FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Dimensionamento de Centrais Fotovoltaicas, para Projetos de Comunidades de Energia Renovável

Pedro Manuel Rocha e Castro Lopes da Costa

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira

17 de julho de 2023

© Pedro Costa, 2023

Resumo

A presente dissertação foi realizada em ambiente empresarial, na **Ecoinside**, e teve como finalidade o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de centrais fotovoltaicas, para projetos de Comunidades de Energia Renovável (CER).

Nos últimos anos, o sistema elétrico tem sofrido transformações significativas devido ao crescimento do consumo global de energia elétrica e à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa. Tal como os países mais desenvolvidos do mundo, Portugal tem feito esforços para rumar até à neutralidade carbónica e, de forma a atingir este objetivo, a tecnologia fotovoltaica apresenta-se como um recurso fundamental.

A **Ecoinside** tem ao seu dispor uma ferramenta em *Visual Basic for Applications* (VBA) para o dimensionamento de centrais fotovoltaicas e, de modo a otimizar o seu funcionamento, foram efetuadas algumas alterações relacionadas com o cálculo de dados financeiros e com a apresentação da simulação. Para trabalhar em paralelo, foi desenvolvida outra ferramenta (também em VBA) cujo objetivo é apresentar dados financeiros que permitam à **Ecoinside** analisar a viabilidade económica de um projeto associado a uma CER.

Através da ferramenta da **Ecoinside** e de outros *softwares* técnicos foi dimensionada uma central fotovoltaica para o caso de estudo de uma CER, que permitiu aprofundar o conhecimento relacionado com o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos.

Abstract

The present dissertation was executed in an enterprise environment, at **Ecoinside**, to develop a support tool for dimensioning photovoltaic power plants for Renewable Energy Communities (REC) projects.

In recent years, the electrical system has undergone significant transformations due to the increasing global consumption of electricity and the need to reduce greenhouse gas emissions. Just like the most developed countries in the world, Portugal has been making efforts to move towards carbon neutrality, and photovoltaic technology plays a crucial role in achieving this objective.

Ecoinside has at its disposal a tool in Visual Basic for Applications (VBA) for dimensioning photovoltaic power plants and, to optimize its operation, some changes were made related to the calculation of financial data and the presentation of the simulation. Additionally, another tool (also in VBA) was developed to work concurrently to provide financial data that allows **Ecoinside** to analyze the economic feasibility of a project associated with a REC.

Through the use of the **Ecoinside** tool and other technical software, a photovoltaic power plant was sized for the case study of a REC, which allowed for a deeper knowledge of how photovoltaic systems work.

Agradecimentos

À minha família, a quem dedico este trabalho, pelo amor que têm por mim e pelos valores que me incutiram. Em particular aos meus pais, por sempre acreditarem que seria capaz de alcançar este objetivo, especialmente nos momentos mais difíceis.

À minha namorada, que me acompanhou em todo o percurso, pela paciência, cumplicidade e pelos constantes incentivos e motivações. Sem ela, tudo seria mais difícil.

Aos meus amigos, a todos que trago desde a infância e aqueles que tive o prazer de conhecer durante o meu percurso académico, por todas as experiências partilhadas, por todas as aprendizagens e pela amizade que tenho com cada um.

A todos os colaboradores da Ecoinside, que desde o início me receberam como um membro integrante de trabalho, em especial, ao Eng. Sérgio Cerdeira e à equipa de engenharia, pela partilha de conhecimento e pelo apoio prestado ao longo da realização deste trabalho.

Gostaria de expressar a minha gratidão ao Professor Doutor José Rui Ferreira por ter aceitado orientar esta dissertação, por todo o apoio e pela imensa disponibilidade demonstrada.

Por fim, agradecer a todos aqueles que fizeram parte do meu percurso de aprendizagem e que contribuíram para a minha formação, desde o 1º ciclo até ao ensino superior.

A todos o meu muito obrigado!

Pedro Costa

"Recomeça...
Se puderes
Sem angústia
E sem pressa.
E os passos que deres,
Nesse caminho duro
Do futuro
Dá-os em liberdade.
Enquanto não alcances
Não descanses.
De nenhum fruto queiras só metade."

Miguel Torga

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 Enquadramento e Motivação . . . 1
  - 1.1.1 Contexto Internacional . . . 1
  - 1.1.2 Contexto europeu . . . 2
  - 1.1.3 Contexto português . . . 4
  - 1.1.4 Contexto Atual de Produção Fotovoltaica . . . 4
- 1.2 Desafios . . . 7
- 1.3 Objetivos . . . 8
- 1.4 Contextualização . . . 8
- 1.5 Estrutura da Dissertação . . . 8

2 Revisão Bibliográfica **11**
- 2.1 Energia Solar Fotovoltaica . . . 11
  - 2.1.1 Produção de Energia Elétrica . . . 11
  - 2.1.2 Principais Componentes de uma Central Fotovoltaica . . . 13
  - 2.1.3 Grandezas Características do Módulo Fotovoltaico . . . 15
  - 2.1.4 Variação na Energia Produzida . . . 16
  - 2.1.5 Tecnologias Fotovoltaicas . . . 19
  - 2.1.6 Instalações Fotovoltaicas . . . 24
- 2.2 Autoconsumo e Comunidades de Energia Renovável . . . 25
  - 2.2.1 Autoconsumo . . . 25
  - 2.2.2 Comunidades de Energia Renovável . . . 26
  - 2.2.3 Enquadramento Legal a Nível europeu . . . 27
  - 2.2.4 Enquadramento Legal em Portugal . . . 27
- 2.3 Conclusões . . . 28

3 Otimização e Desenvolvimento de *Software* **29**
- 3.1 Funcionamento da Ferramenta da Ecoinside . . . 29
  - 3.1.1 Introdução de Dados . . . 30
  - 3.1.2 Processo Iterativo . . . 31
- 3.2 Atualizações na Ferramenta da Ecoinside . . . 32
  - 3.2.1 Formato de Vendas . . . 32
  - 3.2.2 Atualização Automática do Orçamento . . . 33
  - 3.2.3 Inclusão das Folhas de Financiamento Externo . . . 36
- 3.3 Desenvolvimento da Ferramenta para Análise de Consumos . . . 37
- 3.4 Desenvolvimento da Ferramenta para CER . . . 40
  - 3.4.1 Introdução de Dados . . . 41
  - 3.4.2 Cálculos Iniciais . . . 46

3.4.3 Cálculos Intermédios 48
3.4.4 Resultados 50

4 Casos de Estudo **53**
4.1 Comparação de Resultados da Ferramenta CER 53
4.1.1 Introdução de Dados 53
4.1.2 Resultados 54
4.2 Dimensionamento de uma Central Fotovoltaica 55
4.2.1 Recolha de Informação 56
4.2.2 Processo de Dimensionamento 57

5 Visitas Técnicas **61**
5.1 Visita a um *Carport* Solar 61
5.2 Visita à Futura Instalação da CER 64

6 Conclusões e Trabalho Futuro **67**
6.1 Conclusões 67
6.2 Trabalho Futuro 68

A Relatório Técnico PVsyst **69**

B Fichas Técnicas utilizadas no Caso de Estudo **79**

Referências **87**

Lista de Figuras

1.1 Potência instalada a nível mundial de tecnologias de energia renovável (em 2021) 5
1.2 Perspetivas mundiais de produção de energia elétrica 5
1.3 Mapa europeu de radiância solar 6
1.4 Potência de tecnologias renováveis instalada em Portugal 6
1.5 Avaliação de estabilidade num estudo do código na rede da Madeira 7

2.1 Produção de eletricidade numa célula fotovoltaica 12
2.2 Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica 12
2.3 Elucidação dos vários conceitos 13
2.4 Grandezas características do módulo fotovoltaico 15
2.5 Curva tensão-corrente de 60 células monocristalinas de 6 polegadas classificadas em 300W em condições STC 17
2.6 Curva tensão-corrente de 60 células monocristalinas de 6 polegadas classificadas em 300W em condições STC 17
2.7 Sobreaquecimento localizado num módulo fotovoltaico 18
2.8 Implementação de um díodo *by-pass* 18
2.9 Módulo de silício monocristalino (esquerda) e módulo de silício policristalino (direita) 19
2.10 Evolução da utilização de diferentes tipos de junção. 20
2.11 Operação de módulos PV bifaciais. 20
2.12 Funcionamento da tecnologia DSSC 22
2.13 Esquemático da tecnologia OSC 22
2.14 Esquemático da tecnologia QDSC 23
2.15 Exemplo de um painel CPV 24
2.16 Exemplo de dois ACI 25
2.17 Exemplo de ACC 26

3.1 Exemplo da tabela com valores financeiros 33
3.2 Introdução valor de orçamento 34
3.3 Introdução valor de O&M 34
3.4 Introdução número de anos oferta O&M 34
3.5 Introdução número de anos com restrição de venda à rede 34
3.6 Exemplo de apresentação dos resultados 35
3.7 Exemplo de página de financiamento externo 36
3.8 Formulário inicial da ferramenta 37
3.9 Formulário com os diagramas de carga de todos os meses 38
3.10 Primeira mensagem apresentada ao utilizador 38
3.11 Segunda mensagem apresentada ao utilizador 39

3.12 Mensagem com o número de células sem valor . . . 39
3.13 Mensagem com o número de células com valor nulo . . . 39
3.14 Consumo mensal de energia (kWh) . . . 40
3.15 Consumo anual de energia (kWh) . . . 40
3.16 Página principal da ferramenta . . . 41
3.17 Formulário inicial . . . 42
3.18 Formulário coeficientes dinâmicos . . . 42
3.19 Formulário coeficientes estáticos . . . 42
3.20 Exemplo valores de energia consumida (kWh) . . . 43
3.21 Exemplo de preenchimento dos dados referentes às tarifas . . . 44
3.22 Célula com ciclos de contagem . . . 44
3.23 Quadro com a tipologia de ciclos de contagem para efeitos de definição dos períodos horários . . . 44
3.24 Quadro do ciclo diário para BTE e BTN em Portugal continental em 2023 . . . 45
3.25 Exemplo da sincronização dos períodos horários, para Portugal Continental . . . 45
3.26 Exemplo das colunas relativas aos cálculos energéticos . . . 46
3.27 Exemplo da tabela dos coeficientes dinâmicos . . . 47
3.28 Exemplo da tabela dos coeficientes estáticos . . . 47
3.29 Exemplo de sincronização das tarifas . . . 48
3.30 Exemplo de preços da energia sem instalação da UPAC . . . 49
3.31 Exemplo de valores de energia consumida, proveniente da UPAC . . . 49
3.32 Exemplo de valores de poupança . . . 50
3.33 Exemplo dos resultados obtidos . . . 50

4.1 Preenchimento dos dados referentes às tarifas . . . 54
4.2 Resultados da simulação com coeficientes dinâmicos . . . 55
4.3 Resultados da simulação com coeficientes estáticos . . . 55
4.4 Distribuição de equipamentos na cobertura . . . 58

5.1 Painéis fotovoltaicos . . . 61
5.2 Inversor . . . 62
5.3 Radiómetro . . . 62
5.4 Sensor de vento . . . 62
5.5 Quadro elétrico . . . 63
5.6 Quadro de monitorização . . . 63
5.7 Gráfico diário . . . 63
5.8 Gráfico anual . . . 64
5.9 Cobertura do edifício . . . 64
5.10 Cobertura do edifício com platibanda . . . 65
5.11 Obstáculo na cobertura . . . 65
5.12 Obstáculos na cobertura . . . 65
5.13 Contador e quadro elétrico . . . 66

A.1 Relatório técnico do caso de estudo . . . 70

B.1 Ficha técnica do painel fotovoltaico escolhido . . . 80
B.2 Ficha técnica do inversor fotovoltaico escolhido (125 kW) . . . 82
B.3 Ficha técnica do inversor fotovoltaico escolhido (30 kW) . . . 84

Lista de Tabelas

2.1 Condições de acesso por potência instalada 28

3.1 Dados inseridos pelo utilizador 31

4.1 Dados introduzidos na simulação 57

Abreviaturas e Símbolos

AC	*Alternating Current* - Corrente Alternada
ACC	Autoconsumo Coletivo
ACI	Autoconsumo Individual
AM	*Air mass* - Massa de ar
a-Si	Silício Amorfo
AT	Alta Tensão
BTE	Baixa Tensão Especial
BTN	Baixa Tensão Normal
CdTe	Telureto de Cádmio
CE	Comissão Euroeia
CER	Comunidade de Energia Renovável
CIGS	Seleneto de Cobre, Índio e Gálio
COP	Conference Of the Parties - Conferência das Partes
CPE	Código Ponte de Entrega
CPV	*Concentrator Photovoltaics* - Sistema de Concentração Fotovoltaica
CQNUAC	Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
DC	*Direct Current* - Corrente Contínua
DSSC	*Dye-Sensitized Solar Cell* - Célula Solar Sensibilizada por Corante
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
GaAs	Arsenieto de Gálio
GEE	Gases Efeito de Estufa
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
IEC	*International Electrotechnical Commission* - Comissão Electrotécnica Internacional
IHG	Irradiância Horizontal Global
IU	Instalação de Utilização
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
MAT	Muito Alta Tensão
MIBEL	Mercado Ibérico de Eletricidade
MPP	*Maximum Power Point* - Ponto de potência máxima
MRR	Mecanismo de Recuperação e Resiliência
MT	Média Tensão
MW	Megawatt
O&M	Operação e Manutenção
OSC	*Organic Solar Cell* - Célula Solar Orgânica
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima

PSC	*Perovskite Solar Cell* - Célula Solar de Perovskita
PV	*Photovoltaic* - Energia Fotovoltaica
PVGIS	*Photovoltaic Geographical Information System* - Sistema de Informação Geográfica Fotovoltaico
PWM	*Pulse Width Modulation* - Modulação por Largura de Pulso
QDSC	*Quantum Dot Solar Cell* - Célula Solar de Ponto Quântico
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público
RNC	Roteiro para Neutralidade Carbónica
SE	Sistema Elétrico
STC	*Standard Test Conditions* - Condições de Teste Padrão
TIR	Taxa Interna de Retorno
UE	União Europeia
UPAC	Unidades para Produção para Autoconsumo
VAL	Valor Atualizado Líquido
VBA	*Visual Basic for Applications*
W	Watt

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

Ao longo dos últimos anos tem sido cada vez mais evidente o crescimento do sistema elétrico (SE) e as suas consequentes alterações. Estes fenómenos podem ser justificados por vários fatores, sendo um dos principais o consumo global de energia elétrica, que nos últimos 40 anos sofreu um aumento de cerca de 400% [1]. Contudo, apesar desta notória evolução, a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis ainda representa uma pequena percentagem da produção global de eletricidade [1]. Efetivamente, a grande percentagem da energia elétrica ainda é proveniente de geração fóssil e, por esse motivo, surgem sérias preocupações a nível ambiental e de sustentabilidade.

Outra das principais razões para as transformações do SE prende-se com a introdução de produção distribuída de energia elétrica, que está fortemente relacionada com a necessidade de reduzir a emissão de gases efeito de estufa (GEE). De facto, ao contrário da produção centralizada de eletricidade (modelo tradicional de produção de eletricidade), as fontes de produção distribuída aproximam a geração de energia dos centros de consumo, o que permite reduzir substancialmente as perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia. Contudo, a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, como painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas ou centrais hídricas, é bastante variável visto que está fortemente dependente das condições climatéricas, sendo esta particularidade problemática, uma vez que poderá haver um excesso de produção nas horas de menor consumo. Para contrariar esta situação, torna-se necessária a adoção de tecnologias de armazenamento e a introdução de produção distribuída.

1.1.1 Contexto Internacional

Tal como referido anteriormente, a urgência do combate às alterações climáticas tem sido um tema preocupante em todo o panorama mundial. Desta forma, vários líderes mundiais têm assumido compromissos ambiciosos na tentativa de alcançar a neutralidade carbónica. Os compromissos mundiais mais importantes foram o Acordo de Paris e o Pacto Climático de Glasgow.

O Acordo de Paris foi assinado em 2015 durante a Conferência do Clima de Paris que é oficialmente conhecida como a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC). Este é o órgão das Nações Unidas responsável pelo clima e cuja sede fica em Bona, Alemanha [2]. Os governos acordaram que o objetivo principal deste acordo era manter o aumento da temperatura média mundial abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e envidar esforços para limitar o aumento a 1.5 °C [3], através da redução de emissões de GEE. Este acordo permitiu ainda estabelecer as bases para a cooperação internacional relativa às questões climáticas.

Em 2021, durante a 26ª Conferência das Partes (COP 26) da CQNUAC realizada em Glasgow, foi discutido o Pacto Climático de Glasgow, sendo este uma continuação do Acordo de Paris. Este pacto surgiu da necessidade de acelerar os esforços globais no combate às alterações climáticas e exige que todos os países signatários estabeleçam metas mais ambiciosas relativas à redução de emissões de GEE até 2030 e que se adotem medidas de modo a alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Entre os principais esforços determinados no Pacto Climático de Glasgow resultaram:

- Limitar o aquecimento global a 1.5 °C, tendo como referência valores pré-industriais;
- Aumentar as metas na redução de emissões de GEE. Vários países como os Estados Unidos, China, países da União Europeia (UE), entre outros, comprometeram-se a alcançar a neutralidade carbónica até 2050;
- Financiamento de 100 mil milhões de dólares para apoiar países em desenvolvimento na redução de emissões de GEE [4]. O Pacto prevê o fornecimento de ajuda financeira e tecnológica aos países em desenvolvimento para que estes se possam adaptar às alterações climáticas e para se promover o desenvolvimento sustentável;
- Parar e reverter o desflorestamento, principalmente nos principais países produtores de alimento [4].

1.1.2 Contexto europeu

A UE tem um papel determinante na transição energética que tem como principal objetivo o combate às alterações climáticas. Como tal, a UE e todos os seus Estados-Membros assinaram e ratificaram tanto o Acordo de Paris, como o Pacto Climático de Glasgow e estão fortemente empenhados na sua aplicação, sendo que o principal foco será a conversão na primeira economia e sociedade com impacto neutro no clima até 2050 [3].

1.1.2.1 *European Green Deal*

A 11 de dezembro de 2019 foi apresentado o Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*), que tem como propósito transformar a UE numa economia moderna, eficiente (na utilização dos recursos) e competitiva, garantindo um conjunto de premissas [5]:

- Terminar com as emissões líquidas de GEE até 2050 [5];

- Crescimento económico dissociado da utilização de recursos [5];
- Preocupação com todas as regiões e com todos os cidadãos.

O Pacto Ecológico Europeu foi também fundamental na sobrevivência à pandemia de COVID-19, visto que cerca de um terço dos 1,8 biliões de euros de investimentos, efetuados a partir do plano de recuperação *NextGenerationEU* e o orçamento da UE a sete anos, foram direcionados para o financiamento do Pacto Ecológico Europeu [5].

1.1.2.2 *Fit to 55*

No dia 14 de julho de 2021, a Comissão Europeia publicou um conjunto de propostas denominadas por "Objetivo 55" (*Fit to 55*), que visam rever e atualizar a legislação da UE e criar iniciativas com o objetivo de assegurar que as políticas da UE estejam em consonância com os objetivos climáticos acordados pelo Conselho Europeu e pelo Parlamento Europeu. Este conjunto de propostas adota o nome de "Objetivo 55", pois é uma referência ao objetivo da UE em reduzir as emissões líquidas de GEE em, pelo menos, 55% até 2030. As propostas de legislação recaem, entre outras, sobre as seguintes matérias [6]:

- Energias renováveis;
- Eficiência energética;
- Infraestruturas para combustíveis alternativos;
- Desempenho energético dos edifícios;
- Tributação de energia.

1.1.2.3 *REPowerEU*

O plano *REPowerEU* surge como resposta às dificuldades e perturbações do mercado mundial de eletricidade suscitadas pela invasão da Ucrânia por parte da Rússia. O *REPowerEU* é o plano da CE cujo objetivo é tornar a Europa independente de combustíveis fósseis russos muito antes de 2030, e tem como base a poupança energética, a produção de energia limpa e a diversificação do aprovisionamento energético [7].

Relativamente à poupança energética, a UE procura alterar os comportamentos de todos os seus cidadãos, empresas e organizações, visto que a poupança energética é a solução mais barata, segura e limpa de se conseguir reduzir a dependência de combustíveis fosseis provenientes da Rússia [7].

Em relação à produção de energia limpa, o plano *REPowerEU* visa aumentar a capacidade de produção de energia elétrica renovável para 1236 GWh até 2030, amplificando um dos objetivos do "Objetivo 55", que seria a implementação de 1067 GW de produção renovável até 2030. Em particular, a UE desenvolveu uma estratégia para a implantação de energia fotovoltaica (PV), cuja

meta será dobrar a capacidade instalada atual até 2025, colocando em funcionamento cerca de 320 GW, aumentando esse valor para 600 GW até 2030 [7].

No que diz respeito à diversificação, a curto prazo, a UE está focada em garantir fontes alternativas de gás, petróleo e carvão, através de outros parceiros internacionais, sendo que, a longo prazo, o foco será assegurar o fornecimento de hidrogénio renovável [7].

Por fim, para suportar o plano *REPowerEU* será necessário o investimento adicional de 210 mil milhões de euros, sendo que o Mecanismo de Recuperação e Resiliência (MRR) ocupa um lugar central na execução do plano. De forma a canalizar-se os investimentos para as prioridades do plano, os Estados-Membros devem acrescentar um capítulo *REPowerEU* aos seus planos de recuperação e resiliência, para que as reformas necessárias sejam efetuadas [7].

1.1.3 Contexto português

Nos últimos anos, Portugal tem vindo a assumir um papel de liderança no combate às alterações climáticas, com a adoção de políticas e medidas que visam a redução das emissões de GEE, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono. Assim, "Portugal foi o primeiro país no mundo a afirmar o compromisso da neutralidade carbónica" [8], alinhado com o Acordo de Paris.

Mais recentemente, a 31 de Dezembro de 2021, a Assembleia da República aprovou a Lei de Bases do Clima que reconhece a emergência climática [9]. Esta lei veio reforçar outros instrumentos anteriores, como o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC) 2050 e o Plano Nacional para a Energia e Clima (PNEC) 2021-2030. Relativamente ao PNEC, este será o principal instrumento de política energética e climática para a década 2021-2030 [10], que tem, entre outras, as seguintes premissas:

- Eficiência energética;
- Aumentar a utilização de energias renováveis;
- Descarbonizar a economia nacional;
- Promover a mobilidade sustentável.

1.1.4 Contexto Atual de Produção Fotovoltaica

A produção de energia elétrica a partir da tecnologia fotovoltaica tem vindo a crescer em todo o mundo ao longo dos últimos anos, resultante de uma combinação de fatores, tais como a crescente preocupação ambiental (a produção fotovoltaica é uma fonte de energia limpa e renovável), a redução dos custos da tecnologia fotovoltaica e a adoção de políticas favoráveis à geração de energia renovável.

A nível mundial, atualmente, a China é a maior produtora de energia fotovoltaica seguida dos Estados Unidos, Japão e Alemanha. Contudo, países como a Índia, França, Espanha e Austrália têm vindo a aumentar significativamente a sua capacidade de produção fotovoltaica. Analisando

a Figura 1.1, é possível verificar que a tecnologia de produção fotovoltaica, em todo o mundo, representa 27.7% de potência instalada que se traduz em cerca de 848 405 MW.

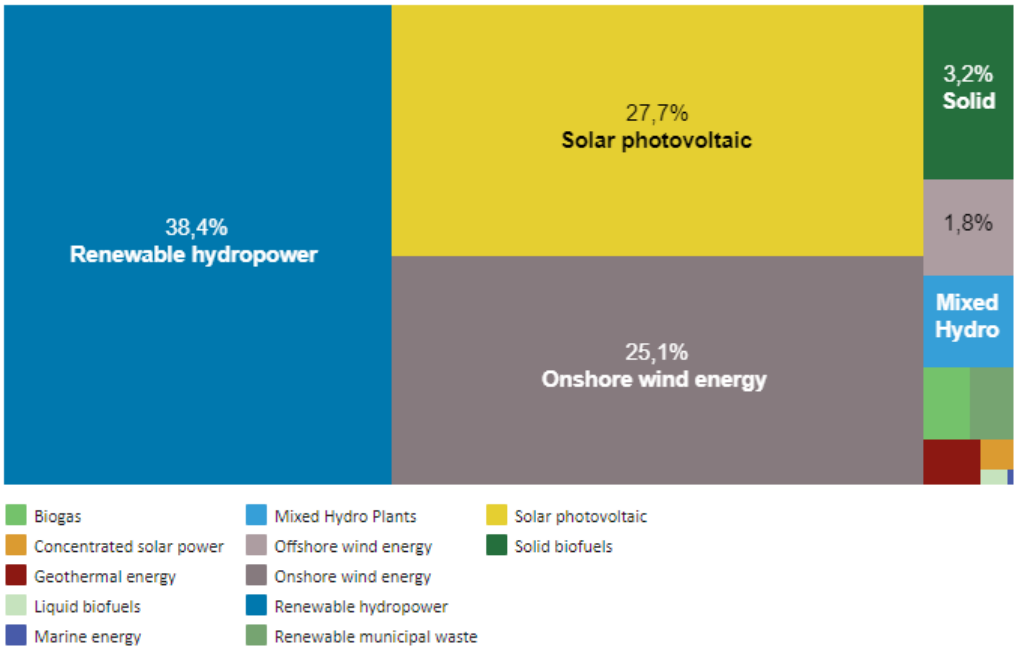


Figura 1.1: Capacidade instalada a nível mundial de tecnologias de energia renovável (em 2021) [11]

De facto, a tecnologia fotovoltaica tem um grande potencial de crescimento e de desenvolvimento, apesar de poder enfrentar alguns desafios, tais como os descritos na Secção 1.2. Todavia, através da Figura 1.2 é possível comprovar que a produção fotovoltaica de eletricidade terá um aumento exponencial até 2050.

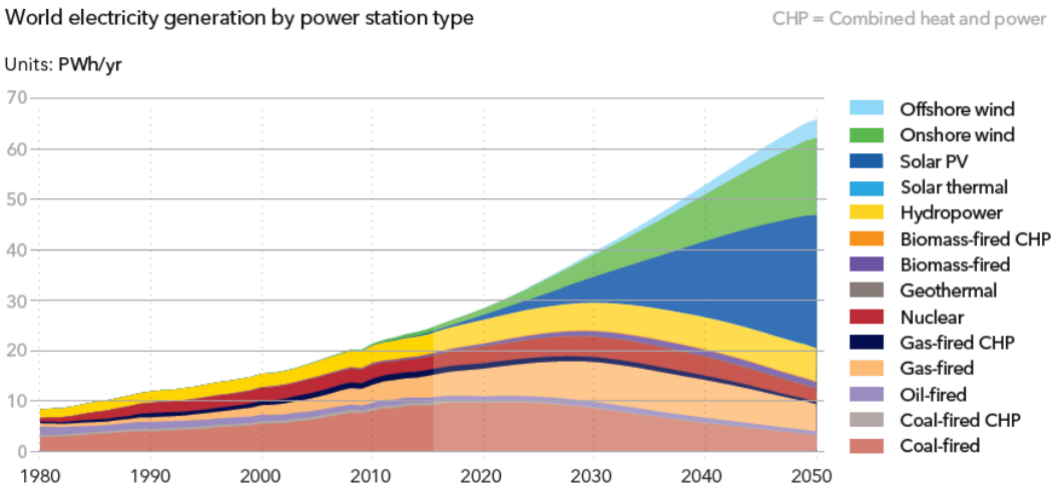


Figura 1.2: Perspetivas mundiais de produção de energia elétrica [12]

Tal como o resto do mundo, Portugal também tem apresentado um crescimento significativo no que diz respeito à produção fotovoltaica, com a vantagem de ser um país com grande potencial para este tipo de produção, devido à sua posição geográfica e ao elevado número de horas de sol por ano, como se pode comprovar pela Figura 1.3.

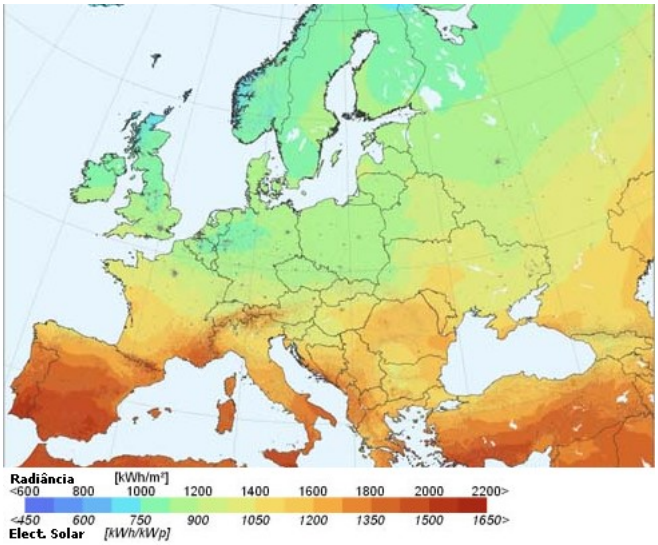


Figura 1.3: Mapa europeu de radiância solar [13]

Através da Figura 1.4 verifica-se que, em termos relativos, a tecnologia que mais cresceu foi a fotovoltaica, tendo evoluído de uma potência instalada de 299 MW (2013) para 2192 MW (2022) [14]. Este crescimento deve-se a vários fatores, como os incentivos associados à produção de energia renovável, o forte investimento do setor privado ou até o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia.

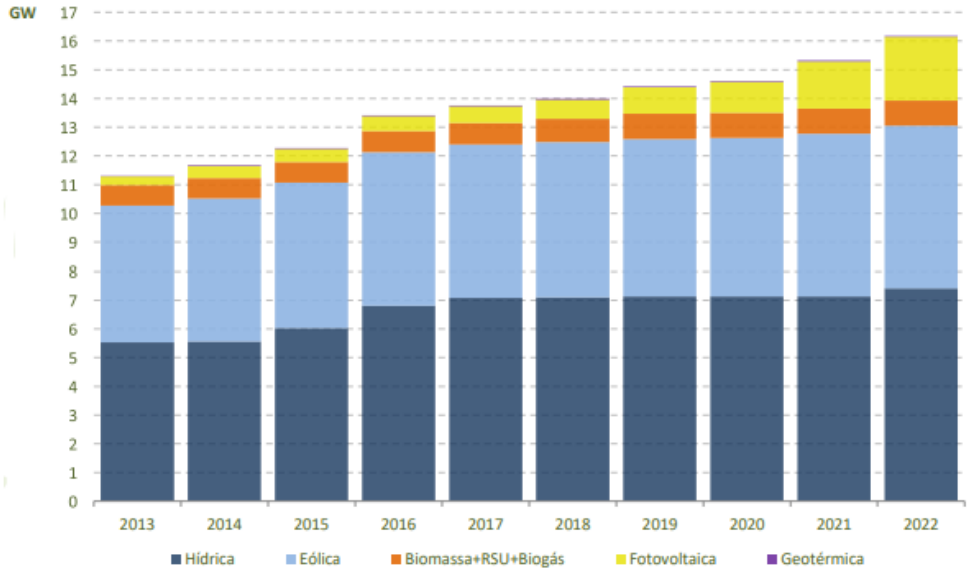


Figura 1.4: Potência instalada em Portugal, de tecnologias renováveis [14]

1.2 Desafios

Tal como referido nas secções anteriores, o aumento das ameaças relativas às alterações climáticas é o principal catalisador para uma eletrificação progressiva da economia e da sociedade, eletrificação essa que deverá acontecer de uma forma eficiente e sustentável. Porém, esta transformação poderá ter uma série de impactos ao nível da Operação do SE, tais como [15]:

- Redução da inércia global do sistema, diretamente relacionado com a adoção de fontes renováveis, em que a estabilidade do SE começa a ser uma questão preocupante. Analisando a Figura 1.5, em que a linha vermelha representa a curva da frequência e a linha verde a derivada da frequência, verificamos um desvio severo na frequência da rede. Desta forma, este desvio pode pôr em causa o funcionamento de equipamentos ligados à rede ou até a levar a falhas de energia.

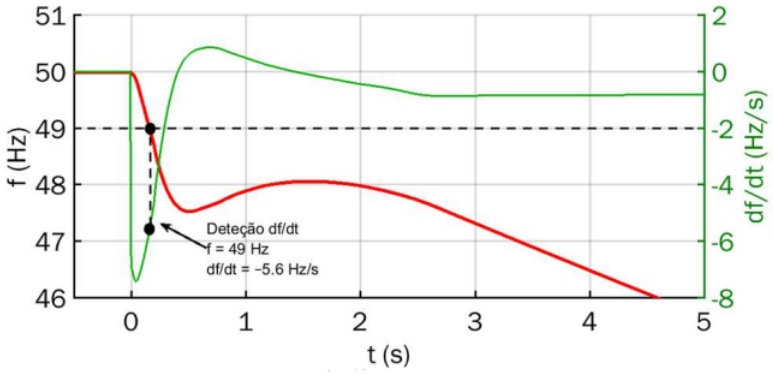


Figura 1.5: Avaliação de estabilidade num estudo do código na rede da Madeira [15]

- Alteração do sentido do fluxo de energia (fluxo bidirecional), provocado pela introdução de fontes de energia distribuída, que pode levar a falhas nos aparelhos de proteção que foram dimensionados para um fluxo de energia unidirecional;
- Redução das correntes de curto-circuito, tornando-se necessário reavaliar os equipamentos de proteção;
- Grandes desequilíbrios de energia no sistema;
- Dificuldade em garantir um balanceamento eficaz de cargas no sistema;
- Problemas sérios na regulação de tensão nas redes de distribuição.

Para se tentar solucionar os problemas referidos, existe um conjunto de soluções que poderão ser adotadas. Uma das soluções chave para o sucesso da transição energética será o armazenamento de energia (capaz de fornecer flexibilidade ao sistema) que será realizado em vários níveis

de operação do SE. Desta maneira, prevê-se que os requisitos relativos à capacidade de armazenamento de energia elétrica na UE serão aproximadamente 200 GW até 2030 e 600 GW até 2050 [15].

Outra das soluções é a atualização dos sistemas de proteção do sistema, com a implementação de tecnologias mais avançadas e com o estabelecimento de regulamentação mais adequada.

1.3 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de centrais fotovoltaicas, para projetos de Comunidades de Energia Renovável (CER), com os seguintes objetivos específicos:

- Rever as soluções tecnológicas mais relevantes aplicáveis em sistemas de autoconsumo;
- Identificar o enquadramento regulatório aplicável ao autoconsumo;
- Desenvolver um estudo de conceção e dimensionamento de soluções para uma aplicação específica, tendo como ponto de partida um *software* já existente na empresa **Ecoinside**;
- Desenvolver um algoritmo específico para o dimensionamento de uma solução de autoconsumo envolvendo a utilização de Comunidades de Energia Renovável;
- Integrar o algoritmo desenvolvido na ferramenta de dimensionamento de centrais fotovoltaicas da **Ecoinside**;
- Realizar testes para verificação do desempenho da ferramenta.

1.4 Contextualização

Esta Dissertação foi desenvolvida e realizada em ambiente empresarial na empresa **Ecoinside**. A **Ecoinside** nasceu na Universidade do Porto, em 2006, e tem como prioridade a promoção do desenvolvimento sustentável. A ideia base desta empresa é a inserção da palavra "ecoeficiência" no léxico português, procurando refletir na prática a ideia de que é possível e vantajoso conciliar a ecologia com a economia. A **Ecoinside** é especializada em energias limpas, sustentabilidade e mobilidade elétrica e conta com um portefólio de mais de 200 clientes, entre indústrias, autarquias e empresas [16].

1.5 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se organizado em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo, são mencionadas as motivações a nível internacional e nacional para o investimento em tecnologias renováveis, em particular na tecnologia fotovoltaica.

No capítulo 2 é realizado um estudo sobre o funcionamento da tecnologia fotovoltaica e, neste mesmo capítulo, é estudado o conceito de autoconsumo e CER, bem como o seu enquadramento legal.

No capítulo 3 é apresentado o processo de funcionamento e otimização de uma ferramenta utilizada para o dimensionamento de centrais fotovoltaicas e, por outro lado, relata o desenvolvimento de uma ferramenta necessária para o dimensionamento de uma CER.

O capítulo 4 está organizado em 2 partes, na primeira realiza-se uma análise aos resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida. Na segunda parte é apresentado o processo de dimensionamento do caso de estudo de uma central fotovoltaica.

No capítulo 5 são apresentadas as duas visitas técnicas realizadas no contexto do trabalho realizado na **Ecoinside**, que tiveram como objetivo poder ter um contacto mais próximo com a realidade estudada.

No capítulo 6 estão expostas as conclusões relativas a este documento e também explanados os possíveis trabalhos futuros.

Adicionalmente, foram incluídos 2 anexos. Estes contêm documentos relativos ao caso de estudo.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é uma das tecnologias de energia renovável mais populares e eficazes disponíveis atualmente no mercado. Esta tecnologia consiste na conversão da luz solar em energia elétrica através de células fotovoltaicas, que são compostas por materiais semicondutores. As células PV são agrupadas em módulos, que podem ser instalados em telhados ou em áreas abertas e, quando a luz solar atinge os módulos, é gerada uma corrente elétrica que será entregue a um inversor e que a irá injetar na rede elétrica.

Esta tecnologia renovável apresenta diversas vantagens, como: a possibilidade de utilização em regiões remotas ou sem acesso à rede elétrica; a capacidade de ser dimensionada de acordo com as necessidades de cada consumidor; a longevidade dos equipamentos (os painéis PV podem durar mais de 25 anos); a necessidade de pouca manutenção; e, por fim, o facto de contribuir para a redução da pegada de carbono.

2.1.1 Produção de Energia Elétrica

A produção de energia elétrica numa célula fotovoltaica ocorre graças à capacidade dos materiais semicondutores em absorver a radiação solar e convertê-la em eletricidade. Este processo é conhecido como efeito fotovoltaico e consiste na incidência de fotões com diferentes comprimentos de onda na célula, sendo que se a energia do fotão for superior à energia da banda de condução, será criado um par eletrão lacuna. A junção p-n origina um campo elétrico que irá promover a circulação dos eletrões pelo circuito da carga. A tensão da célula deve-se, então, ao efeito de difusão dos portadores na junção p-n. O efeito de difusão e o campo elétrico (originado pela junção p-n) neutralizam-se, atingindo um ponto de equilíbrio que depende da corrente que circula pela carga [17].

A recombinação de portadores da junção p-n aumenta conforme o aumento da tensão externa da célula, sendo que esta recombinação dá origem à corrente de díodo (I_D). Um decréscimo da diferença de potencial nos terminais (devido a aumento da carga) diminui o campo elétrico da

junção impelindo uma difusão mais larga e, consequentemente, uma menor corrente de díodo (contrária à corrente na carga) [17].

O efeito fotovoltaico está representado na Figura 2.1.

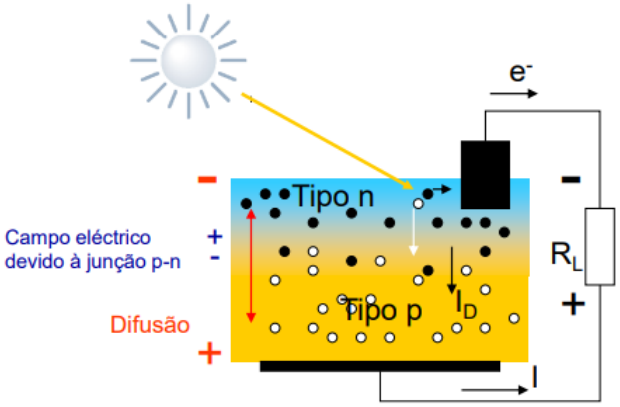


Figura 2.1: Produção de eletricidade numa célula fotovoltaica [18]

Contudo, há um conjunto de fatores que limitam o processo fotovoltaico, entre os quais as perdas por [17]:

- Reflexão - fotões não atingem a camada n;
- Não absorção - energia insuficiente dos fotões;
- Transmissão - não há criação do par eletrão lacuna (na camada n).

2.1.1.1 Célula Fotovoltaica

Uma célula fotovoltaica pode ser reduzida a um circuito elétrico em que a mesma é representada por uma fonte ideal de corrente, tal como se pode observar na Figura 2.2. De facto, para além da fonte ideal de corrente, o circuito apresenta um díodo, que representa a camada de difusão, uma resistência R_{sh} que modeliza as perdas de corrente e uma resistência R_s que modeliza as perdas de tensão.

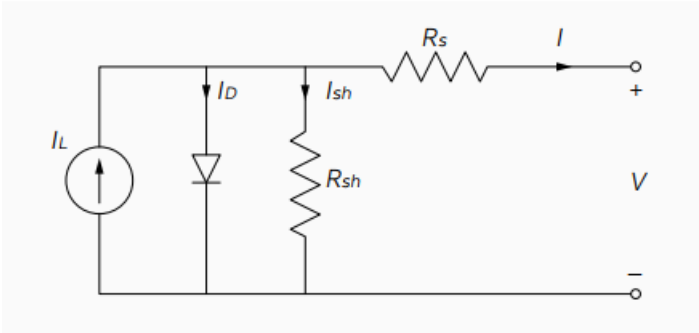


Figura 2.2: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica [19]

A corrente aos terminais de saída da célula fotovoltaica (I), pode ser calculada pela primeira lei de Kirchhoff, aplicada na Equação 2.1.

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \tag{2.1}$$

Em que:

- I_L - representa a corrente gerada pela célula fotovoltaica;
- I_D - representa a corrente dependente da tensão perdida na recombinação de portadores na junção p-n;
- I_{sh} - representa a corrente perdida devido às resistências *shunt*.

2.1.2 Principais Componentes de uma Central Fotovoltaica

2.1.2.1 Gerador Fotovoltaico

De acordo com o documento 61836 [20] da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), há diferença entre os termos célula, módulo, painel, *array* e gerador fotovoltaico. Desta forma, a célula PV é considerada o componente fotovoltaico elementar e o conjunto de células interligadas (e protegidas do meio ambiente) é denominado por módulo fotovoltaico. Relativamente ao painel PV, este é composto por vários módulos que estão interligados, tanto eletricamente como mecanicamente. A *array* é um conjunto mecânico e elétrico de módulos PV e inclui todos os componentes (terminais de entrada de corrente contínua (DC) do inversor, outro equipamento de conversão de energia ou cargas DC). Por fim, um gerador PV é um tipo de gerador que utiliza o efeito fotovoltaico para converter a luz solar em eletricidade e é representado por um conjunto de *arrays* em paralelo num sistema FV [19].

Na Figura 2.3 estão representados os vários conceitos, iniciando à esquerda com a célula e terminando com o gerador fotovoltaico.

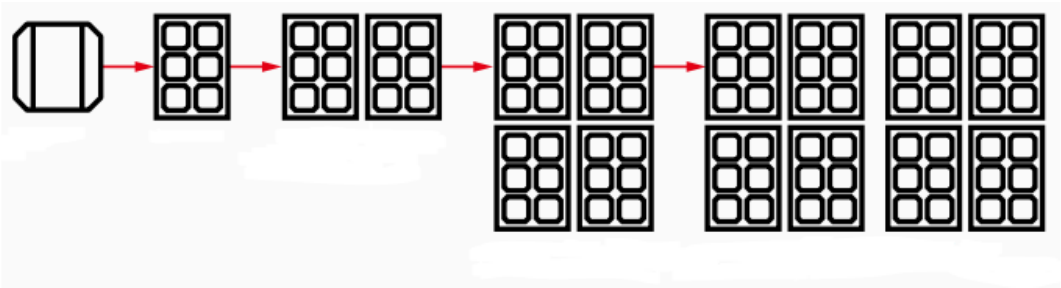


Figura 2.3: Elucidação dos conceitos de célula, módulo, painel, *array* e gerador fotovoltaico [19]

De facto, o comportamento do gerador fotovoltaico está diretamente relacionado com a associação das células ou módulos (em paralelo ou em série). Nas ligações em série, as várias tensões

são somadas, aumentando o valor total do conjunto, sendo que o valor total da corrente é determinado apenas pelo valor da célula/módulo. No caso da ligação em paralelo, a corrente total do grupo é igual à soma das várias correntes e a tensão é igual à de um módulo [19].

2.1.2.2 Inversor

O inversor é o componente responsável por converter a corrente DC em AC, que tem a capacidade de controlar a qualidade da potência entregue à rede elétrica. Os principais elementos que integram um inversor são [19]:

- *Max power point tracker* (MPPT) - normalmente é um conversor DC/DC, tendo este circuito a função de maximizar a energia disponível do gerador PV a qualquer instante do seu funcionamento. A energia que um gerador fotovoltaico pode fornecer depende do ponto em que este opera e os controladores podem seguir várias estratégias para otimizar a potência fotovoltaica. O MPPT pode implementar diferentes algoritmos e alternar entre estes, com base nas condições de operação do gerador PV;

- Condensador *Bulk* - são utilizados para prevenir que o *ripple* da corrente atinja a fonte DC, de forma a suavizar as variações de tensão no barramento DC;

- Conversor DC/AC - este circuito converte a potência DC em AC, com os valores de tensão e frequência pretendidos. Esta conversão pode ser alcançada ligando e desligando dispositivos semicondutores, de forma controlada. A forma de onda da tensão de saída de um inversor ideal deve ser puramente sinusoidal, porém, as ondas de tensão dos inversores não o são (visto que contêm harmónicos). Relativamente à frequência de saída de um inversor, esta é determinada pelo ritmo que o circuito de controlo liga e desliga os dispositivos semicondutores. Este circuito de controlo utiliza a técnica PWM (*Pulse Width Modulation*) que permite obter uma forma de onda tão sinusoidal quanto possível;

- Filtro - por norma é um filtro L-C (bobina e condensador) utilizado para controlar a qualidade da potência que será entregue à rede. Este filtro permite a geração de tensões sinusoidais com baixa distorção harmónica.

Os inversores podem ser instalados em centrais fotovoltaicas com ligação à rede ou em centrais *Off-Grid* (sem ligação à rede). Assim, devido às diferentes necessidades de cada caso, os inversores devem apresentar características específicas. Para as centrais *Off-Grid*, os inversores devem fornecer uma tensão no lado AC o mais constante possível com a variação da produção do gerador e da procura da carga. Por outro lado, os inversores das centrais com ligação à rede elétrica devem reproduzir, o mais exato possível, a tensão da rede e, ao mesmo tempo, devem otimizar e maximizar a potência de saída dos módulos fotovoltaicos [19].

Além disso, há diferentes tipos de inversores, sendo que podem ser consideradas três alternativas [19]:

- Inversor centralizado - estes inversores apresentam um limite de potência até 5000 kW (que continua a aumentar). Os inversores centralizados são utilizados em centrais fotovoltaicas industriais ou em aplicações no solo.
- Inversor de *string* - este tipo de inversor tem uma potência entre 1.2 kW e 175 kW. Normalmente, esta solução é utilizada em centrais PV de edifícios residenciais, comerciais e industriais, ou em aplicações montadas no solo.
- Microinversor - estes inversores são instalados a jusante de apenas 1, ou poucos módulos FV, e fazem a conversão da corrente DC em AC (compatível com a rede elétrica) diretamente no módulo. A solução de microinversor pode ser utilizada em centrais fotovoltaicas de edifícios residenciais e comerciais.

2.1.3 Grandezas Características do Módulo Fotovoltaico

Para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos é fundamental o conhecimento das grandezas características do módulo fotovoltaico. Por norma, estas grandezas são obtidas analisando as curvas características do módulo, fornecidas pelo seu fabricante.

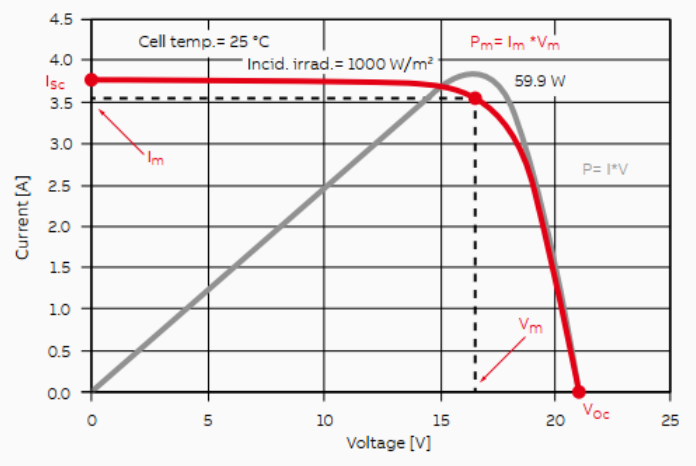


Figura 2.4: Grandezas características do módulo fotovoltaico [19]

Na Figura 2.4 está representado o aspeto típico das curvas características de um módulo fotovoltaico em que se verificam as seguintes características [19]:

- I_{SC} - corrente de curto-circuito;
- V_{OC} - tensão de circuito aberto;
- P_m ou P_{MPP} - potência máxima produzida em condições padrão;
- I_m ou I_{MPP} - corrente produzida no ponto de potência máxima;
- V_m ou V_{MPP} - tensão no ponto de potência máxima.

Analisando a Figura 2.4 verifica-se que, em condições de curto-circuito, a corrente I_{SC} é a mais elevada, em circuito aberto a tensão V_{OC} é a que apresenta maior valor, sendo que em ambos os casos não existe produção de energia. O valor máximo de potência (MPP, Maximum Power Point) é atingido quando a tensão aumenta e se aproxima do valor de circuito aberto.

Para além das grandezas referidas anteriormente, podem agregar-se as seguintes:

- FF - fator de forma, calculado através da Equação 2.2:

$$FF = \frac{P_m}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \tag{2.2}$$

- η - rendimento calculado através da Equação 2.3, em que G representa a irradiância em (W/m^2) e A representa a área do módulo em (m^2).

$$\eta = \frac{P_m}{G \cdot A} \tag{2.3}$$

2.1.4 Variação na Energia Produzida

O funcionamento do painel fotovoltaico é influenciado por diversos fatores que afetam a eficiência da conversão da luz solar em energia elétrica.

Os principais fatores que influenciam a produção do painel fotovoltaico são [19]:

- Irradiância;
- Temperatura dos módulos PV;
- Sombreamento;
- Sujidade e acumulação de água nos painéis PV.

Relativamente à irradiância incidente no módulo PV, através da Figura 2.5, é possível verificar-se que a curva tensão-corrente varia consoante os diferentes valores de irradiância. Quando a irradiância incidente diminui, a corrente PV produzida também diminui proporcionalmente, enquanto a variação da tensão é muito baixa. De facto, a eficiência de conversão não é influenciada pela variação da irradiância (dentro da gama de funcionamento padrão das células PV), ou seja, a eficiência de conversão energética é a mesma num dia de céu claro e num dia nublado. Portanto, num dia de céu nublado, o valor de potência gerada será menor devido à reduzida irradiância solar [19].

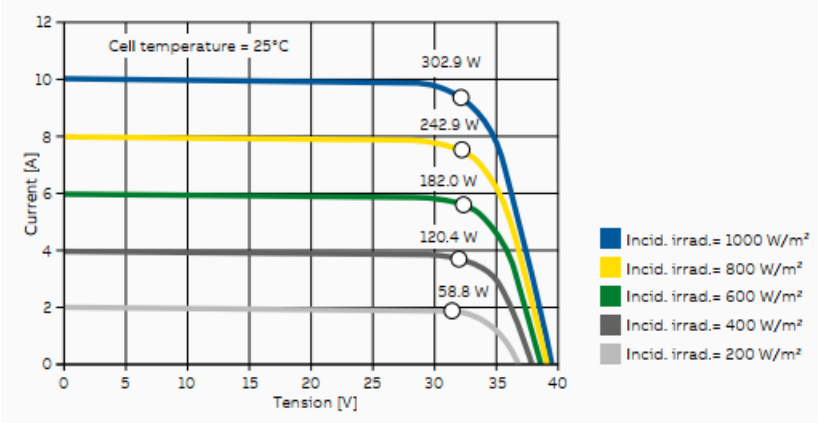


Figura 2.5: Curva tensão-corrente de 60 células monocristalinas de 6 polegadas classificadas em 300W em condições STC (condições de teste padrão, em que, irradiância = $1000W/m^2$, $T_{\text{célula}}$ = 25ºC, AM (massa de ar) = 1,5) [19]

Ao contrário da irradiância, quando existe um aumento da temperatura dos módulos FV, a corrente produzida permanece praticamente inalterada, enquanto a tensão diminui [19]. Este fenómeno acontece porque o aumento da temperatura provoca uma maior agitação das partículas, dando origem a uma maior recombinação da célula que, por sua vez, alarga a difusão e diminui a corrente de díodo (aumentando ligeiramente a corrente de saída célula). Como a variação da tensão é maior que a variação da corrente, a potência (e rendimento) da célula PV diminuirá com a redução da tensão. A diminuição da potência provoca ainda um aumento de temperatura, amplificando o efeito [17].

Na Figura 2.6, verifica-se a variação da curva tensão-corrente consoante os diferentes valores de temperatura da célula PV.

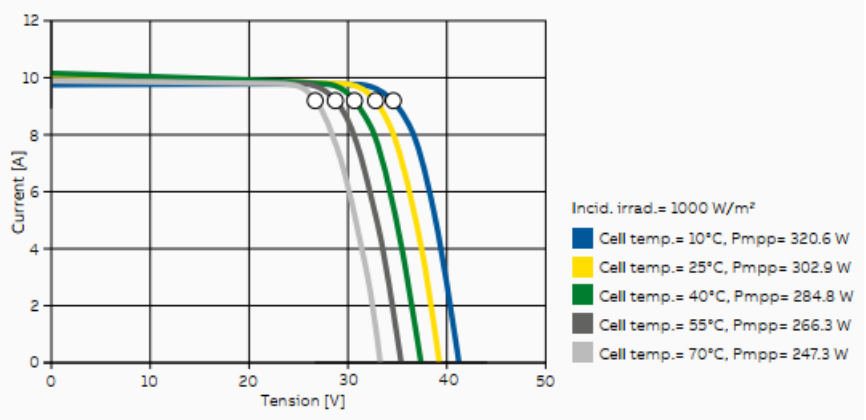


Figura 2.6: Curva tensão-corrente de 60 células monocristalinas de 6 polegadas classificadas em 300W em condições STC [19]

Num projeto de instalação fotovoltaica é necessário ter em conta que alguns módulos PV (uma ou mais células) poderão ser sombreados por árvores, folhas caídas, chaminés, nuvens ou até por

outros módulos instalados nas proximidades. No caso do sombreamento de uma célula fotovoltaica, esta deixa de conduzir eletricidade e passa a comportar-se como um díodo que bloqueia a corrente produzida pelas outras células (interligadas em série), comprometendo a produção do módulo PV. Além disso, o díodo está sujeito à tensão das outras células, podendo ocorrer sobreaquecimento localizado (*Hot Spot*) e consequente perfuração da junção. Este acontecimento pode levar a danos no módulo fotovoltaico e pode ser observado na Figura 2.7 [19].

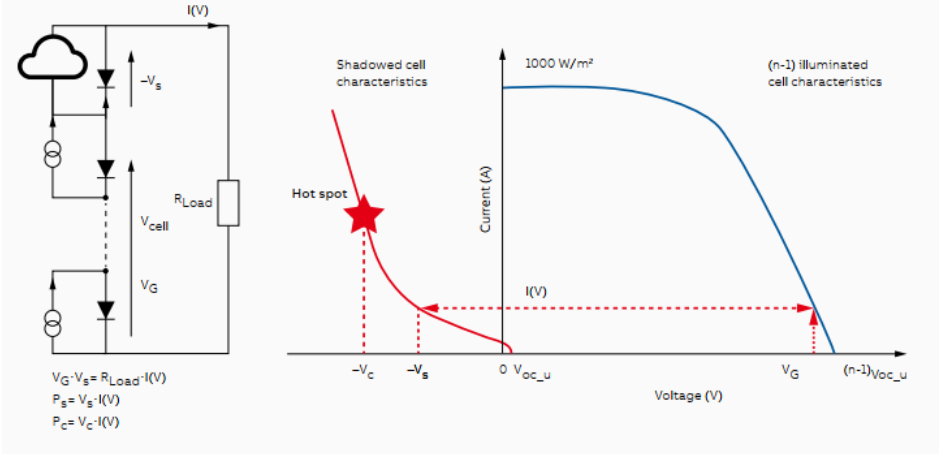


Figura 2.7: Sobreaquecimento localizado num módulo fotovoltaico [19]

De modo a evitar que uma ou mais células PV sombreadas coloquem em causa a produção de uma *string* completa, são inseridos díodos *by-pass* (que contornam a parte sombreada ou danificada) ao nível do módulo, dentro da caixa de junção (normalmente colocada na parte de trás do módulo PV). Este díodo *by-pass* está em paralelo com várias células, e apenas conduz quando uma ou várias células são sombreadas (é bloqueado quando todas as células são iluminadas) [19].

O funcionamento do díodo *by-pass* está representado na Figura 2.8.

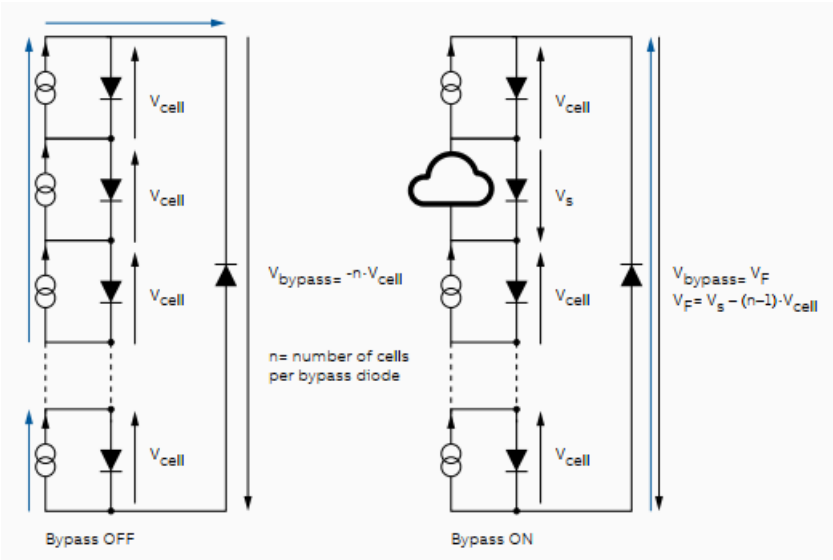


Figura 2.8: Implementação de um díodo *by-pass* [19]

Por fim, a sujidade acumulada nos painéis fotovoltaicos (poeiras, poluição, entre outros), bem como a acumulação de água no friso (dos painéis), atuam como uma barreira, impedindo a penetração da radiação solar nas células PV. Tal acontecimento reduz a produção de energia elétrica e diminui a eficiência do módulo PV e, por esse motivo, é essencial a limpeza periódica dos mesmos, especialmente quando instalados em locais mais desfavoráveis. Além disso, a sujidade também pode provocar sombreamento e causar os efeitos adversos referidos anteriormente.

2.1.5 Tecnologias Fotovoltaicas

2.1.5.1 Tecnologias Primeira Geração

A primeira geração de tecnologias fotovoltaicas corresponde aos módulos PV de silício cristalino, sendo que estes continuam a ser a solução mais utilizada nos dias de hoje (correspondem a cerca de 90% do mercado atual) [17]. Relativamente a esta tecnologia de conversão, há dois tipos de módulos PV, os de silício monocristalino e de silício policristalino. Os módulos de silício monocristalino são fabricados a partir de um único cristal (forma pura de silício) [19] e apresentam uma eficácia dentro do intervalo dos 13% e 17% [17], enquanto os módulos de silício policristalino são obtidos a partir de lingotes fundidos, onde os cristais não têm exatamente a mesma orientação [19], e apresentam uma eficácia entre os 11% e os 14%. Apesar dos módulos de cristais monocristalinos apresentarem uma maior eficiência, o processamento desta tecnologia é mais dispendioso [17].

As diferenças físicas entre os módulos PV destas duas tecnologias de conversão estão representadas na Figura 2.9.

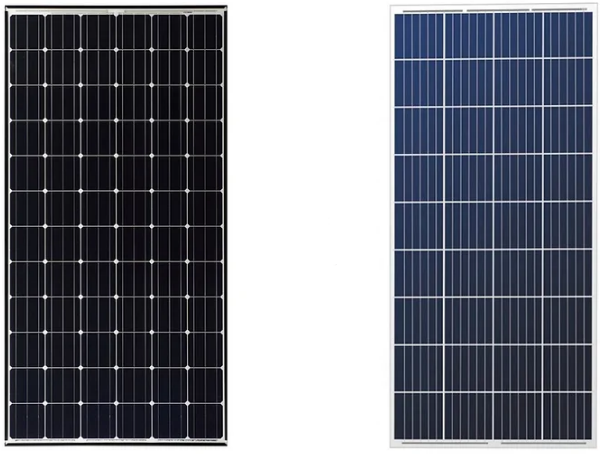


Figura 2.9: Módulo de silício monocristalino (esquerda) e módulo de silício policristalino (direita) [21]

Para além das características referidas anteriormente, os painéis PV de 1ª geração também podem apresentar diferentes tipos de junção. Assim, o termo *p-type* refere-se ao facto de a célula ser construída sobre uma base de silício com carga positiva. Tal acontece porque a bolacha de silício (base para a fabricação da célula PV) é dopada com boro, que contém um eletrão a menos

que o silício. Por fim, a parte superior da bolacha é dopada negativamente (*type-n*) com fósforo (que contém mais um eletrão que o silício) e é formada a junção p-n [19].

Ao contrário das células *type-p*, as células *type-n* são fabricadas com o processo inverso, isto é, é o lado dopado *type-n* que serve como base da célula PV. Atualmente, as células *type-p* são as mais comuns, visto que apresentam o processo de fabrico mais simples e económico. Contudo, as células mais potentes disponíveis no mercado são as *type-n*, sendo que estas são imunes a alguns efeitos de degradação. É previsível que a adoção de células *type-n* continue a aumentar, tal como se pode observar na Figura 2.10 [19].

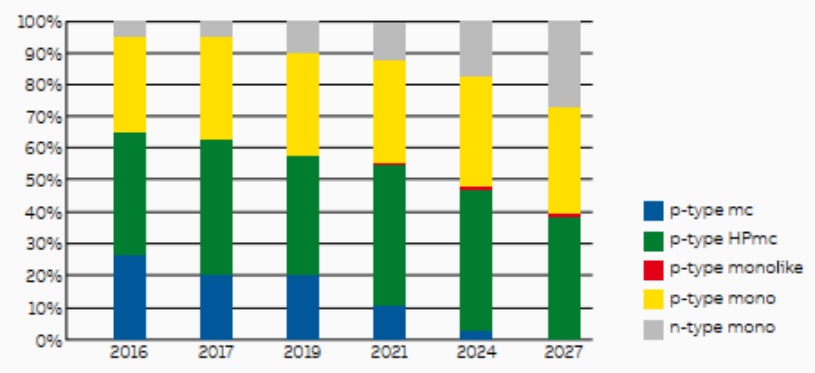


Figura 2.10: Evolução da utilização de diferentes tipos de junção [19]

Por fim, o desenvolvimento da tecnologia permitiu o aparecimento das células solares bifaciais, capazes de absorver radiação solar do lado superior e inferior, permitindo ao módulo bifacial absorver a radiação solar refletida [19].

O princípio de funcionamento destes módulos está representado na Figura 2.11.

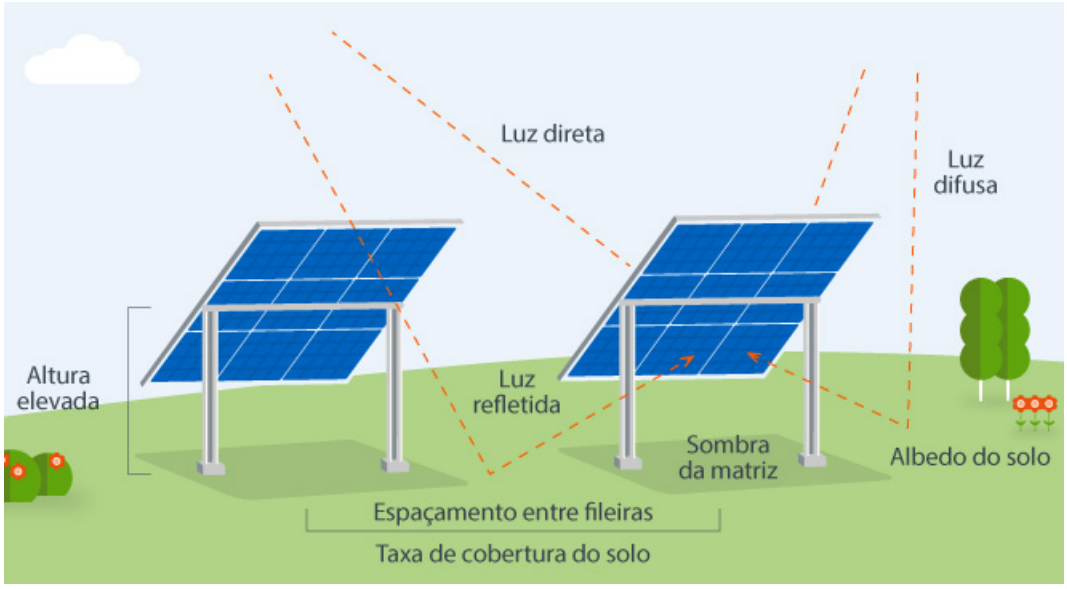


Figura 2.11: Operação de módulos PV bifaciais [22]

Em comparação com módulos monofaciais, os bifaciais apresentam um aumento de produção de energia em cerca de 5% para módulos instalados na relva, 10% para módulos instalados na areia e 20% para módulos instalados na superfície pintada de branco [19].

2.1.5.2 Tecnologias Segunda Geração

A segunda geração de painéis PV consiste numa tecnologia de películas finas compostas por material semicondutor depositado, geralmente, sob a forma de misturas gasosas sobre substratos rígidos (vidro, polímeros, alumínio) [19].

Os materiais mais utilizados nesta tecnologia são [19]:

- Silício amorfo (a-Si);
- Telureto de cádmio (CdTe);
- Seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS);
- Arsenieto de gálio (GaAs).

A eficiência dos três primeiros tipos de células referidos anteriormente é cerca de 7%. No caso das células de arsenieto de gálio, estas apresentam uma eficiência que ronda os 30%, sendo que este tipo de células é utilizado quase exclusivamente em aplicações espaciais, devido ao seu custo elevado. Apesar da eficácia deste tipo de células ser inferior às células de 1ª geração, estas apresentam algumas vantagens, tais como: preços mais reduzidos (utiliza menos material e energia no fabrico); melhor eficiência em locais com altas temperaturas; melhor desempenho em condições de baixa radiação e com luz difusa (especialmente em dias de céu nublado); e, por fim, apresentam menor sensibilidade aos sombreamentos, devido à sua geometria (células longas e estreitas) [17].

2.1.5.3 Tecnologias Recentes

Os principais catalisadores para o desenvolvimento tecnológico no campo fotovoltaico são a redução de custos nos processos de produção e o aumento da eficiência energética. Uma tecnologia que está a ser objeto de investigação e desenvolvimento é a célula solar sensibilizada por corante (DSSC), também conhecida por célula *Grätzel*, nome do seu inventor. A DSSC tem como base material orgânico e consiste numa folha frontal de vidro ou plástico com poucos elementos depositados um sobre o outro. O corante é o material fotoativo da tecnologia DSSC, sendo que este consegue produzir eletricidade uma vez sensibilizado pela luz. O corante capta os fotões da luz incidente (luz solar ou luz artificial) e utiliza a sua energia para excitar eletrões. Os eletrões excitados são então injetados em dióxido de titânio (TiO_2) e são conduzidos por dióxido de titânio nanocristalino. Por fim, o eletrólito químico fecha o circuito para que os eletrões voltem ao corante. Relativamente à eficiência desta tecnologia, em condições STC e utilizando uma configuração de junção simples, apresenta uma eficiência de 32% e, utilizando um conjunto de 2 níveis, já consegue atingir uma eficiência de 46% [19].

Todo este processo está representado na Figura 2.12.

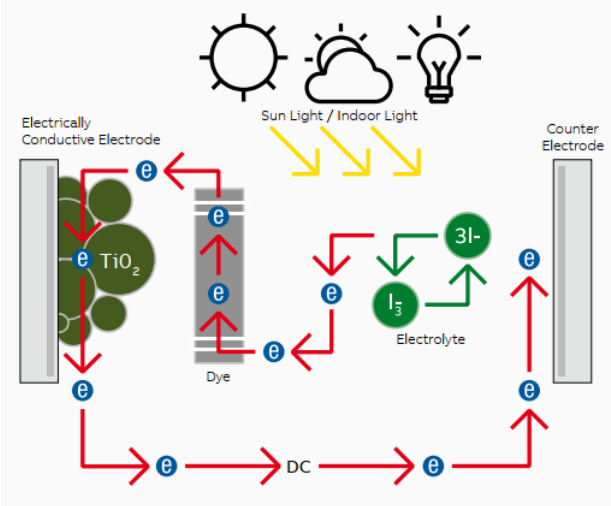


Figura 2.12: Funcionamento da tecnologia DSSC [19]

Outra tecnologia em desenvolvimento são as células solares orgânicas (OSC), onde a deposição a vácuo é utilizada para a produção deste tipo de células, utilizando materiais com baixo peso molecular. Os materiais orgânicos com condutividade *type-n* e *type-p* são depositados num elétrodo transparente e, por cima destes, é depositado um elétrodo metálico. A luz solar é absorvida pelas camadas orgânicas e as excitações geradas pela absorção da luz são dissociadas aos eletrões e lacunas na junção entre camadas orgânicas *type-n* e *type-p*. Os eletrões e as lacunas são recolhidos nos elétrodos superior e inferior respetivamente e, deste modo, é gerada corrente elétrica. A utilização de semicondutores orgânicos permite a redução de custos de produção de painéis PV a médio-longo prazo, visto que estes podem ser sintetizados e depositados a baixas temperaturas e com baixo custo industrial. Contudo, a grande limitação desta tecnologia é a eficiência que ronda apenas os 10% (para um mini módulo) [19].

Na Figura 2.13 está representado um esquema da tecnologia.

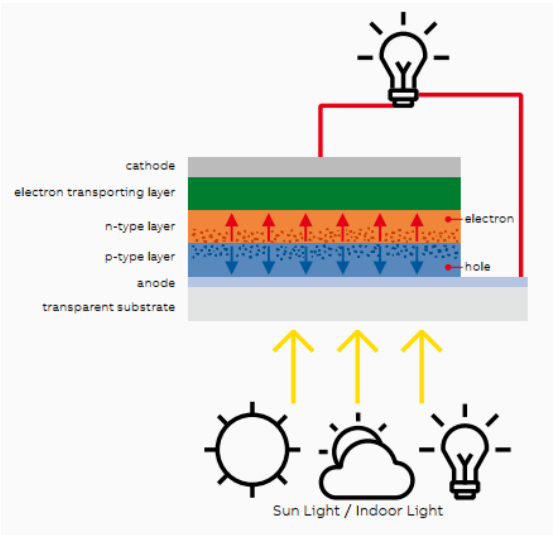


Figura 2.13: Esquemático da tecnologia OSC [19]

As células solares de perovskita (PSC) são outra das tecnologias em desenvolvimento, apesar de ainda não existir produção. Esta tecnologia apresenta um potencial de produção de muito baixo custo e, por esse motivo, poderá revolucionar a geração de energia fotovoltaica. As células de perovskita poderão ou não conter chumbo. Em laboratório, esta tecnologia alcança uma eficiência de 16% para o mini módulo [19].

Para além das tecnologias referidas anteriormente, a célula solar de ponto quântico (QDSC) é um tipo de célula solar que utiliza pontos quânticos como material fotovoltaico absorvente. Esta tecnologia tenta substituir materiais como o silício, o CIGS ou o CdTe. A película de pontos quânticos é atrativa para células solares multi-junção, onde uma variedade de materiais é utilizada para melhorar a eficiência, através da captura de múltiplos intervalos do espectro solar. Em laboratório, foram obtidos valores de eficiência de 14% [19].

Na Figura 2.14 está representado um esquema da tecnologia.

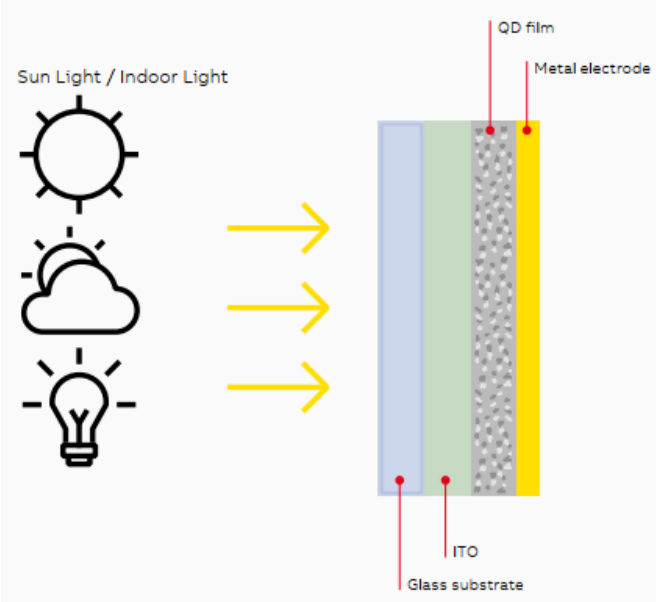


Figura 2.14: Esquemático da tecnologia QDSC [19]

Por outro lado, a tecnologia de sistema de concentração fotovoltaica (CPV) é uma alternativa promissora para aumentar a eficiência dos sistemas solares. Ao contrário dos sistemas solares convencionais (que usam células PV planas), os CPV usam lentes ou espelhos para concentrar a luz solar em pequenas áreas de células PV altamente eficientes. Esta tecnologia tem como objetivo a redução da área necessária para a instalação PV, sendo ideal para aplicações em larga escala. Para além do mais, os sistemas CPV apresentam baixos coeficientes de temperatura, produção estável ao longo do dia (devido ao rastreamento de dois eixos) e têm um baixo impacto ambiental, visto que o terreno poderá ser utilizado, por exemplo, para agricultura. Contudo, esta tecnologia também apresenta alguns desafios, tais como: a necessidade de instalação em áreas com alta radiação solar direta, reduzindo o número de áreas adequadas para tais centrais; a necessidade de um sistema de rastreamento preciso, para manter o módulo o mais perpendicular possível à radiação solar direta;

e, por fim, a necessidade de um sistema de refrigeração para as células, devido à alta temperatura que estas podem atingir com o aumento da irradiância [19].

Figura 2.15: Exemplo de um painel CPV [23]

2.1.6 Instalações Fotovoltaicas

As instalações fotovoltaicas são sistemas que permitem converter a energia proveniente do sol em eletricidade. Por norma, estes sistemas são compostos por painéis solares, inversores, equipamento elétrico (de ligação e proteção) e, em alguns casos, por sistemas de armazenamento de energia. Relativamente à configuração da instalação fotovoltaica, podem ser considerados 3 tipos [19]:

- Sistema de ligação à rede - o conjunto fotovoltaico está sempre conectado à rede. Neste caso, a energia produzida pelo gerador fotovoltaico é convertida de corrente DC para corrente alternada (AC), através do inversor e, posteriormente, injetada na rede. Durante os tempos em que não há luz solar, as cargas consomem a eletricidade da rede.

- Sistema *Off Grid* - caracteriza-se por ser um sistema solar que não tem ligação à rede. Toda a energia elétrica produzida é armazenada em baterias e será utilizada durante a noite para alimentar as cargas. Este tipo de sistema é indicado para áreas remotas onde não há eletricidade nem acesso à rede elétrica.

- Sistema solar híbrido - o sistema tem um interruptor de desconexão automático que liga ou desliga a ligação à rede elétrica, consoante os requisitos de eletricidade da microrede onde o conjunto fotovoltaico está conectado.

2.2 Autoconsumo e Comunidades de Energia Renovável

2.2.1 Autoconsumo

Autoconsumo (AC) é definido como todo o consumo assegurado por energia elétrica proveniente de uma ou várias unidades de produção para autoconsumo (UPAC), sendo que o consumo poderá ser realizado por mais de que um autoconsumidor [24]. A UPAC é uma instalação de produção de energia elétrica (a partir de energias renováveis) destinada ao autoconsumo na instalação de utilização (IU) associada, podendo injetar excedentes na rede elétrica de serviço público (RESP) [25].

O autoconsumo é independente do nível de tensão das IU e pode ser realizado de 2 formas, autoconsumo individual (ACI) e autoconsumo coletivo (ACC) [24]:

- **ACI** - este é verificado sempre que a UPAC estiver associada a um único Código Ponto de Entrega (CPE), ou seja, sempre que o consumo da energia elétrica se realizar apenas numa IU. No que toca à energia elétrica não consumida (energia excedente), o proprietário da IU tem o direito de escolha no que toca à venda da mesma. Também se considera uma instalação ACI no caso de existir uma ligação entre a UPAC e o CPE do quadro de serviços comuns de uma IU, cujo objetivo é apenas satisfazer os consumos nesse ponto de entrega [24]. Na Figura 2.16 está representado o exemplo de dois ACI com ligação à RESP.

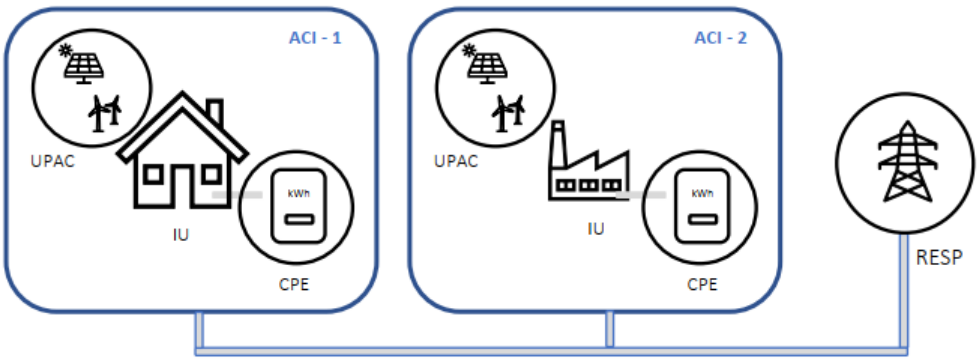


Figura 2.16: Exemplo de dois ACI [24]

- **ACC** - verifica-se sempre que a UPAC estiver associada a mais do que um CPE, ou seja, sempre que o consumo da eletricidade se verificar em mais do que uma IU (desde que estas se encontrem situadas numa vizinhança próxima). Caso não exista ligação entre as IU através da RESP, terá de existir uma rede direta e/ou interna que realize a ligação da UPAC às IU. Na Figura 2.17 está representado o exemplo de um ACC, numa vizinhança próxima, onde a RESP é utilizada para ligação da(s) UPAC às IU [24].

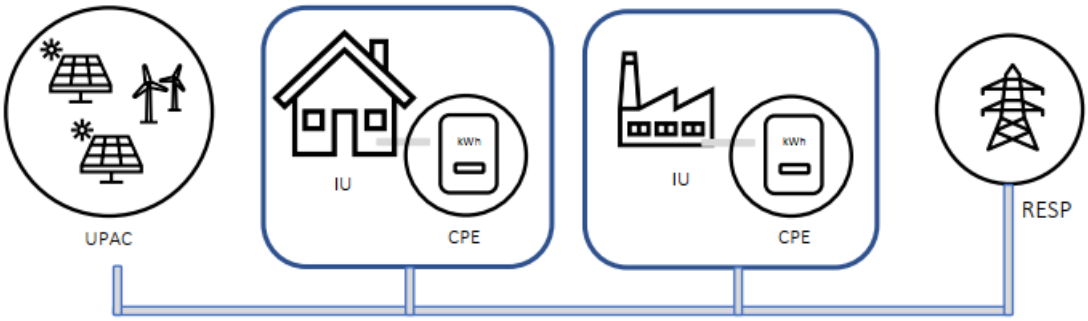


Figura 2.17: Exemplo de ACC [24]

2.2.2 Comunidades de Energia Renovável

Uma CER consiste numa pessoa coletiva, constituída mediante adesão voluntária dos seus membros, os quais podem ser pessoas singulares ou coletivas, de natureza pública ou privada. Desta forma, podem ser pequenas e médias empresas ou até autarquias locais, sendo que devem estar localizados na proximidade dos projetos de energia renovável ou então devem desenvolver atividades relacionadas com os projetos de energia da respetiva CER, incluindo necessariamente UPAC. A CER deve ter como objetivo principal propiciar aos membros ou às localidades onde opera a comunidade, benefícios ambientais, económicos e sociais ao invés de lucros financeiros. As CER têm a faculdade de [24]:

- Produzir, consumir, armazenar, comprar e vender energia renovável com os seus membros ou com terceiros;
- Partilhar e comercializar entre os seus membros a energia renovável produzida por UPAC;
- Aceder a todos os mercados de energia.

O acesso dos consumidores a uma CER não pode ser sujeito a condições ou procedimentos injustificados ou discriminatórios que impeçam a sua participação. Por isso, a CER deve admitir a saída de qualquer participante, sob condição do cumprimento das obrigações a que esteja vinculado [24].

Relativamente à partilha de energia elétrica, a metodologia definida para a distribuição da energia produzida através de uma ou mais UPAC, é de extrema importância (tanto para o caso do ACC como o da CER). Assim, é este coeficiente que poderá definir a viabilidade económica destes projetos. Os modelos de partilha encontram-se divididos em diferentes tipos de coeficientes [24]:

- Coeficientes fixos - diferenciados (entre outros) por dias úteis e feriados ou fins de semana, e que podem ou não tomar em consideração as estações do ano;
- Coeficientes variáveis - definidos com base em critérios, na hierarquização, no consumo medido em cada período no intervalo temporal definido pela regulamentação da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE);

- Na combinação de qualquer uma das modalidades referidas anteriormente, de acordo com a regulamentação da ERSE aplicável.

Contudo, também é possível realizar a partilha de energia com base em sistemas específicos de gestão dinâmica que permitem monitorizar, controlar e gerir a energia em tempo real, com o objetivo de otimizar o fluxo energético. Para implementar a gestão dinâmica, os sistemas utilizados devem [24]:

- Ter acesso aos dados necessários do operador de rede para funcionar corretamente, incluindo as leituras dos contadores;
- Fornecer ao operador de rede a quantidade de energia partilhada com cada membro do autoconsumo, ou o respetivo coeficiente de partilha, para dedução do consumo medido nos equipamentos de medição;
- Garantir a interoperabilidade com os sistemas do operador da rede, fornecendo aos interessados os requisitos necessários para tal.

Se a partilha de energia afetar a faturação de cada autoconsumidor, o operador de rede realizará a comunicação durante o período de faturação subsequente à sua aceitação. Se não houver comunicação disponível, o responsável pela rede divide o consumo de eletricidade de cada instalação individualmente, usando a medição realizada em intervalos de 15 minutos, de acordo com as regras definidas pela regulamentação da ERSE [24].

2.2.3 Enquadramento Legal a Nível europeu

Com o objetivo de promover o crescimento da utilização de energia elétrica renovável, de modo a combater-se as alterações climáticas foi reformulada a Diretiva (UE) 2018/2001 [26] que revoga a legislação anterior (Diretiva 2009/28/CE [27], Diretiva (UE) 2015/1513 [28] e Diretiva 2013/18/UE do Conselho [29]). A diretiva pretende reduzir a dependência energética da UE, contribuir para a liderança industrial e tecnológica da UE e ambiciona a criação de emprego, bem como o desenvolvimento de zonas rurais e isoladas [26].

A Diretiva (UE) 2018/2001 [26], de 11 de dezembro de 2018, é a primeira diretiva europeia que regula o autoconsumo e que define vários conceitos, entre os quais: autoconsumidores de energia renovável que operam coletivamente e, ainda, de CER.

2.2.4 Enquadramento Legal em Portugal

Em Portugal, a produção descentralizada de energia elétrica através de unidades de produção para autoconsumo é regulada pelo Decreto-lei n.º 15/2022, de 14 de janeiro, que estabelece [30]:

- Promover o AC de energia renovável, definindo as regras para a produção de energia associada às IU do autoconsumidor de energia renovável.

- CER, que parcialmente transpõe a Diretiva (UE) 2018/2001 [26], relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis.

O Decreto-lei n.º 15/2022 [31], de 14 de janeiro, vem deste modo dar cumprimento ao estabelecido na Diretiva (UE) 2018/2001 [26]. Este decreto visa promover e facilitar o AC de energia renovável e as CER, eliminando obstáculos legais injustificados e criando condições para o estabelecimento de soluções inovadoras.

De acordo com a legislação em vigor, para a instalação de um ou mais UPAC (seja ACI, ACC ou CER), é necessário efetuar um procedimento de licenciamento. Este procedimento está sujeito a diferentes regras que dependem da potência a instalar, estando estas presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Condições de acesso por potência instalada [25]

Potência instalada	**Condições acesso** (com ou sem injeção de excedentes)
$\leq$ 700 W	Isenta de controlo prévio (sem injeção de excedente na RESP)
> 700 W e $\leq$ 30 kW	Comunicação prévia
> 30 kW e $\leq$ 1 MW	Registo prévio e certificado de exploração
> 1 MW	Licença de produção e de exploração

2.3 Conclusões

Em suma, esta revisão bibliográfica contribuiu para a obtenção de um conhecimento mais aprofundado sobre a produção da energia solar fotovoltaica. Foi possível perceber que o correto funcionamento das centrais PV está dependente tanto das características dos seus componentes como de fatores externos, sendo esses a irrandiância, a temperatura dos módulos PV, o sombreamento e a sujidade nos painéis PV. Além disso, verificou-se que a tecnologia fotovoltaica continua em constante evolução, sempre com o objetivo de aumentar a eficiência dos módulos PV e reduzir o seu custo. Finalmente, foram explorados os conceitos de autoconsumo e de CER, e também foi estudado o seu enquadramento legal.

Capítulo 3

Otimização e Desenvolvimento de *Software*

Neste capítulo será explicado o funcionamento da ferramenta utilizada pela **Ecoinside** no apoio ao dimensionamento de instalações fotovoltaicas. Esta ferramenta está implementada em *Visual Basic for Applications* (VBA), no Excel, utilizando um processo iterativo que também será explicado neste capítulo. Serão ainda apresentadas algumas alterações realizadas nesta ferramenta, de modo a otimizar e a melhorar a mesma.

Para além das melhorias efetuadas na ferramenta da **Ecoinside**, também foi desenvolvida outra ferramenta em VBA, que permite analisar e verificar o perfil de consumo dos clientes, através da leitura dos seus diagramas de carga.

Na última parte deste capítulo será explicado o processo de desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de uma CER, também em VBA. Esta ferramenta permite obter como resultado as tarifas evitadas, o valor de poupança (com a instalação da UPAC) e o lucro da venda à rede, o que permite realizar uma análise relativamente à viabilidade económica do projeto.

De salientar que para todas as ferramentas descritas no presente documento são necessários os diagramas de carga dos clientes, que são documentos Excel que refletem os consumos dos clientes. Desta forma, cada documento corresponde a um mês de consumos e inclui um conjunto de parâmetros, sendo que os valores de potência ativa são os únicos relevantes para as ferramentas descritas no presente trabalho. Além do referido anteriormente, convém salientar que os consumos são apresentados em períodos de 15 em 15 minutos.

3.1 Funcionamento da Ferramenta da Ecoinside

Tal como referido anteriormente, em primeiro lugar irá ser feito um enquadramento do funcionamento da ferramenta utilizada pela **Ecoinside**, para o dimensionamento de centrais fotovoltaicas de acordo com as necessidades de cada cliente.

O funcionamento desta ferramenta está dependente de informação relativa a diagramas de carga e irradiâncias, que necessitam de sofrer um tratamento antes de serem introduzidos na simulação, cujo processo será explicado detalhadamente na secção 4.2.1. Contudo, no caso de o cliente não possuir diagramas de carga, é possível realizar o procedimento sem a utilização dos mesmos, porém os resultados obtidos não serão tão exatos.

3.1.1 Introdução de Dados

Na primeira fase da simulação da ferramenta, é necessária a introdução de informações relativas ao projeto, sendo que a ferramenta inicia um formulário para o utilizador inserir os seguintes dados:

- Definição do período horário;
- Unidades dos diagramas de carga (W ou kW);
- Número de meses em estudo;
- Data inicial dos diagramas de carga;
- Número de orientações em estudo.

Interessa realçar que, relativamente ao primeiro parâmetro, esta ferramenta está preparada para realizar uma simulação para 7 casos diferentes, cada qual com um período horário específico, sendo estes:

- Portugal continental: todos os fornecimentos;
- Portugal continental: ciclo opcional para muito alta tensão (MAT), alta tensão (AT) e média tensão (MT);
- Portugal continental: fornecimentos em baixa tensão especial (BTE) e baixa tensão nominal (BTN);
- Madeira: todos os fornecimentos;
- Madeira: fornecimentos em AT, MT e BTE;
- Açores: todos os fornecimentos;
- Açores: fornecimentos em MT e BTE.

Após o utilizador concluir o formulário anterior, a ferramenta inicia um conjunto de janelas que permite ao utilizador escolher a localização dos documentos relativos aos diagramas de carga. Com os documentos dos diagramas de carga importados, a ferramenta inicia outra janela para a importação dos documentos da radiância, sendo que esta janela é iniciada o mesmo número de vezes que o valor inserido no parâmetro "número de orientações em estudo", presente no formulário anterior.

Concluída a importação de todos os documentos necessários, a ferramenta inicia outro formulário cujo conteúdo está presente na Tabela 3.1. Neste, o utilizador deverá introduzir informação relativa ao painel fotovoltaico escolhido, e também deverá inserir os valores das tarifas de energia do cliente. Para além destes parâmetros, o formulário também contém algumas variáveis financeiras, que tal como se pode observar pela Tabela 3.1, já estão preenchidas, apesar de poderem ser alteradas pelo utilizador caso seja necessário. Relativamente ao parâmetro da taxa interna de retorno (TIR), este será abordado na seguinte secção do presente documento.

Tabela 3.1: Dados inseridos pelo utilizador

Dados instalação		**Tarifas**
Potência de cada painel (kW)		Ponta
Eficiência de cada painel (%)		Cheia
Área de cada painel (m^2)		Vazio
Perdas dos painéis (%)		Super Vazio
Garantia do fabricante dos painéis (anos)		Potência de Hora de Ponta
Perdas a considerar no sistema (%)	14	Tarifa de venda à rede
Margem do cliente (%)	10	
Seguro (%)	1	
Inflação (%)	2.5	
Custo de capital (%)	8	
Custo médio ponderado de capital do cliente (%)	4	
Taxa mínima de TIR (%)	10	
Limite de energia injetada (%)	30	
Operação e manutenção (€) ou (%)	7 (%)	
Preço por watt-pico (€/Wp)	1	

Para finalizar esta etapa, a ferramenta solicita ao utilizador, para cada orientação simulada, informação sobre a área máxima de implantação dos painéis PV e também o número mínimo de painéis a considerar. Este último parâmetro é importante pois permite anular ciclos de iteração e assim reduzir o tempo de simulação da ferramenta [32].

3.1.2 Processo Iterativo

Esta é a etapa de processamento da ferramenta e tem como principal objetivo determinar o número de painéis fotovoltaicos a serem instalados no local, considerando as condições previamente definidas.

Em primeiro lugar, é realizada uma sincronização entre os valores dos consumos do cliente (provenientes dos diagramas de carga) e das irradiâncias, em intervalos de 15 minutos. Para otimizar o processamento da ferramenta, apenas são considerados os períodos entre o nascer e o pôr do sol, visto que não há produção de energia solar fora destes períodos. Para além da sincronização referida anteriormente, também são sincronizadas as tarifas associadas ao cliente, igualmente em intervalos de 15 minutos [32].

Após o procedimento anterior, inicia-se um processo iterativo relativo ao número de painéis PV a instalar, baseado numa análise técnica e financeira para o período de um ano. Neste ciclo, são analisados os valores de consumo e de irradiância, em períodos de 15 minutos, e é registado o comportamento do número (iterado) dos painéis. Em cada registo são armazenados os valores de benefício da energia autoconsumida e de energia injetada (para o número de painéis iterado). No ciclo seguinte, a ferramenta considera os valores de benefício e custo anteriores e calcula o fluxo de caixa para os anos de garantia estipulados. Seguidamente, é realizada uma comparação com o melhor caso identificado até à presente iteração e a ferramenta avança para a iteração seguinte com os valores do caso mais vantajoso [32].

O processo iterativo percorre todas as opções disponíveis, dentro dos limites definidos pelo utilizador, na etapa de introdução de dados. Esta ferramenta realiza uma análise para cada orientação, individualmente, iniciando na primeira e percorrendo todas as iterações de um determinado número de painéis PV, até alcançar a área máxima definida para essa orientação. Após definido o número ideal de painéis para a primeira orientação, a ferramenta inicia o processo de cálculos para a orientação seguinte, porém, é subtraído o valor de energia autoconsumida (da melhor solução) da orientação anterior ao valor de energia consumida, em cada registo. Caso a ferramenta verifique que não é vantajoso instalar painéis PV numa determinada orientação, esta é ignorada. No final, é determinado o número total de painéis PV a instalar, somando-se o resultado obtido para cada uma das orientações em análise [32].

Por fim, a ferramenta realiza o processo de cálculos financeiros, relativos ao número total de painéis PV instalados, que serão apresentados na seguinte secção do presente documento.

3.2 Atualizações na Ferramenta da Ecoinside

Tal como referido anteriormente, nesta secção serão explicadas as alterações efetuadas na ferramenta utilizada pela **Ecoinside** para o apoio no dimensionamento de instalações PV. Os principais objetivos destas modificações foram a otimização da ferramenta e a redução do tempo investido pelos utilizadores na utilização da mesma. Para além do mais, as alterações foram importantes para compreender o funcionamento desta ferramenta e também para aperfeiçoar os conhecimentos da linguagem VBA, obtidos previamente.

3.2.1 Formato de Vendas

Numa primeira fase de adaptação ao código, foi proposto efetuar alterações relativas à apresentação final da ferramenta, para que esta vá ao encontro do pretendido pelo departamento comercial. Estas alterações foram importantes para a melhoria do aspeto visual dos elementos reproduzidos pela ferramenta, tais como tabelas e gráficos, de modo que estes sejam apresentados devidamente ao cliente. No que se refere às tabelas, foi efetuado o seguinte:

- ajustar o tamanho;
- centrar valores;

- remover as grelhas do Excel;
- alterar títulos específicos;
- formatar a apresentação dos valores;
- ocultar tabelas auxiliares.

Por outro lado, tanto as folhas que contêm os gráficos como os próprios gráficos também sofreram alterações. Assim, os gráficos sofreram um ajuste de tamanho e o código da ferramenta associado à criação dos mesmos teve de ser alterado para poderem ler valores de tabelas ocultas.

Por fim, foram ocultadas algumas páginas que não são necessárias para a apresentação final ao cliente e também foram reordenadas as páginas.

3.2.2 Atualização Automática do Orçamento

Para além das alterações referidas anteriormente, foi também acrescentado um processo de automatização relativo aos cálculos de cariz financeiro. A ferramenta da **Ecoinside** realiza os cálculos financeiros com valores estimados de investimento inicial e de custos de operação e manutenção e, por esse motivo, é necessário introduzir os valores reais dos mesmos e proceder-se aos respetivos cálculos. Na Figura 3.1 está representada a tabela criada pela ferramenta com todos os valores financeiros, contudo, serão os valores de operação e manutenção (O&M), benefício de venda à rede, *cash flow* e *cash flow acumulado* a sofrer as devidas atualizações. De notar que cada linha da tabela da Figura 3.1 corresponde a 1 ano de contrato, sendo que o limite da simulação são 25 anos.

Ano	Produção p/ Autoconsumo (kWh)	Produção p/ Venda à Rede (kWh)	Tarifa Evitada	Seguro	O&M	Benefício da Venda à Rede	Benefício do Consumo Interno	Cash Flow	Cash Flow Acumulado
1	104 642	55 463	0,1127 €	140 €	685 €	0 €	11 794 €	10 969 €	-61 332 €
2	102 549	54 354	0,1155 €	143 €	702 €	0 €	11 847 €	11 002 €	-50 330 €
3	101 985	54 055	0,1184 €	146 €	720 €	0 €	12 077 €	11 211 €	-39 119 €
4	101 424	53 758	0,1214 €	148 €	738 €	0 €	12 310 €	11 424 €	-27 694 €
5	100 866	53 462	0,1244 €	151 €	756 €	0 €	12 549 €	11 641 €	-16 053 €
6	100 311	53 168	0,1275 €	154 €	775 €	2 406 €	12 792 €	14 268 €	-1 784 €
7	99 759	52 876	0,1307 €	157 €	794 €	2 453 €	13 039 €	14 541 €	12 756 €
8	99 211	52 585	0,1340 €	160 €	814 €	2 500 €	13 292 €	14 818 €	27 574 €
9	98 665	52 296	0,1373 €	163 €	835 €	2 549 €	13 549 €	15 100 €	42 674 €
10	98 122	52 008	0,1408 €	167 €	855 €	2 598 €	13 812 €	15 388 €	58 062 €
11	97 583	51 722	0,1443 €	170 €	877 €	2 648 €	14 079 €	15 681 €	73 742 €
12	97 046	51 437	0,1479 €	173 €	899 €	2 700 €	14 352 €	15 979 €	89 722 €
13	96 512	51 155	0,1516 €	176 €	921 €	2 752 €	14 630 €	16 284 €	106 006 €
14	95 982	50 873	0,1554 €	180 €	944 €	2 805 €	14 913 €	16 594 €	122 599 €
15	95 454	50 593	0,1593 €	183 €	968 €	2 859 €	15 202 €	16 910 €	139 509 €
16	94 929	50 315	0,1632 €	187 €	992 €	2 915 €	15 496 €	17 232 €	156 741 €
17	94 407	50 038	0,1673 €	190 €	1 017 €	2 971 €	15 796 €	17 560 €	174 301 €
18	93 887	49 763	0,1715 €	194 €	1 042 €	3 029 €	16 102 €	17 894 €	192 195 €
19	93 371	49 489	0,1758 €	198 €	1 068 €	3 087 €	16 414 €	18 235 €	210 430 €
20	92 857	49 217	0,1802 €	202 €	1 095 €	3 147 €	16 731 €	18 582 €	229 012 €
21	92 347	48 947	0,1847 €	206 €	1 122 €	3 208 €	17 055 €	18 935 €	247 947 €
22	91 839	48 677	0,1893 €	210 €	1 151 €	3 270 €	17 386 €	19 296 €	267 243 €
23	91 334	48 410	0,1940 €	214 €	1 179 €	3 334 €	17 722 €	19 663 €	286 906 €
24	90 831	48 143	0,1989 €	218 €	1 209 €	3 398 €	18 065 €	20 037 €	306 942 €
25	90 332	47 879	0,2039 €	222 €	1 239 €	3 464 €	18 415 €	20 418 €	327 361 €

Figura 3.1: Exemplo da tabela com valores financeiros

Para se automatizar este processo de cálculos, foi efetuada uma alteração na ferramenta para que esta adicione um botão na mesma página que é gerada a tabela da Figura 3.1, no final da simulação. Após o clique do utilizador nesse botão, a ferramenta inicia um conjunto de menus

que devem ser preenchidos com os valores requisitados. O primeiro menu solicita ao utilizador o valor real do investimento inicial e apresenta o formato da Figura 3.2. Relativamente ao segundo menu, este é referente ao valor real dos custos de O&M e apresenta o formato da Figura 3.3.

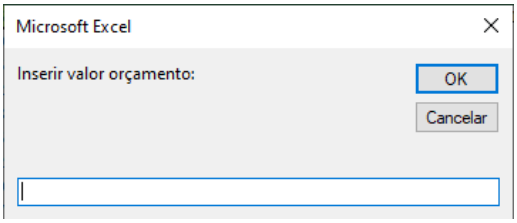


Figura 3.2: Introdução valor de orçamento

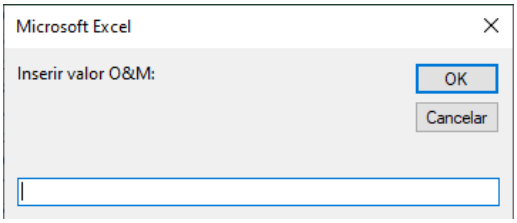


Figura 3.3: Introdução valor de O&M

Para além dos menus referidos anteriormente, a ferramenta também solicita ao utilizador informações sobre o tipo de contrato realizado com o cliente, apresentando os menus das Figuras 3.4 e 3.5. No que diz respeito aos custos de operação e manutenção, há a possibilidade de a **Ecoinside** os assumir durante um determinado período de tempo e, por esse motivo, os valores apresentados na tabela da Figura 3.1 serão nulos. Por outro lado, caso a obra seja sustentada por algum tipo de apoio externo (como por exemplo um fundo ambiental), a venda à rede será vetada por um determinado período de tempo. Por esse motivo, os valores de benefício de venda à rede apresentados na tabela da Figura 3.1 serão nulos, durante o período inserido pelo utilizador na ferramenta.

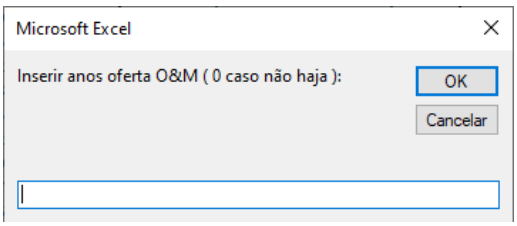


Figura 3.4: Introdução número de anos oferta O&M

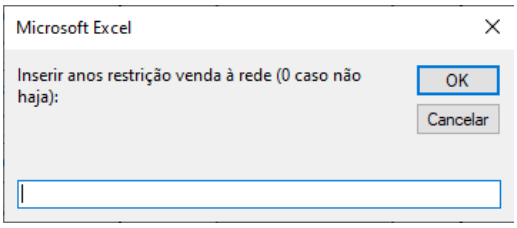


Figura 3.5: Introdução número de anos com restrição de venda à rede

Após o utilizador inserir todos os valores necessários, a ferramenta inicia o processo de cálculo e de atualização da tabela referida previamente. A primeira coluna a ser alterada é relativa aos custos de O&M e, tal como referido anteriormente, em primeiro lugar verifica se há oferta por parte da **Ecoinside**. Posto isto, cada linha da tabela (exceto o primeiro valor não nulo, caso haja) obedece à Equação 3.1.

$$O\&M = O\&M_{\,ano\ anterior} \cdot 2.5\% \tag{3.1}$$

A segunda coluna a ser atualizada é do benefício de venda à rede e apenas é alterada no caso de haver algum tipo de restrição.

Posteriormente, a ferramenta atualiza a coluna referente ao *cash flow*, também conhecido como fluxo de caixa, uma medida financeira que indica a quantidade de dinheiro que entra e sai de

uma empresa durante um determinado período de tempo. Os valores desta coluna são calculados através da Equação 3.2.

$$Cash\ flow = Benefício\ do\ consumo\ interno + Benefício\ da\ venda\ à\ rede - O\&M - Seguro \quad (3.2)$$

Seguidamente, é a coluna relativa ao *cash flow acumulado* a sofrer as modificações, sendo que este parâmetro é referente ao valor total de entrada e saída de dinheiro ao longo de um determinado período de tempo. O valor do primeiro ano obedece à Equação 3.3, porém, os restantes valores são calculados através da Equação 3.4.

$$Cash\ flow\ acumulado = Cash\ flow - Investimento\ inicial \quad (3.3)$$

$$Cash\ flow\ acumulado = Cash\ flow\ acumulado_{\ ano\ anterior} + Cash\ flow \quad (3.4)$$

Após todas as colunas da tabela sofrerem as devidas atualizações, a ferramenta realiza outro processo de cálculo financeiro, apresentando os resultados numa outra página, com o formato da Figura 3.6.

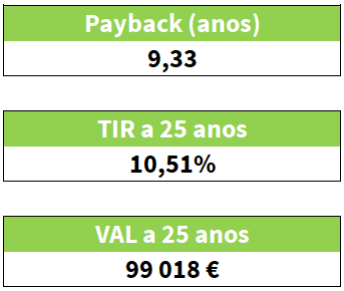


Figura 3.6: Exemplo de apresentação dos resultados

O primeiro cálculo que a ferramenta realiza é relativo à TIR, que é uma medida financeira utilizada para avaliar a rentabilidade do investimento. Esta medida representa a taxa de juro que iguala o valor presente dos fluxos de caixa de um investimento ao custo investido inicialmente, sendo que para o cálculo da mesma é utilizada a função "TIR" integrada no Excel. Os parâmetros necessários para esta função são o valor de investimento inicial e os valores de *cash flow* de cada um dos 25 anos.

Em segundo lugar, a ferramenta calcula o valor do *payback*, que representa o tempo necessário para o cliente recuperar o investimento inicial aplicado no projeto. Neste caso particular, é necessário que a ferramenta analise os valores de *cash flow acumulado* e encontre o primeiro valor positivo (seguindo a ordem crescente do número dos anos). Após a ferramenta encontrar o valor referido anteriormente, aplica a Equação 3.5 à linha do ano correspondente, e é obtido o valor do *payback* em anos.

$$Payback = Ano\ anterior + Cash\ flow\ acumulado_{\ ano\ anterior} \cdot \frac{-1}{Cash\ flow} \tag{3.5}$$

Por fim, a ferramenta também realiza o cálculo do Valor Atualizado Líquido (VAL), que é um indicador utilizado para determinar a viabilidade do projeto. O VAL consiste na soma de todas as entradas e saídas de dinheiro durante a vida útil de um projeto, atualizada para o período atual através de uma taxa de desconto. Tal como no caso da TIR, o VAL também é calculado através de uma função integrada no Excel, que tem como parâmetros o valor de investimento inicial, os valores de *cash flow* de cada um dos 25 anos e a taxa de desconto que, neste caso, é de 4%.

3.2.3 Inclusão das Folhas de Financiamento Externo

Para finalizar as alterações na ferramenta, foram adicionadas folhas Excel (previamente formatadas) que a **Ecoinside** utiliza para análise financeira, no caso de a obra ter um financiamento externo. Foi ainda adicionado um botão à ferramenta que ativa as folhas inseridas e permite o preenchimento das mesmas com valores obtidos na simulação. Um exemplo destas folhas Excel está representado na Figura 3.7.

B	C	D	E	F
Investimento Inicial (€)		Ano	Produção Injetada no cliente (kWh)	Produção Injetada na Rede (kWh)
		1		
Tarifa evitada (€/kWh)		2		
		3		
Tarifa -10% Mibel (€/kWh)		4		
		5		
Custo O&M 1º ano		6		
		7		
		8		
		9		
		10		
		11		
		12		
		13		
		14		
		15		
		16		
		17		
		18		
		19		
		20		
		21		
		22		
		23		
		24		
		25		

Figura 3.7: Exemplo de página de financiamento externo

Por fim, também foi adicionada uma outra propriedade à ferramenta que permite a criação de um botão de "Reset" na sua página principal. Este botão permite ao utilizador realizar uma nova simulação e, na prática, elimina todas as páginas com valores da simulação e elimina os valores da simulação inseridos nas folhas Excel anexadas.

3.3 Desenvolvimento da Ferramenta para Análise de Consumos

Para além das alterações realizadas na ferramenta da **Ecoinside**, foi também proposto o desenvolvimento de uma ferramenta que permitisse realizar uma análise e verificação dos consumos dos clientes. Deste modo, o objetivo principal desta ferramenta é permitir ao utilizador examinar os diagramas de carga dos clientes, e confirmar se os mesmos vão de encontro do esperado.

Em primeiro lugar, a ferramenta apresenta um botão na página principal que permite ao utilizador converter os valores de consumos do cliente (presentes nos documentos dos diagramas de carga) para o formato de "número". Esta propriedade é importante visto que a E-redes e outros exploradores da rede elétrica apresentam os documentos numa formatação personalizada, impossibilitando a leitura dos seus valores por parte das respetivas ferramentas. Assim sendo, após o clique do utilizador no botão, a ferramenta inicia uma janela onde é possível selecionar os documentos Excel relativos aos diagramas de carga. Posto isto, todos os valores de potência ativa de consumo são convertidos para o formato correto (em cada um dos documentos Excel).

Desta forma, o utilizador clica num segundo botão, presente na página principal, e a ferramenta inicia um formulário com o formato da Figura 3.8. Neste formulário, o utilizador deverá inserir a data de início dos diagramas de carga, as unidades dos mesmos e também o número de meses em estudo.

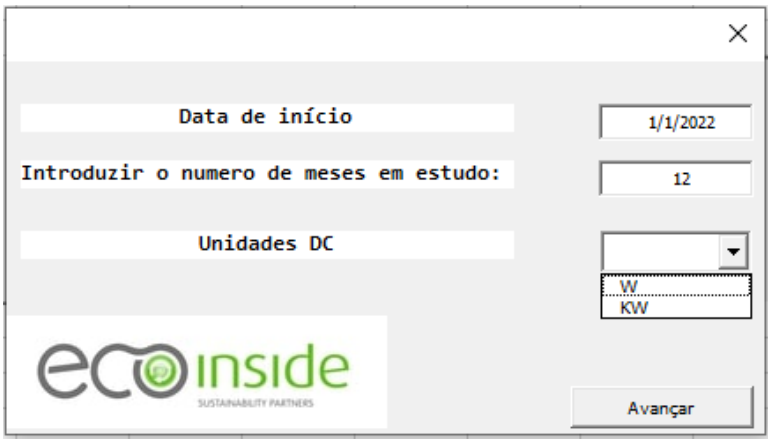


Figura 3.8: Formulário inicial da ferramenta

Tal como referido anteriormente, o objetivo principal da ferramenta é permitir uma análise dos diagramas de carga e, para tal, é necessário haver a importação dos mesmos. Para tal, a ferramenta inicia uma janela para o utilizador escolher a localização dos respetivos documentos e, após a seleção destes documentos Excel, a ferramenta exibe um formulário com o formato apresentado na Figura 3.9.

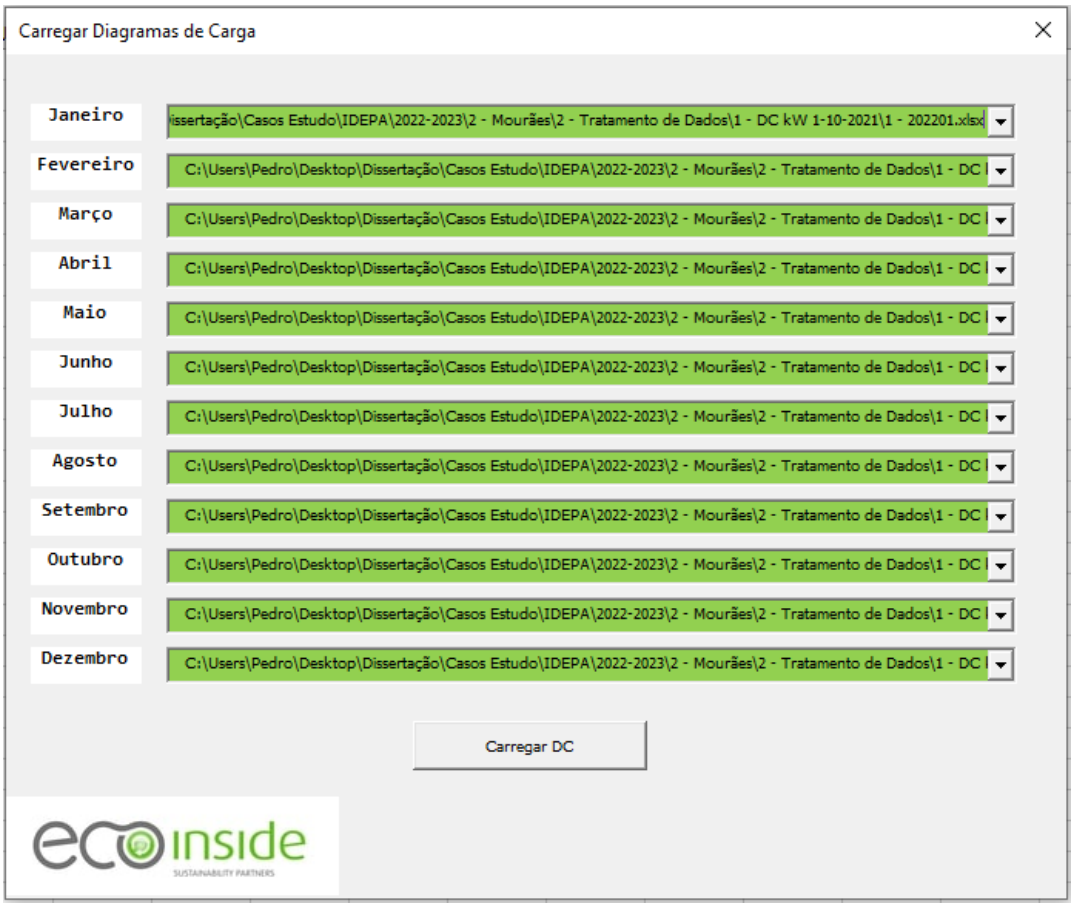


Figura 3.9: Formulário com os diagramas de carga de todos os meses

Após o procedimento anterior, a ferramenta cria uma página Excel com o nome de cada mês do conjunto de diagramas de carga. Em cada uma destas páginas é formada uma matriz com os valores de consumo, em que cada linha corresponde a um dia do mês e cada coluna corresponde a um valor horário. Após terminar o processo de elaboração de todas as páginas, a ferramenta apresenta duas mensagens informativas ao utilizador, sendo estas as das Figuras 3.10 e 3.11. Estas duas mensagens têm a função de informar o utilizador sobre o funcionamento da ferramenta.

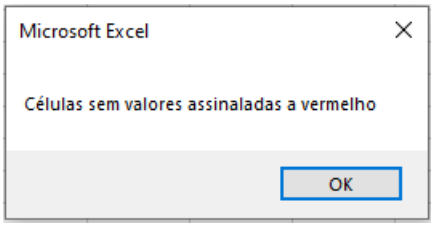


Figura 3.10: Primeira mensagem apresentada ao utilizador

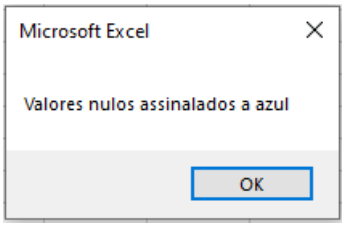


Figura 3.11: Segunda mensagem apresentada ao utilizador

Posteriormente, a ferramenta percorre todas as páginas criadas e realiza uma análise a cada uma das matrizes. Esta análise consiste em verificar se cada matriz tem o tamanho correto, isto é, se o número de valores extraídos dos diagramas de carga corresponde ao esperado e, ainda, se existem valores de consumo nulos.

Após todo este processo, são apresentadas mensagens ao utilizador indicando o número total de células sem valores e o número total de valores nulos, por mês, caso estes se verifiquem. Nas Figuras 3.12 e 3.13 estão apresentados dois exemplos dessas mensagens.

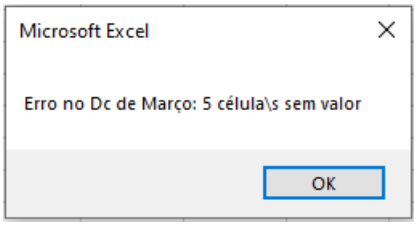


Figura 3.12: Mensagem com o número de células sem valor

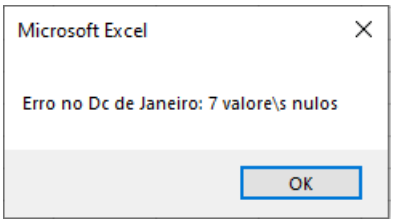


Figura 3.13: Mensagem com o número de células com valor nulo

Para além do mencionado anteriormente, a ferramenta também cria um gráfico de consumo de energia para cada mês, como o apresentado na Figura 3.14. Para a realização deste gráfico são somados todos os valores de potência, por dia, e é aplicada a Equação 3.6 para o caso da unidade dos diagramas de carga ser quilowatt, ou a Equação 3.7 para o caso da unidade ser watt.

$$Energia\ consumida = \frac{Total\ potência\ consumida}{4} \tag{3.6}$$

$$Energia\ consumida = \frac{Total\ potência\ consumida}{4 \cdot 1000} \tag{3.7}$$

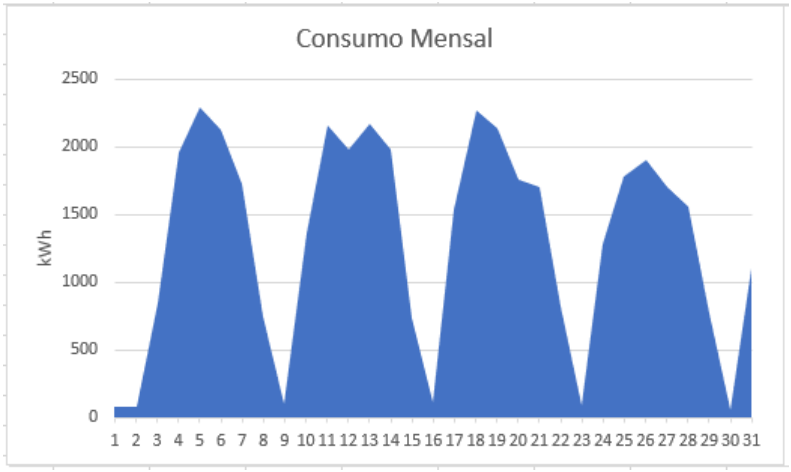


Figura 3.14: Consumo mensal de energia (kWh)

Finalmente, a ferramenta adiciona uma nova folha com os valores totais de consumo de cada mês e aplica novamente a Equação 3.6 ou a Equação 3.7, de modo a gerar um gráfico com o consumo anual de energia, como o exemplo da Figura 3.15.

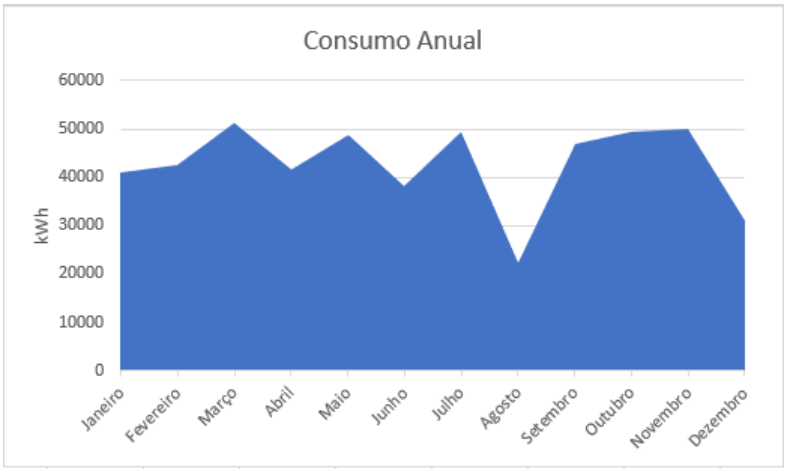


Figura 3.15: Consumo anual de energia (kWh)

3.4 Desenvolvimento da Ferramenta para CER

Nesta secção será explicado o processo de funcionamento da ferramenta desenvolvida em VBA, para o apoio ao dimensionamento de uma CER, cujo objetivo é obter os valores das tarifas evitadas, o valor da poupança com a instalação da UPAC e o valor do lucro com a venda à rede.

Tal como referido anteriormente, esta ferramenta necessita da leitura dos diagramas de carga do cliente e, para além disso, também necessita da introdução dos valores de energia produzida pela UPAC (também de 15 em 15 minutos), que são fornecidos pela ferramenta da **Ecoinside**, sendo que o período da simulação realizada deve coincidir com o mesmo dos diagramas de carga.

Por fim, de referir que o processo de cálculo foi dividido em várias partes de modo a aliviar a operação computacional e para facilitar a alteração de valores no caso de ser necessário algum tipo de atualização.

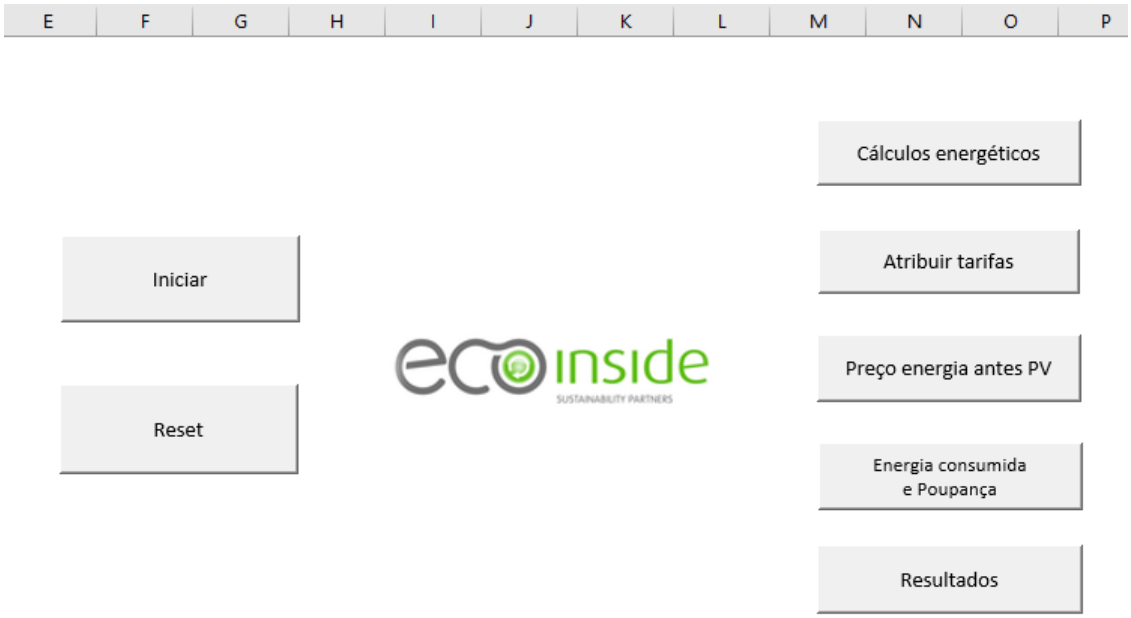


Figura 3.16: Página principal da ferramenta

3.4.1 Introdução de Dados

Em primeiro lugar, será necessária a recolha de alguns dados relativos à CER em análise. Após o utilizador clicar no botão "Iniciar", irá começar a simulação da ferramenta com a apresentação de um formulário com o formato da Figura 3.17. Este formulário contém um conjunto de parâmetros que devem ser preenchidos pelo utilizador, sendo estes:

- Data inicial dos diagramas de carga;
- Data final dos diagramas de carga;
- Número de CPE's;
- Tipo de coeficientes;
- Localização da CER.

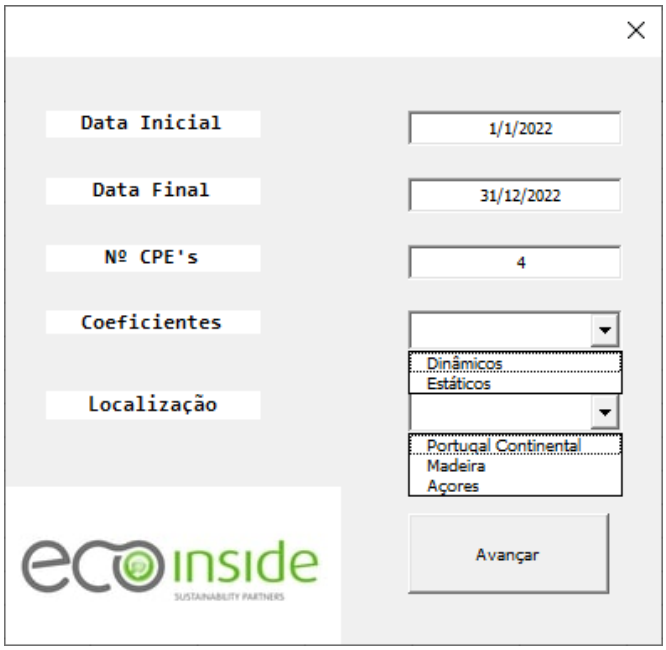


Figura 3.17: Formulário inicial

No que diz respeito aos parâmetros "Coeficientes" e "Localização", tal como se pode observar na Figura 3.17, o utilizador deverá selecionar uma das opções apresentadas. Relativamente ao parâmetro "Coeficientes", o utilizador poderá selecionar a opção "Dinâmicos" ou "Estáticos", cujas diferenças serão explicadas numa fase posterior do presente documento. A "Localização", tal como o nome indica, é referente ao local de instalação da CER, sendo esta necessidade também explicada posteriormente.

Após a introdução dos dados no primeiro formulário, a ferramenta irá apresentar tantos formulários quanto o número inserido no parâmetro "Nº CPE's". Estes formulários são referentes a cada CPE e devem ser preenchidos com o nome da entidade que possui o CPE, o seu código e as unidades dos diagramas de carga (kW ou W). No caso de ter sido selecionada a opção de coeficientes "Estáticos", há necessidade de o utilizador também inserir a percentagem estipulada de partilha de energia produzida pela UPAC. Nas Figuras 3.18 e 3.19 estão representados os formatos dos formulários para o caso de coeficientes "Dinâmicos" e "Estáticos", respetivamente.

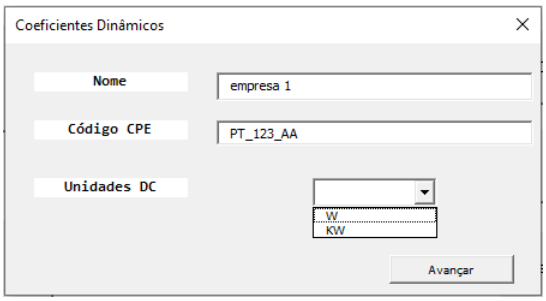


Figura 3.18: Formulário coeficientes dinâmicos

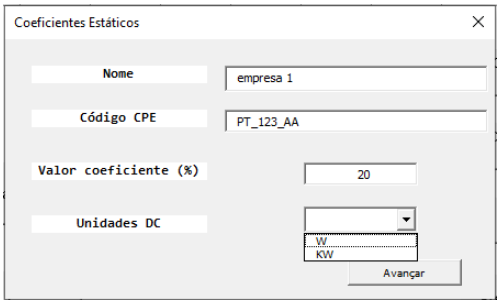


Figura 3.19: Formulário coeficientes estáticos

Após o utilizador clicar no botão "Avançar" destes formulários, a ferramenta irá abrir uma janela que permite a seleção dos documentos Excel referentes aos diagramas de carga. Depois da seleção dos diagramas de carga, será criada uma página com os valores da energia consumida em intervalos de 15 minutos, para o intervalo de dados escolhido no formulário da Figura 3.17. Caso o utilizador selecione a opção "kW" no formulário do CPE, os valores de energia consumida obedecem à Equação 3.8, no entanto, se o utilizador selecionou a opção "W", os valores de energia obedecem à Equação 3.9.

$$Energia\ consumida_{\ 15\ min.} = \frac{Potência\ consumida}{4} \tag{3.8}$$

$$Energia\ consumida_{\ 15\ min.} = \frac{Potência\ consumida}{4 \cdot 1000} \tag{3.9}$$

Para além do descrito anteriormente, a ferramenta também calcula o valor total do consumo energético da CER, em intervalos de 15 minutos. Na Figura 3.20 é possível observar-se um exemplo do descrito anteriormente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Dia	Mês	Hora	empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4		
2				PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD		Total
3	1	1	00:00	0,47	0,03	0,14	0,20		0,85
4	1	1	00:15	0,42	0,07	0,13	0,11		0,73
5	1	1	00:30	0,40	0,06	0,13	0,11		0,71
6	1	1	00:45	0,41	0,06	0,13	0,11		0,71
7	1	1	01:00	0,44	0,06	0,15	0,11		0,76
8	1	1	01:15	0,44	0,06	0,15	0,11		0,75
9	1	1	01:30	0,44	0,06	0,15	0,11		0,75
10	1	1	01:45	0,49	0,05	0,15	0,11		0,80
11	1	1	02:00	0,43	0,05	0,13	0,11		0,72
12	1	1	02:15	0,41	0,05	0,13	0,11		0,70
13	1	1	02:30	0,45	0,05	0,15	0,11		0,75
14	1	1	02:45	0,38	0,05	0,14	0,11		0,67
15	1	1	03:00	0,43	0,04	0,15	0,11		0,73
16	1	1	03:15	0,47	0,04	0,15	0,11		0,78
17	1	1	03:30	0,45	0,04	0,15	0,11		0,75
18	1	1	03:45	0,44	0,04	0,13	0,11		0,72
19	1	1	04:00	0,41	0,04	0,15	0,11		0,70

Figura 3.20: Exemplo valores de energia consumida (kWh)

Para finalizar o processo de introdução de dados, é necessário inserir os elementos referentes ao tarifário, numa página específica da ferramenta. Estes valores podem ser consultados na fatura de eletricidade associada a cada CPE. Além disso, também é necessário introduzir um valor aproximado da tarifa do Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL), que é o valor estabelecido para a venda de energia à rede.

Na Figura 3.21 está representado um exemplo de preenchimento dos dados necessários relativos ao tarifário.

	A	B	C	D	E	F
1			empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4
2			PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD
3			Semanal-Portugal Cont.	Simples	Semanal-Portugal Cont.	Diário-Portugal Cont.
4		Simples		0,1654		
5	Preço	Ponta	0,105579		0,20723	0,120471
6	indexado	Cheia	0,105579		0,1945	0,120471
7	(€)	Vazio	0,105579		0,16831	0,120471
8		SuperVazio				0,120471
9		Simples		-0,00066046		
10	Mecanismo	Ponta			-0,00045	
11	Ajuste	Cheia			-0,00088	
12	(€)	Vazio			-0,0028	
13		SuperVazio				
14		Simples				
15	Acesso	Ponta	0,0601		0,0601	-0,0479
16	Redes	Cheia	-0,0449		-0,0449	-0,0492
17	(€)	Vazio	-0,0631		-0,0631	-0,0517
18		SuperVazio				-0,0538
19		PHP				0,4854
20		Simples	0	0,16473954	0	0
21	Total	Ponta	0,165679	0	0,26688	0,557971
22	(€)	Cheia	0,060679	0	0,14872	0,071271
23		Vazio	0,042479	0	0,10241	0,068771
24		SuperVazio	0	0	0	0,066671
25	MIBEL (€)		0,08			

Figura 3.21: Exemplo de preenchimento dos dados referentes às tarifas

Além do referido anteriormente, é necessário selecionar a topologia de ciclos de contagem para cada CPE, que também pode ser consultada na fatura de eletricidade do mesmo. Na Figura 3.22 está representada a lista com os diferentes tipos de ciclos de contagem integrados na ferramenta. Esta lista obedece à Figura 3.23, que pertence ao documento da estrutura tarifária do setor elétrico para 2023 [33], desenvolvido pela ERSE.

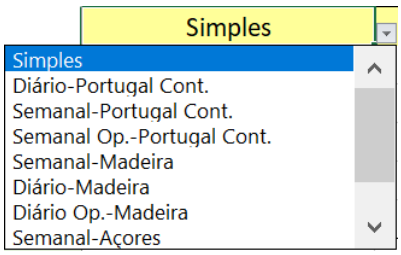


Figura 3.22: Célula com ciclos de contagem

Portugal continental	Região Autónoma dos Açores	Região Autónoma da Madeira
Consumidores em MAT, AT e MT: • Ciclo Semanal • Ciclo Semanal opcional Consumidores em BTE e BTN: • Ciclo Semanal • Ciclo Diário	Consumidores em MT e BTE: • Ciclo Diário • Ciclo Diário opcional Consumidores em BTN: • Ciclo Semanal • Ciclo Diário	Consumidores em AT, MT e BTE: • Ciclo Diário • Ciclo Diário opcional Consumidores em BTN: • Ciclo Semanal • Ciclo Diário

MAT – Muito Alta Tensão; AT – Alta Tensão; MT – Média Tensão; BTE – Baixa Tensão Especial e BTN – Baixa Tensão Normal.

Figura 3.23: Quadro com a tipologia de ciclos de contagem para efeitos de definição dos períodos horários [33]

Cada ciclo de contagem presente na Figura 3.23 tem associado uma estrutura específica de períodos horários, tal como se pode observar na Figura 3.24, o exemplo do ciclo diário para BTE e BTN em Portugal continental.

Ciclo diário para BTE e BTN em Portugal continental			
Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
Ponta:	09.00/10.30 h 18.00/20.30 h	Ponta:	10.30/13.00 h 19.30/21.00 h
Cheias:	08.00/09.00 h 10.30/18.00 h 20.30/22.00 h	Cheias:	08.00/10.30 h 13.00/19.30 h 21.00/22.00 h
Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h	Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h

Figura 3.24: Quadro do ciclo diário para BTE e BTN em Portugal continental em 2023 [33].

Finalmente, a ferramenta cria outra página com colunas referentes às datas dos diagramas de carga (dia, mês e hora), em intervalos de 15 minutos, bem como colunas com a indicação do dia da semana e a estação do ano. Estes valores são necessários para uma atribuição correta dos períodos horários, tal como se pode perceber pelo exemplo da Figura 3.24. Posto isto, a ferramenta também cria 3 colunas referentes à tipologia de ciclos de contagem, de acordo com a Figura 3.23, de acordo com a "Localização" selecionada no primeiro formulário (Figura 3.17). De notar que todos os processos relativos a cálculos (apresentados na próxima secção do presente relatório) serão efetuados nesta mesma página do Excel, e também obedecem aos intervalos de 15 em 15 minutos.

Na Figura 3.25 está representado um exemplo da sincronização de todos os parâmetros referidos anteriormente.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Dia	Mês	Hora	Dia	Estação	Ciclo	Ciclo	Ciclo Sem.
2				Semana	Ano	Diário	Semanal	Opcional
3								
4	1	1	00:00	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
5	1	1	00:15	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
6	1	1	00:30	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
7	1	1	00:45	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
8	1	1	01:00	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
9	1	1	01:15	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
10	1	1	01:30	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
11	1	1	01:45	Sabado	Inverno	Vazio	Vazio	Vazio
12	1	1	02:00	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	Vazio
13	1	1	02:15	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	Vazio
14	1	1	02:30	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	Vazio
15	1	1	02:45	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	Vazio
16	1	1	03:00	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	SuperVazio
17	1	1	03:15	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	SuperVazio
18	1	1	03:30	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	SuperVazio
19	1	1	03:45	Sabado	Inverno	SuperVazio	SuperVazio	SuperVazio

Figura 3.25: Exemplo da sincronização dos períodos horários, para Portugal Continental

3.4.2 Cálculos Iniciais

Após o utilizador preencher e selecionar todos os dados necessários é possível proceder-se ao processo dos cálculos. Em primeiro lugar, é apresentada uma mensagem ao utilizador para inserir na coluna "I" os valores relativos à energia produzida pela UPAC, valores estes simulados pela ferramenta da **Ecoinside**, como mencionado previamente. Após a introdução destes valores, o utilizador deverá voltar à página principal da ferramenta e clicar no botão "Cálculos energéticos" que irá criar 3 colunas adjacentes à "I". As colunas "J" e "K" contêm os valores da energia injetada, sendo a única diferença apenas visual, visto que na coluna "K" os valores "0" estão apresentados como "Autoconsumo" (quando há produção PV), tal como se pode observar na Figura 3.26.

I	J	K	L
PV (kWh) (Inserir)	Energia Injetada (kWh)	Venda à rede (kWh)	PV consumido (kWh)
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0,03891	0	Autoconsumo	0,03891462
0,03891	0	Autoconsumo	0,03891462
0,03891	0	Autoconsumo	0,03891462
2,71927	0,69827	Autoconsumo	2,021
5,39097	3,65297	Autoconsumo	1,738
8,07132	6,37232	Autoconsumo	1,699
10,7192	8,98725	Autoconsumo	1,732

Figura 3.26: Exemplo das colunas relativas aos cálculos energéticos

Contudo, os valores destas colunas serão obtidos com diferentes métodos de cálculo, consoante a seleção do tipo de coeficientes por parte do utilizador no formulário da Figura 3.17.

3.4.2.1 Coeficientes Dinâmicos

No caso de o utilizador selecionar a opção de coeficientes "Dinâmicos", a ferramenta inicia o preenchimento das colunas "J" e "K" da Figura 3.26. Cada célula desta coluna resulta de uma subtração entre os valores da energia produzida pela UPAC (coluna "I") com os valores totais do consumo energético da CER (neste caso, coluna "I" da página da Figura 3.20), sendo que não há valores negativos.

A segunda fase é relativa ao preenchimento da coluna "L" e consiste numa comparação entre os valores da energia produzida pela UPAC com os valores totais do consumo. De facto, as células relativas à energia consumida proveniente da UPAC resultam sempre do menor valor da comparação referida anteriormente.

Para finalizar esta etapa, a ferramenta preenche as colunas relativas aos coeficientes de cada CPE, e apresenta uma tabela semelhante à da Figura 3.27. Estas células obedecem à Equação 3.10 e, tal como os restantes cálculos, estão divididas em intervalos de 15 em 15 minutos.

$$Coeficiente = \frac{Potência\ consumida_{CPE}}{Total\ potência\ consumida_{CER}} \tag{3.10}$$

N	O	P	Q
Coeficientes			
empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4
PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD
10%	33%	47%	10%
10%	31%	48%	10%
11%	32%	46%	11%
10%	31%	48%	10%
11%	30%	48%	11%
10%	33%	47%	10%
11%	26%	52%	11%
10%	31%	48%	10%
10%	33%	47%	10%
10%	35%	45%	10%

Figura 3.27: Exemplo da tabela dos coeficientes dinâmicos

3.4.2.2 Coeficientes Estáticos

Por outro lado, caso o utilizador selecione a opção de coeficientes "Estáticos", a ferramenta começa por atribuir os valores dos coeficientes para cada CPE. Estes valores são coincidentes com os inseridos pelo utilizador no formulário da Figura 3.19, e a tabela resultante apresenta o formato da Figura 3.28.

N	O	P	Q
Coeficientes			
empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4
PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%
15%	15%	40%	30%

Figura 3.28: Exemplo da tabela dos coeficientes estáticos

Seguidamente, a ferramenta procede ao preenchimento das células respetivas à energia consumida proveniente da UPAC (tabela "L" da Figura 3.26). Para obter estes valores, a ferramenta serve-se de uma variável auxiliar que guarda a quantidade de energia da UPAC que cada CPE consome, podendo esta variável ser:

- o valor da multiplicação do coeficiente (do CPE) pelo total de energia produzida pela UPAC;
- o valor do consumo lido no diagrama de carga do CPE, no caso deste ser menor que a multiplicação do coeficiente pelo total de energia produzida pela UPAC.

Depois deste procedimento, a ferramenta insere na coluna "L" o resultado total de energia proveniente da UPAC, consumida pela CER.

Por fim, são preenchidas as colunas "J" e "K", que resultam da subtração dos valores da coluna "I" pelos valores da coluna "L", obtendo-se a energia injetada.

3.4.3 Cálculos Intermédios

Após a conclusão dos procedimentos anteriores, a ferramenta inicia o processo de sincronização das tarifas, de 15 em 15 minutos, para cada CPE. Desta maneira, através dos valores inseridos na página da Figura 3.21 e dos valores da tabela da Figura 3.25, a ferramenta atribui a tarifa correta em cada período de 15 minutos. Para além disso, este procedimento só é realizado se o utilizador tiver atribuído todos os ciclos de contagem, sendo ainda capaz de distinguir entre a tarifa tri-horária e tetra-horária (para o caso dos ciclos diário, semanal e semanal opcional). O resultado desta sincronização é uma tabela semelhante ao exemplo da Figura 3.29 e, como se pode observar, os valores das tarifas estão no formato "geral". O mesmo acontece para as restantes tabelas com valores financeiros, visto que este formato permite realizar cálculos com maior precisão.

S	T	U	V
Tarifas (€)			
empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4
PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,068771
0,042479	0,1647395	0,10241	0,066671
0,042479	0,1647395	0,10241	0,066671

Figura 3.29: Exemplo de sincronização das tarifas

A seguinte etapa diz respeito ao cálculo do preço da energia antes da instalação da UPAC e os cálculos são realizados respeitando a Equação 3.11, sendo os resultados apresentados numa tabela com o formato da Figura 3.30.

$$Preço_{\,Energia\ s/\ PV} = Energia\ consumida_{\,PV} \cdot tarifa \cdot coeficiente \tag{3.11}$$

X	Y	Z	AA
Preço energia antes PV (€)			
empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4
PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD
0,0200501	0,0056011	0,0146446	0,0136167
0,0177987	0,0107081	0,0136205	0,007496
0,0171615	0,0105433	0,0136205	0,007496
0,0172465	0,0100491	0,0137229	0,007496
0,0186908	0,0097196	0,0154639	0,007496
0,0184784	0,0093902	0,0153615	0,007496
0,0186908	0,0090607	0,0152591	0,007496
0,0207298	0,0087312	0,0149519	0,0074273
0,0181385	0,0084017	0,0137229	0,0072671
0,0174589	0,0080722	0,0137229	0,0072671

Figura 3.30: Exemplo de preços da energia sem instalação da UPAC

Seguidamente, é calculado o valor que cada CPE consome de energia proveniente da UPAC, através da Equação 3.12. Esta ferramenta possui uma propriedade que garante que este valor não excede o consumo (necessária para a simulação com coeficientes estáticos). Os valores obtidos através desta equação são inseridos numa tabela semelhante à da Figura 3.31.

$$Energia\ consumida_{PV} = (Energia\ produzida_{PV} - Energia\ injetada) \cdot coeficiente \tag{3.12}$$

AC	AD	AE	AF
Energia Consumida PV (kWh)			
empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4
PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0,0028826	0,0129715	0,020178	0,0028826
0,0027796	0,0138981	0,0194573	0,0027796
0,0026838	0,0147607	0,0187864	0,0026838
0,2165357	0,5774286	1,0105	0,2165357
0,1336923	0,6016154	0,869	0,1336923
0,1258519	0,5663333	0,880963	0,1258519
0,1332308	0,5995385	0,866	0,1332308

Figura 3.31: Exemplo de valores de energia consumida, proveniente da UPAC

Por fim, é possível calcular-se os valores, de 15 em 15 minutos, que cada CPE pouparia no caso da instalação da UPAC. Estes são obtidos através da Equação3.13 e são apresentados numa tabela como a da Figura 3.32.

$$Valor_{poupança} = Energia\ consumida_{PV} \cdot coeficiente \tag{3.13}$$

AH	AI	AJ	AK
Poupança (€)			
empresa 1 PT_123_AA	empresa 2 PT_456_BB	empresa 3 PT_789_CC	empresa 4 PT_000_DD
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0,0001224	0,0021369	0,0020664	0,0002054
0,0001181	0,0022896	0,0019926	0,0001981
0,000114	0,0024317	0,0019239	0,0001913
0,0091982	0,0951253	0,1034853	0,1208206
0,0056791	0,0991098	0,0889943	0,0745964
0,0076366	0,0932975	0,1310168	0,0702217
0,0080843	0,0987677	0,1287915	0,0743389

Figura 3.32: Exemplo de valores de poupança

3.4.4 Resultados

Finalmente, é possível proceder-se à obtenção dos resultados da ferramenta, sendo a primeira etapa deste processo a criação de uma nova página Excel e a construção de uma tabela com o formato da Figura 3.33.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2			empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4	Total
3			PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD	
4		Poupança	3 557,91 €	8 655,86 €	12 003,24 €	6 888,87 €	31 105,87 €
5		Venda à Rede	-	-	-	-	29 585,00 €
6	Tarifas Evitadas	Simples	-	0,16 €	-	-	-
7		Ponta	0,17 €	-	0,27 €	0,56 €	-
8		Cheia	0,06 €	-	0,15 €	0,07 €	-
9		Vazio	0,04 €	-	0,10 €	0,07 €	-
10		SuperVazio	-	-	-	-	-
11		Média	0,09 €	0,16 €	0,17 €	0,23 €	-

Figura 3.33: Exemplo dos resultados obtidos

Seguidamente, é necessário realizar o cálculo da soma total dos valores de poupança atingida com a instalação fotovoltaica (inseridos diretamente na tabela da Figura 3.33) e da soma total dos valores da energia consumida proveniente da UPAC, por cada CPE, para o período dos diagramas de carga. Este processo é necessário para o cálculo das tarifas evitadas, que são obtidas através da Equação 3.14, e inseridas na tabela da Figura 3.33.

$$Tarifa\ evitada = \frac{Total\ poupança\ _{Por\ CPE,\ por\ tarifa\ horária}}{Total\ energia\ consumida\ (PV)\ _{Por\ CPE,\ por\ tarifa\ horária}} \tag{3.14}$$

Assim sendo, a ferramenta também calcula o lucro com a venda à rede, sendo este valor calculado através da multiplicação entre a soma total dos valores da energia injetada com a tarifa de venda à rede, também inserida na página da Figura 3.21.

Para finalizar, foi acrescentado um botão de "Reset" na página principal desta ferramenta que permite a realização de uma nova simulação. Na prática, quando o utilizador clica neste botão, a ferramenta elimina todas as páginas, exceto a página principal (Figura 3.16) e a página referente às tarifas (Figura 3.21). Relativamente à página das tarifas, a ferramenta apenas elimina os valores, visto que esta contém uma formatação para calcular o total de cada tarifa.

Capítulo 4

Casos de Estudo

No capítulo 3 foram apresentadas as várias ferramentas VBA e foi explicado o seu desenvolvimento e funcionamento. No presente capítulo serão analisados os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida para o apoio ao dimensionamento de uma CER e será exposto o processo de dimensionamento de uma central fotovoltaica, com recurso à ferramenta desenvolvida pela **Ecoinside**.

4.1 Comparação de Resultados da Ferramenta CER

A ferramenta desenvolvida para o apoio ao dimensionamento de uma CER tem a particularidade de realizar uma simulação para 2 tipos de modelos de partilha de energia elétrica (proveniente de uma UPAC), sendo estes coeficientes dinâmicos e coeficientes estáticos.

Na presente secção, serão apresentados os resultados de duas simulações (para cada tipo de coeficiente) para o caso de uma CER constituída por 4 empresas e será realizada a comparação entre as soluções obtidas.

É de referir que todos os dados introduzidos para esta comparação são provenientes de um projeto da **Ecoinside**, de modo a ser possível a obtenção de resultados o mais aproximado possível da realidade.

4.1.1 Introdução de Dados

Tal como abordado no capítulo 3, esta ferramenta carece da leitura dos consumos de cada cliente. Deste modo, para esta análise, foram utilizados os diagramas de carga de 4 empresas localizadas em Portugal Continental.

De notar que, no caso da simulação com coeficientes estáticos, é necessária a introdução do valor da percentagem de autoconsumo de cada CPE. Como o projeto da **Ecoinside** consistia num modelo de partilha com coeficientes dinâmicos, foi considerado um caso em que todas as empresas assumiam a mesma percentagem de autoconsumo sendo que, deste modo, foram atribuídos os seguintes valores de coeficiente:

- empresa 1: 25%;

- empresa 2: 25%;
- empresa 3: 25%;
- empresa 4: 25%.

Após a introdução dos respetivos diagramas de carga e do valor das percentagens para simulação com os coeficientes estáticos, foram consultadas as faturas de eletricidade dos clientes. Estes documentos permitem o preenchimento da folha referente às tarifas, obtendo-se os valores apresentados na Figura 4.1. Para além da introdução destes dados, foi considerada uma tarifa de venda à rede de 0.08 €.

	A	B	C	D	E	F
1			empresa 1	empresa 2	empresa 3	empresa 4
2			PT_123_AA	PT_456_BB	PT_789_CC	PT_000_DD
3			Semanal-Portugal Cont.	Semanal-Portugal Cont.	Simples	Semanal-Portugal Cont.
4	Preço indexado (€)	Simples			0,1516	
5		Ponta	0,105579	0,20723		0,19311
6		Cheia	0,105579	0,1945		0,20798
7		Vazio	0,105579	0,16831		0,19335
8		SuperVazio				
9	Mecanismo Ajuste (€)	Simples			0,00098774	
10		Ponta		-0,00045		0,12071
11		Cheia		-0,00088		0,13065
12		Vazio		-0,0028		0,15816
13		SuperVazio				
14	Acesso Redes (€)	Simples				
15		Ponta	0,0601	0,0601		0,0919
16		Cheia	-0,0449	-0,0449		-0,0099
17		Vazio	-0,0631	-0,0631		-0,0284
18		SuperVazio				
19	PHP					
20	Total (€)	Simples	0	0	0,15258774	0
21		Ponta	0,165679	0,26688	0	0,40572
22		Cheia	0,060679	0,14872	0	0,32873
23		Vazio	0,042479	0,10241	0	0,32311
24		SuperVazio	0	0	0	0
25	MIBEL (€)		0,08			

Figura 4.1: Preenchimento dos dados referentes às tarifas

Finalmente, foi necessário recorrer à simulação da ferramenta da **Ecoinside**, para se introduzir os valores de energia produzida pela fonte fotovoltaica e para se realizar os respetivos cálculos energéticos.

4.1.2 Resultados

Terminado o processo descrito no capítulo 3, para as duas simulações, a ferramenta apresenta os resultados da Figura 4.2 para o caso da simulação com coeficientes dinâmicos e os resultados presentes na Figura 4.3 para o caso da simulação com coeficientes estáticos.

			empresa 1 PT_123_AA	empresa 2 PT_456_BB	empresa 3 PT_789_CC	empresa 4 PT_000_DD	Total
		Poupança	2 049,62 €	7 702,61 €	7 452,83 €	15 789,63 €	32 994,69 €
		Venda à Rede	-	-	-	-	19 556,84 €
	Tarifas Evitadas	Simples	-	-	0,15 €	-	-
		Ponta	0,17 €	0,27 €	-	0,41 €	-
		Cheia	0,06 €	0,15 €	-	0,33 €	-
		Vazio	0,04 €	0,10 €	-	0,32 €	-
		SuperVazio	-	-	-	-	-
		Média	0,09 €	0,17 €	0,15 €	0,35 €	-

Figura 4.2: Resultados da simulação com coeficientes dinâmicos

			empresa 1 PT_123_AA	empresa 2 PT_456_BB	empresa 3 PT_789_CC	empresa 4 PT_000_DD	Total
		Poupança	1 844,92 €	7 069,09 €	6 319,40 €	18 611,83 €	33 845,24 €
		Venda à Rede	-	-	-	-	19 955,22 €
	Tarifas Evitadas	Simples	-	-	0,15 €	-	-
		Ponta	0,17 €	0,27 €	-	0,41 €	-
		Cheia	0,06 €	0,15 €	-	0,33 €	-
		Vazio	0,04 €	0,10 €	-	0,32 €	-
		SuperVazio	-	-	-	-	-
		Média	0,09 €	0,17 €	0,15 €	0,35 €	-

Figura 4.3: Resultados da simulação com coeficientes estáticos

Analisando os valores presentes nas tabelas das Figuras 4.2 e 4.3 verifica-se que apenas a empresa 4 alcança uma maior poupança com a adoção do método de coeficientes estáticos. Tal pode ser justificado pelo facto desta empresa possuir tarifas mais elevadas que as restantes e através deste método consome mais energia elétrica, proveniente da UPAC, nas horas de maior procura (em que a energia é mais cara).

No caso desta CER ser financiada por um interveniente externo às empresas, seria mais vantajoso adotar o modelo de partilha de energia com coeficientes estáticos, especialmente se as tarifas de venda à rede fossem mais elevadas.

Relativamente aos valores das tarifas evitadas, estes são iguais em ambos os casos simulados.

4.2 Dimensionamento de uma Central Fotovoltaica

Esta parte do documento terá como objetivo expor todo o processo necessário para o dimensionamento de uma central fotovoltaica, neste caso de uma instalação que irá alimentar uma CER constituída por 10 CPE's.

O dimensionamento de uma central PV envolve várias etapas e, por norma, requer ajustes e alterações, levando à repetição das mesmas. Por esse motivo, no presente documento será apresentado o processo ideal deste dimensionamento.

4.2.1 Recolha de Informação

Em primeira instância, é necessário analisar toda a informação recolhida pelo departamento comercial da **Ecoinside**, sendo que esta abrange: as faturas de eletricidade associadas a cada CPE; os diagramas de carga (também de cada CPE); as coordenadas geográficas do local onde será instalada a UPAC; e outro tipo de informação relevante para o projeto. Recorrendo ao *Google Earth*, são introduzidas as coordenadas geográficas e é realizada uma análise ao local de instalação, que consiste na identificação do mesmo e na deteção de possíveis obstáculos que causem sombreamento. Por norma, também é realizada uma visita técnica, com o objetivo de se obter um conhecimento mais aprofundado do local. No caso deste projeto, foi realizada uma visita técnica ao local da futura instalação PV (que será apresentada na secção 5.2) que permitiu: a obtenção mais precisa das medidas das zonas de instalação; a identificação de todos os obstáculos existentes; a confirmação do número de orientações viáveis, bem como, a medição da inclinação associada a cada uma destas. Assim, obtiveram-se os seguintes valores:

- Orientação 1: Inclinação 3.5º, azimute 15º;
- Orientação 2: Inclinação 3.5º, azimute -20º;
- Orientação 3: Inclinação 3.5º, azimute -105º;
- Orientação 4: Inclinação 3.5º, azimute 75º.

Relativamente aos diagramas de carga existem duas possibilidades, ou o departamento comercial disponibiliza os documentos necessários ou então cede as credenciais de acesso do cliente para a exportação dos mesmos. Caso os diagramas de carga não sejam documentos Excel e não apresentem os valores em intervalos de 15 em 15 minutos, será necessário adaptá-los para tal formato, pois só deste modo poderão ser lidos corretamente pela ferramenta VBA. Neste caso de estudo, utilizou-se a ferramenta desenvolvida para a análise dos diagramas de carga e verificou-se que alguns destes documentos não estavam completos. Para ultrapassar esta situação, foram acrescentados a esses documentos valores de consumo de meses que pertencem à mesma estação do ano e ao mesmo período horário. Como este caso de estudo é relativo a um projeto de uma CER, foi elaborado um documento Excel para cada um dos 12 meses do ano, com a soma de todos os diagramas de carga dos CPE's em análise, para poderem ser introduzidos na ferramenta da **Ecoinside**.

No que diz respeito às irradiâncias, estes documentos são obtidos através de um *software* online denominado por PVGIS (*photovoltaic geographical information system*). Neste *software* são selecionados e introduzidos os seguintes parâmetros, para cada orientação em análise:

- Base de dados de radiação solar;
- Mês de análise;
- Inclinação e azimute dos painéis PV.

Desta forma, são gerados documentos Excel com os valores da irradiância horizontal global (IHG), contudo, estes dados são apresentados em intervalos de 1 hora. Como a ferramenta de simulação processa os dados em intervalos de 15 minutos, a **Ecoinside** dispõe de outra ferramenta em VBA, que concebe documentos de texto com os valores nos intervalos pretendidos. Esta ferramenta aplica a Equação 4.1 que, para cada intervalo de 15 minutos, subtrai o valor de IHG dos 15 minutos anteriores à IHG da hora seguinte. Para além disso, ainda é somado o valor de IHG dos 15 minutos anteriores ao resultado da subtração.

$$IHG_{(h:m)} = \frac{IHG_{(h+1:m-15)} - IHG_{(h:m-15)}}{4} + IHG_{(h:m-15)} \tag{4.1}$$

4.2.2 Processo de Dimensionamento

Com todos os documentos necessários para a simulação da ferramenta da **Ecoinside** em conformidade, é possível realizar o processo de dimensionamento da UPAC.

Em primeiro lugar, recorre-se à ferramenta de modo a estimar o número de painéis PV a instalar na cobertura. Após o preenchimento do formulário referido no capítulo 3 e da introdução dos documentos relativos aos diagramas de carga e às irradiâncias, é necessário inserir os dados do painel fotovoltaico selecionado e das tarifas do cliente. Neste caso, foi escolhido um painel monofacial da Trina Solar [34] de 570 W e, na Tabela 4.1, estão apresentados todos os valores relativos a este painel, necessários para a simulação da ferramenta. No que diz respeito ao valor das tarifas, foram analisadas todas as faturas de eletricidade dos CPE's associados à CER e foram estimados os valores presentes na Tabela 4.1. Relativamente às variáveis financeiras, para este caso de estudo foi realizada a simulação com os valores predefinidos.

Tabela 4.1: Dados introduzidos na simulação

Dados instalação		**Tarifas**	
Potência de cada painel (kW)	0.570	Ponta	0.15
Eficiência de cada painel (%)	21.1	Cheia	0.14
Área de cada painel (m^2)	2.7	Vazio	0.13
Perdas dos painéis (% 1º ano) / (% restantes)	2/0.55	Super Vazio	0.12
Garantia do fabricante dos painéis (anos)	25	Potência de Hora de Ponta	0
Perdas a considerar no sistema (%)	14	Tarifa de venda à rede	0.08
Margem do cliente (%)	10		
Seguro (%)	1		
Inflação (%)	2.5		
Custo de capital (%)	8		
Custo médio ponderado capital do cliente (%)	4		
Taxa mínima de TIR (%)	10		
Limite de energia injetada (%)	30		
Operação e manutenção (€) ou (%)	7 (%)		
Preço por watt-pico (€/Wp)	1		

Após se obter o resultado desta simulação, é possível começar a implementar os painéis na cobertura. Para esta implementação é utilizado o *software* NanoCAD [35] e esta ferramenta permite determinar o número exato de painéis a instalar, tendo em conta o espaço disponível e os obstáculos presentes. Neste caso, foram adicionados 819 painéis FV e na Figura 4.4 está representada a distribuição dos mesmos, nas respetivas orientações, bem como a localização dos inversores.

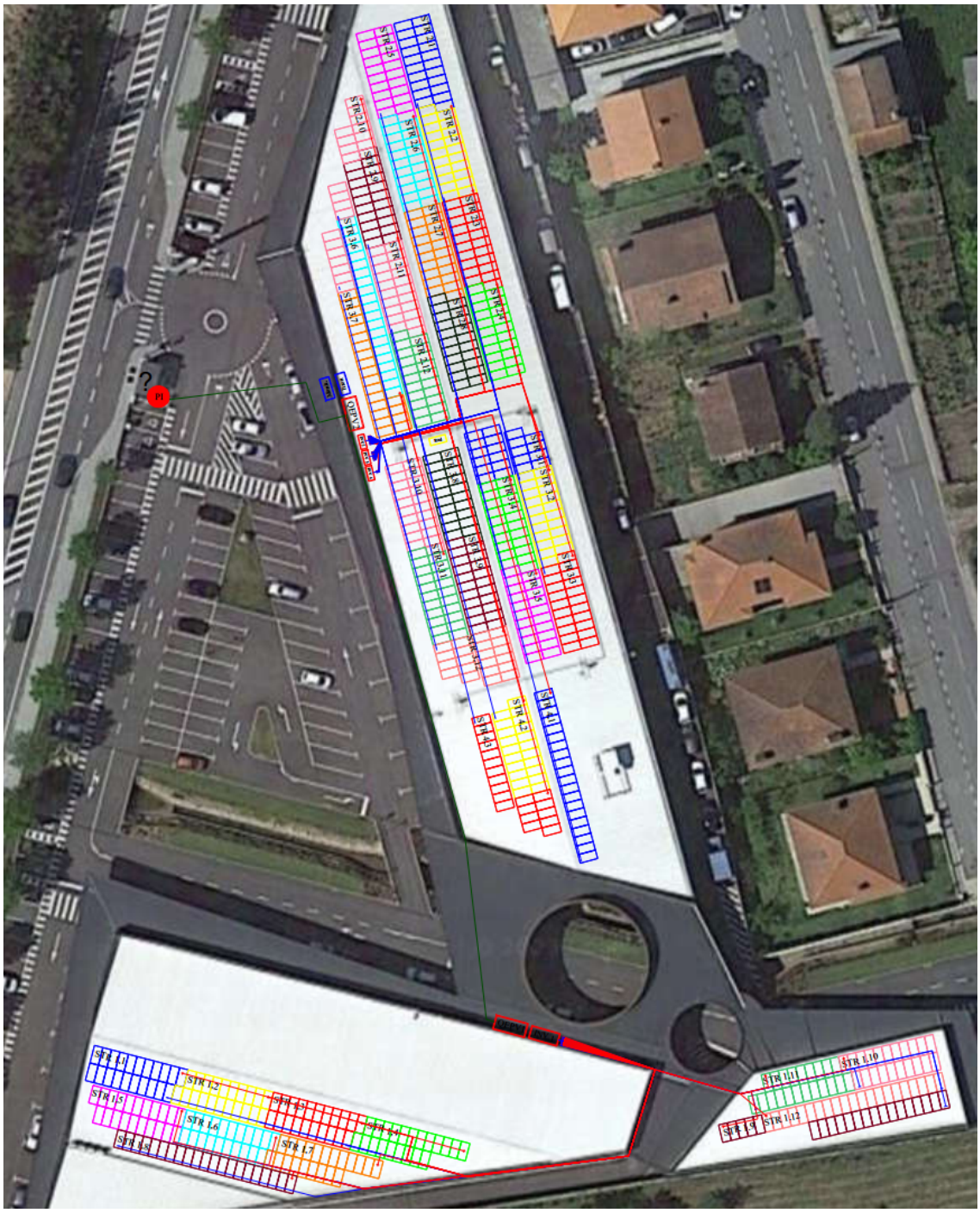


Figura 4.4: Distribuição de equipamentos na cobertura

A próxima etapa do processo de dimensionamento requer a utilização do *software* PVsyst [36], que tem como principal objetivo determinar o valor da energia disponível no ponto de injeção. Neste *software* é necessário inserir a localização da UPAC, o número de orientações e o valor de inclinação e azimute das mesmas. Para além destes dados, é necessário selecionar o número e modelo dos painéis e dos inversores implementados e a distribuição das *strings*. Para este caso de estudo, foi utilizada a seguinte configuração:

- 3 inversores da Solax Power [37] de 125 kW, cada qual com ligação a 12 *strings* de 21 painéis;
- 1 inversor da Solax Power de 30 kW, com ligação a 3 *strings* de 21 painéis.

Por fim, é fundamental selecionar o tipo de montagem dos painéis PV, que está relacionado com o aquecimento dos mesmos e ainda é necessário introduzir o valor da percentagem de perdas correspondentes aos seguintes parâmetros:

- cablagem DC;
- cablagem AC;
- degradação da eficiência painel;
- sujidade nos módulos PV.

O resultado deste *software* é um relatório técnico detalhado, com toda a informação relativa à instalação PV, no qual é possível consultar o valor de energia disponível no ponto de injeção.

Com o número ótimo de painéis determinado, é necessário recorrer à ferramenta da **Ecoinside** para se realizar mais um conjunto de duas simulações. A primeira simulação deste conjunto é praticamente igual à primeira simulação do processo de dimensionamento, com a diferença de se especificar o número final de painéis instalados. No final desta simulação, é necessário registar o valor total de energia produzida pela UPAC para se proceder à simulação final. A última simulação difere da anterior no parâmetro de perdas a considerar no sistema, que é obtido através da Equação 4.2, e é um valor mais próximo da realidade.

$$Percentagem\ perdas = (1 - \frac{Energia\ produzida_{\ PVsyst}}{Energia\ produzida_{\ Global}}) \cdot 100 \tag{4.2}$$

Neste caso, a variável $Energia\ produzida_{\ Global}$ obedece à Equação 4.3, e nesta equação, o valor de 14% corresponde ao valor pré-definido das perdas a considerar no sistema.

$$Energia\ produzida_{\ Global} = \frac{Energia\ produzida_{\ Ferramenta\ Ecoinside}}{1 - 14\%} \tag{4.3}$$

Finalmente, após concluída a última simulação, é necessário inserir os valores reais de investimento inicial e custos de O&M e, para tal, é utilizada a atualização desenvolvida na ferramenta da **Ecoinside** (descrita no capítulo 3).

Concluindo, o dimensionamento de uma central fotovoltaica revela-se um processo complexo que envolve uma análise rigorosa, não tendo uma única solução ótima.

Capítulo 5

Visitas Técnicas

Durante o trabalho realizado na **Ecoinside**, foi proporcionada a realização de duas visitas técnicas com diferentes finalidades, que estarão explanadas a seguir. A primeira visita foi a um *carport* cuja instalação já estava finalizada e a segunda visita teve como objetivo analisar e estudar o local para uma futura UPAC, que irá alimentar uma CER.

5.1 Visita a um *Carport* Solar

Esta visita técnica permitiu visualizar toda a estrutura e equipamentos necessários para o funcionamento de um *carport* solar. Um *carport* solar é um estacionamento exterior que, além de proteger os veículos dos elementos do clima, possui no seu topo painéis PV capazes de produzir energia elétrica.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 é possível observar-se os painéis fotovoltaicos e inversor utilizados nesta instalação, respetivamente.

Figura 5.1: Painéis fotovoltaicos

Figura 5.2: Inversor

Para além dos elementos anteriores, as instalações estão equipadas com equipamentos auxiliares de monitorização, que permitem avaliar a eficiência e o desempenho das mesmas. Estes equipamentos são o radiómetro (presente na Figura 5.3), o sensor de vento (presente na Figura 5.4) e os sensores de temperatura (instalados na parte inferior dos painéis), sendo que estes desempenham funções distintas no sistema. O radiómetro é utilizado para medir a intensidade da radiação solar que atinge a superfície (irradiância) e, a par disso, tem a capacidade de medir a temperatura ambiente. Por outro lado, o sensor de vento mede a velocidade do mesmo e este parâmetro está relacionado com o arrefecimento dos painéis PV. A instalação destes sensores permite ao departamento de O&M analisar se a central PV está a produzir como o expectável, tendo em consideração os parâmetros registados. Se não se verificar a produção esperada, deverá existir uma intervenção por forma a identificar a origem da adversidade.

Figura 5.3: Radiómetro

Figura 5.4: Sensor de vento

Na Figura 5.5 está representado o quadro elétrico da instalação, sendo que este possui todo o equipamento de proteção do sistema fotovoltaico. O quadro elétrico possui ainda transformadores de intensidade, que são dispositivos medidores da corrente elétrica, permitindo obter leituras para os contadores de produção de energia fotovoltaica.

Na Figura 5.6 está representado o quadro de monitorização da instalação, onde o principal componente é um *datalogger*, que tem a função de monitorizar e gerir todos os dados da produção fotovoltaica. Assim, este elemento recebe toda a informação proveniente do inversor e dos equipamentos auxiliares e disponibiliza-a online. Esta informação pode ser acedida remotamente e alguns exemplos da apresentação destes dados são os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8. Por fim, referir que este componente é alimentado por uma tomada externa ao circuito elétrico, de modo a ficar em funcionamento permanente.

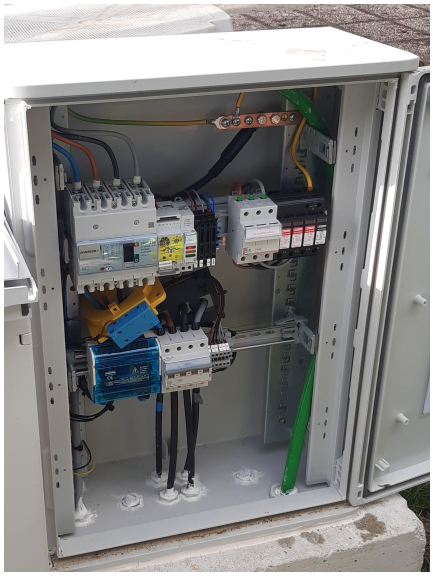


Figura 5.5: Quadro elétrico

Figura 5.6: Quadro de monitorização

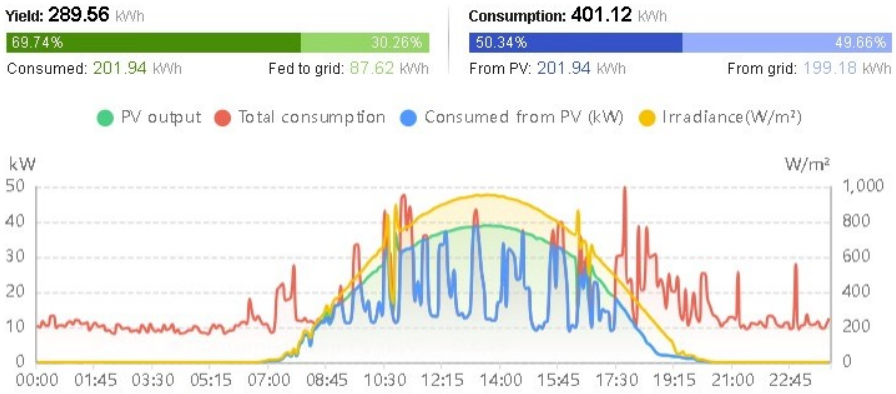


Figura 5.7: Gráfico diário

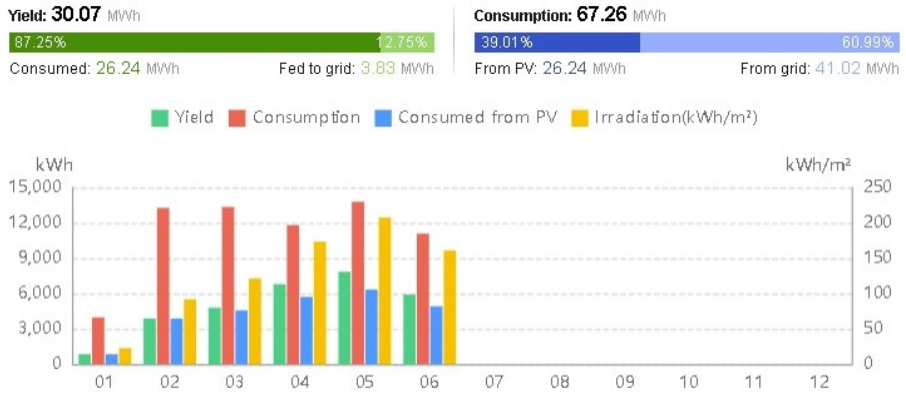


Figura 5.8: Gráfico anual

Relativamente ao gráfico da Figura 5.7, este contém informação sobre a potência gerada pela instalação PV (cor verde), a potência total consumida pelo cliente (cor vermelha), potência consumida pelo cliente proveniente da UPAC (cor azul) e sobre a irradiância no local (cor amarela). A diferença entre os valores da potência PV e dos consumos do cliente é o valor da potência injetada na rede elétrica (assinalado a verde-claro). De referir, que os valores de consumo do cliente são adquiridos através de um analisador de energia instalado no QGBT (quadro geral de baixa tensão).

O gráfico da Figura 5.8 segue o mesmo código de cores do anterior, porém, com valores de energia (kWh).

5.2 Visita à Futura Instalação da CER

Tal como referido anteriormente, esta visita teve como objetivo analisar mais aprofundadamente o local para a instalação de uma UPAC.

Na Figura 5.9 é possível observar-se parte da cobertura do edifício, onde serão instalados os painéis PV.

Figura 5.9: Cobertura do edifício

Na figura 5.10 é possível observar-se outra parte da cobertura, mas com a particularidade de ter uma platibanda, que tal como os obstáculos das Figuras 5.11 e 5.12, irá produzir sombreamento a certas horas do dia.

Figura 5.10: Cobertura do edifício com platibanda

Figura 5.11: Obstáculo na cobertura

Figura 5.12: Obstáculos na cobertura

Por fim, a Figura 5.13 apresenta o QGBT e o contador associados à instalação elétrica.

Figura 5.13: Contador e quadro elétrico

Em suma, as visitas técnicas foram fundamentais na medida que proporcionaram o contacto com todos os equipamentos relacionados com uma central fotovoltaica, sendo que permitiram ainda verificar os desafios e as adversidades que tornam único cada projeto.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

Ao longo desta dissertação, foi possível aprimorar os conhecimentos obtidos previamente sobre sistemas fotovoltaicos e, particularmente, sobre os seus componentes. Além disso, foram desenvolvidas noções acerca do autoconsumo e comunidades de energia elétrica bem como o enquadramento legal que abrange estes temas, tanto a nível nacional como europeu. Esta informação revela-se pertinente uma vez que, na maioria dos casos, condiciona o processo de desenvolvimento de uma instalação fotovoltaica.

Através das atualizações realizadas na ferramenta da **Ecoinside**, foi possível consolidar e alargar as bases sobre a linguagem VBA. Este foi o ponto de partida para o foco principal desta dissertação, que é o desenvolvimento de uma ferramenta para o apoio no dimensionamento de uma central PV, para uma CER. Os resultados obtidos por esta ferramenta e os testes realizados à mesma foram bastante satisfatórios uma vez que permitiram a obtenção de dados precisos e confiáveis. A ferramenta desenvolvida será bastante útil para a **Ecoinside**, aquando da realização de projetos para uma CER, visto que disponibiliza informação crucial sobre os CPE's associados, permitindo realizar uma análise financeira com maior detalhe e precisão.

O estudo da produção de energia solar fotovoltaica desempenhou um papel fulcral para a realização do dimensionamento de uma central PV, uma vez que o processo se revelou complexo e rigoroso. Desta forma, a realização de um dimensionamento de um caso de estudo permitiu a aplicação prática dos conceitos teóricos estudados, possibilitando uma aprendizagem mais aprofundada e detalhada.

Por fim, a realização da dissertação na **Ecoinside** permitiu conhecer melhor a realidade do mundo empresarial. Além disso, proporcionou a aquisição de conhecimentos sobre as mais diversas áreas essenciais para o funcionamento de uma empresa, entre as quais, operação e manutenção, *procurement* e vendas.

6.2 Trabalho Futuro

A ferramenta desenvolvida para o apoio ao dimensionamento de uma CER poderá sofrer algumas melhorias relativas ao seu desempenho, particularmente no que diz respeito à velocidade da simulação, podendo haver a tentativa de otimizar ainda mais o código VBA.

Outro trabalho possível seria comparar os resultados obtidos pela ferramenta com dados reais associados aos CPE's de uma CER, após o período de um ano. A análise poderia permitir compreender se os resultados da ferramenta seriam suficientes ou se seria necessária a conjugação de mais variáveis.

Uma incorporação interessante nesta ferramenta seria acrescentar uma análise com um sistema de armazenamento de energia elétrica. Por exemplo, obter resultados financeiros onde o sistema armazenaria a energia proveniente da UPAC e apenas vendia à RESP em períodos com tarifas mais elevadas.

Por fim, será necessário atualizar o código VBA no caso de ocorrer alguma alteração técnica como, por exemplo, na definição dos períodos de contagem.

Anexo A

Relatório Técnico PVsyst

Versão 7.3.4

PVsyst - Relatório da simulação

Sistema acoplado à rede

Variante: Nova variante da simulação
Sem desenho 3D de sombras, sem sombras
Potência sistema: 467 kWp

Autor·a
Ecoinside – Sol. Ecoeficiência e Sustentabilidade, lda. (Portugal)

Figura A.1: Relatório técnico do caso de estudo

Variante: Nova variante da simulação

PVsyst V7.3.4
VC0, Data da simulação: 20/06/23 17:15
com v7.3.4

Ecoinside – Sol. Ecoeficiência e Sustentabilidade, lda. (Portugal)

Resumo do projeto

Localização geográfica
Portugal

Localização
Latitude °N
Longitude °W
Altitude 15 m
Fuso horário UTC

Parâmetros projeto
Albedo 0.20

Dados meteorológicos
Meteonorm 8.0 (2004-2017), Sat=100% - Sintético

Resumo do sistema

Sistema acoplado à rede

Sem desenho 3D de sombras, sem sombras

Orientação do plano dos módulos
Planos fixos 4 orientações
Inclin/azimutes 3.5 / 15 °
3.5 / -20 °
3.5 / -105 °
3.5 / 75 °

Sombras próximas
Sem sombras

Exigências do consumidor
Definição ext. por ficheiro

Informação do sistema

Grupo FV
Nr. de módulos 819 unidades
Pnom total 467 kWp

Inversores
Número de unidades 4 unidades
Pnom total 405 kWca
Rácio Pnom 1.153

Resumo dos resultados

Energia produzida	566400 kWh/ano	Produção específica	1213 kWh/kWp/ano	Índice de perf. PR	78.94 %
Energia utilizada	363044 kWh/ano			Fração solar	55.30 %

Índice

Resumo do projeto e dos resultados 2
Parâmetros gerais, Características do grupo FV, Perdas do sistema 3
Resultados principais 7
Diagrama de perdas 8
Gráficos predefinidos 9

Parâmetros gerais

Sistema acoplado à rede

Sem desenho 3D de sombras, sem sombras

Orientação do plano dos módulos

Orientação		Configuração dos sheds	Modelos utilizados	
Planos fixos	4 orientações	Não há um desenho 3D definido	Transposição	Perez
Inclin/azimutes	3.5 / 15 °		Difuso	Perez, Meteonorm
	3.5 / -20 °		Cicumsolar	separado
	3.5 / -105 °			
	3.5 / 75 °			

Horizonte	Sombras próximas	Exigências do consumidor
Sem horizonte	Sem sombras	Definição ext. por ficheiro

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano	
29822	26795	28494	27924	28900	34028	39938	39230	29853	25938	25335	26786	363044	kWh

Características do grupo FV

Módulo FV		**Inversor**	
Fabricante	Trina Solar	Fabricante	Solaxpower
Modelo	TSM-570DE19R	Modelo	X3- FTH-125K
(Parâmetros definidos pelo utilizador)		(Parâmetros definidos pelo utilizador)	
Potência unitária	570 Wp	Potência unitária	125 kWca
Número de módulos FV	756 unidades	Número de inversores	3 unidades
Nominal (STC)	431 kWp	Potência total	375 kWca

Grupo #1 - INV 1

Orientação	#1		
Inclinação/Azimute	4/15 °		
Número de módulos FV	168 unidades	Número de inversores	8 * MPPT 8% 0.7 unidade
Nominal (STC)	95.8 kWp	Potência total	83.3 kWca
Módulos	8 Strings x 21 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	180-1000 V
Pmpp	87.9 kWp	Potência máx. (=>10°C)	132 kWca
Umpp	724 V	Rácio Pnom (DC:AC)	1.15
I mpp	121 A	Não há partilha de potência entre MPPTs	

Grupo #2 - INV 1

Orientação	#2		
Inclinação/Azimute	4/-20 °		
Número de módulos FV	84 unidades	Número de inversores	4 * MPPT 8% 0.3 unidade
Nominal (STC)	47.9 kWp	Potência total	41.7 kWca
Módulos	4 Strings x 21 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	180-1000 V
Pmpp	43.9 kWp	Potência máx. (=>10°C)	132 kWca
Umpp	724 V	Rácio Pnom (DC:AC)	1.15
I mpp	61 A		

Grupo #3 - INV 2

Orientação	#3		
Inclinação/Azimute	4/-105 °		
Número de módulos FV	168 unidades	Número de inversores	8 * MPPT 8% 0.7 unidade
Nominal (STC)	95.8 kWp	Potência total	83.3 kWca
Módulos	8 Strings x 21 Em série		

Variante: Nova variante da simulação

PVsyst V7.3.4 Ecoinside – Sol. Ecoeficiência e Sustentabilidade, lda. (Portugal)
VC0, Data da simulação: 20/06/23 17:15
com v7.3.4

Características do grupo FV

Em condições de func. (50°C)

Pmpp	87.9 kWp	Tensão de funcionamento	180-1000 V
Umpp	724 V	Potência máx. (=>10°C)	132 kWca
I mpp	121 A	Rácio Pnom (DC:AC)	1.15
		Não há partilha de potência entre MPPTs	

Grupo #4 - INV 3

Orientação	#3		
Inclinação/Azimute	4/-105 °		
Número de módulos FV	105 unidades	Número de inversores	5 * MPPT 8% 0.4 unidade
Nominal (STC)	59.9 kWp	Potência total	52.1 kWca
Módulos	5 Strings x 21 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	180-1000 V
Pmpp	54.9 kWp	Potência máx. (=>10°C)	132 kWca
Umpp	724 V	Rácio Pnom (DC:AC)	1.15
I mpp	76 A		

Grupo #7 - INV 3

Orientação	#4		
Inclinação/Azimute	4/75 °		
Número de módulos FV	147 unidades	Número de inversores	7 * MPPT 8% 0.6 unidade
Nominal (STC)	83.8 kWp	Potência total	72.9 kWca
Módulos	7 Strings x 21 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	180-1000 V
Pmpp	76.9 kWp	Potência máx. (=>10°C)	132 kWca
Umpp	724 V	Rácio Pnom (DC:AC)	1.15
I mpp	106 A	Não há partilha de potência entre MPPTs	

Grupo #8 - INV 2

Orientação	#4		
Inclinação/Azimute	4/75 °		
Número de módulos FV	84 unidades	Número de inversores	4 * MPPT 8% 0.3 unidade
Nominal (STC)	47.9 kWp	Potência total	41.7 kWca
Módulos	4 Strings x 21 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	180-1000 V
Pmpp	43.9 kWp	Potência máx. (=>10°C)	132 kWca
Umpp	724 V	Rácio Pnom (DC:AC)	1.15
I mpp	61 A		

Módulo FV

Fabricante	Trina Solar
Modelo	TSM-570DE19R
(Parâmetros definidos pelo utilizador)	
Potência unitária	570 Wp
Número de módulos FV	63 unidades
Nominal (STC)	35.9 kWp

Inversor

Fabricante	Solaxpower
Modelo	X3- PRO-30K-G2
(Parâmetros definidos pelo utilizador)	
Potência unitária	30.0 kWca
Número de inversores	1 unidade
Potência total	30.0 kWca

Grupo #5 - INV 4

Orientação	#3		
Inclinação/Azimute	4/-105 °		
Número de módulos FV	21 unidades	Número de inversores	1 * MPPT 33% 0.3 unidade
Nominal (STC)	11.97 kWp	Potência total	10.0 kWca
Módulos	1 String x 21 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	160-980 V
Pmpp	10.98 kWp	Rácio Pnom (DC:AC)	1.20
Umpp	724 V		
I mpp	15 A		

Características do grupo FV

Grupo #6 - INV 4

Orientação	#4		
Inclinação/Azimute	4/75 °		
Número de módulos FV	42 unidades	Número de inversores	2 * MPPT 33% 0.7 unidade
Nominal (STC)	23.94 kWp	Potência total	20.0 kWca
Módulos	2 Strings x 21 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	160-980 V
Pmpp	21.96 kWp	Rácio Pnom (DC:AC)	1.20
Umpp	724 V	Não há partilha de potência entre MPPTs	
I mpp	30 A		

Potência FV total		**Potência total inversor**	
Nominal (STC)	467 kWp	Potência total	405 kWca
Total	819 módulos	N.° de inversores	4 unidades
Superfície módulos	2214 m²		0.0 Não utilizado
Superfície célula	2065 m²	Rácio Pnom	1.15
		Sem partilha de potência	

Perdas do grupo

Perdas sujidade grupo
Fração perdas 5.0 %

Fator de perdas térm.
Temperatura módulos em função irradiância
Uc (const.) 15.0 W/m²K
Uv (vento) 0.0 W/m²K/m/s

LID - "Light Induced Degradation"
Fração perdas 2.0 %

Perdas de qualidade dos módulos
Fração perdas 0.0 %

Perdas dos módulos com mismatch
Fração perdas 2.0 % no MPP

Perdas devidas a mismatch, em fiadas
Fração perdas 0.1 %

Fator de perda IAM
Efeito de incidência (IAM): Perfil personalizado

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	1.000	0.999	0.995	0.972	0.938	0.838	0.599	0.000

Perdas de cablagem DC

Res. global dos cabos 10 mΩ
Fração perdas 1.5 % em STC

Grupo #1 - INV 1		**Grupo #2 - INV 1**	
Res. global do grupo	98 mΩ	Res. global do grupo	196 mΩ
Fração perdas	1.5 % em STC	Fração perdas	1.5 % em STC
Grupo #3 - INV 2		**Grupo #4 - INV 3**	
Res. global do grupo	98 mΩ	Res. global do grupo	157 mΩ
Fração perdas	1.5 % em STC	Fração perdas	1.5 % em STC
Grupo #5 - INV 4		**Grupo #6 - INV 4**	
Res. global do grupo	783 mΩ	Res. global do grupo	391 mΩ
Fração perdas	1.5 % em STC	Fração perdas	1.5 % em STC
Grupo #7 - INV 3		**Grupo #8 - INV 2**	
Res. global do grupo	112 mΩ	Res. global do grupo	196 mΩ
Fração perdas	1.5 % em STC	Fração perdas	1.5 % em STC

Perdas de cablagem CA

Linha de saída do inversor até ao ponto de injeção

Tensão inversor	400 Vac tri		
Fração perdas	8.57 % em STC		
Inversor: X3- FTH-125K		**Inversores: X3- FTH-125K, X3- PRO-30K-G2**	
Secção cabos (1 Inv.)	Alumínio 1 x 3 x 150 mm²	Secção cabos (3 Inv.)	Alumínio 3 x 3 x 25 mm²
Comprimento dos cabos	100 m	Comprimento médio dos cabos	100 m

Variante: Nova variante da simulação

PVsyst V7.3.4
VC0, Data da simulação: 20/06/23 17:15
com v7.3.4

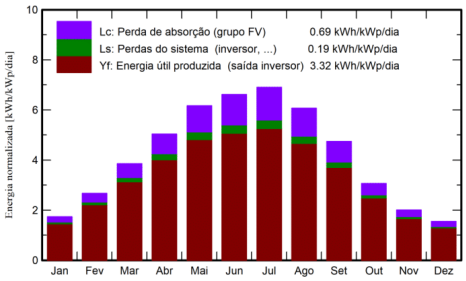
Ecoinside – Sol. Ecoeficiência e Sustentabilidade, lda. (Portugal)

Resultados principais

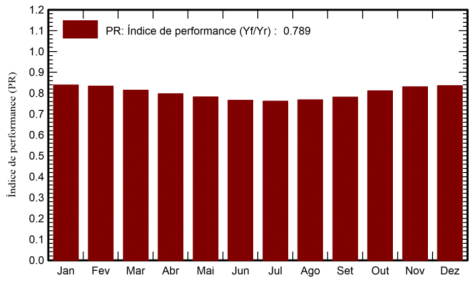
Produção do sistema

Energia produzida	566400 kWh/ano	Produção específica	1213 kWh/kWp/ano
Energia utilizada	363044 kWh/ano	Índice de perf. PR	78.94 %
		Fração solar	55.30 %

Produções normalizadas (por kWp instalado)



Índice de performance (PR)



Balanços e resultados principais

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_User	E_Solar	E_Grid	EFrGrid
	kWh/m²	kWh/m²	°C	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Janeiro	52.8	26.60	9.72	53.9	50.1	22107	29822	13232	7898	16591
Fevereiro	73.4	35.90	10.19	74.7	69.8	30477	26795	14071	15007	12724
Março	118.2	54.40	12.29	119.4	112.2	47886	28494	16958	28463	11536
Abril	150.2	66.70	13.80	151.1	142.1	59581	27924	17303	38908	10621
Maio	190.7	84.60	16.24	191.2	180.1	74178	28900	19355	50467	9545
Junho	198.2	75.20	18.61	198.6	187.1	75659	34028	20679	50361	13349
Julho	213.6	76.30	20.05	214.1	201.8	81090	39938	24861	51309	15077
Agosto	187.2	69.90	20.41	188.3	177.2	71711	39230	22719	44821	16512
Setembro	140.9	49.40	18.89	142.3	133.8	54962	29853	15859	36051	13994
Outubro	93.7	45.70	16.60	95.1	89.0	37811	25938	12586	23417	13352
Novembro	59.0	30.20	12.15	60.2	55.9	24427	25335	11787	11575	13549
Dezembro	46.8	24.10	10.50	48.0	44.4	19574	26786	11364	7350	15422
Ano	1524.7	639.00	14.98	1537.0	1443.5	599463	363044	200773	365627	162270

Legendas

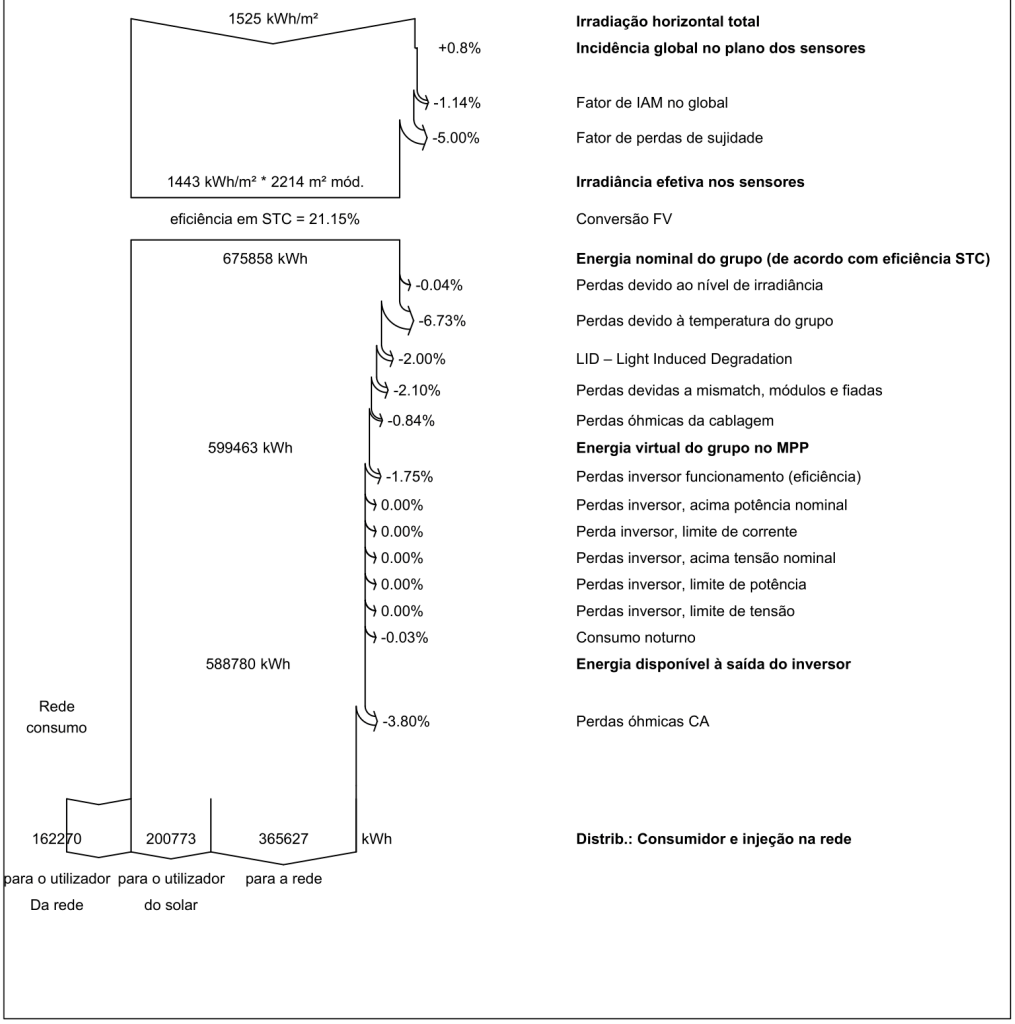
GlobHor	Irradiação horizontal total	EArray	Energia efetiva à saída do grupo
DiffHor	Irradiação difusa horizontal	E_User	Energia fornecida ao consumidor
T_Amb	Temperatura ambiente	E_Solar	Energia do sol
GlobInc	Incidência global no plano dos sensores	E_Grid	Energia injetada na rede
GlobEff	Global efetivo, corrigido para IAM e sombras	EFrGrid	Energia de rede

Variante: Nova variante da simulação

PVsyst V7.3.4
VC0, Data da simulação: 20/06/23 17:15
com v7.3.4

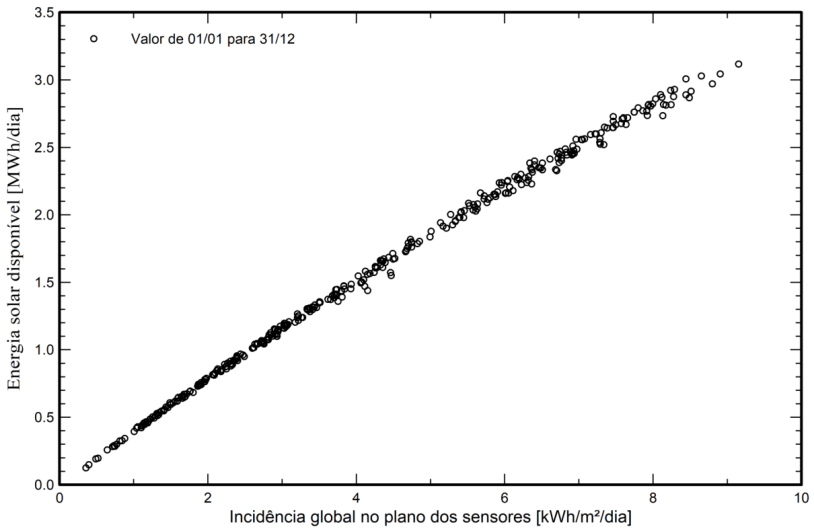
Ecoinside – Sol. Ecoeficiência e Sustentabilidade, lda. (Portugal)

Diagrama de perdas

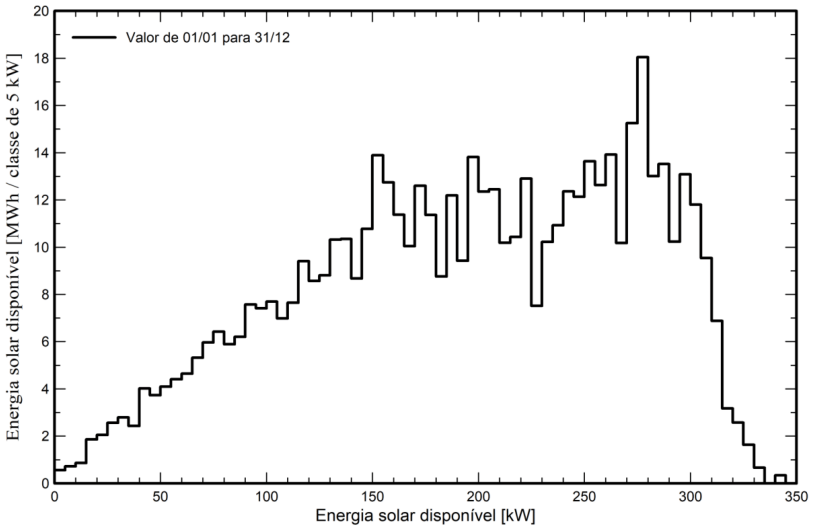


Gráficos predefinidos

Diagrama de entrada / saída diário



Distribuição da potência à saída do sistema



Anexo B

Fichas Técnicas utilizadas no Caso de Estudo

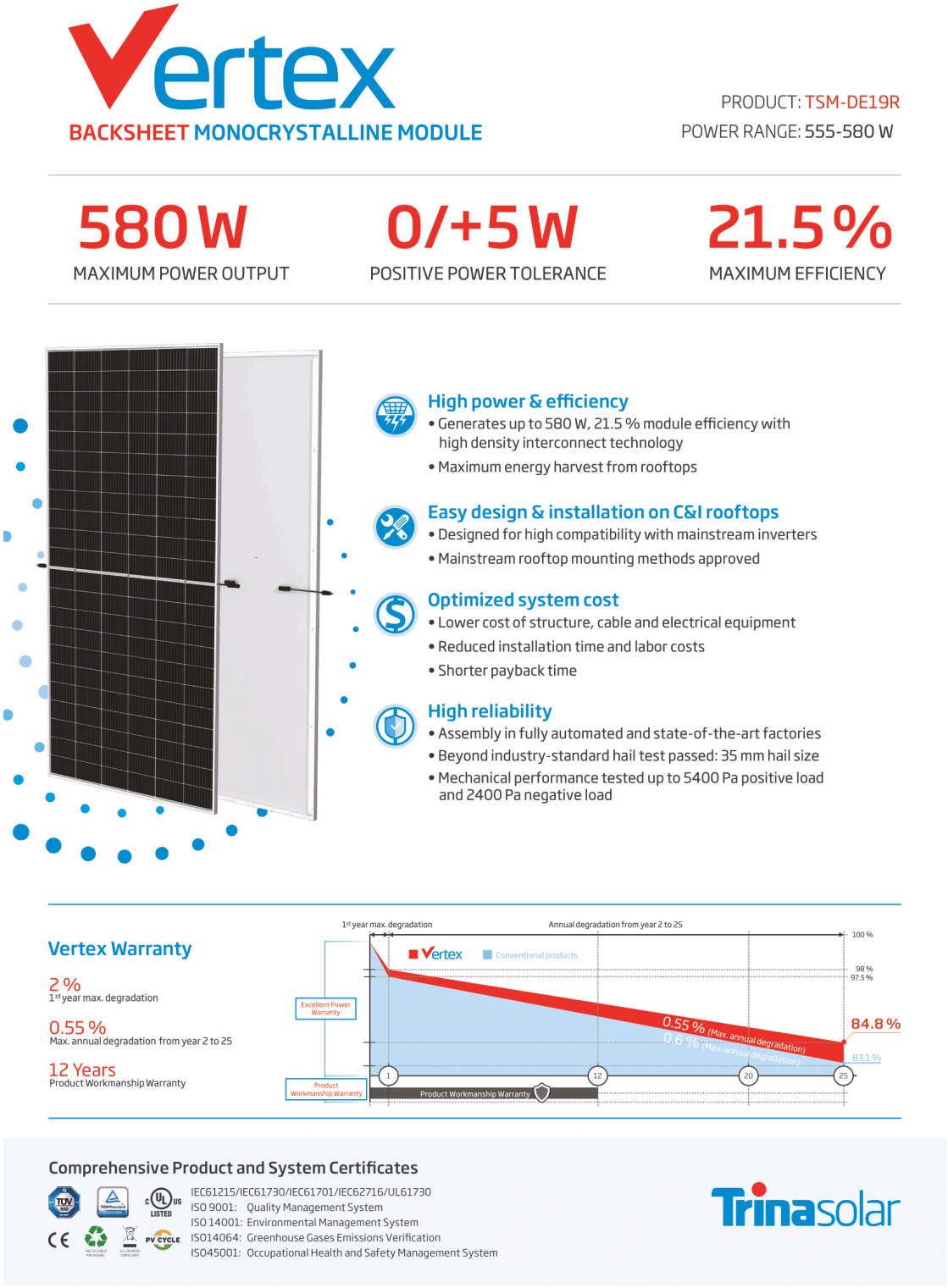
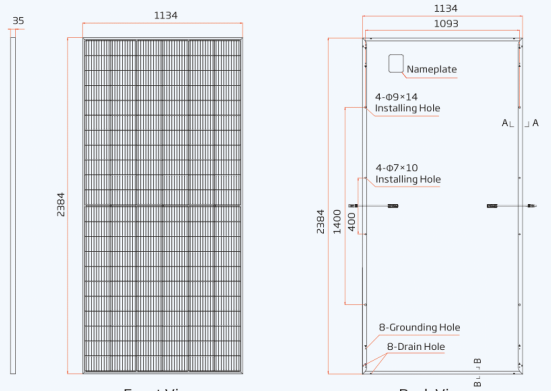


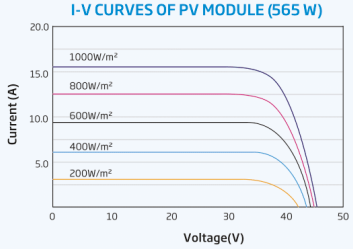
Figura B.1: Ficha técnica do painel fotovoltaico escolhido

Vertex

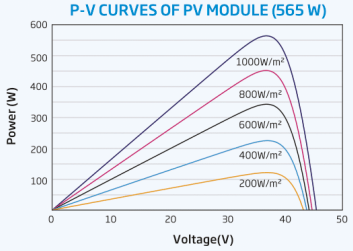
DIMENSIONS OF PV MODULE (mm)



I-V CURVES OF PV MODULE (565 W)



P-V CURVES OF PV MODULE (565 W)



ELECTRICAL DATA (STC)	TSM-555 DE19R	TSM-560 DE19R	TSM-565 DE19R	TSM-570 DE19R	TSM-575 DE19R	TSM-580 DE19R
Peak Power Watts-PMAX (Wp)*	555	560	565	570	575	580
Power Tolerance-PMAX (W)	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5
Maximum Power Voltage-VMPP (V)	37.2	37.4	37.7	37.9	38.2	38.4
Maximum Power Current-IMPP (A)	14.92	14.96	14.99	15.03	15.07	15.10
Open Circuit Voltage-VOC (V)	44.8	45.0	45.2	45.5	45.7	46.0
Short Circuit Current-ISC (A)	15.91	15.95	16.00	16.05	16.08	16.11
Module Efficiency η m (%)	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25 °C, Air Mass AM1.5. *Measuring tolerance: ±3 %.

ELECTRICAL DATA (NOCT)	TSM-555 DE19R	TSM-560 DE19R	TSM-565 DE19R	TSM-570 DE19R	TSM-575 DE19R	TSM-580 DE19R
Maximum Power-PMAX (Wp)	419	423	427	431	435	438
Maximum Power Voltage-VMPP (V)	34.5	34.7	34.9	35.1	35.4	35.6
Maximum Power Current-IMPP (A)	12.14	12.18	12.23	12.26	12.30	12.32
Open Circuit Voltage-VOC (V)	42.2	42.4	42.6	42.8	43.0	43.3
Short Circuit Current-ISC (A)	12.82	12.85	12.89	12.93	12.96	12.98

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

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
No. of cells	132 cells
Module Dimensions	2384 x 1134 x 35 mm
Weight	29.6 kg
Glass	3.2 mm, High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	EVA/POE
Backsheet	White
Frame	35mm Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0 mm², Landscape: 1400/1400 mm Portrait: 280/350 mm*
Connector	TS4 / MC4 EVO2*

*Special order only.

TEMPERATURE RATINGS

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	43 °C (±2 K)
Temperature Coefficient of PMAX	−0.34%/K
Temperature Coefficient of VOC	−0.25%/K
Temperature Coefficient of ISC	0.04%/K

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	−40 to +85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Max Series Fuse Rating	30A

WARRANTY

12 Year product workmanship warranty

25 Year power warranty

2% First year degradation

0.55% Annual power degradation

(Please refer to the applicable limited warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box:	31 pieces
Modules per 40' container:	620 pieces

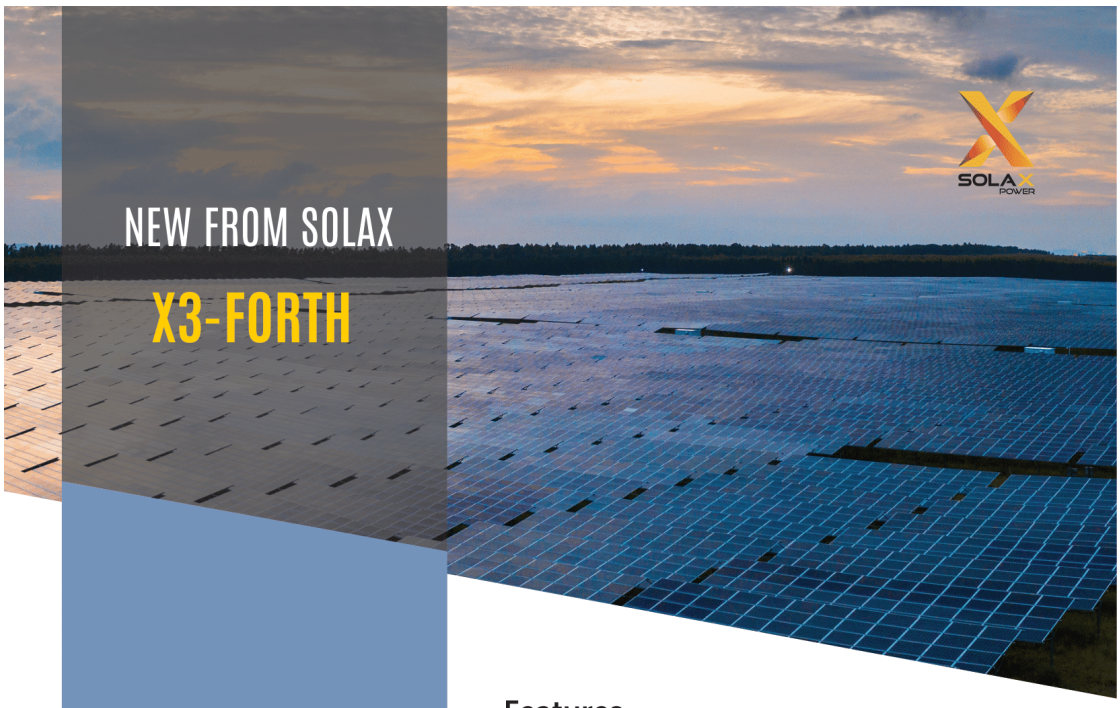
Trinasolar

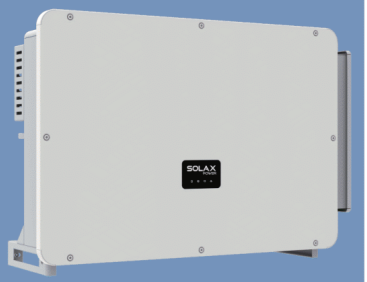
CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.

© 2022 Trina Solar Limited, All rights reserved, Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

Version number: TSM_EN_2022_PA1

www.trinasolar.com





X3-FORTH

80kW/100kW/110kW
120kW/125kW/136kW/150kW

Features

More energy harvest

- Maximum efficiency up to 99%
- 180~1000Vdc MPPT voltage range
- Maximum 12 MPPTs, 2 strings per MPP tracker
- 150% PV oversizing input, 110% overloading output
- Maximum 32A MPPT current

Safety & Reliability

- IP66 protection level
- AFCI protection (Optional)
- AC terminal temperature detection
- Both AC&DC SPDs(Type II) inside, Type I+II SPD is optional

Intelligence for easy maintenance and economy

- Built-in export power control
- Remote setting and upgrading
- 24 hours operation monitoring
- Smart I-V Curve Diagnosis supported
- Night-time reactive power compensation
- Aluminium AC cable connection available
- Power line communication (PLC)(Optional)
- Fuse free design with smart string current monitoring
- Smart air cooling technique results in long lifetime of fans
- Advanced heat dissipation technology makes the system more than 5% lighter and smaller

info@solaxpower.com
service@solaxpower.com

Contact Us for More Information

www.solaxpower.com
AU: +61 1300 476529
DE: +49 6142 4091664
Global: +86 571-56260008
UK: +44 2476 586998
NL: +31 (0) 852 737932

Figura B.2: Ficha técnica do inversor fotovoltaico escolhido (125 kW)

X3-FORTH (THREE PHASE)

	X3-FTH-80K	X3-FTH-100K	X3-FTH-110K	X3-FTH-120K	X3-FTH-125K	X3-FTH-136K-MV	X3-FTH-150K-MV
DC INPUT							
Max. PV array input power [kWp]	120	150	165	180	188	204	225
Max. PV input voltage [V]	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Startup voltage [V]	200	200	200	200	200	200	200
Nominal input voltage [V]	580/600	580/600	580/600	580/600	580/600	730/785	730/785
MPP tracker voltage range [V]	180~1000	180~1000	180~1000	180~1000	180~1000	180~1000	180~1000
No. of MPP trackers	9	9	9	12	12	12	12
Strings per MPP tracker	2						
Max. input current per MPPT [A]	32						
Max. short circuit current per MPPT [A]	46						
AC OUTPUT							
Nominal AC output power [kW]	80	100	110	120	125	136	150
Nominal AC output current [A]	121.3/116	151.6/145	166.7/159.5	181.9/174	189.4/181.2	157.1/145.4	173.2/160.4
Max. AC output apparent power [kVA]	88	110	121	132	132	149.6	165
Max. AC output current [A]	133.4/127.6	166.7/159.5	183.4/175.4	200/191.3	200/191.3	172.8/160	190.6/176.5
Nominal AC voltage[V]	220/380, 230/400, 3/N/PE, 3/PE					500/540,3P3W+PE	500/540,3P3W+PE
Nominal grid frequency [Hz]	50/60						
Displacement power factor	0.8 leading-0.8 lagging						
THDi (Rated power) [%]	<3						
SYSTEM DATA							
MPPT efficiency [%]	99.9						
Max. efficiency [%]	98.6	98.6	98.6	98.6	98.6	99.0	99.0
Ingress protection	IP66						
Operating temperature range [°C]	-30~+60 (Derating above 45)						
Max. operation altitude [m]	4000 (Derating above 3000)						
Relative humidity [%]	0~100						
Dimensions[W×H×D] [mm]	985×660×327.5						
Weight [kg]	83	83	83	87	87	87	87
Cooling concept	Smart fan cooling						
Communication interfaces	RS485 / (Optional: Pocket WiFi/LAN/4G) / PLC(Optional) / USB						
Display	LCD(Optional)/LED*4						
PROTECTION							
Over/under voltage protection	YES						
DC isolation protection	YES						
Grid monitoring	YES						
DC injection monitoring	YES						
Residual current detection	YES						
Anti-islanding protection	YES						
String fault detection	YES						
SPD (DC/AC)	Type II / Type II						
Arc-fault circuit interrupter(AFCI)	Optional						
AC terminals over temperature detection	YES						
AC auxiliary power supply(APS)	Optional						
Power line communication(PLC)	Optional						
STANDARD							
Safety	IEC/EN 62109-1; IEC/EN 62109-2; NB/T 32004						
EMC	IEC/EN 61000; NB/T 32004						
Certification	EN 50549; AS4777.2; VDE4105; IEC 61727; IEC 62116; IEC 61683; IEC 60068; EN 50530; NB/T 32004						

**V2.6 Information may be subject to modify without notice.650.00001.00*

Figura B.3: Ficha técnica do inversor fotovoltaico escolhido (30 kW)

X3-PRO G2

	X3-PRO-8K-G2	X3-PRO-10K-G2	X3-PRO-12K-G2	X3-PRO-15K-G2	X3-PRO-17K-G2	X3-PRO-20K-G2	X3-PRO-25K-G2	X3-PRO-30K-G2
DC INPUT								
Max. PV array input power [Wp]	12000	15000	18000	22500	25500	30000	37500	45000
Max. PV input voltage [V]	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Start startup voltage [V]	200	200	200	200	200	200	200	200
Nominal input voltage [V]	650	650	650	650	650	650	650	650
MPP tracker voltage range [V]	160~980							
No. of MPP trackers	2	2	2	2	2	2	3	3
Strings per MPP tracker	2	2	2	2	2	2	2	2
Max. input current per MPPT [A]	32/32	32/32	32/32	32/32	32/32	32/32	32/32/32	32/32/32
Max. short circuit current per MPPT [A]	40/40	40/40	40/40	40/40	40/40	40/40	40/40/40	40/40/40
AC OUTPUT								
Nominal AC output power [W]	8000	10000	12000	15000	17000	20000	25000	30000
Nominal AC output current [A]	12.2/11.6	15.2/14.5	18.2/17.4	22.8/21.8	25.8/24.7	30.3/29	37.9/36.3	45.5/43.5
Max. AC output apparent power [VA]	8800	11000	13200	16500	18700	22000	27500	30000
Max. AC output current [A]	13.2	16	19.3	24.2	27.5	33.6	41.8	45.5
Nominal AC voltage[V]	220/380, 230/400, 3/N/PE, 3/PE							
Nominal grid frequency [Hz]	50/60							
Displacement power factor	0.8 leading ~ 0.8 lagging							
THDi (Rated power) [%]	<3							
SYSTEM DATA								
Max. efficiency [%]	98.20	98.20	98.20	98.30	98.30	98.30	98.50	98.50
Euro efficiency [%]	97.70	97.70	97.70	97.80	97.80	97.80	98.00	98.00
Standby consumption(Night) [W]	<3							
Ingress protection	IP66							
Operating temperature range [°C]	-30~+60 (Derating above 45)							
Max. operation altitude [m]	4000 (Derating above 3000)							
Relative humidity [%]	0~100							
Typical noise emission [dB]	<35	<35	<35	<55	<55	<55	<55	<58
Storage temperature [°C]	-30~+60							
Dimensions (W×H×D) [mm]	482×417×181							
Weight [kg]	24.5			26			28	
Cooling concept	Natural cooling			Smart fan cooling				
Communication interfaces	USB / RS485 / DRM / Pocket WiFi (Optional: Pocket LAN/4G) / Adapter box(Optional)							
PROTECTION								
Over/under voltage protection	YES							
DC isolation protection	YES							
Grid monitoring	YES							
DC injection monitoring	YES							
Residual current detection	YES							
Anti-islanding protection	YES							
Over Temp protection	YES							
SPD (DC/AC)	Type II / Type II							
ARC protection	Optional							
STANDARD								
Safety	IEC/EN 62109-1; IEC/EN 62109-2; NB/T 32004							
EMC	IEC/EN 61000; NB/T 32004							
Certification	VDE4105; EN 50549; AS 4777.2; VDE4105; IEC 61727; IEC 62116; IEC 61683; IEC 60068; EN 50530; NB/T 32004							

**V2.1. Information may be subject to modify without notice.* 650.00004.00

Referências

[1] V. Smil. Evolução do Consumo por tipo de Energia. URL: https://ourworldindata.org/energy-production-consumption [último acesso em 14-02-2023].

[2] Organização das Nações Unidas. COP21 Perguntas frequentes. URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2015/10/COP21-FAQ-Portuguese.pdf [último acesso em 14-02-2023].

[3] Conselho Europeu. Acordo de Paris sobre alterações climáticas. URL: https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/paris-agreement/#council [último acesso em 14-02-2023].

[4] T. Ponce de Leão. Climate Change & Energy Transition Opportunities.

[5] Comissão Europeia. O Pacto Ecológico Europeu. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt [último acesso em 15-02-2023].

[6] Conselho Europeu. Objetivo 55 – o plano da UE para uma transição ecológica. URL: https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/ [último acesso em 15-02-2023].

[7] Comissão Europeia. REPowerEU: energia segura, sustentável e a preços acessíveis para a Europa. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_pt [último acesso em 16-02-2023].

[8] XXI Governo Português. Portugal foi o primeiro país no mundo a afirmar o compromisso da neutralidade carbónica. URL: https://shorturl.at/muw58 [último acesso em 16-02-2023].

[9] A. Flor. Um ano de Lei de Bases do Clima: quatro sucessos e cinco tarefas por cumprir. *Público*, 2023. URL: https://www.publico.pt/2023/02/01/azul/noticia/ano-lei-bases-clima-onde-emergencia-climatica-2037137 [último acesso em 16-02-2023].

[10] Portugal Energia. Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030. URL: https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-3/ [último acesso em 16-02-2023].

[11] IRENA. Technologies. URL: https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Technologies [último acesso em 16-02-2023].

[12] C. Monteiro. EES-Energia Eólica e Solar, 2022.

[13] Mapas energia solar. URL: https://www.electronica-pt.com/mapas-radiacao-solar [último acesso em 29-06-2023].

[14] Direção-Geral de Energia e Geologia. Estatísticas rápidas das renováveis. URL: https://www.dgeg.gov.pt/media/okedagxb/dgeg-arr-2022-07.pdf [último acesso em 17-02-2023].

[15] J. A. Peças Lopes. Transição Energética e Desafios para as Redes Elétricas.

[16] Ecoinside. Sobre nós. URL: https://www.ecoinside.pt/sobre-nos/ [último acesso em 02-03-2023].

[17] E. L. Garrido. Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho 2010.

[18] C. Monteiro. Energia solar fotovoltaica a célula FV, 2022.

[19] *Photovoltaic plants Cutting edge technology. From sun to socket*.

[20] International Electrotechnical Commission. Solar photovoltaic energy systems - Terms, definitions and symbols. URL: https://webstore.iec.ch/publication/28612 [último acesso em 13-03-2023].

[21] Silício mono ou policristalino: quem vence o duelo? URL: https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/ [último acesso em 17-03-2023].

[22] Iberdrola. Painéis bifaciais. URL: https://www.iberdrola.com/inovacao/paineis-solares-bifaciais [último acesso em 20-03-2023].

[23] UNLV News Center. Solar side effects. *University of Nevada, Las Vegas*, 2017. URL: https://www.unlv.edu/news/article/solar-side-effects [último acesso em 18-04-2023].

[24] Direção-Geral de Energia e Geologia. Autoconsumo e Comunidade de Energia Renovável - Manual Digital, 2022.

[25] E-REDES. Produção de energia para Autoconsumo. URL: https://www.e-redes.pt/pt-pt/transicao-energetica/redes-do-futuro/autoconsumo [último acesso em 20-04-2023].

[26] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2018 relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2018. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?qid=1682586815864&uri=CELEX%3A32018L2001 [último acesso em 19-04-2023].

[27] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2009. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A32009L0028 [último acesso em 19-04-2023].

[28] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho de 9 de setembro de 2015 que altera a Diretiva 98/70/CE relativa à qualidade da gasolina e do combustível para motores diesel e a diretiva 2009/28/CE relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2015. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A32015L1513 [último acesso em 19-04-2023].

[29] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho de 13 de maio de 2013 que adapta a Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, devido à adesão da República da Croácia. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2015. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A32013L0018 [último acesso em 19-04-2023].

[30] Direção-Geral de Energia e Geologia. Autoconsumo e CER - Enquadramento legal. URL: https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energia-eletrica/producao-de-energia-eletrica/producao-descentralizada-autoconsumo-e-upp-mp-mn/autoconsumo-e-cer/enquadramento-legal/ [último acesso em 20-04-2023].

[31] Presidência do Conselho de Ministros. Decreto-lei n.º 15/2022, de 14 de janeiro. *Diário da República n.º 10/2022, Série I de 2022-01-14*, páginas 3 – 185, 2022. URL: https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/15-2022-177634016 [último acesso em 20-04-2023].

[32] J. T. B. Ferreira. Dimensionamento de centrais fotovoltaicas para autoconsumo. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro 2021.

[33] Entidade Reguladora Dos Serviços Energéticos. Estrutura Tarifária do Setor Elétrico em 2023, 2022.

[34] Trina Solar. URL: https://www.trinasolar.com/pt/.

[35] NanoCAD. URL: https://nanocad.com/.

[36] PVsyst. URL: https://www.pvsyst.com/.

[37] Solax Power. URL: https://www.solaxpower.com/.