWac
		Pnom ratio	1.18

**Results summary**

Produced Energy	418.82 MWh/year	Specific production	1774 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	86.49 %
-----------------	-----------------	---------------------	-------------------	----------------	---------

**Table of contents**

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6
Cost of the system	7
CO <sub>2</sub> Emission Balance	8



## Project: VINHA

Variant: New simulation variant

## PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:  
12/06/25 09:31  
with V8.0.12

## Main results

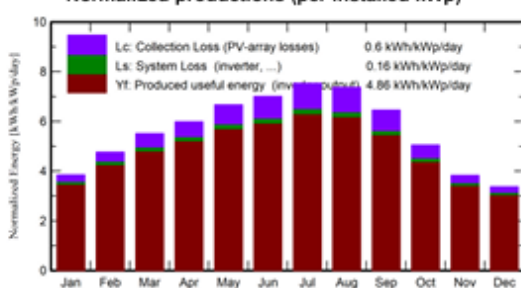
## System Production

Produced Energy 418.82 MWh/year Specific production 1774 kWh/kWp/year  
Perf. Ratio PR 86.49 %

## Economic evaluation

**Investment**  
Global 60,643.00 EUR Yearly cost Annuities 0.00 EUR/yr LCOE Energy cost 0.01 EUR/kWh  
Specific 0.26 EUR/Wp Run. costs 0.00 EUR/yr  
Payback period Unprofitable

## Normalized productions (per installed kWp)



## Performance Ratio PR



## Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	67.7	25.48	9.43	119.2	117.5	26.33	25.47	0.905
February	88.7	33.42	10.17	133.4	131.5	29.16	28.22	0.896
March	134.7	50.01	12.59	170.7	167.6	36.44	35.26	0.875
April	165.5	70.75	14.00	179.6	175.7	38.25	37.01	0.873
May	213.3	69.99	16.93	206.7	201.8	43.22	41.81	0.857
June	228.3	67.67	19.69	210.0	204.6	43.50	42.07	0.849
July	248.2	53.15	21.37	233.7	228.0	47.73	46.18	0.837
August	218.0	52.49	21.95	228.4	223.6	46.77	45.29	0.840
September	157.8	43.23	19.99	193.6	190.0	39.98	38.70	0.847
October	111.6	41.39	17.23	156.6	154.1	33.22	32.14	0.870
November	70.5	31.41	12.25	114.8	113.1	25.14	24.31	0.897
December	58.6	26.77	10.24	104.6	103.1	23.13	22.36	0.905
Year	1763.0	565.76	15.52	2051.3	2010.7	432.86	418.82	0.865

## Legends

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

Figura 28 - Dados de simulação de PVsist na área de vinha – sistema agrivoltaico

## Apêndice E – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 1 Sistema Agrivoltaico



Project: PASTAGEM-ESTRUTURA FIXA ELEVADA

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:  
12/06/25 10:29  
with V8.0.12

Project summary			
<b>Geographical Site</b>		<b>Situation</b>	<b>Project settings</b>
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA		Latitude	Albedo
Portugal		39.82 *(N)	0.20
		Longitude	
		-7.46 *(W)	
		Altitude	
		0 m	
		Time zone	
		UTC	
<b>Weather data</b>			
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA			
Meteonorm 8.2 (2001-2020), Sat=100% - Synthetic			

System summary			
<b>Grid-Connected System</b>		<b>No 3D scene defined, no shadings</b>	
<b>Orientation #1</b>		<b>Near Shadings</b>	
<b>Fixed plane</b>		no Shadings	
Tilt/Azimuth		<b>User's needs</b>	
35 / 0 °		Unlimited load (grid)	
<b>System information</b>			
<b>PV Array</b>		<b>Inverters</b>	
Nb. of modules	496 units	Nb. of units	2.5 units
Pnom total	288 kWp	Total power	250 kWac
		Pnom ratio	1.15

Results summary					
Produced Energy	519.96 MWh/year	Specific production	1807 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	88.11 %

Table of contents	
Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6

PVsyst TRIAL



## Project: PASTAGEM-ESTRUTURA FIXA ELEVADA

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

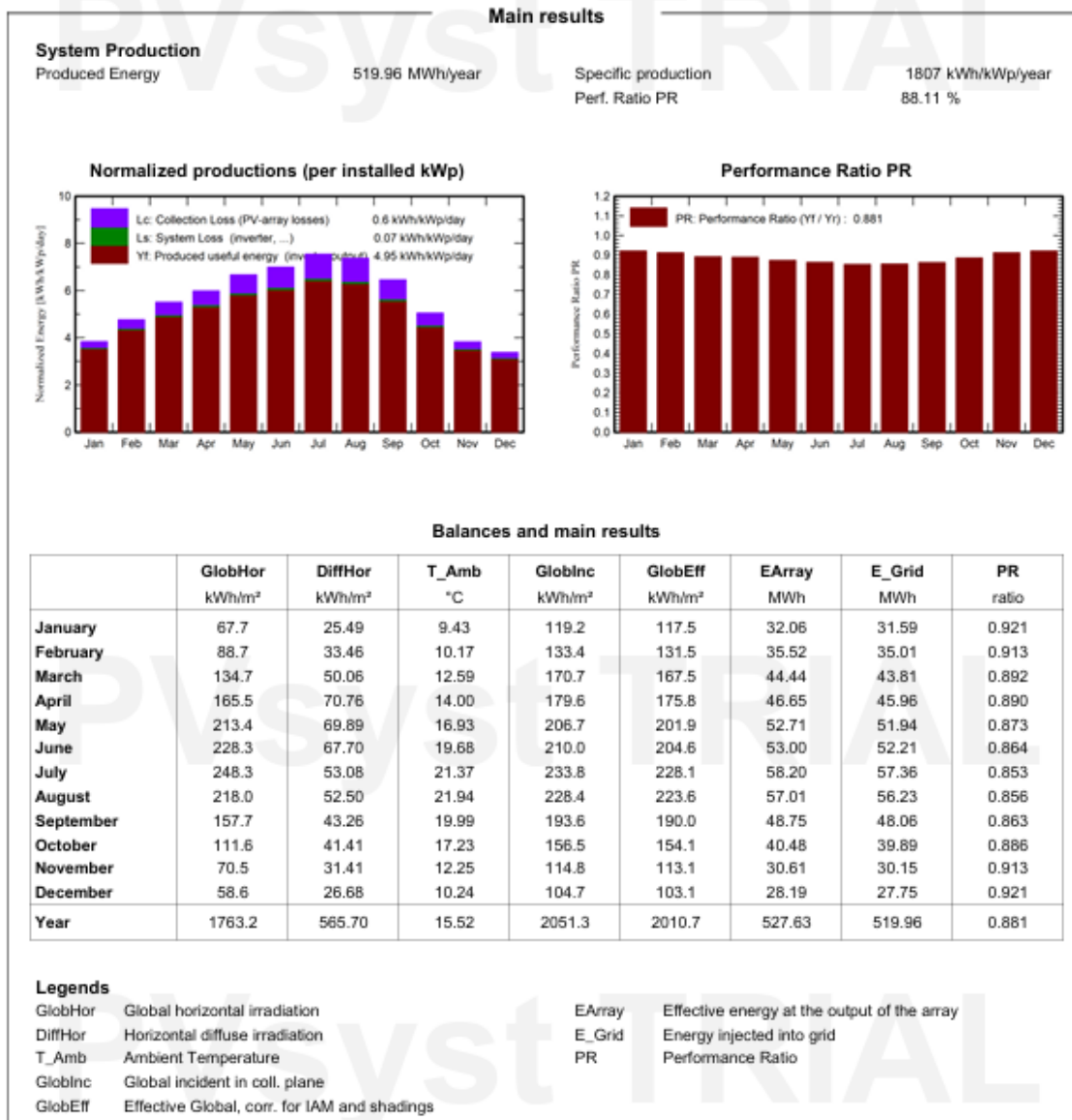
VCO, Simulation date:  
12/06/25 10:29  
with V8.0.12

Figura 29 - Dados de simulação de PVsist na área de pastagem 1 – sistema agrivoltaico

## Apêndice F – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 2 Sistema Agrivoltaico



Project: PASTAGEM-ESTRUTURA COM PAREDE VERTICAL

Variant: New simulation variant

**PVsyst V8.0.12**

VC0, Simulation date:  
12/06/25 10:01  
with V8.0.12

Project summary			
<b>Geographical Site</b>		<b>Situation</b>	
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA		Latitude	39.82 *(N)
Portugal		Longitude	-7.46 *(W)
		Altitude	0 m
		Time zone	UTC
		<b>Project settings</b>	
		Albedo	0.20
<b>Weather data</b>			
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA			
Meteonorm 8.2 (2001-2020), Sat=100% - Synthetic			

System summary			
<b>Grid-Connected System</b>		<b>No 3D scene defined, no shadings</b>	
<b>Orientation #1</b>		<b>Near Shadings</b>	
Fixed plane		no Shadings	
Tilt/Azimuth		90 / 0 *	
		<b>User's needs</b>	
		Unlimited load (grid)	
<b>System information</b>			
<b>PV Array</b>			
Nb. of modules	360 units	<b>Inverters</b>	
Pnom total	209 kWp	Nb. of units	0.7 unit
		Total power	200 kWac
		Pnom ratio	1.04

Results summary					
Produced Energy	243.00 MWh/year	Specific production	1164 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	86.80 %

Table of contents	
Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6



Project: PASTAGEM-ESTRUTURA COM PAREDE VERTICAL

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

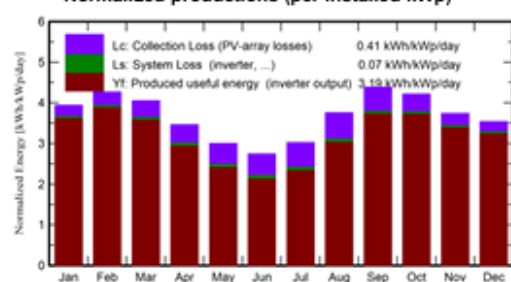
VC0, Simulation date:  
12/06/25 10:01  
with V8.0.12

Main results

System Production

Produced Energy 243.00 MWh/year Specific production 1164 kWh/kWp/year  
Perf. Ratio PR 86.80 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	67.7	25.49	9.43	122.3	120.9	23.93	23.56	0.923
February	88.7	33.46	10.17	119.4	117.1	23.20	22.85	0.916
March	134.7	50.06	12.59	125.6	120.2	23.78	23.34	0.890
April	165.5	70.76	14.00	103.9	96.3	19.05	18.56	0.855
May	213.4	69.89	16.93	93.0	82.9	16.30	15.77	0.812
June	228.3	67.70	19.68	82.4	72.3	14.06	13.49	0.784
July	248.3	53.08	21.37	93.8	82.0	15.85	15.30	0.782
August	218.0	52.50	21.94	116.4	105.6	20.34	19.82	0.816
September	157.7	43.26	19.99	131.7	124.3	23.97	23.53	0.856
October	111.6	41.41	17.23	130.6	127.2	24.66	24.24	0.889
November	70.5	31.41	12.25	112.1	110.5	21.75	21.40	0.914
December	58.6	26.68	10.24	109.6	108.5	21.47	21.12	0.922
Year	1763.2	565.70	15.52	1340.8	1267.7	248.35	243.00	0.868

Legends

- GlobHor Global horizontal irradiation
- DiffHor Horizontal diffuse irradiation
- T\_Amb Ambient Temperature
- GlobInc Global incident in coll. plane
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArray Effective energy at the output of the array
- E\_Grid Energy injected into grid
- PR Performance Ratio

Figura 30 - Dados de simulação de PVsist na área de pastagem 2 – sistema agrivoltaico

## Apêndice G – Dados PVsyst-Simulação – Vinha Sistema Convencional



Project: VINHA

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:  
12/06/25 09:35  
with V8.0.12

### Project summary

Geographical Site	Situation	Project settings
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA(ESA), CASTELO BRANCO Portugal	39.83 °(N) Longitude -7.46 °(W) Altitude 0 m Time zone UTC	Albedo 0.20

#### Weather data

ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA(ESA), CASTELO BRANCO  
Meteonorm 8.2 (2001-2020), Sat=100% - Synthetic

### System summary

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	User's needs
<b>Orientation #1</b> <b>Fixed plane</b> Tilt/Azimuth 35 / 0 °	<b>Near Shadings</b> no Shadings	Unlimited load (grid)
<b>System information</b> <b>PV Array</b>	<b>Inverters</b>	
Nb. of modules 580 units	Nb. of units 3.5 units	
Pnom total 336 kWp	Total power 280 kWac	
	Pnom ratio 1.20	

### Results summary

Produced Energy	596.50 MWh/year	Specific production	1773 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	86.44 %
-----------------	-----------------	---------------------	-------------------	----------------	---------

### Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6
Cost of the system	7
CO <sub>2</sub> Emission Balance	8



Project: VINHA

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:  
12/06/25 09:35  
with V8.0.12

Main results

System Production

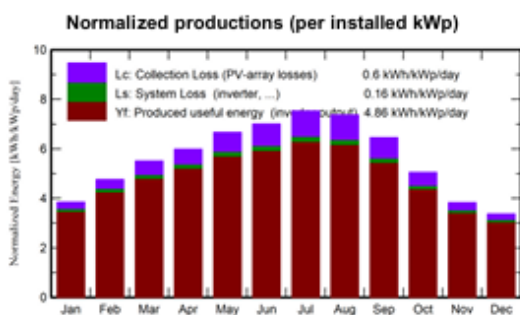
Produced Energy 596.50 MWh/year Specific production 1773 kWh/kWp/year  
Perf. Ratio PR 86.44 %

Economic evaluation

**Investment**  
Global 86,420.00 EUR  
Specific 0.26 EUR/Wp

**Yearly cost**  
Annuities 0.00 EUR/yr  
Run. costs 0.00 EUR/yr  
Payback period Unprofitable

**LCOE**  
Energy cost 0.01 EUR/kWh



Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	67.7	25.48	9.43	119.2	117.5	37.50	36.29	0.905
February	88.7	33.42	10.17	133.4	131.5	41.54	40.21	0.896
March	134.7	50.01	12.59	170.7	167.6	51.87	50.20	0.874
April	165.5	70.75	14.00	179.6	175.7	54.49	52.72	0.873
May	213.3	69.99	16.93	206.7	201.8	61.55	59.55	0.857
June	228.3	67.67	19.69	210.0	204.6	61.96	59.92	0.848
July	248.2	53.15	21.37	233.7	228.0	67.97	65.77	0.837
August	218.0	52.49	21.95	228.4	223.6	66.61	64.51	0.840
September	157.8	43.23	19.99	193.6	190.0	56.90	55.08	0.846
October	111.6	41.39	17.23	156.6	154.1	47.30	45.78	0.869
November	70.5	31.41	12.25	114.8	113.1	35.81	34.63	0.896
December	58.6	26.77	10.24	104.6	103.1	32.95	31.86	0.905
Year	1763.0	565.76	15.52	2051.3	2010.7	616.46	596.50	0.864

Legends

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

Figura 31 - Dados de simulação de PVsist na área de vinha – sistema convencional

## Apêndice H – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 1 Sistema Convencional



Project: PASTAGEM-ESTRUTURA FIXA ELEVADA

Variant: New simulation variant

### PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:  
12/06/25 09:51  
with V8.0.12

#### Project summary

##### Geographical Site

ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA

Portugal

##### Situation

Latitude 39.82 °(N)

Longitude -7.46 °(W)

Altitude 0 m

Time zone UTC

##### Project settings

Albedo 0.20

##### Weather data

ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA

Meteonorm 8.2 (2001-2020), Sat=100% - Synthetic

#### System summary

##### Grid-Connected System

No 3D scene defined, no shadings

##### Orientation #1

Fixed plane

Tilt/Azimuth 35 / 0 °

##### Near Shadings

no Shadings

##### User's needs

Unlimited load (grid)

##### System information

###### PV Array

Nb. of modules

990 units

Pnom total

574 kWp

###### Inverters

Nb. of units

5 units

Total power

450 kWac

Pnom ratio

1.28

#### Results summary

Produced Energy 1018.9 MWh/year Specific production 1775 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 86.51 %

#### Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6



Project: PASTAGEM-ESTRUTURA FIXA ELEVADA

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:  
12/06/25 09:51  
with V8.0.12

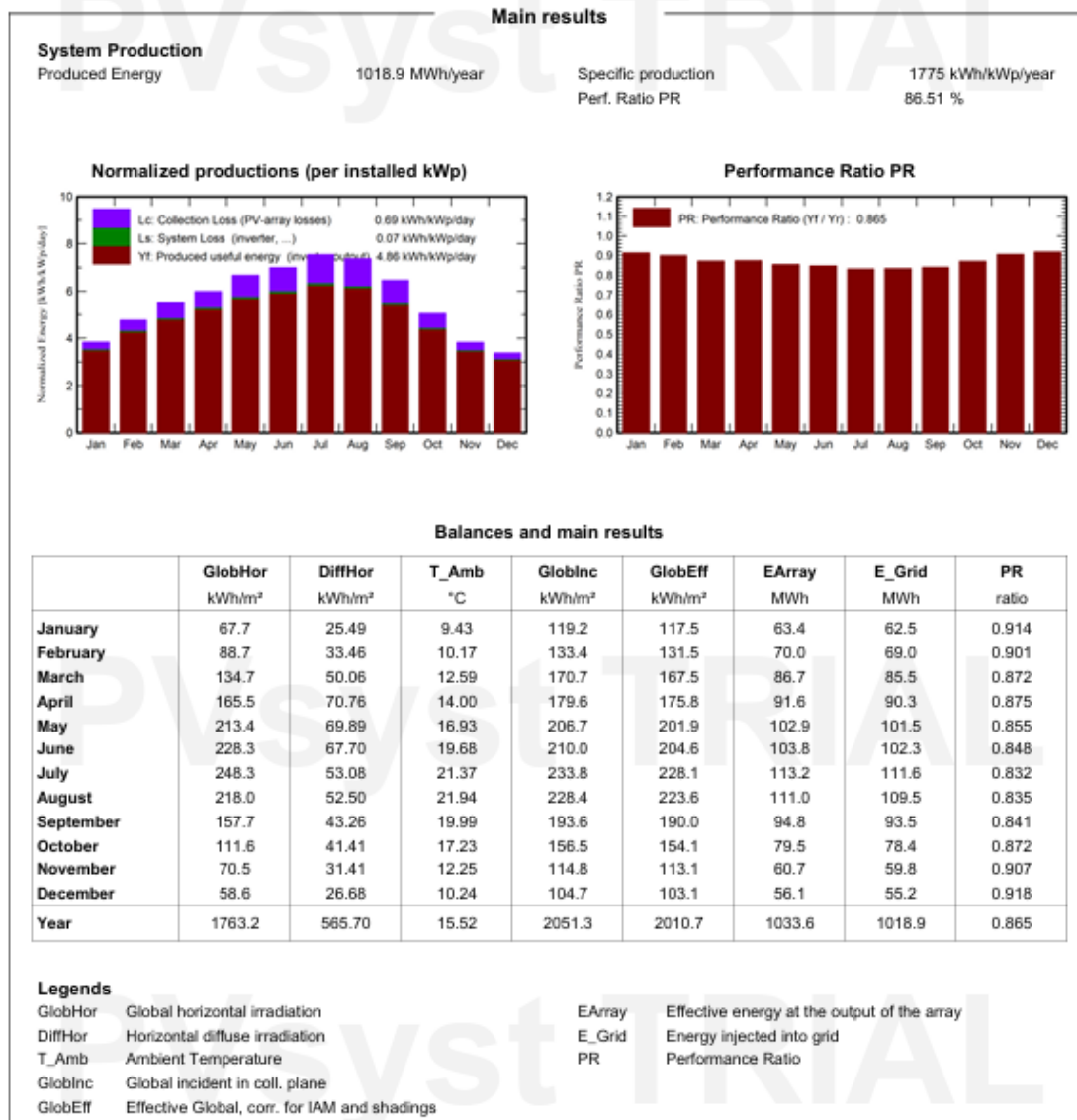


Figura 32 - Dados de simulação de PVsist na área de pastagem 1 – sistema convencional

## Apêndice I – Dados PVsyst-Simulação – Pastagem 2 Sistema Convencional



Project: PASTAGEM-ESTRUTURA COM PAREDE VERTICAL

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:  
12/06/25 10:11  
with V8.0.12

Project summary				
<b>Geographical Site</b>	<b>Situation</b>		<b>Project settings</b>	
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA	Latitude	39.82 *(N)	Albedo	0.20
Portugal	Longitude	-7.46 *(W)		
	Altitude	0 m		
	Time zone	UTC		
<b>Weather data</b>				
ESCOLA SUPERIOR DE AGRARIA				
Meteonorm 8.2 (2001-2020), Sat=100% - Synthetic				

System summary			
<b>Grid-Connected System</b>	<b>No 3D scene defined, no shadings</b>		
<b>Orientation #1</b>	<b>Near Shadings</b>	<b>User's needs</b>	
Fixed plane	no Shadings	Unlimited load (grid)	
Tilt/Azimuth	90 / 0 °		
<b>System information</b>			
<b>PV Array</b>		<b>Inverters</b>	
Nb. of modules	580 units	Nb. of units	3.5 units
Pnom total	336 kWp	Total power	280 kWac
		Pnom ratio	1.20

Results summary					
Produced Energy	385.91 MWh/year	Specific production	1147 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	85.56 %

Table of contents	
Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Pref. graphs	6



## Project: PASTAGEM-ESTRUTURA COM PAREDE VERTICAL

Variant: New simulation variant

PVsyst V8.0.12

VC0, Simulation date:

12/06/25 10:11

with V8.0.12

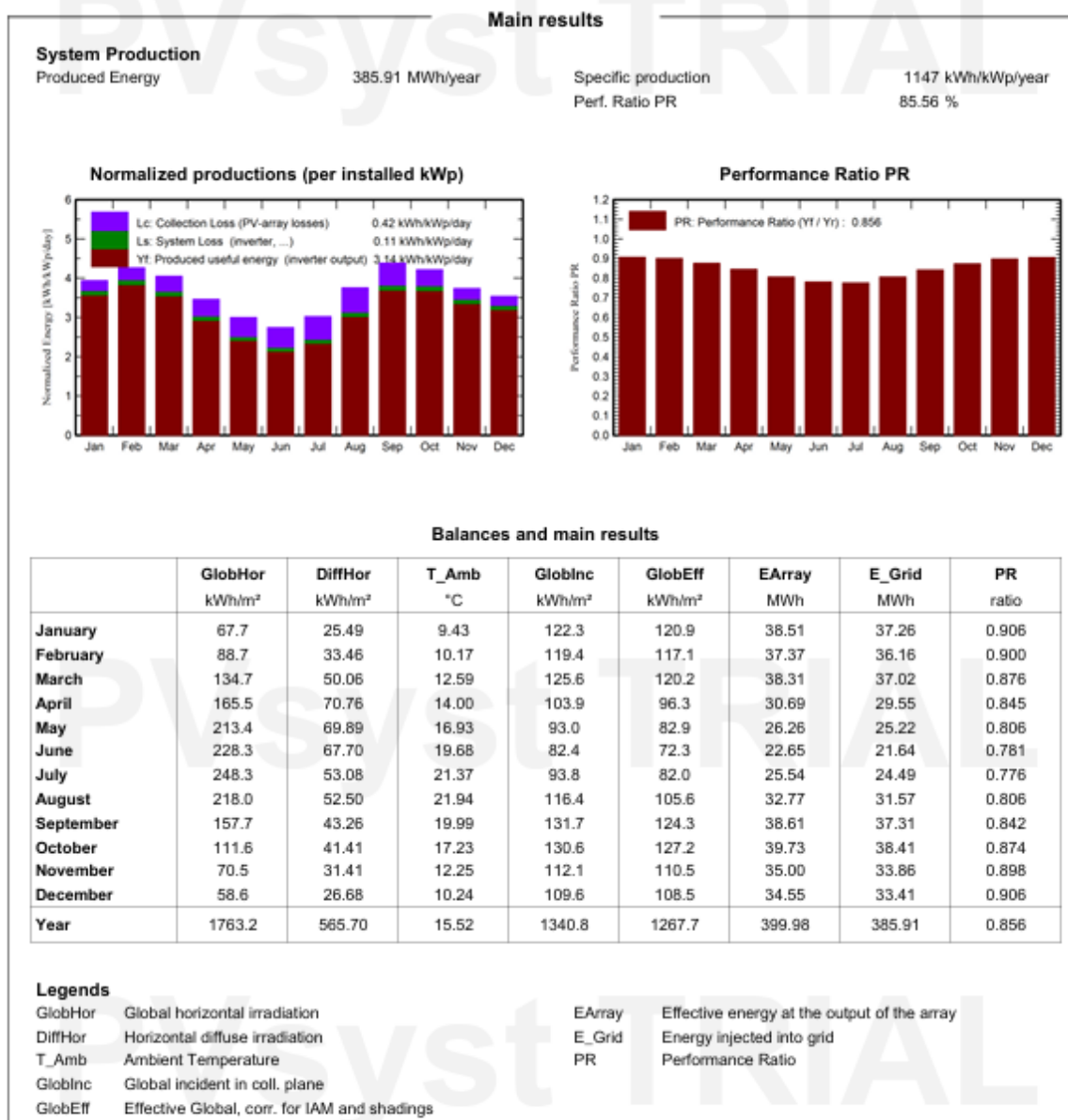


Figura 33 - Dados de simulação de PVsyst na área de pastagem 2 – sistema convencional