

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

**Desenvolvimento de ferramentas automáticas  
para dimensionamento e otimização de centrais  
fotovoltaicas (simulação de constrangimentos e  
sistemas off-grid)**

Rui Miguel Fonseca e Silva

VERSÃO FINAL

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Helder Filipe Duarte Leite  
Coorientador: Engenheiro Joaquim Guedes

24 de junho de 2019



# Resumo

A crescente preocupação com o aquecimento global tem sido um dos principais fatores para a redução das emissões de gases poluentes e do aparecimento de políticas que visam um desenvolvimento sustentável. Isto tem levado à procura de produzir energia de forma limpa, com recurso a fontes de energia renováveis. Porém, ainda existem muitas centrais que funcionam apenas a geradores diesel em que, por dificuldade ou inviabilidade, não têm ligação com a rede elétrica de serviço pública, sendo de elevado interesse a melhoria da eficiência destas centrais, de modo a diminuir o combustível gasto e consequentemente as emissões de gases poluentes.

É de elevado interesse para a **Ecoinside**, empresa conhecida pelo trabalho na área da eficiência energética e das energias renováveis, o estudo destas soluções. A empresa já possui uma ferramenta de dimensionamento automático de sistemas fotovoltaicos capaz de determinar o número ótimo de painéis a instalar, em sistemas ligados à rede elétrica (*on-grid*), a partir dos consumos do cliente. A ferramenta vai incrementando painéis fotovoltaicos e, a cada iteração, é feita uma análise técnico-económica da viabilidade dessa nova solução, de forma a encontrar o número de painéis que melhor se ajusta ao caso em estudo.

Este documento foca-se principalmente num estudo feito a um cliente da **Ecoinside**, para a situação em que não há ligação à rede elétrica (*off-grid*) e serão abordados três cenários: central apenas a geradores diesel; central com geradores diesel e sistema fotovoltaico; central com geradores diesel, sistema fotovoltaico e sistema de armazenamento de energia a baterias. Estes três cenários serão abordados de uma perspetiva técnica e económica. Todos os cálculos e gráficos foram feitos com recurso ao Excel.

No final, será apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta complementar para sistemas híbridos *off-grid* com finalidade de uso empresarial pela **Ecoinside**.



# Abstract

The growing concern about global warming has been one of the main factors in reducing greenhouse gas emissions and the emergence of policies aiming a sustainable development. This has led to the production of clean energy using renewable energy sources. However, there are already many power plants that only work with diesel generators in which, due to difficulty or unfeasibility, they are not connected to the public utility grid, being of high interest the efficiency improvement of these power plants, in order to reduce the fuel spent and greenhouse gas emissions.

It is of great interest for **Ecoinside**, a company known for its work in the area of energy efficiency and renewable energies, to study these solutions. The company already has a tool for automatic sizing of photovoltaic systems capable of determining the optimum number of panels to be installed, in systems connected to the grid (*on-grid*), based on the customer's consumption. The tool increases photovoltaic panels and, at each iteration, a technical-economic analysis of the feasibility of this new solution is made, in order to find the number of panels that best fit the case under study.

This document focuses mainly on a study done to an **Ecoinside** customer, for the situation in which there is no connection to the electric grid (*off-grid*). Three scenarios will be approached: diesel genset power plant; diesel genset with photovoltaic power plant; diesel genset with photovoltaic and battery energy storage system. These three scenarios will be approached from a technical and economic perspective. All calculations and graphs were made using Excel.

At the end, it will be presented the development of a complementary tool for hybrid off-grid systems to be used by **Ecoinside**.



# Agradecimentos

Gostaria em primeiro lugar de agradecer aos meus dois orientadores. Ao professor Doutor Helder Leite, pelo companheirismo, apoio, indicações, sugestões e correções que contribuíram para a conclusão desta dissertação. Ao engenheiro Joaquim Guedes, pela oportunidade concedida e pela disponibilidade ao longo de todo o tempo de realização da dissertação.

A toda a equipa da **Ecoinside** que, com total disponibilidade e boa disposição, me fizeram realmente entender a importância do trabalho em equipa. Quero expressar a minha gratidão por me acolherem de braços abertos e me fazerem sentir como um membro desta família, desde o primeiro dia.

Aos meus melhores amigos e família, que estiveram ao meu lado durante todo o percurso académico, pelas longas conversas, pelo companheirismo, força e apoio nos momentos menos bons. À minha namorada agradeço a alegria, compreensão e motivação, que realmente me ajudaram a terminar esta dissertação.

Por último, o maior agradecimento que tenho a fazer, porque nada disto seria possível sozinho. Aos meus pais e irmã, pelo apoio incondicional, paciência e encorajamento que prestaram durante esta fase, mas também durante toda a minha vida.





# Índice

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Resumo .....                                                              | iii       |
| Abstract .....                                                            | v         |
| Agradecimentos .....                                                      | vii       |
| Índice .....                                                              | ix        |
| Lista de figuras .....                                                    | xi        |
| Lista de tabelas .....                                                    | xiii      |
| Abreviaturas e Símbolos .....                                             | xiv       |
| <b>1 Introdução .....</b>                                                 | <b>1</b>  |
| 1.1 Contextualização e Motivação .....                                    | 1         |
| 1.2 Objetivos da dissertação .....                                        | 3         |
| 1.3 Estrutura da dissertação .....                                        | 3         |
| <b>2 Caracterização dos sistemas híbridos .....</b>                       | <b>5</b>  |
| 2.1 Introdução aos sistemas híbridos .....                                | 5         |
| 2.2 Componente fotovoltaica .....                                         | 6         |
| 2.2.1 Célula fotovoltaica .....                                           | 7         |
| 2.2.1.1 Esquema elétrico da célula fotovoltaica .....                     | 8         |
| 2.2.1.2 Efeito da radiação solar na célula fotovoltaica .....             | 13        |
| 2.2.1.3 Efeito da temperatura na célula fotovoltaica .....                | 13        |
| 2.2.1.4 Sombreamentos .....                                               | 14        |
| 2.2.1.5 Distanciamento entre painéis .....                                | 16        |
| 2.2.2 Inversores .....                                                    | 16        |
| 2.3 Unidades geradoras a diesel .....                                     | 17        |
| 2.3.1 Poupança de combustível .....                                       | 17        |
| 2.3.2 Ruído .....                                                         | 19        |
| 2.3.3 Período de vida útil .....                                          | 19        |
| 2.3.4 Redução de emissões .....                                           | 19        |
| 2.4 Componente de armazenamento de energia .....                          | 20        |
| <b>3 Sistemas de armazenamento de energia a baterias .....</b>            | <b>21</b> |
| 3.1 Introdução ao armazenamento de energia .....                          | 21        |
| 3.1.1 Efeito da temperatura .....                                         | 22        |
| 3.1.2 Funções dos sistemas de armazenamento nos sistemas fotovoltaicos .. | 23        |
| 3.2 Características de uma bateria .....                                  | 23        |
| 3.2.1 Tensão e Corrente .....                                             | 23        |
| 3.2.2 Resistência .....                                                   | 23        |
| 3.2.3 Capacidade .....                                                    | 24        |
| 3.2.4 Vida útil da bateria .....                                          | 24        |
| 3.3 Diferentes tecnologias de armazenamento .....                         | 25        |
| 3.3.1 Baterias Chumbo-ácido .....                                         | 26        |
| 3.3.2 Baterias de Níquel cádmio .....                                     | 26        |
| 3.3.3 Baterias de Níquel-hidreto metálico .....                           | 26        |
| 3.3.4 Baterias de íons de Lítio .....                                     | 27        |

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4      | Comparações .....                                                            | 28        |
| 3.5      | Potencial de mercado.....                                                    | 29        |
| <b>4</b> | <b>Dimensionamento e análise técnico-económica do sistema híbrido .....</b>  | <b>31</b> |
| 4.1      | Descrição do caso de estudo.....                                             | 31        |
| 4.2      | Caraterização dos consumos.....                                              | 31        |
| 4.3      | Sistema apenas com unidades geradoras a diesel .....                         | 33        |
| 4.3.1    | Dimensionamento e análise técnica do sistema .....                           | 33        |
| 4.3.2    | Análise económica e viabilidade das soluções .....                           | 36        |
| 4.4      | Sistema fotovoltaico .....                                                   | 37        |
| 4.4.1    | Radiância .....                                                              | 38        |
| 4.4.2    | Potência a instalar .....                                                    | 39        |
| 4.4.3    | Caraterísticas dos painéis e dos inversores .....                            | 39        |
| 4.4.4    | Dimensionamento do sistema fotovoltaico .....                                | 40        |
| 4.5      | Sistema fotovoltaico com unidades geradoras a diesel .....                   | 46        |
| 4.5.1    | Estratégia de operação .....                                                 | 46        |
| 4.5.2    | Análise de resultados e viabilidade da solução .....                         | 47        |
| 4.6      | Sistema fotovoltaico com unidades geradoras a diesel e BESS .....            | 52        |
| 4.6.1    | Estratégia de Operação .....                                                 | 53        |
| 4.6.2    | Dimensionamento do sistema de baterias .....                                 | 54        |
| 4.6.3    | Análise de resultados e viabilidade da solução .....                         | 56        |
| 4.7      | Ferramenta automática desenvolvida .....                                     | 63        |
| 4.7.1    | Inputs.....                                                                  | 64        |
| 4.7.2    | Outputs.....                                                                 | 66        |
| 4.7.3    | Validação da ferramenta.....                                                 | 69        |
| <b>5</b> | <b>Conclusões e trabalhos futuros.....</b>                                   | <b>71</b> |
| 5.1      | Conclusões .....                                                             | 71        |
| 5.2      | Trabalho futuro .....                                                        | 72        |
|          | <b>Referências .....</b>                                                     | <b>73</b> |
|          | <b>Anexos .....</b>                                                          | <b>77</b> |
|          | Anexo A - Datasheet do painel utilizado para o dimensionamento .....         | 77        |
|          | Anexo B - Datasheet do inversor utilizado para o dimensionamento .....       | 79        |
|          | Anexo C - Datasheet do gerador diesel C32 utilizado no dimensionamento.....  | 81        |
|          | Anexo D - Datasheet do gerador diesel C13 utilizado no dimensionamento ..... | 83        |
|          | Anexo E - Resultados obtidos para validação da ferramenta .....              | 84        |

# Lista de figuras

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 - Produção fotovoltaica em Portugal (2010 - 2019). Fonte: DGEG [1].                                  | 2  |
| Figura 2.1 - Sistema fotovoltaico on-grid [44].                                                                 | 6  |
| Figura 2.2 - Célula solar, módulo solar e array [10].                                                           | 7  |
| Figura 2.3 - Camadas de uma célula fotovoltaica [79].                                                           | 8  |
| Figura 2.4 - Circuito equivalente para uma célula ideal [17].                                                   | 9  |
| Figura 2.5 - Circuito equivalente para uma célula real [17].                                                    | 10 |
| Figura 2.6 - Circuito equivalente da célula solar - corrente de curto-circuito [17].                            | 10 |
| Figura 2.7 - Circuito equivalente da célula solar - tensão em circuito aberto[17].                              | 11 |
| Figura 2.8 - Curva de potência e ponto de máxima potência (MPP)[17].                                            | 11 |
| Figura 2.9 - Variação da curva I-V com a radiação [17].                                                         | 13 |
| Figura 2.10 - Variação da curva I-V com a temperatura [17].                                                     | 14 |
| Figura 2.11 - Conjunto de células em série com e sem sombreamento [10].                                         | 15 |
| Figura 2.12 - Distância entre painéis [46].                                                                     | 16 |
| Figura 2.13 - Comparação da curva de eficiência de combustível a velocidade variável e velocidade constante[2]. | 18 |
| Figura 2.14 - Curva de potência típica de um gerador diesel [2].                                                | 19 |
| Figura 3.1 - Divisão dos custos num sistema híbrido PV/Diesel/BESS típico.                                      | 22 |
| Figura 3.2 - Influencia da temperatura no tempo de vida de uma bateria para diferentes tecnologias [40].        | 22 |
| Figura 3.3 - Vida útil das baterias em função da profundidade de descarga em baterias chumbo-ácido [12].        | 25 |
| Figura 3.4 - Evolução do preço das baterias [9].                                                                | 29 |
| Figura 4.1 - Diagrama de carga para o mês de janeiro.                                                           | 32 |
| Figura 4.2 - Diagrama de carga diário.                                                                          | 32 |
| Figura 4.3 - Modelo C32 da Caterpillar.                                                                         | 33 |
| Figura 4.4 - Modelo C13 da Caterpillar.                                                                         | 35 |
| Figura 4.5 - Exemplo do ficheiro obtido no software PVGIS para o mês de janeiro.                                | 38 |
| Figura 4.6 - Irradiância no plano horizontal para o local em questão.                                           | 39 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.7 - Curva de eficiência do inversor utilizado. ....                                                               | 41 |
| Figura 4.8 - Associação de módulos em série. ....                                                                          | 42 |
| Figura 4.9 - Associação de módulos em paralelo. ....                                                                       | 44 |
| Figura 4.10 - Aspeto simplificado do sistema híbrido fotovoltaico + Geradores diesel [5]. ....                             | 46 |
| Figura 4.11 - Ferramenta desenvolvida para o cálculo do sistema híbrido. ....                                              | 46 |
| Figura 4.12 - Fluxograma da operação do sistema híbrido. ....                                                              | 47 |
| Figura 4.13 - Distribuição das produções na solução diesel + fotovoltaico. ....                                            | 48 |
| Figura 4.14 - Período de retorno de investimento. ....                                                                     | 50 |
| Figura 4.15 - Comparação do custo a 10 anos dos dois sistemas. ....                                                        | 51 |
| Figura 4.16 - Fluxograma da estratégia de operação do sistema híbrido PV + Diesel + BESS. .                                | 53 |
| Figura 4.17 - Distribuição da produção. ....                                                                               | 57 |
| Figura 4.18 - SOC médio mensal do BESS. ....                                                                               | 58 |
| Figura 4.19 - Comparativo do custo a 10 anos dos três sistemas. ....                                                       | 60 |
| Figura 4.20 - Tempo de retorno de investimento. ....                                                                       | 62 |
| Figura 4.21 - Ecrã principal da ferramenta desenvolvida. ....                                                              | 64 |
| Figura 4.22 - Dados de entrada do gerador diesel. ....                                                                     | 65 |
| Figura 4.23 - <i>Dashboard</i> apresentada no final da simulação. ....                                                     | 66 |
| Figura 4.24 - Valores discriminados de 15 em 15 minutos para o caso sem fotovoltaico. ....                                 | 67 |
| Figura 4.25 - Valores discriminados de 15 em 15 minutos para o caso com fotovoltaico. ....                                 | 67 |
| Figura 4.26 - Valores mensais de produção fotovoltaica e geradores diesel. ....                                            | 68 |
| Figura 4.27 - Análise financeira do sistema diesel com fotovoltaico comparado ao sistema apenas com geradores diesel. .... | 68 |

# Lista de tabelas

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 - Comparação entre os tipos mais comuns de baterias do mercado [29][30][31][42].....               | 28 |
| Tabela 3.2 - Preço de referência das baterias de lítio. ....                                                  | 29 |
| Tabela 4.1 - Consumo de combustível do gerador C32 da Caterpillar.....                                        | 34 |
| Tabela 4.2 - Resultados obtidos para o gerador diesel C32 da Caterpillar. ....                                | 34 |
| Tabela 4.3 - Consumo de combustível do gerador C13 da Caterpillar.....                                        | 35 |
| Tabela 4.4 - Resultados obtidos para o grupo de geradores diesel C13 da Caterpillar. ....                     | 36 |
| Tabela 4.5 - Custo para o 1º ano das duas soluções. ....                                                      | 37 |
| Tabela 4.6 - Características do painel fotovoltaico. ....                                                     | 39 |
| Tabela 4.7 - Características do inversor. ....                                                                | 40 |
| Tabela 4.8 - Distribuição das strings pelos inversores.....                                                   | 43 |
| Tabela 4.9 - Verificação das potências nos inversores. ....                                                   | 44 |
| Tabela 4.10 - Valores obtidos na simulação.....                                                               | 45 |
| Tabela 4.11 - Valores obtidos para os dois geradores em uso. ....                                             | 48 |
| Tabela 4.12 - Análise do período de retorno de investimento para o sistema diesel + fotovoltaico. ....        | 49 |
| Tabela 4.13 - Comparativo do custo a 10 anos dos dois sistemas. ....                                          | 51 |
| Tabela 4.14 - TIR e VAL calculados para o sistema diesel e fotovoltaico.....                                  | 52 |
| Tabela 4.15 - Escolha da capacidade das baterias. ....                                                        | 55 |
| Tabela 4.16 - Valores mensais obtidos. ....                                                                   | 56 |
| Tabela 4.17 - Valores obtidos para os dois geradores em uso. ....                                             | 58 |
| Tabela 4.18 - Comparativo do custo a 10 anos dos três sistemas. ....                                          | 59 |
| Tabela 4.19 - Análise do período de retorno de investimento para o sistema diesel + fotovoltaico + BESS. .... | 61 |
| Tabela 4.20 - TIR e VAL calculados para o sistema diesel com fotovoltaico e sistema de baterias. ....         | 63 |

# Abreviaturas e Símbolos

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| BESS | <i>Battery Energy Storage Systems</i> |
| DOD  | <i>Depth of Discharge</i>             |
| MPP  | <i>Maximum Power Point</i>            |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracking</i>   |
| O&M  | Operação e Manutenção                 |
| PV   | Fotovoltaico                          |
| RESP | Rede Elétrica de Serviço Público      |
| SOC  | <i>State of Charge</i>                |
| TIR  | Taxa Interna de Rentabilidade         |
| UPS  | <i>Uninterruptible power supply</i>   |
| VAL  | Valor Atualizado Líquido              |
| VBA  | <i>Visual Basic for Applications</i>  |

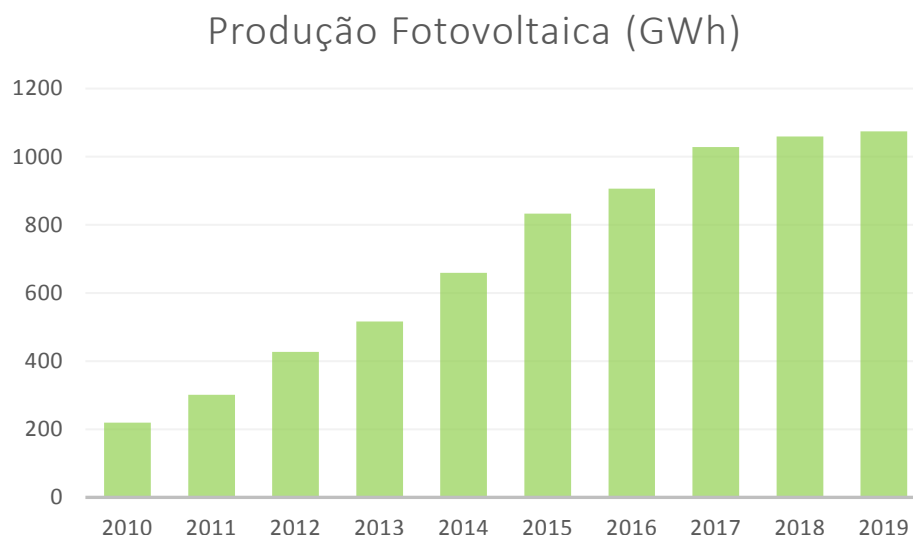
# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização e Motivação

A energia elétrica é um bem essencial para a humanidade aumentando de forma significativa a qualidade de vida dos seus utilizadores. Contudo, cerca de um bilhão de pessoas no mundo não tem acesso a este tipo de energia. O objetivo dos operadores de rede é então fazer chegar eletricidade ao máximo de pessoas possível, de modo a satisfazer as necessidades existentes, abrangendo também as regiões em que se torna mais complicado fazer a extensão da rede elétrica, devido a condicionantes económicas e/ou geográficas.

Existem várias maneiras de gerar energia elétrica e que, dependendo da fonte de energia utilizada, pode ser classificada como renovável ou não renovável. A energia renovável é produzida a partir de recursos naturais, capazes de se regenerarem num curto espaço de tempo e de um modo sustentável, sendo assim, inesgotáveis (p.e.: sol, água, vento, entre outros). Já a energia não renovável é gerada a partir de fontes não renováveis e cujas reservas são limitadas (p.e.: carvão, petróleo, gás natural, entre outros). Então, utilizando as fontes de energia renovável, evita-se a importação de combustíveis fósseis para gerar eletricidade bem como a emissão de gases com efeito de estufa.

A produção de eletricidade usando o sol é possível através de painéis solares fotovoltaicos ou de painéis solares térmicos. No primeiro caso, que é o que interessa para esta dissertação, as células fotovoltaicas ao receberem os raios solares transformam-nos em eletricidade. A potência instalada fotovoltaica em Portugal tem vindo a aumentar e consequentemente a produção de energia elétrica a partir da energia do sol também, como se verifica pela Figura 1.1, sendo a produção total no ano-móvel de fevereiro de 2018 a janeiro de 2019 igual a 1074 GWh, comparando com a produção em 2010, que foi igual a 219 GWh.



**Figura 1.1 - Produção fotovoltaica em Portugal (2010 - 2019). Fonte: DGE [1].**

O acréscimo de produção renovável tem permitido reduzir as emissões específicas do setor electroprodutor nacional cifrando-se o valor de 2017 nos 360 kg/MWh, comparados aos 589 kg/MWh registados em 2002 (dados da APREN). Nos próximos anos prevê-se que a produção de eletricidade através de fontes renováveis continue a influenciar a descarbonização da sociedade portuguesa, motivada pela previsão de aumento da produção de energia elétrica de origem renovável.

O interesse no estudo dos sistemas híbridos, advém do facto de se complementarem duas ou mais formas de produção de energia elétrica, aumentando assim a eficiência do sistema e de se poder responder de forma eficaz a aumentos de consumo de energia.

Os geradores diesel são uma excelente fonte de backup de energia, devido à facilidade de transporte, instalação e remoção, bem como à maturidade da tecnologia. Porém, o preço dos combustíveis na última década aumentou para mais do dobro. Com o aumento dos preços dos combustíveis, o preço de produção de energia elétrica, nestes casos, também aumenta. Outro fator contra estes geradores é a alta poluição que provocam [2].

Com o objetivo de tornar estes sistemas mais eficientes, integra-se, por exemplo, sistemas fotovoltaicos a funcionar em conjunto com geradores a diesel (que funcionariam como backup), de forma a que estas duas formas de produção de energia se complementem. Além disto, a vantagem deste tipo de sistema é poder ser utilizado tanto com ligação à rede elétrica como sem ela, sendo uma ótima solução para zonas remotas, onde a extensão da rede elétrica não é possível de se realizar ou não é viável. Também poderá ser incluído um sistema de armazenamento de energia o que torna a solução mais eficiente e flexível, apesar de mais cara.

A Ecoinside já dispõe de uma ferramenta programada em linguagem VBA do Excel que permite determinar o número ótimo de painéis a instalar nos sistemas ligados à rede. O



interesse no estudo dos sistemas híbridos no âmbito desta dissertação está também em, posteriormente, se incluir na ferramenta os casos dos sistemas híbridos fotovoltaicos com geradores diesel, tanto *on-grid* como *off-grid*, com a possibilidade de integração de um sistema de armazenamento de energia a baterias.

## 1.2 Objetivos da dissertação

Em primeiro lugar pretende-se fazer uma revisão dos sistemas híbridos com a finalidade de perceber como estes sistemas operam e estudar o funcionamento dos geradores a diesel integrados em sistemas fotovoltaicos.

Em segundo lugar uma revisão das tecnologias de armazenamento de energia a baterias, para se perceber as vantagens e desvantagens de cada tecnologia, as suas características e limitações técnicas bem como a tendência de mercado destes sistemas de armazenamento.

Posteriormente, dimensionar um sistema *off-grid* em que o fornecimento de energia é feito por geradores diesel, a partir de dados de consumo de um cliente da **Ecoinside**. Será depois integrado um sistema fotovoltaico no sistema diesel existente e realizada a respetiva análise técnico-económica. Pretende-se também fazer a inclusão de um sistema de armazenamento a baterias (BESS), no sistema diesel e fotovoltaico dimensionado anteriormente e respetiva análise técnica e económica, com a finalidade de se comparar as várias soluções.

Por último, desenvolver-se uma ferramenta automática em VBA para Excel, complementar à ferramenta existente de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, em que sejam incluídos os sistemas híbridos *off-grid*, para uso empresarial da **Ecoinside**.

## 1.3 Estrutura da dissertação

De acordo com os objetivos, esta dissertação foi dividida em seis capítulos. Este primeiro capítulo é o introdutório à dissertação, descrevendo a motivação, objetivos e estrutura da mesma.

O segundo capítulo trata o estado da arte com uma introdução aos sistemas híbridos de produção de energia e os seus componentes.

No terceiro capítulo são apresentadas as diferentes tecnologias de armazenamento de energia, o seu interesse para os sistemas híbridos e as comparações entre as diferentes tecnologias.

No quarto capítulo é realizado o dimensionamento e análise técnico-económica, várias soluções: apenas com geradores diesel; geradores diesel com integração do sistema fotovoltaico; geradores diesel com integração do sistema fotovoltaico e do sistema de armazenamento de energia a baterias. No fim do capítulo é demonstrada a ferramenta

complementar desenvolvida em VBA do Excel, para sistemas híbridos com geradores diesel e sistema fotovoltaico off-grid.

No quinto e último capítulo encontra-se as conclusões deste trabalho e propostas para trabalhos futuros, de modo a dar continuidade a esta dissertação.

## 2 Caracterização dos sistemas híbridos

### 2.1 Introdução aos sistemas híbridos

Um sistema híbrido de geração de energia é um sistema combinado de duas ou mais fontes de energia, operadas em conjunto, e que pode incluir sistemas de armazenamento. Estes sistemas podem funcionar tanto ligados à rede elétrica, como em modo isolado. A grande meta será não depender da energia da rede, bem como não desperdiçar qualquer energia no processo de produção fotovoltaica.

Nesta dissertação pretende-se explorar os sistemas híbridos com um sistema fotovoltaico a funcionar em conjunto com unidades geradoras diesel e posterior integração de um sistema de armazenamento de energia a baterias. O primeiro tipo de sistema traz vantagens como a capacidade de se satisfazer as necessidades de carga, principalmente à noite, quando não há produção fotovoltaica, bem como quando a produção fotovoltaica é inferior ao consumo, durante o dia.

A inclusão de um sistema de armazenamento de energia será uma estratégia para combater esta injeção de energia na rede, sendo toda a energia gerada para autoconsumo. Neste tipo de sistema, é armazenado o excesso de produção de energia que ocorre nas horas de sol, sendo esta energia utilizada nas horas em que não há sol, e/ou caso a produção não seja suficiente para satisfazer as necessidades de carga. Caso não haja energia suficiente armazenada, é acionado então o grupo de socorro. As vantagens desta solução são a exclusão da venda do excesso de produção à rede, uma vez que este excesso é armazenado nas baterias e também a facilidade que o sistema terá de se adaptar a qualquer aumento de consumo de energia [6].

É por isso objetivo da **Ecoinside**, empresa com os ideais assentes na eficiência energética, a criação de uma ferramenta capaz de dimensionar automaticamente sistemas híbridos compostos por geradores a diesel, sistema fotovoltaico e sistema de baterias para sistemas que não estejam ligados à rede elétrica (*off-grid*).

## 2.2 Componente fotovoltaica

O efeito fotovoltaico é caracterizado pela conversão da energia solar em energia elétrica, sendo as células fotovoltaicas responsáveis por essa conversão. Os fótons são captados por estas células e convertidos em corrente elétrica. Com um inversor é possível fazer a interface destas com a rede elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em sistemas ligados à rede (*on-grid*) e em sistemas autônomos (*off-grid*). No caso dos sistemas autônomos o aproveitamento da energia solar terá de ser ajustado à procura de energia elétrica. Uma vez que a produção de energia não corresponde (na maior parte dos casos) à procura pontual de energia de um consumidor, introduz-se um sistema de armazenamento de energia a baterias e/ou meios de apoio complementares de produção de energia (sistemas híbridos). No caso dos sistemas ligados à rede elétrica, quando a produção não corresponder à procura de energia, a energia será vendida ou comprada à Rede Elétrica de Serviço Pública (RESP), caso a produção exceda o consumo ou caso a produção não seja suficiente para satisfazer as necessidades de consumo, respetivamente [5][14].

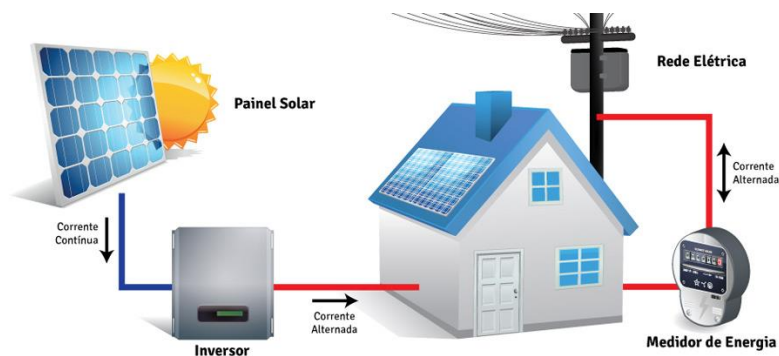


Figura 2.1 - Sistema fotovoltaico on-grid [44].

Como a potência das células solares é reduzida, justifica-se a ligação de várias células no fabrico dos módulos fotovoltaicos.

Um módulo ou painel fotovoltaico consiste num número de células solares ligadas eletricamente, normalmente em série, mas também paralelo, encapsuladas e montadas na estrutura. A um conjunto de módulos dá-se o nome de *array* ou gerador fotovoltaico. Um painel fotovoltaico típico é formado por 36 ou 72 células em série [12].

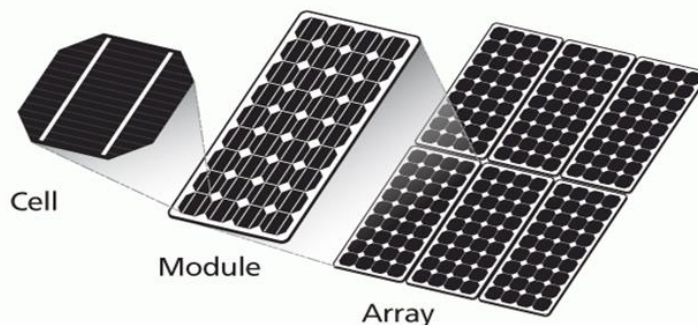


Figura 2.2 - Célula solar, módulo solar e array [10].

### 2.2.1 Célula fotovoltaica

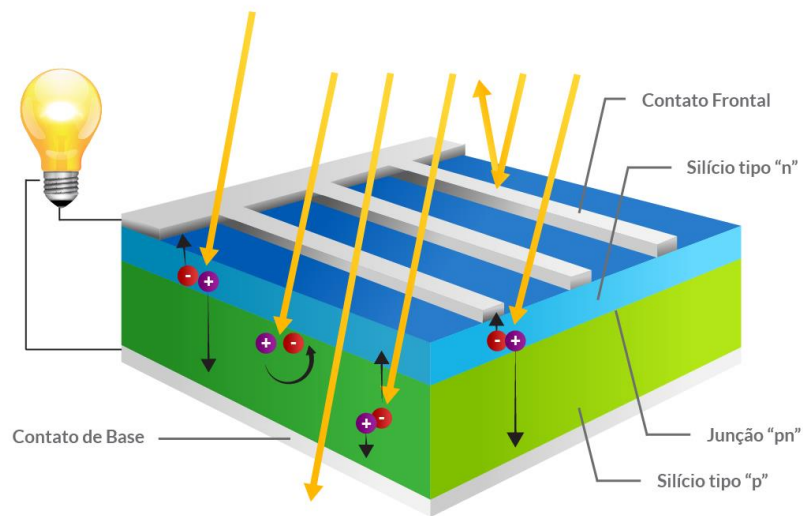
As células fotovoltaicas são dispositivos, compostos por materiais semicondutores, que permitem transformar energia luminosa em energia elétrica, como referido anteriormente. Um dos semicondutores mais utilizados no fabrico de células solares é o silício. Atualmente cerca de 95% de todas as células solares do mundo são de silício. Este é o segundo elemento químico mais frequentemente utilizado na Terra, logo a seguir ao oxigénio e apresenta uma disponibilidade quase ilimitada. O material utilizado nas células solares deve ser da maior pureza possível. Isto pode ser conseguido através de sucessivas etapas na produção química.

Um átomo de silício é formado por catorze prótons e catorze eletrões. Na camada de valência, que é a última camada de distribuição eletrónica, existem quatro eletrões. Quando se constitui um cristal de silício, os átomos alinham-se segundo uma estrutura de teia, formando quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos. Em cada ligação covalente, um átomo partilha um dos seus eletrões de valência com um dos eletrões de valência do átomo vizinho. Como resultado desta partilha de eletrões, a camada de valência, que pode conter até oito eletrões, fica completa, sendo que os eletrões ficam presos nesta e o átomo fica num estado estável.

Para que os eletrões se possam deslocar têm de adquirir energia suficiente para passarem da camada de valência para a camada de condução. A energia necessária, no caso do cristal de silício, vale 1,12 eV. Quando um fóton da radiação solar com energia suficiente atinge um eletrão na camada de valência, este move-se para a camada de condução e deixa uma lacuna no seu lugar, a qual se comporta como uma carga positiva. Neste caso diz-se que foi criado um par eletrão-lacuna.

Só é possível que haja corrente elétrica se existir um campo elétrico, isto é, uma diferença de potencial entre duas zonas da célula. Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não produziria energia elétrica, uma vez que não há esta diferença de potencial. Neste caso, os eletrões passariam para a camada de condução, mas acabariam por se recombinar com as lacunas, não dando origem a qualquer corrente elétrica. A diferença de potencial é obtida através do processo conhecido como dopagem do silício. Este processo consiste na introdução de elementos “estranhos” com o intuito de alterar as

suas propriedades elétricas. Aqui são criadas as camadas tipo *n* e *p* (Figura 2.3) que possuem, respectivamente, excesso de cargas negativas e excesso de cargas positivas, relativamente ao silício puro [4][14][23].



**Figura 2.3 - Camadas de uma célula fotovoltaica [75].**

Na região onde as duas camadas se cruzam, chamada junção *pn*, cria-se, portanto, um campo elétrico que separa os portadores de carga. Os elétrons, excitados pelos fótons com energia suficiente para excitar elétrons da camada de valência para a camada de condução, são enviados para um terminal negativo, ao passo que as lacunas são enviadas para um terminal positivo. Nestas condições, ligando os terminais a um circuito que se fecha exteriormente através de uma carga, circulará corrente elétrica. Enquanto a luz continuar a incidir na célula, haverá corrente elétrica [4]. A intensidade da corrente gerada variará proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente.

#### 2.2.1.1 Esquema elétrico da célula fotovoltaica

Para se modelar um painel solar, deve-se primeiramente perceber como funciona eletricamente a célula fotovoltaica.

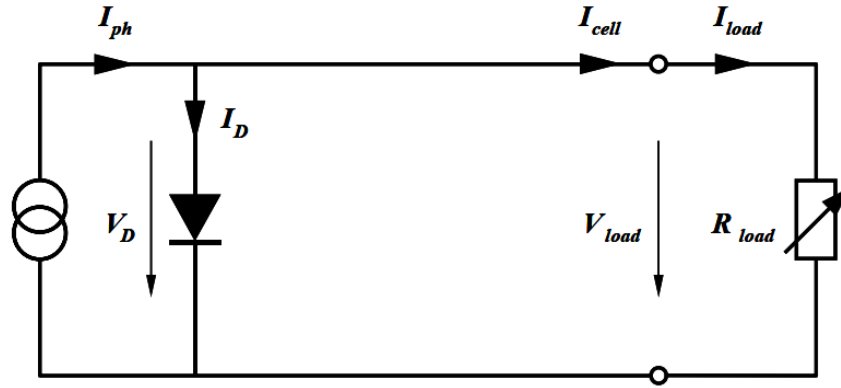


Figura 2.4 - Circuito equivalente para uma célula ideal [17].

Uma célula fotovoltaica ideal pode ser representada pelo circuito equivalente simplificado da figura acima. Consiste numa fonte de corrente que representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa  $I_{ph}$  ao atingir a superfície da célula.  $I_D$  é a corrente unidirecional que representa a troca de eletrões na junção  $pn$  da célula fotovoltaica. É conectado à célula solar uma resistência variável que representa a carga.

A corrente  $I_D$  pode ser expressa por:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Neste caso  $I_0$  corresponde à corrente inversa máxima de saturação do díodo,  $V$  corresponde ao valor de tensão que se encontra aos terminais da célula,  $m$  o fator de idealidade do díodo (díodo ideal:  $m=1$ ; díodo real:  $m>1$ ),  $K$  é a constante de Boltzmann ( $K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T$  é a temperatura absoluta da célula em Kelvin e  $q$  é a carga elétrica do eletrão ( $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

A corrente que se fecha pela carga é então:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right) \quad (2)$$

Isto é válido apenas para uma situação ideal. Porém, as perdas na célula não podem ser ignoradas, uma vez que afetam o desempenho da mesma. Estas perdas estão representadas pelas resistências  $R_p$  e  $R_s$ , na figura abaixo:

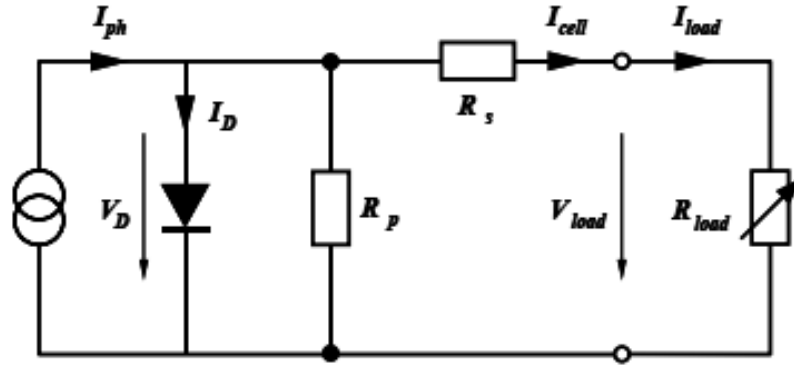


Figura 2.5 - Circuito equivalente para uma célula real [17].

As resistências  $R_p$  e  $R_s$  estão relacionadas com as perdas da corrente de fugas inversa, que ocorre devido à junção *pn* e de tensão devido à migração dos portadores de carga do semicondutor para os condutores elétricos da célula. Quando se estuda as células fotovoltaicas deve-se constatar três importantes características, sendo elas a corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ), tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e fator de forma (*FF*).

A corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) é a máxima corrente que se pode obter e é medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica nos seus terminais é igual a zero. De acordo com (2) e uma vez que a tensão *V* é zero, não há corrente a fluir para o diodo e por isso, a corrente de curto circuito vai ser igual à corrente gerada por efeito fotovoltaico:  $I_{sc} = I_{ph}$ . O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

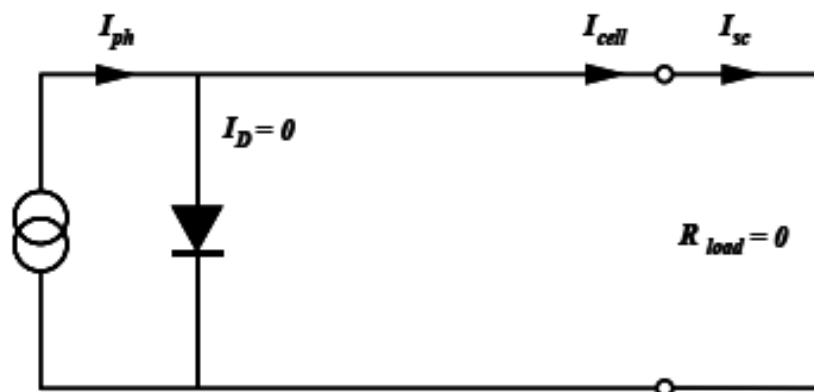


Figura 2.6 - Circuito equivalente da célula solar - corrente de curto-circuito [17].



A tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica a circular e é a máxima tensão que uma célula pode produzir. Então, em circuito aberto, a corrente a circular na célula será zero e toda a corrente produzida pelo efeito fotovoltaico vai fluir pelo diodo. Partindo de (2), a tensão de circuito aberto será então:

$$V_{oc} = m \times \frac{kT}{q} \times \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (3)$$

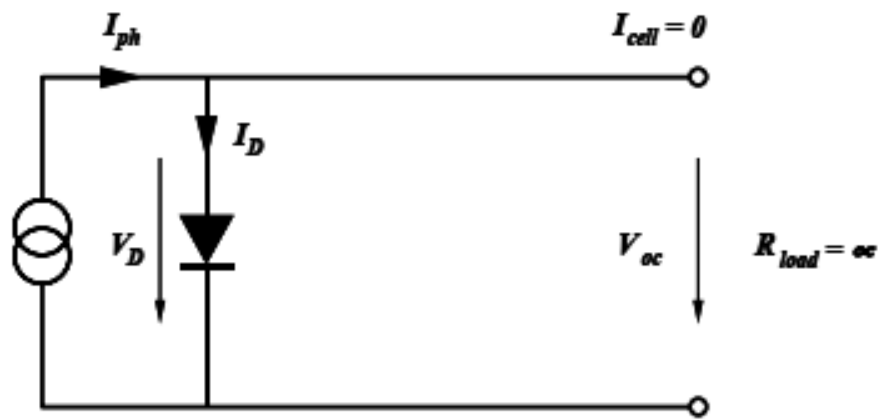


Figura 2.7 - Circuito equivalente da célula solar - tensão em circuito aberto[17].

Uma vez que a potência é o produto da corrente pela tensão, pode-se obter a curva da potência entregue por uma célula fotovoltaica:

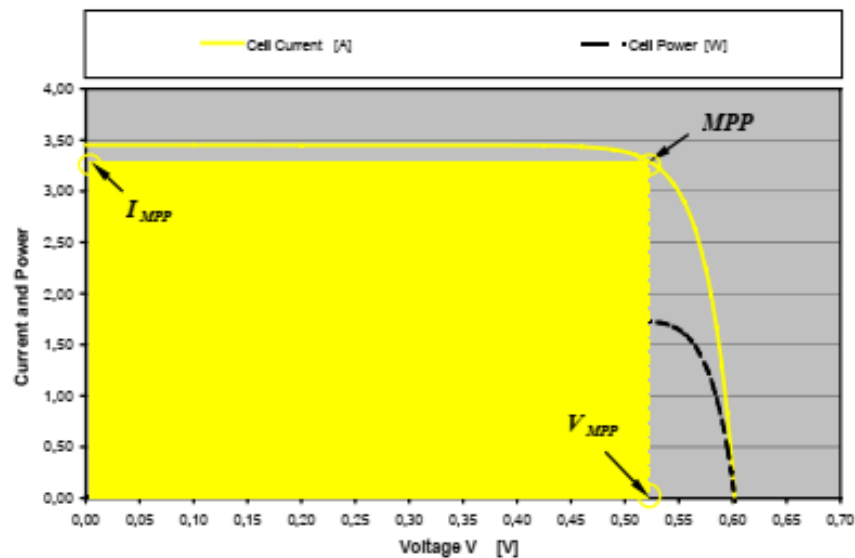


Figura 2.8 - Curva de potência e ponto de máxima potência (MPP)[17].

Apesar da corrente ser máxima quando há curto-circuito, a tensão é zero e, portanto, a potência é zero também. Na situação em que a tensão é máxima (circuito aberto), a corrente é zero e, por isso, a potência é também zero. Entre estes pontos, existe uma combinação particular de valores de tensão e corrente, em que a potência atinge o valor máximo, que pode ser verificado no gráfico da Figura 2.8 pelo área do retângulo a amarelo. O ponto de máxima potência (MPP) representa o ponto de funcionamento, no qual a célula fotovoltaica consegue entregar a maior potência para uma dada intensidade de radiação. Os valores correspondentes de  $V_{MPP}$  e  $I_{MPP}$  podem ser estimados a partir de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ :

$$\begin{cases} V_{MPP} = (0,75 \sim 0,9) V_{oc} \\ I_{MPP} = (0,85 \sim 0,95) I_{sc} \end{cases}$$

Para complementar existe o Fator de Forma (FF) que mede a qualidade da célula solar. Indica o quão longe é que a curva I-V está de se aproximar de um retângulo. O valor para células cristalinas está entre 0,7 e 0,8. É expressa por:

$$FF = \frac{(V_{MPP} \times I_{MPP})}{(V_{oc} \times I_{sc})} \quad (4)$$

O máximo valor de potência de uma célula é, então:

$$P_{MPP} = V_{MPP} \times I_{MPP} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (5)$$

Portanto, o valor da eficiência de uma célula, que se refere à razão entre a energia elétrica de saída e a potência da radiação solar de entrada e é definida pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{A \times G} \quad (6)$$

Sendo  $A$ , a área da superfície da célula solar e  $G$  a radiância solar.

Atualmente, as células fotovoltaicas de silício cristalino, que é a tecnologia mais utilizada no mercado atualmente (95% do mercado), apresentam eficiência de conversão que vai de 15 a 21%. Existem células com eficiências de até 28%, fabricadas em arsenieto de gálio, mas o seu alto custo inviabiliza a produção em alta escala [11][14][17].

### 2.2.1.2 Efeito da radiação solar na célula fotovoltaica

A Figura 2.9 mostra o efeito da variação da radiação solar incidente na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica:

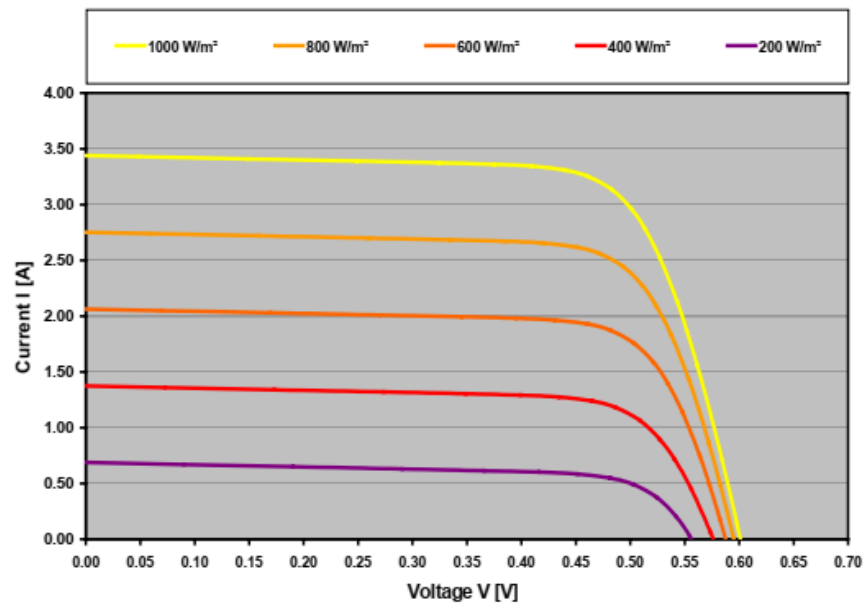


Figura 2.9 - Variação da curva I-V com a radiância [17].

Como se verifica pela figura acima, pode-se afirmar que:

- Com o aumento da radiação incidente há um aumento da potência de saída;
- A corrente de curto-circuito varia linearmente com a radiação incidente;
- A tensão em circuito aberto varia pouco com a radiação incidente, mas verifica-se que a variação é maior para valores mais baixos de radiância.

### 2.2.1.3 Efeito da temperatura na célula fotovoltaica

Quanto à variação da curva I-V com a temperatura da célula a variação está apresentada no gráfico da Figura 2.10:

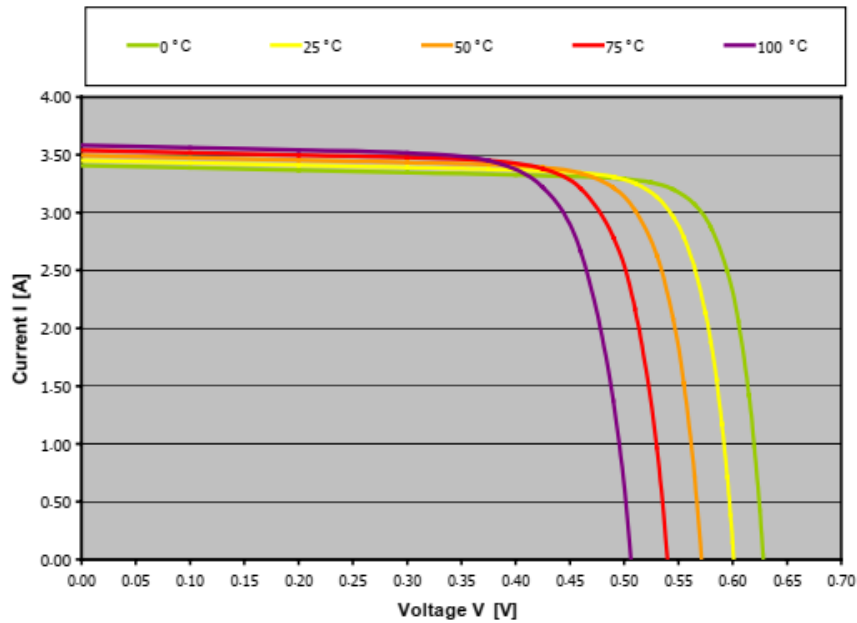


Figura 2.10 - Variação da curva I-V com a temperatura [17].

Como se pode observar na figura 2.10:

- A potência de saída diminui com o aumento da temperatura;
- A tensão em circuito aberto decresce com o aumento da temperatura;
- A corrente de curto-circuito varia muito pouco com a temperatura.

#### 2.2.1.4 Sombreamentos

Uma das partes fundamentais no dimensionamento de uma central fotovoltaica é a gestão de todo o tipo de sombras, quer sejam causadas por edifícios envolventes, clarabóias, telhados e também entre painéis. É por isso importante, projetar o distanciamento correto dos painéis de forma a assegurar que, em momento algum, ocorra sombreamento entre eles.

Assim que um grupo de células se encontra sombreado, assiste-se a uma perda de energia produzida, que pode ser de duas maneiras: pela redução da energia gerada pela célula e pelo aumento das perdas nas células sombreadas. Este problema torna-se mais grave quando o sombreamento das células causa polarização inversa.

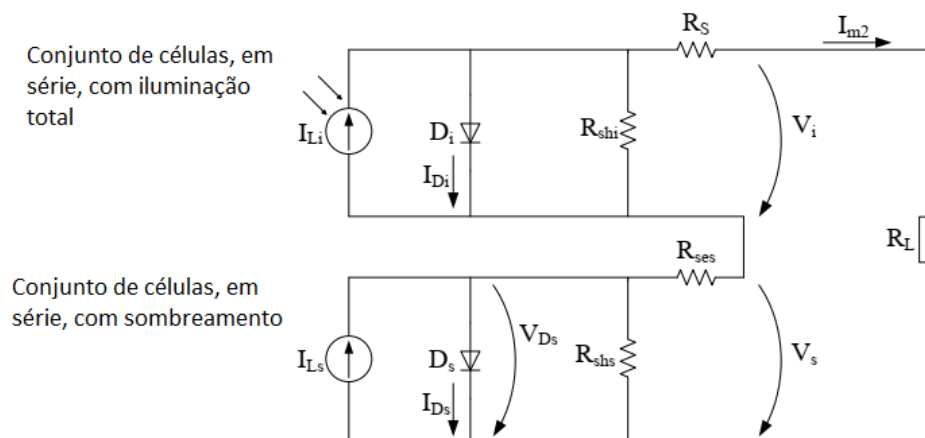


Figura 2.11 - Conjunto de células em série com e sem sombreamento [10].

A figura 2.11 representa um grupo de células com iluminação total ( $I_{Li}$ ) ligadas em série com um grupo de células sombreadas ( $I_{Ls}$ ). Se a corrente  $I_{m2} < I_{Ls}$ , o diodo  $D_s$  está polarizado diretamente, não existindo risco para a célula sombreada. Se pelo contrário  $I_{m2} > I_{Ls}$ , então a corrente no diodo  $I_{Ds} = I_{Ls} - I_{m2}$ , o que coloca o diodo em polarização inversa. Isto faz com que o diodo se comporte como uma resistência muito grande e que a corrente na carga ( $I_{m2}$ ) seja reduzida significativamente.

Então, algumas consequências da existência de sombras nos módulos fotovoltaicos são:

- Altera o ponto de funcionamento ótimo do gerador, com consequência perda de rendimento para o sistema;
- A(s) célula(s) sombreada(s) comportam-se como cargas para as restantes, o que leva a uma enorme dissipação de energia;
- Tensão inversa elevada;
- Criação de pontos quentes.

Todos estes pontos contribuem para o aumento das perdas do sistema fotovoltaico e para a degradação das células fotovoltaicas.

De modo a reduzir o efeito do sombreamento dos módulos, são utilizados díodos de passo. Em caso de sombreamento, a corrente da *string* diminui e o módulo passa a atuar como uma carga (aumentando o valor da sua resistência interna). Como a sua resistência interna é inferior à do módulo, a corrente passa a circular através deste, sendo efetuado um shunt à célula. No entanto, o sombreamento de módulos em série numa *string* provoca uma diminuição da tensão dessa *string*, o que faz com que a mesma passe a comportar-se como uma carga (absorvendo parte da corrente gerada pelas restantes). De modo a evitar este efeito, utilizam-se díodos de bloqueio, que vão desativar a *string* do paralelo que sofreu sombreamento [20][21][22].

### 2.2.1.5 Distanciamento entre painéis

Para evitar sombreamento entre painéis provocado pela inclinação destes, os painéis estabelecidos em *strings* nas respectivas coberturas dos edifícios, devem ficar suficientemente afastados da próxima *string* de maneira a não causar sombreamento entre si em nenhum momento do dia e/ou do ano. Assim, deve ter-se em conta uma distância mínima de segurança entre *strings*. Seguindo a figura 2.12, este cálculo é feito com recurso à largura do painel (L), inclinação destes ( $\alpha$ ), e o ângulo da altura mínima do sol ( $\beta$ ).

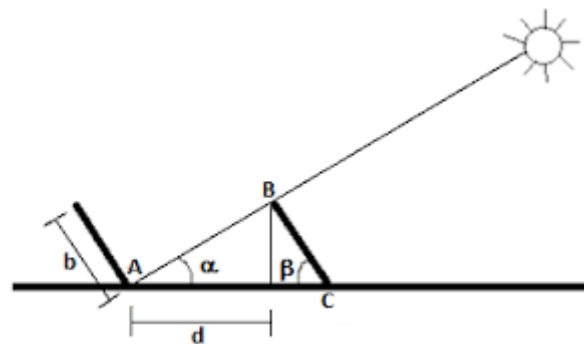


Figura 2.12 - Distância entre painéis [46].

Então a distância mínima entre strings de painéis deverá ser:

$$d = b \left( \cos \beta + \frac{\sin \beta}{\tan \alpha} \right) \quad (7)$$

De referir que por vezes a limitação do espaço existente ou características dos locais da instalação fotovoltaica resultam em situações nas quais estas distâncias não são cumpridas [10].

### 2.2.2 Inversores

O inversor é o equipamento responsável pela transformação da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos e/ou armazenada em bancos de baterias, em corrente alternada (CA) para ligação à rede e/ou cargas. Para a escolha do inversor mais adequado é necessário conhecer algumas das suas funções básicas, características e limitações, disponibilizadas pelo fabricante na folha de características. A escolha do inversor numa instalação fotovoltaica é de extrema importância, uma vez que da mesma depende o tamanho e o número de fileiras [11][16].

Dependendo da aplicação, existe uma distinção entre os inversores utilizados nos sistemas com ligação à rede elétrica e nos sistemas autónomos.

Nos sistemas ligados à rede o inversor é ligado diretamente à rede de forma direta ou através da instalação do serviço elétrico do prédio. Com uma ligação direta, a eletricidade produzida é injetada diretamente na RESP. Com o acoplamento à instalação do prédio, a

energia gerada é em primeiro lugar consumida no prédio, sendo então a excedente fornecida à RESP.

Já nos inversores para sistemas autônomos, o armazenamento de energia nas baterias e o fornecimento de energia para o consumo é feito através de corrente contínua. Os inversores autônomos são então utilizados para possibilitar o uso de aparelhos elétricos AC convencionais de 230 V a 50 Hz [14].

Os atuais inversores solares são capazes de realizar as funções:

- Conversão da corrente DC gerada pelo gerador fotovoltaico em corrente AC, de acordo com os requisitos técnicos e de segurança que estão estipulados para a ligação à rede;
- Ajuste do ponto operacional do inversor ao MPP do gerador fotovoltaico;
- Registo de dados operacionais e sinalização (p.e. visualizadores, armazenamento de dados);
- Dispositivos de proteção AC e DC (p.e., proteção contra sobrecargas e sobretensões, proteção de polaridade).

## **2.3 Unidades geradoras a diesel**

Os geradores a diesel com finalidade de geração de energia elétrica são tipicamente dimensionados para satisfazerem as necessidades de carga quando a produção fotovoltaica não é suficiente para satisfazer estas necessidades.

Um gerador diesel convencional consiste num motor ligado diretamente a um alternador síncrono para produção de eletricidade. Uma vez que a eletricidade deve ser produzida a frequência constante, normalmente 50 Hz, o motor deve funcionar a velocidade constante, independentemente da necessidade energética.

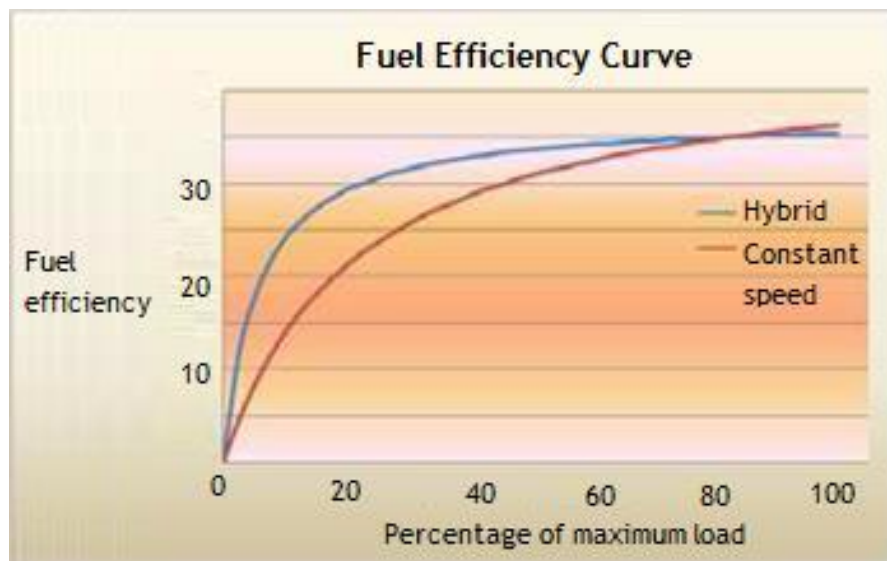
Uma possível solução para poupar combustível em geradores diesel é permitir que o motor funcione a velocidades variáveis, relacionadas com a necessidade energética. Aplicações como torres de telecomunicações com unidades de refrigeração que ligam/desligam constantemente ou áreas remotas em que as necessidades de energia podem variar substancialmente, beneficiaram muito dos geradores de velocidade variável.

Estes geradores de velocidade variável têm várias vantagens comparando aos convencionais, como vai ser mostrado a seguir [2][25].

### **2.3.1 Poupança de combustível**

Um gerador de velocidade variável pode poupar combustível de duas formas. A principal, com o gerador a funcionar com a sua velocidade mais eficiente para uma determinada necessidade energética. Na figura 2.13 está mostrada uma comparação da eficiência de utilização do combustível entre um gerador diesel de velocidade variável e

um de velocidade constante. A estimativa da poupança real de combustível iria depender da curva de consumo numa certa aplicação.



**Figura 2.13 - Comparação da curva de eficiência de combustível a velocidade variável e velocidade constante[2].**

A poupança de combustível também pode ser alcançada uma vez que um gerador diesel de velocidade variável requer um motor mais pequeno comparado com um de velocidade fixa da mesma gama de potência. A curva típica de potência de um gerador convencional, mostrada na figura 2.14, ilustra o porquê de num gerador de velocidade variável o tamanho do motor ser menor. Num gerador convencional com velocidade fixa, o motor pode apenas operar a 1500 rpm. Isto significa que toda a potência acima da velocidade nominal (área a vermelho na figura 2.14) não está disponível de ser alcançada. Dependendo do motor, da curva de potência e da aplicação, um gerador de velocidade variável consegue extrair 30% mais potencia desse motor que um gerador de velocidade fixa. Porém, os geradores raramente operam à capacidade nominal o tempo todo, sendo que a velocidade média de operação do motor será abaixo de 1500 rpm[2].



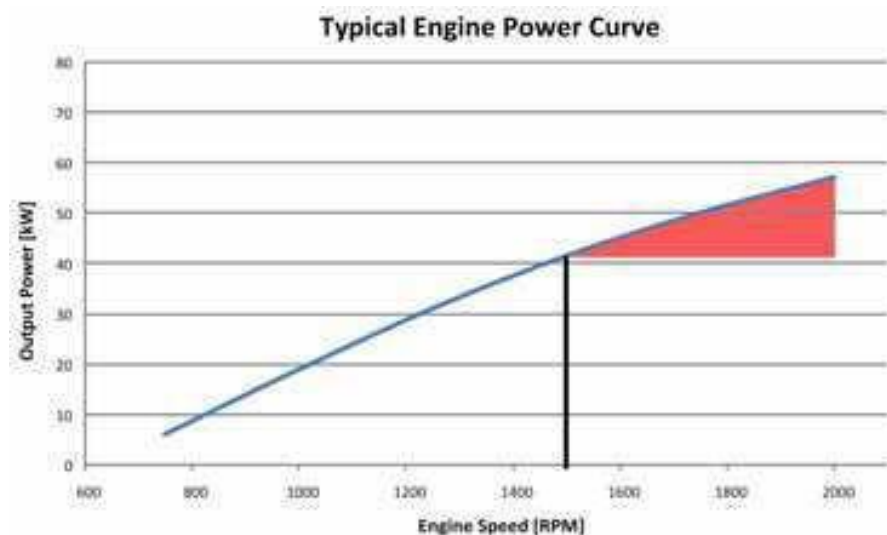


Figura 2.14 - Curva de potência típica de um gerador diesel [2].

### 2.3.2 Ruído

Quase todo o barulho produzido por um gerador é devido ao motor e à velocidade de rotação deste. Quando a velocidade deste motor é diminuída, o ruído produzido por este vai também diminuir significativamente, o que significa que em modo de poupança de energia, quando o motor está a operar a baixa velocidade, um gerador de velocidade variável é muito mais silencioso [2].

### 2.3.3 Período de vida útil

Os geradores a diesel de velocidades variáveis em aplicações situadas em áreas remotas vão, a maior parte do tempo, operar a baixas velocidades. Isto prolonga a vida útil do motor. As partes móveis do motor estão sujeitas a um “ciclo de carga” cada vez que o motor roda. Uma redução na velocidade do motor resulta numa redução no número de ciclos o que vai resultar na extensão da vida útil do motor.

Outra vantagem é a eliminação do problema de “*cylinder glazing*”. Este fenómeno ocorre quando o motor está muito frio e a combustão é ineficiente. Isto acontece nos geradores diesel de velocidade fixa quando se opera com baixas cargas. Com baixos consumos, o motor fica frio, o que resulta em depósitos nas paredes do cilindro da câmara de combustão. Quando o motor opera continuamente no seu ponto de melhor eficiência, permanece quente e este fenómeno de “*glazing*” é reduzido/eliminado prolongando a vida útil do motor [2][18][19].

### 2.3.4 Redução de emissões

Resultados de testes a geradores de velocidade variável indicam que as emissões são reduzidas proporcionalmente à economia de combustível gerada pelo sistema de geração

de velocidade variável, ou seja, é poupado combustível e consequentemente há uma redução das emissões de gases poluentes [2].

## **2.4 Componente de armazenamento de energia**

O armazenamento de energia é um elemento muito importante na hibridização dos sistemas de fornecimento de energia, simplesmente para completar as falhas de fornecimento de energia quando se estão a utilizar fontes de energia renováveis intermitentes (p.e. durante a ausência de vento ou produção fotovoltaica, ou até quando o consumo de energia é irregular). Este sistema de armazenamento irá armazenar a energia produzida pelos sistemas de energia renovável quando a produção exceder o consumo e utilizá-la quando a necessidade energética for superior à capacidade de produção.

Como é um tópico bastante importante, este irá ser mais aprofundado no capítulo 3.

## **3 Sistemas de armazenamento de energia a baterias**

### **3.1 Introdução ao armazenamento de energia**

Nos últimos trinta anos, o mercado de dispositivos eletrônicos portáteis incentivou esforços para melhorar o desempenho técnico e a economia dos dispositivos de armazenamento eletroquímicos. Esta evolução, combinada com a evolução das tecnologias de produção de energia com recurso a fontes renováveis, abriu espaço para a aplicação e desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia a baterias (BESS) [3].

As centrais fotovoltaicas geram potência de forma intermitente, devido à imprevisibilidade meteorológica (sombreamento causado pelas nuvens, dias com pouca radiação solar, etc.) e, como consequência, não têm o mesmo nível de controlabilidade das centrais convencionais de combustíveis fósseis. Esta é a principal razão do interesse da implementação de sistemas de armazenamento de energia a baterias em sistemas fotovoltaicos com o intuito de combater as flutuações de carga que existem nestes e para que estes sistemas tenham uma maior participação nos mercados energéticos.

As baterias podem ser classificadas em duas categorias, primária e secundária. As baterias primárias não podem ser recarregadas, ou seja, uma vez esgotados os reagentes que produzem energia elétrica, devem ser descartadas. As secundárias podem ser recarregadas através da aplicação de uma corrente elétrica aos seus terminais. Os sistemas fotovoltaicos utilizam baterias do tipo recarregáveis. O ciclo de vida das baterias é o fator chave na viabilidade económica do projeto, uma vez que estas acarretam um custo de aquisição elevado [25][33].

A inclusão de um sistema de armazenamento de energia a baterias num projeto necessita de ser muito bem estudada, uma vez que, devido ao investimento enorme que é, representa uma percentagem considerável no custo total do projeto fotovoltaico (Figura 3.1), o que pode tornar o projeto inviável [24][25].

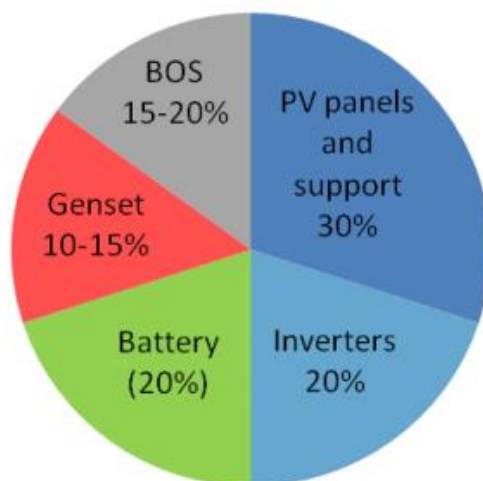


Figura 3.1 - Divisão dos custos num sistema híbrido PV/Diesel/BESS típico.

### 3.1.1 Efeito da temperatura

A temperatura a que as baterias estão sujeitas influencia consideravelmente a vida útil e rendimento das mesmas. A Figura 3.2 torna evidente a necessidade de controlar a temperatura a que as baterias estão sujeitas, de modo a rentabilizar o investimento, evitando o seu sobreaquecimento, a redução da vida útil e o rendimento [25].

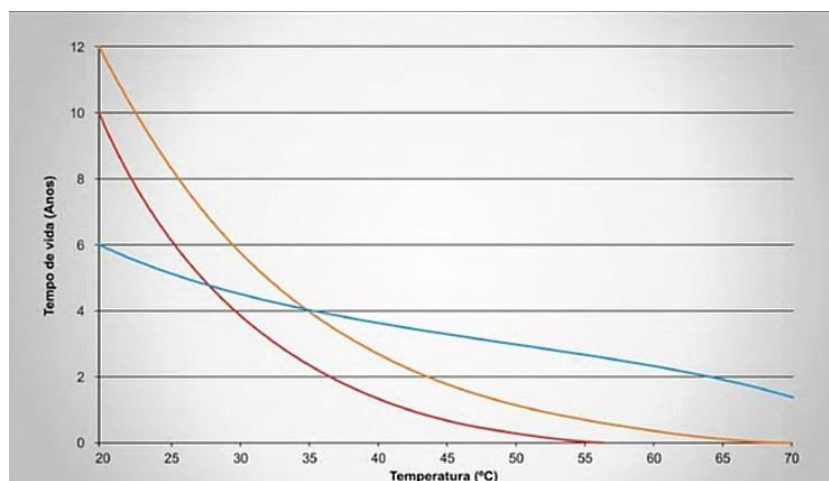


Figura 3.2 - Influencia da temperatura no tempo de vida de uma bateria para diferentes tecnologias [40].

### **3.1.2 Funções dos sistemas de armazenamento nos sistemas fotovoltaicos**

Os sistemas de armazenamento de energia quando associados a sistemas fotovoltaicos podem ter várias funções [12]:

- Limitação de consumo de energia da rede pública;
- Limitação de energia injetada na rede pública (para cumprir legislação);
- Maximização da produção de energia (armazenamento nas horas de menor custo para posterior abastecimento das cargas nas horas de pico; redução das variações bruscas de produção, entre outras);
- Independência energética da rede pública (deve ser suportado por outra forma de produção de energia);
- Sistema de backup da rede (ser capaz de formar uma rede isolada);
- Gestão da rede (correção de frequência, tensão e energia reativa).

## **3.2 Características de uma bateria**

A parte química da bateria é muitas vezes o foco principal nas discussões sobre a performance destas e certamente os materiais do eletrodo têm um papel fundamental para determinar as características de desempenho da bateria. No entanto, há mais fatores a ter em conta do que apenas a reatividade das materiais do eletrodo. O fluxo no qual a energia é libertada, é modulada por fatores práticos associados ao design da bateria e pela seleção de outros materiais usados na construção da bateria, incluindo o tipo e quantidade do eletrólito. Para a análise do funcionamento da bateria é necessário ter presente alguns conceitos elétricos característicos, que vão ser apresentados a seguir [26].

### **3.2.1 Tensão e Corrente**

A tensão ou potencial eletroquímico (em Volt, V) é a quantidade de trabalho ou energia (em Joule, J) que pode ser feito por uma unidade de carga elétrica (em Coulombs, C).

A corrente elétrica (em Ampere, A) é o fluxo “ordenado” de partículas portadoras de carga elétrica [26].

### **3.2.2 Resistência**

O fluxo de corrente elétrica num material experiência uma certa resistência a esse movimento. A corrente que uma tensão consegue produzir, é limitada pela resistência do circuito, que segue a lei de Ohm. Segundo esta lei, a diferença de potencial entre dois

pontos é diretamente proporcional à corrente entre esses dois pontos e inversamente proporcional à resistência do condutor:

$$V = R \times I \quad (8)$$

Onde  $I$  é a corrente (A),  $V$  é a tensão (V) e  $R$  é a resistência ( $\Omega$ ) [26].

### 3.2.3 Capacidade

A capacidade de uma bateria é a quantidade de energia que esta consegue fornecer e é medida em Ampere-hora (Ah). Esta capacidade quantifica quantas horas uma bateria vai aguentar com uma certa corrente de descarga imposta (em ampere). É um cálculo relativamente fácil de realizar se a bateria for descarregada com uma corrente constante:

$$\text{Capacidade (Ah)} = \text{Corrente (A)} \times \text{Tempo (horas)} \quad (9)$$

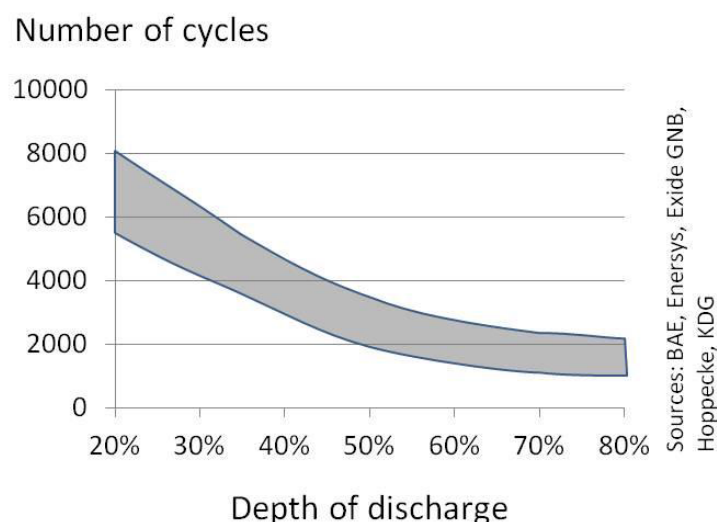
Porém, muitas aplicações não descarregam as baterias com uma corrente constante. A forma como a bateria é descarregada vai afetar o tempo e a tensão de descarga. A corrente não é constante em algumas aplicações em que as baterias são descarregadas através de uma resistência e, por isso, multiplicar apenas a corrente pelo tempo vai levar a uma resposta errada [26].

### 3.2.4 Vida útil da bateria

A vida útil da bateria irá depender da forma como esta opera, do regime de carga/descarga e da temperatura. O cálculo da vida útil da bateria irá influenciar o custo total do sistema.

A capacidade do banco de baterias deve ser dimensionada para que seja capaz de armazenar a energia necessária para cobrir a carga, durante o período em que não é suposto o gerador funcionar e o output solar não está disponível.

Os ciclos das baterias devem permitir que estas armazenem o excesso de produção fotovoltaica e que descarreguem com uma profundidade de descarga que permita um número de ciclos suficientes, de modo a que a sua vida útil seja no mínimo de 6 anos (tipicamente 2200 ciclos a 50%-60% de profundidade de descarga, considerando um ciclo por dia) e idealmente 8 a 10 anos. Em termos de viabilidade económica, esta depende largamente do número de ciclos a que as baterias estarão sujeitas, do estado de carga, profundidade de descarga e da temperatura, fatores que influenciam a vida útil das mesmas [25][39].



**Figura 3.3 - Vida útil das baterias em função da profundidade de descarga em baterias chumbo-ácido [12].**

### 3.3 Diferentes tecnologias de armazenamento

A tecnologia a aplicar está diretamente relacionada com o custo do sistema, uma vez que o custo das baterias, com como a instalação e sistema de gestão variam consoante a tecnologia a utilizar.

Explorar-se-ão as baterias recarregáveis, que são as baterias com interesse para integração em sistemas fotovoltaicos.

Uma bateria recarregável é um grupo de uma ou mais células eletroquímicas, designadas de células secundárias uma vez que as reações eletroquímicas serem eletricamente reversíveis. As baterias recarregáveis podem ter diferentes formas e tamanhos, como por exemplo um botão ou até sistemas conectados para a estabilização da rede elétrica de distribuição. Combinações diferentes de elementos químicos são comumente usadas nos eletrólitos, incluindo:

- Chumbo-ácido;
- Níquel cádmio (NiCd);
- Hidreto metálico de níquel (NiMH);
- Iões de lítio (Li-íon).

As reações químicas podem eventualmente causar deterioração dos componentes da bateria e consequentemente perda de ciclos de vida. Por isto a bateria deve ter certas características para que tornem viável o seu uso, como por exemplo, elevada energia específica, baixa resistência e bom desempenho ao longo de uma ampla banda de temperaturas de funcionamento. Estes requisitos limitam o número de matérias que podem ser utilizados com sucesso numa bateria recarregável [13][28][32][34].

### **3.3.1 Baterias Chumbo-ácido**

As baterias de chumbo-ácido já são comercializadas há mais de um século, sendo a tecnologia mais utilizada em várias aplicações incluindo os sistemas fotovoltaicos. O ânodo destas baterias é composto por chumbo poroso ou esponjoso e o cátodo é de óxido de chumbo. O eletrólito é uma solução aquosa de ácido sulfúrico. Estas funcionam com uma tensão na ordem dos 2 V.

Estas baterias têm um custo baixo e uma elevada eficiência. São uma escolha popular para melhorar a qualidade de energia, UPS e algumas aplicações de reserva girante. Contudo a sua aplicação para gestão de energia tem sido limitada devido ao seu ciclo de vida reduzido e à sua baixa densidade de energia, devido à inerente elevada densidade do chumbo. As baterias de chumbo-ácido também apresentam fraca performance a baixas temperaturas e por este motivo requerem um sistema de controlo de temperatura. [41][42][43].

### **3.3.2 Baterias de Níquel cádmio**

As baterias de níquel cádmio estão a par das baterias de chumbo-ácido em termos de maturidade e popularidade. Estas contêm um elétrodo positivo de hidróxido de níquel e um elétrodo negativo de hidróxido de cádmio, um separador, e um eletrólito alcalino.

Estas apresentam uma elevada densidade de energia, são robustas e necessitam de muito pouca manutenção. Porém, o seu ciclo de vida é relativamente baixo. Estas vantagens sobre as baterias de chumbo-ácido tornam-nas mais favorecidas para utilização em ferramentas elétricas, dispositivos portáteis, iluminação de emergência, UPS, telecomunicações e arranque de geradores. A principal desvantagem destas baterias é o seu elevado custo, devido ao caro processo de fabrico. O cádmio é um metal pesado e tóxico o que leva a que estas baterias não sejam tão populares. Outra particularidade destas baterias é que sofrem do “efeito de memória”, em que as baterias só terão carga completa após uma série de descargas completas. Porém, se forem geridas adequadamente este efeito pode ser mitigado [42].

### **3.3.3 Baterias de Níquel-hidreto metálico**

Partilha grande parte das suas características com as baterias de níquel cádmio, distinguindo-se sobretudo pela composição do seu elétrodo negativo. Aí, a substituição do cádmio por hidretos metálicos, cuja densidade de energia é superior, permite que o elétrodo negativo ocupe um menor espaço na célula que poderá ser aproveitado para acondicionar maiores quantidades do elétrodo positivo. Isto aumenta a densidade de energia destas baterias, mas, também, a sua capacidade e tempo de serviço. Além disso, retira da sua composição um metal tóxico, tornando-se uma solução mais ecológica [32].



### **3.3.4 Baterias de Iões de Lítio**

As baterias de Li-íon ou iões de lítio são baterias leves, compactas e funcionam com uma tensão na ordem dos 4 V. A estrutura mais convencional desta bateria é constituída por um ânodo de grafite, um cátodo formado por um óxido de lítio de metal e um eletrólito formado a partir de sal de lítio, misturado num solvente orgânico embebido num separador.

Com o desenvolvimento e melhoramento dos materiais de construção deste tipo de baterias, estas têm vindo a sofrer aprimoramentos sendo que a sua densidade de energia, desde a primeira bateria de iões de lítio, aumentou de 75 até 200 Wh/kg e o seu ciclo de vida aumentou para mais de 10000 ciclos. A sua eficiência é muito perto de 100% outro fator importante para a sua escolha em vez das restantes baterias.

O grande desafio para a utilização destas baterias a larga escala é o seu preço, devido ao empacotamento especial e aos circuitos internos contra sobrecarregamento [42].

É de prever que com os avanços e o desenvolvimento natural das ciências e tecnologias esta desvantagem de preço seja atenuada, o que possibilitará a produção a grande escala deste tipo de baterias.

### 3.4 Comparações

De entre a diversidade de bateras existente, a bateria de Lítio tem vindo a popularizar-se por se revelar altamente eficiente, pois apresenta maior longevidade e por possuir uma energia específica elevada e, tal como se observa na Tabela 3.1, por ocupar menos espaço, por não necessitar de ventilação nem de manutenção e por ser mais amiga do ambiente.

**Tabela 3.1 - Comparação entre os tipos mais comuns de baterias do mercado [29][30][31][42].**

|                              | Chumbo-ácido | Níquel-Cádmio | Níquel-hidreto metálico | Li-íon      |
|------------------------------|--------------|---------------|-------------------------|-------------|
| Impacto ambiental            | Alto         | Alto          | Médio/Alto              | Médio/Baixo |
| Ciclos                       | 200-300      | 1500          | 300-500                 | 500-10000   |
| Densidade de energia (Wh/kg) | 30-50        | 45-80         | 60-120                  | 110-200     |
| Autodescarga por mês (%)     | <5           | <10           | <20                     | <5          |
| Eficiência (%)               | 70-80        | 60-75         | 50-80                   | ~100        |
| Temperatura de operação (°C) | -15° a +50°  | -20° a +50°   | -20° a +60°             | -20° a +60° |
| Peso                         | Pesada       | Leve          | Leve                    | Muito leve  |
| Tempo de carga               | Longo        | Médio         | Médio                   | Curto       |
| Custo a longo prazo          | Alto         | Médio         | Médio                   | Baixo       |

### 3.5 Potencial de mercado

Reuniram-se alguns preços de referência na Tabela 3.2 com a referência à fonte e ao ano de estudo.

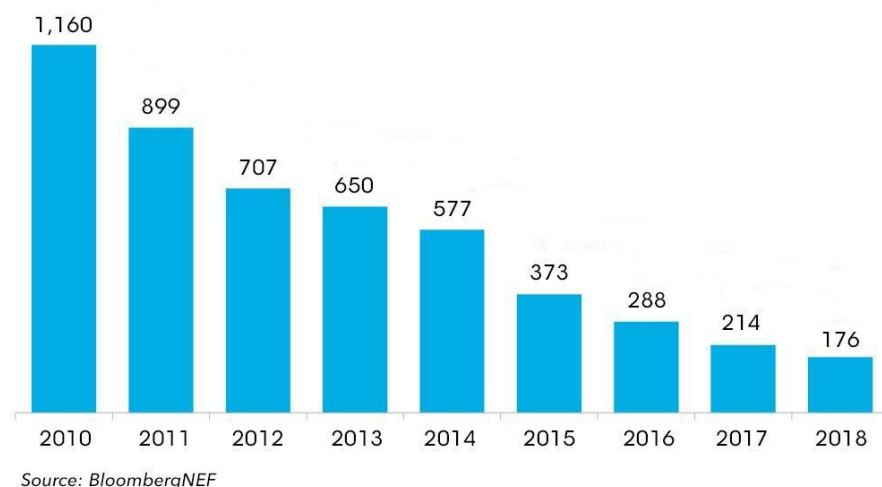
**Tabela 3.2 - Preço de referência das baterias de lítio.**

| Referência | Ano de estudo | Preço baterias        |
|------------|---------------|-----------------------|
| [6]        | 2018          | 250 \$/kWh            |
| [8]        | 2017          | 273 \$/kWh            |
| [36]       | 2015          | 350 \$/kWh            |
| [37]       | 2015          | 500 €/kWh             |
| [7]        | 2014          | 360\$/kWh - 440\$/kWh |
| [35]       | 2014          | 500 \$/kWh            |
| [38]       | 2013          | 750 €/kWh             |

Com o desenvolvimento da ciência e da tecnologia, é expectável uma diminuição significativa no preço das baterias, tornando a integração destas em sistemas fotovoltaicos cada vez mais viável. Na Figura 3.4 está mostrada esta evolução no preço das baterias de lítio nos últimos anos, prevendo-se um futuro brilhante para esta tecnologia, tendo em conta os benefícios já demonstrados que esta tecnologia traz.

Lithium-ion battery price survey results: volume-weighted average

Battery pack price (real 2018 \$/kWh)



**Figura 3.4 - Evolução do preço das baterias [9].**



## **4 Dimensionamento e análise técnico-económica do sistema híbrido**

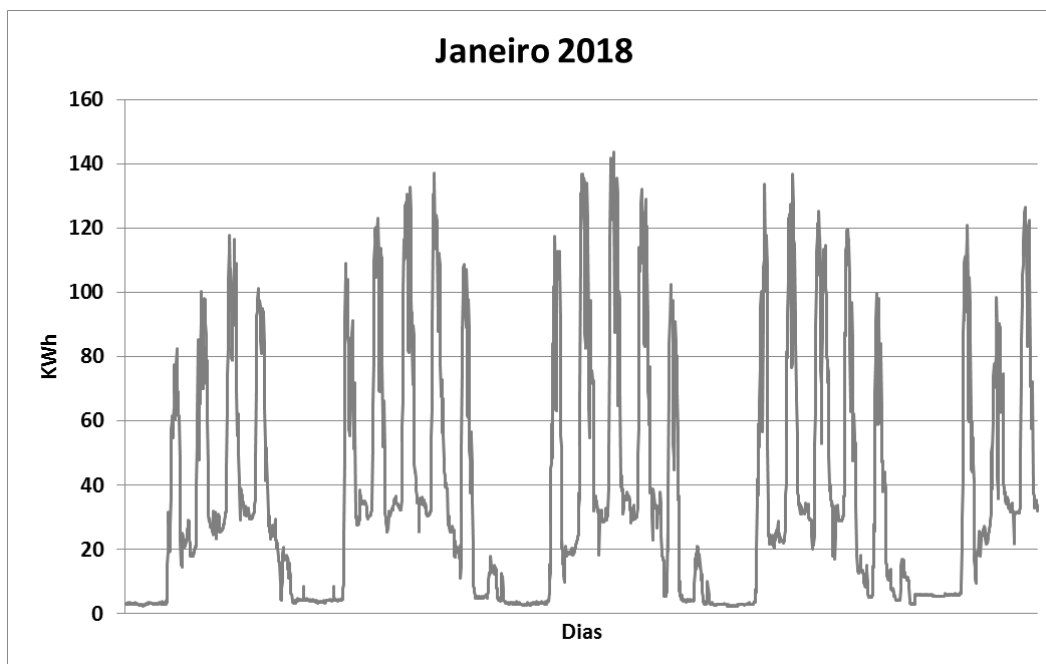
### **4.1 Descrição do caso de estudo**

Este sistema será dimensionado com base nos dados de consumo de um cliente da **Ecoinside**. Primeiro ir-se-á fazer uma análise dos consumos empresa e, posteriormente, será projetado um sistema unicamente a geradores diesel. Após isso, será feito o dimensionamento de uma central fotovoltaica e respetiva integração com os geradores diesel. Por fim, vai ser integrado um sistema de armazenamento de energia a baterias (BESS), no sistema híbrido diesel com fotovoltaico já existente.

### **4.2 Caracterização dos consumos**

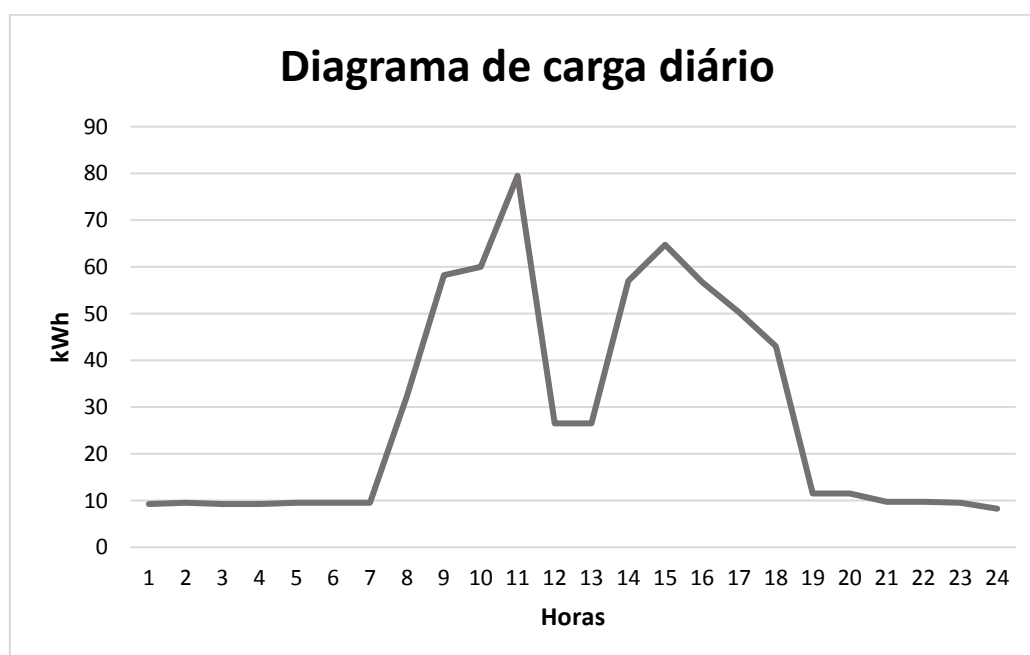
As características do consumo impõem a modulação da energia consumida no tempo através de uma função - o diagrama de cargas - que traduz a variação desse consumo ao longo das horas do dia e dos dias do ano. O diagrama de cargas é influenciado pela época do ano, dia da semana, hora do dia, condições atmosféricas e acontecimentos especiais (feriados) [15]. O diagrama de cargas foi obtido por um sistema automático de monitorização e registo de quinze em quinze minutos.

Na Figura 4.1, está apresentado o diagrama de cargas para o mês de janeiro.



**Figura 4.1 - Diagrama de carga para o mês de janeiro.**

Pela análise do gráfico é possível verificar alguns fatores que influenciam o diagrama de cargas. Cada pico de consumo no gráfico corresponde a um dia de trabalho. Na primeira semana só há quatro picos, uma vez que no dia 1 de janeiro (Dia de Ano Novo) foi feriado e a empresa não laborou. Observa-se também que a empresa não labora ao fim de semana, traduzida na pausa que há entre os cinco picos.



**Figura 4.2 - Diagrama de carga diário.**

A Figura 4.2 apresenta um diagrama de cargas do dia 2 de janeiro, para esta empresa, que labora apenas durante o dia e que faz pausa de almoço entre as 12h30 e as 13h30.

### 4.3 Sistema apenas com unidades geradoras a diesel

Nesta secção será justificada a potência que teria de ser instalada, para responder às necessidades energéticas, tendo em conta que o fornecimento de energia é feito apenas pelos geradores e que o sistema não tem ligação à Rede Elétrica de Serviço Público (RESP).

Os geradores podem ter vários modos de funcionamento:

- Contínuo, em que o gerador funciona continuamente com uma carga constante;
- Prime, em que o gerador funciona durante longos períodos com carga variável;
- Emergência, em que o gerador só irá funcionar, se a fonte principal de energia não conseguir atender a carga.

Neste sistema as cargas são variáveis, pelo que os geradores irão funcionar em modo prime ou modo de emergência.

#### 4.3.1 Dimensionamento e análise técnica do sistema

É importante perceber qual é o pico de consumo da instalação. Analisando os consumos do ano em estudo, obteve-se um pico de consumo de 590 kW. Sendo assim, é necessário um gerador diesel capaz de fornecer, numa hora, 590 kWh. Este gerador irá ter de funcionar em modo prime, sendo que vai ser a única fonte de fornecimento de energia.

O gerador escolhido para o estudo foi o modelo C32 da Caterpillar com uma potência de 728 kW. A folha de características do gerador está no anexo 0.



Figura 4.3 - Modelo C32 da Caterpillar.

**Tabela 4.1 - Consumo de combustível do gerador C32 da Caterpillar**

| Percentagem de carga | Consumo combustível (l/hr) |
|----------------------|----------------------------|
| 25%                  | 60,8                       |
| 50%                  | 100,4                      |
| 75%                  | 142,8                      |
| 100%                 | 189,5                      |

Foi considerada uma emissão de  $CO_2$  de 2,7 kg/l [27].

Os resultados obtidos para a previsão do consumo anual de diesel e a emissão de  $CO_2$  foram:

**Tabela 4.2 - Resultados obtidos para o gerador diesel C32 da Caterpillar.**

| Regime de carga | Horas | Consumo de combustível (l) | Emissão de $CO_2$ (ton) |
|-----------------|-------|----------------------------|-------------------------|
| Desligado       | 2     | 0                          | 0                       |
| 25%             | 6281  | 381870                     | 1031                    |
| 50%             | 1957  | 196433                     | 530                     |
| 75%             | 514   | 73399                      | 198                     |
| 100%            | 7     | 1279                       | 3                       |
| Total           | 8760  | 652981                     | 1763                    |

Porém, este gerador foi dimensionado para atender à máxima carga possível e, como muitas poucas vezes a unidade fabril atinge estes altos consumos, há períodos em que a potência deste gerador será demasiado alta para atender o consumo necessário. Como se observa pela Tabela 4.2 o gerador apenas irá funcionar durante 7 horas à sua plena carga. Tabela 4.4

Então, a solução será a utilização de mais do que um gerador, para não ter de ser necessário a utilização de um gerador tão potente e evitar a subutilização deste. Será então utilizado um gerador em modo de funcionamento prime, que irá ser a principal fonte de fornecimento de energia e um segundo gerador a funcionar em modo de funcionamento de



emergência, que só irá entrar em funcionamento, quando o primeiro não conseguir atender a carga.

A solução escolhida foi a utilização de dois geradores do modelo C13 da Caterpillar com potência de 320 kW. Com isto, consegue-se reduzir a potência total do sistema, que estava claramente sobredimensionado e fazer uma melhor gestão tanto do combustível gasto como das emissões de CO<sub>2</sub>.



Figura 4.4 - Modelo C13 da Caterpillar.

Tabela 4.3 - Consumo de combustível do gerador C13 da Caterpillar.

| Percentagem<br>de carga | Consumo<br>combustível<br>(l/hr) |
|-------------------------|----------------------------------|
| 25%                     | 26,1                             |
| 50%                     | 43,7                             |
| 75%                     | 61,9                             |
| 100%                    | 83,5                             |

Os valores obtidos para o consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> estão apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 - Resultados obtidos para o grupo de geradores diesel C13 da Caterpillar.**

| Gerador | Regime de carga | Horas | Consumo de combustível (l) | Emissão de CO <sub>2</sub> (ton) |
|---------|-----------------|-------|----------------------------|----------------------------------|
| 1       | Desligado       | 2     | 0                          | 0                                |
|         | 25%             | 3212  | 83820                      | 226                              |
|         | 50%             | 2723  | 118984                     | 321                              |
|         | 75%             | 1022  | 63231                      | 171                              |
|         | 100%            | 1802  | 150488                     | 406                              |
| 2       | Desligado       | 7852  | 0                          | 0                                |
|         | 25%             | 603   | 15732                      | 42                               |
|         | 50%             | 236   | 10313                      | 28                               |
|         | 75%             | 67    | 4132                       | 11                               |
|         | 100%            | 3     | 251                        | 1                                |
| Total   |                 | 8760  | 446950                     | 1207                             |

#### 4.3.2 Análise económica e viabilidade das soluções

O valor para a O&M dos geradores C32 e C13, por informações cedidas pelo fornecedor, será cerca de 2500€ e 1500€, por ano, respetivamente. O custo do gerador C13 é cerca de 160000€. Já o custo do modelo C13 é cerca de 50000 sendo acrescido o valor de 10000€ para fazer o paralelo e sincronismo dos dois geradores, fazendo um total de 110000€. O custo total para o 1º ano pode ser calculado por:

$$Custo_{1^{\circ}ano} = Custo_{gerador} + Custo_{diesel/ano} + Custo_{O\&M} \quad (10)$$

Foi considerado o custo de diesel de 1,3€/litro. Os resultados obtidos foram:

Tabela 4.5 - Custo para o 1º ano das duas soluções.

| Solução           | Custo investimento gerador (€) | Custo diesel (€/ano) | Custo O&M (€/ano) | Custo total do sistema no 1º ano (€) |
|-------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1 x Gerador C32   | 160000                         | 848 875              | 2500              | 1 011 375                            |
| 2 x Geradores C13 | 110000                         | 581 035              | 3000              | 694 035                              |

Optando pela segunda solução consegue-se uma poupança no 1º ano de cerca de 317339€ e para os restantes em cerca de 267839€. Para além disto há uma diminuição nas emissões de  $CO_2$  em cerca de 556 toneladas anualmente, concluindo-se que a 2ª solução é muito mais viável que a 1ª. Isto também se deve ao facto de a empresa não laborar 24 horas por dia, 7 dias por semana, e dos consumos serem variáveis. Como as cargas são variáveis, não se justifica a utilização de apenas um gerador em modo de funcionamento prime, uma vez que grande parte do tempo os consumos são muito baixos o que força um gerador de enorme potência a trabalhar com baixo fator de carga. Assim, a utilização de dois geradores mais pequenos durante esse tempo é uma solução muito mais eficiente em termos de gasto de combustível e traduz-se num investimento menor. É possível neste caso colocar apenas um gerador a funcionar durante a maior parte do tempo em modo prime e o outro funcionar em modo de emergência, só quando o primeiro gerador não conseguir satisfazer a carga. Para uma empresa que mantenha consumos constantes durante todo o dia, a utilização de apenas um gerador de maior potência a funcionar em modo de funcionamento contínuo, poderia ser justificada, uma vez que este iria funcionar quase sempre a elevado fator de carga.

#### 4.4 Sistema fotovoltaico

Para estudar a integração de um sistema fotovoltaico, é necessário conhecer o potencial da zona em que se vai instalar o sistema, ou seja, analisar a irradiação no local do modo a estimar a produção esperada. Esta central será dimensionada dependendo da área disponível, uma vez que se trata de uma indústria fabril situada na zona norte do país e a área é limitada. O local da empresa não vai ser referido, de modo a manter a privacidade da empresa.

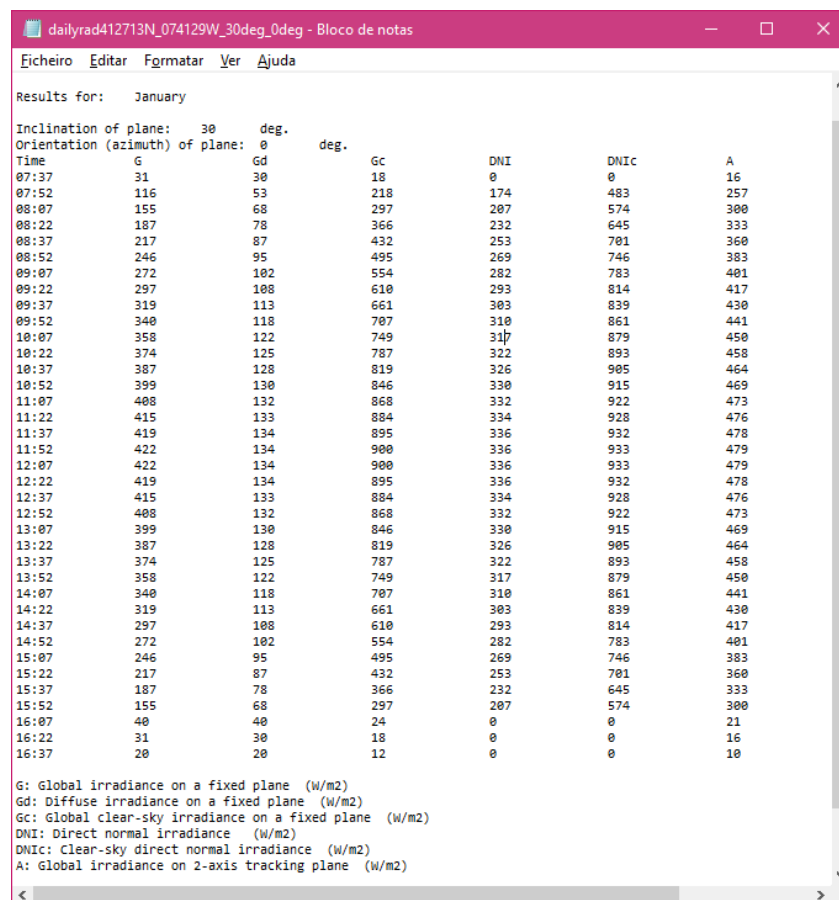
O dimensionamento vai ser feito com recurso à ferramenta de dimensionamento de centrais fotovoltaicas em uso pela **Ecoinside**. Na ferramenta pode-se dimensionar o sistema tendo em conta a área e número de painéis.

Quando a finalidade será a integração em sistemas híbridos *off-grid* sem banco de baterias, o dimensionamento deve ser feito de modo a que a energia produzida excedente

seja zero. Se a finalidade for a integração num sistema com baterias este dimensionamento pode ser feito de forma a maximizar a área disponível utilizada. Neste caso como posteriormente será feito o estudo com baterias a opção escolhida será a de maximização da área disponível utilizada.

#### 4.4.1 Radiância

A ferramenta de dimensionamento fotovoltaico da **Ecoinside** pede os valores da radiância diária, de 15 em 15 minutos, durante o ano em estudo, que devem ser introduzidos pelo utilizador. Estes valores são obtidos pelo utilizador através do software **PVGIS**. A partir deste *software online* consegue-se obter em ficheiro de texto, a partir das coordenadas de latitude e longitude, as radiâncias para um dia típico de cada mês do ano, para uma dada inclinação dos painéis. Neste caso será utilizada a inclinação dos painéis de 30° e orientação dos painéis para sul, uma vez que se o local se encontra em Portugal continental. Um exemplo do ficheiro obtido a partir deste software está presente na Figura 4.5. No gráfico da Figura 4.6 estão demonstrados os valores médios mensais da irradiância em  $Wh/m^2/dia$ .



dailyrad412713N\_074129W\_30deg\_0deg - Bloco de notas

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda

Results for: January

Inclination of plane: 30 deg.  
Orientation (azimuth) of plane: 0 deg.

| Time  | G   | Gd  | Gc  | DNI | DNIC | A   |
|-------|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| 07:37 | 31  | 30  | 18  | 0   | 0    | 16  |
| 07:52 | 116 | 53  | 218 | 174 | 483  | 257 |
| 08:07 | 155 | 68  | 297 | 207 | 574  | 300 |
| 08:22 | 187 | 78  | 366 | 232 | 645  | 333 |
| 08:37 | 217 | 87  | 432 | 253 | 701  | 360 |
| 08:52 | 246 | 95  | 495 | 269 | 746  | 383 |
| 09:07 | 272 | 102 | 554 | 282 | 783  | 401 |
| 09:22 | 297 | 108 | 610 | 293 | 814  | 417 |
| 09:37 | 319 | 113 | 661 | 303 | 839  | 430 |
| 09:52 | 340 | 118 | 707 | 310 | 861  | 441 |
| 10:07 | 358 | 122 | 749 | 317 | 879  | 450 |
| 10:22 | 374 | 125 | 787 | 322 | 893  | 458 |
| 10:37 | 387 | 128 | 819 | 326 | 905  | 464 |
| 10:52 | 399 | 130 | 846 | 330 | 915  | 469 |
| 11:07 | 408 | 132 | 868 | 332 | 922  | 473 |
| 11:22 | 415 | 133 | 884 | 334 | 928  | 476 |
| 11:37 | 419 | 134 | 895 | 336 | 932  | 478 |
| 11:52 | 422 | 134 | 900 | 336 | 933  | 479 |
| 12:07 | 422 | 134 | 900 | 336 | 933  | 479 |
| 12:22 | 419 | 134 | 895 | 336 | 932  | 478 |
| 12:37 | 415 | 133 | 884 | 334 | 928  | 476 |
| 12:52 | 408 | 132 | 868 | 332 | 922  | 473 |
| 13:07 | 399 | 130 | 846 | 330 | 915  | 469 |
| 13:22 | 387 | 128 | 819 | 326 | 905  | 464 |
| 13:37 | 374 | 125 | 787 | 322 | 893  | 458 |
| 13:52 | 358 | 122 | 749 | 317 | 879  | 450 |
| 14:07 | 340 | 118 | 707 | 310 | 861  | 441 |
| 14:22 | 319 | 113 | 661 | 303 | 839  | 430 |
| 14:37 | 297 | 108 | 610 | 293 | 814  | 417 |
| 14:52 | 272 | 102 | 554 | 282 | 783  | 401 |
| 15:07 | 246 | 95  | 495 | 269 | 746  | 383 |
| 15:22 | 217 | 87  | 432 | 253 | 701  | 360 |
| 15:37 | 187 | 78  | 366 | 232 | 645  | 333 |
| 15:52 | 155 | 68  | 297 | 207 | 574  | 300 |
| 16:07 | 40  | 40  | 24  | 0   | 0    | 21  |
| 16:22 | 31  | 30  | 18  | 0   | 0    | 16  |
| 16:37 | 20  | 20  | 12  | 0   | 0    | 10  |

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m2)  
Gd: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m2)  
Gc: Global clear-sky irradiance on a fixed plane (W/m2)  
DNI: Direct normal irradiance (W/m2)  
DNIC: Clear-sky direct normal irradiance (W/m2)  
A: Global irradiance on 2-axis tracking plane (W/m2)

Figura 4.5 - Exemplo do ficheiro obtido no software PVGIS para o mês de janeiro.

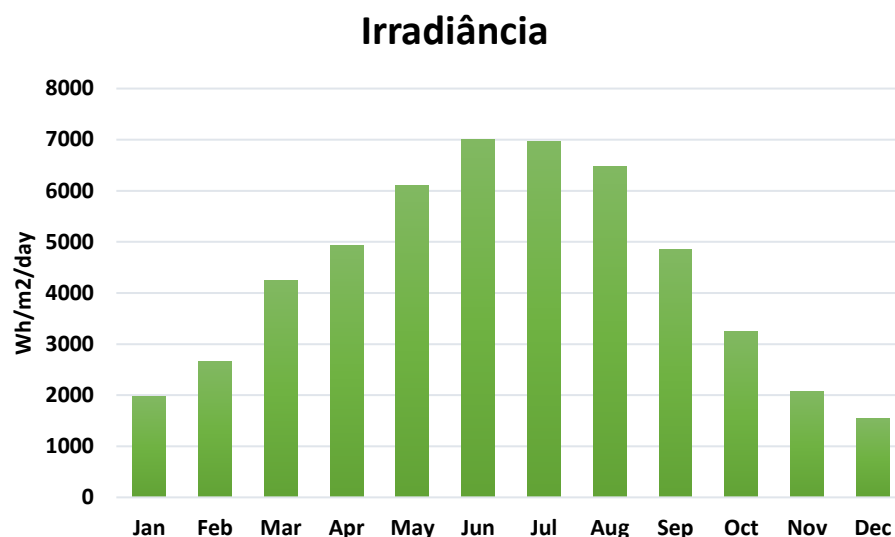


Figura 4.6 - Irradiância no plano horizontal para o local em questão.

#### 4.4.2 Potência a instalar

A potência a instalar será de forma a maximizar a área disponível, que é neste caso  $1577 \text{ m}^2$ .

#### 4.4.3 Características dos painéis e dos inversores

Os painéis a utilizar são do fabricante REC, da gama REC Twinpeak 2. As características do painel estão na Tabela 4.6 - Características do painel fotovoltaico.

Tabela 4.6 - Características do painel fotovoltaico.

| Caraterísticas                 |           |       |
|--------------------------------|-----------|-------|
| Potência nominal (kWp)         | $P_{MPP}$ | 0,285 |
| Tensão MPP (V)                 | $V_{MPP}$ | 31,9  |
| Corrente MPP (A)               | $I_{MPP}$ | 8,95  |
| Tensão em circuito aberto (V)  | $V_{OC}$  | 38,6  |
| Corrente de curto circuito (A) | $I_{SC}$  | 9,66  |
| Eficiência (%)                 | $\eta$    | 17,1  |
| Área ( $\text{m}^2$ )          | a         | 1,67  |

Os inversores a utilizar serão o modelo SUN2000-36KTL da marca Huawei. As características do inversor estão disponíveis na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7 - Características do inversor.**

| <b>Entrada</b>                    |          |
|-----------------------------------|----------|
| Tensão máxima de entrada (V)      | 1100     |
| Máxima corrente por MPPT (A)      | 22       |
| Gama de operação do MPPT (V)      | 200~1000 |
| Tensão nominal de entrada (V)     | 620      |
| Quantidade de entradas            | 8        |
| Quantidade de MPPT                | 4        |
| Entradas por MPPT                 | 2        |
| <b>Saída</b>                      |          |
| Potência nominal ativa AC (kW)    | 36       |
| Máxima potência aparente AC (kVA) | 40       |
| Tensão de saída (V)               | 230/400  |
| Máxima corrente de saída (A)      | 57,8     |
| <b>Eficiência</b>                 |          |
| Eficiência europeia               | 98,4%    |

As folhas de características, tanto do painel como do inversor, estão em anexo deste documento.

#### 4.4.4 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O número de painéis a instalar será obtido dividindo a área total disponível pela área dos painéis:

$$n^{\circ}_{\text{painéis}} = \frac{\text{área}_{\text{total}}}{\text{área}_{\text{painel}} + \text{área}_{\text{manutenção/painel}}} = \frac{1577}{1,8} = 876 \text{ painéis} \quad (11)$$

Assim, dividindo a área total disponível pela soma da área do painel com a área de segurança que será preciso para manutenção de cada painel obtém-se o número de painéis a instalar.

$$P_{instalarPV} = n^o_{painéis} \times P_{painel} = 876 \times 0,285 = 249,66 \text{ kWp} \quad (12)$$

A ferramenta em uso pela **Ecoinside** calcula a produção de 15 em 15 minutos, para cada radiância iterativamente, através de:

$$P_{PV}(i) = \frac{G(i)}{1000} \times n^o_{painéis} \times \eta_{painel} \times \text{área}_{painel} \times (1 - \text{perdas}) \times \frac{1}{4} \quad (13)$$

Sendo  $G(i)$  a radiância global num plano fixado, ou seja, a radiância para determinada inclinação dos painéis (em  $W/m^2$ ) e  $\eta$  a eficiência de conversão do painel. Faz-se a divisão de  $G(i)$  por 1000 para passar a radiância para  $kW/m^2$ , multiplica-se por 1/4 para se fazer a conversão para 1h uma vez que as iterações estão feitas de 15 em 15 minutos e assume-se um valor para as perdas do sistema de conversão. Neste caso foi assumido um valor de 14%. Fazendo a soma das radiâncias globais durante o ano todo consegue-se estimar a produção anual, que será:

$$P_{PVanual} = \frac{6782437}{1000} \times 876 \times 17,1\% \times 1,67 \times (1 - 14\%) \times \frac{1}{4} = 361473 \text{ kWh/ano} \quad (14)$$

Sabendo que muito raramente os painéis funcionam à sua potência máxima, é normalmente boa prática subdimensionar os inversores, ou seja, optar por inversores com menos potência, de forma a que estes trabalhem a maior parte do tempo a maior percentagem de carga, aproveitando melhor a eficiência dos inversores, uma vez que estes são mais eficientes com percentagens de carga maiores (Figura 4.7).



**Figura 4.7 - Curva de eficiência do inversor utilizado.**

Assim, consegue-se “forçar” o inversor a trabalhar a maior percentagem de carga, sem nunca ultrapassar a potência máxima do inversor. Com este subdimensionamento também se consegue optar por inversores mais baratos, evitando esse custo acrescido desnecessário. O sobredimensionamento será de 15%:

$$n^{\circ} \text{ inversores} = \frac{P_{\text{instalarPV}}}{P_{\text{inversor}} \times 1,15} = \frac{249,66 \text{ kW}}{36 \text{ kW} \times 1,15} = 6,03 \approx 6 \text{ inversores} \quad (15)$$

Apesar de o valor ultrapassar os 6 inversores em três centésimas isso não justifica a instalação de mais um inversor. Será então necessário a instalação de seis inversores de 36 kW.

O próximo passo será calcular o número de painéis em série ligar a cada entrada inversor. Como a associação dos módulos em série implica o aumento de tensão por cada módulo inserido (Figura 4.8) que vai entrar no MPPT tem de se fazer o correto dimensionamento para que a tensão máxima de entrada do MPPT não seja ultrapassada.

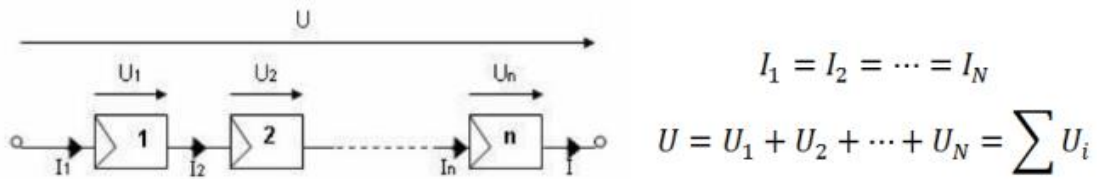


Figura 4.8 - Associação de módulos em série.

Tendo em conta a tensão nominal de entrada do inversor, presente na Tabela 4.7 e a tensão MPP do painel da Tabela 4.6 consegue-se calcular o número de painéis em série que se devem ligar em série de forma a não ultrapassar a tensão nominal de entrada:

$$n^{\circ} \text{ paineis\_série} = \frac{V_{\text{nom,entrada}}}{V_{\text{MPP}} \times 1,15} = \frac{620}{31,9 \times 1,15} = 22,35 \approx 22 \text{ paineis em série} \quad (16)$$

Com isto, optou-se por strings de 22 painéis. Isto dará um total de 39 strings de 22 painéis e 1 string de 18 painéis. Assim obtém-se um sistema equilibrado e as tensões de entrada dos MPPT do inversor são respeitadas.

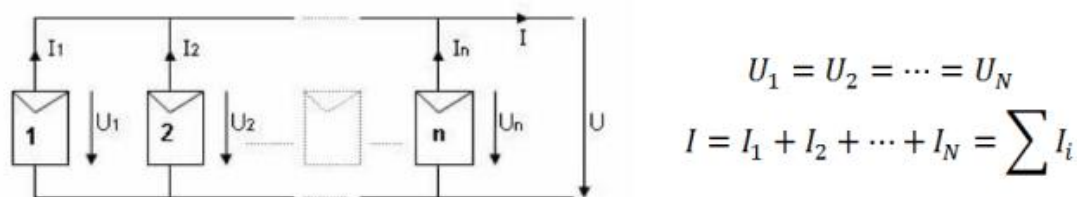
Assim sendo, a divisão de strings por inversores fica:



**Tabela 4.8 - Distribuição das strings pelos inversores.**

| Nº Inversor | Strings         | Divisão por MPPT |
|-------------|-----------------|------------------|
| Inversor 1  | 7 x 22          | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 1 x 22           |
| Inversor 2  | 7 x 22          | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 1 x 22           |
| Inversor 3  | 7 x 22          | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 1 x 22           |
| Inversor 4  | 6 x 22          | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
| Inversor 5  | 6 x 22          | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
| Inversor 6  | 6 x 22 + 1 x 18 | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 2 x 22           |
|             |                 | 1 x 18           |
|             |                 |                  |

Deve-se também verificar se a corrente máxima no MPPT não é ultrapassada. A associação de strings em paralelo implica o aumento da corrente que chega ao MPPT por cada string adicionada (Figura 4.9). Como cada MPPT tem duas entradas, apenas é possível combinar no máximo duas strings. Uma vez que a corrente não varia com a quantidade de módulos em série, a corrente de uma string será igual à corrente MPP do módulo fotovoltaico. Então, no caso em que são ligadas duas strings ao MPPT, esta corrente vai ser o dobro.



**Figura 4.9 - Associação de módulos em paralelo.**

A corrente no ponto máximo de potência (MPP) do módulo utilizado é 8,95 A e então a corrente em cada string terá este valor. Ligando duas strings a um MPPT a corrente de entrada será 17,9 A.

$$I_{\text{entrada,MPPT}} < I_{\text{máx,MPPT}} ; 17,9 \text{ A} < 22 \text{ A} \quad (17)$$

É verificada, então, a condição de corrente de entrada do MPPT.

Falta agora verificar se a potência de cada inversor não é ultrapassada. A máxima potência que o inversor estará sujeito terá de ser menor que 1,15 vezes a potência máxima de saída do inversor. Para fator de potência igual a 1 a potência máxima será de 40000 W. Isto a multiplicar por 1,15 dá um valor de 46000 W que não devem ser ultrapassados. Na Tabela 4.9 estão presentes as verificações.

**Tabela 4.9 - Verificação das potências nos inversores.**

| Nº Inversor | Strings         | Potência no inversor (W) |
|-------------|-----------------|--------------------------|
| Inversor 1  | 7 x 22          | 43890                    |
| Inversor 2  | 7 x 22          | 43890                    |
| Inversor 3  | 7 x 22          | 43890                    |
| Inversor 4  | 6 x 22          | 37620                    |
| Inversor 5  | 6 x 22          | 37620                    |
| Inversor 6  | 6 x 22 + 1 x 18 | 42750                    |

Verifica-se que em nenhum dos inversores é ultrapassada a potência máxima de 46000W.

Como não há ligação à rede elétrica, o sistema fotovoltaico, por si só, não consegue satisfazer as necessidades energéticas da indústria em questão, devido à volatilidade da produção fotovoltaica e porque não há produção à noite. É necessário fazer a integração deste sistema fotovoltaico no sistema diesel dimensionado no subcapítulo anterior. Essa integração será estudada no subcapítulo a seguir.

Devido à limitação da área disponível, este será o único caso estudado, uma vez que este é o que maximiza a área utilizada e consequentemente a máxima potência possível a instalar.

Os valores de produção e autoconsumo obtidos para este sistema foram:

**Tabela 4.10 - Valores obtidos na simulação.**

| Consumo antes<br>PV (kWh) | Produção Anual (kWh) | Autoconsumo (kWh) | Consumo após PV<br>(kWh) |
|---------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|
| 1243964                   | 361473               | 307143            | 936821                   |

Pela análise da tabela consegue observar-se que, com a instalação do sistema fotovoltaico, será evitado o consumo de cerca de 307 MWh que corresponde a cerca de 25% do consumo total da empresa.

Não contabilizando o custo dos cabos solares, considerando um custo dos painéis fotovoltaicos de 1€/Wp e sabendo que o modelo do inversor custa cerca de 2500€ por unidade (informações recolhidas no âmbito da dissertação), o sistema fotovoltaico terá um custo aproximado de investimento de 300000€.

## 4.5 Sistema fotovoltaico com unidades geradoras a diesel

Nesta fase irá ser feito o estudo da integração dos dois sistemas: Sistema com unidades geradoras a diesel e sistema fotovoltaico.

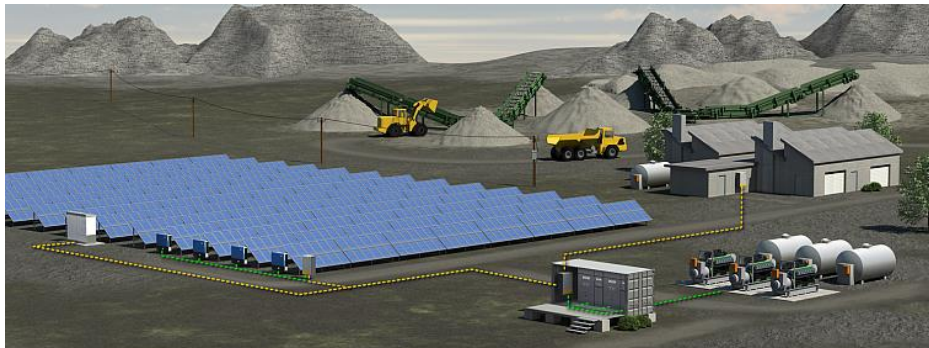


Figura 4.10 - Aspeto simplificado do sistema híbrido fotovoltaico + Geradores diesel [5].

### 4.5.1 Estratégia de operação

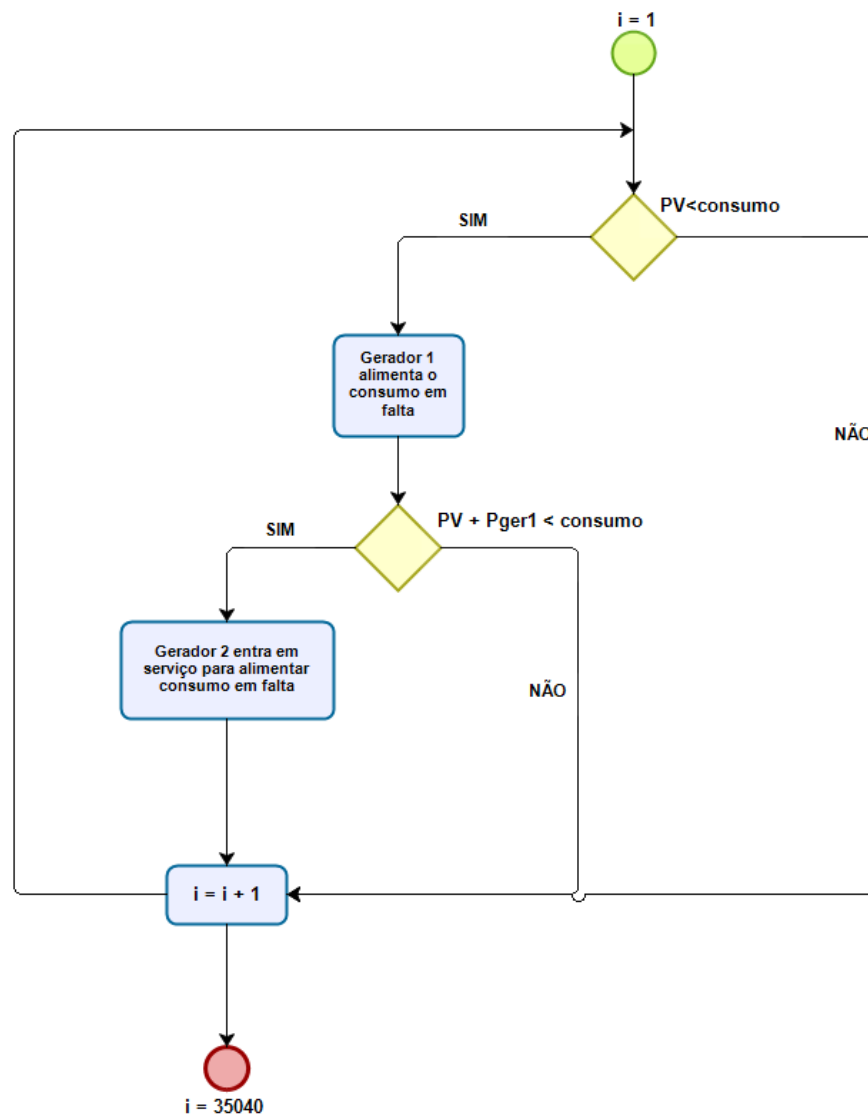
O sistema diesel que se vai usar primeiramente será o da segunda solução calculado em 4.3. Neste caso o 1º gerador diesel vai operar em conjunto com o gerador fotovoltaico e o 2º gerador diesel apenas entrará em funcionamento quando esse conjunto não conseguir satisfazer as necessidades energéticas.

A screenshot of an Excel spreadsheet titled "Rui\_dimensamento\_DIESEL + PV - Excel". The spreadsheet is organized into columns with headers: "Horas", "Energia consumida", "Produção Total", "Energia em falta", "Gerador 1", "Energia em falta", "% carga", "Consumo diesel 1 (l)", "Gerador 2", "% carga", "Consumo diesel 2", "Energia desperdiçada", and "Validação". The rows represent hourly data from 00:15 to 06:45. The data shows the energy consumption, production, and the operation of two diesel generators. The "Validação" column contains the word "VERDADEIRO" for all rows, indicating that the system meets the energy requirements. The bottom of the spreadsheet shows a summary of the total energy consumption and production for the entire period.

| #  | A     | B                 | C              | D                | E           | F                | G       | H                    | I         | J       | K                | L                    | M          |
|----|-------|-------------------|----------------|------------------|-------------|------------------|---------|----------------------|-----------|---------|------------------|----------------------|------------|
|    | Horas | Energia consumida | Produção Total | Energia em falta | Gerador 1   | Energia em falta | % carga | Consumo diesel 1 (l) | Gerador 2 | % carga | Consumo diesel 2 | Energia desperdiçada | Validação  |
| 2  | 00:15 | 19,75             | 0              | 19,75            | 19,75       | 0                | 25%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 3  | 00:30 | 19,75             | 0              | 19,75            | 19,75       | 0                | 25%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 4  | 00:45 | 19,5              | 0              | 19,5             | 19,5        | 0                | 24%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 5  | 01:00 | 19,75             | 0              | 19,75            | 19,75       | 0                | 25%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 6  | 01:15 | 19,5              | 0              | 19,5             | 19,5        | 0                | 24%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 7  | 01:30 | 21                | 0              | 21               | 21          | 0                | 26%     | 10,925               | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 8  | 01:45 | 18,75             | 0              | 18,75            | 18,75       | 0                | 23%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 9  | 02:00 | 18,25             | 0              | 18,25            | 18,25       | 0                | 23%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 10 | 02:15 | 17,25             | 0              | 17,25            | 17,25       | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 11 | 02:30 | 17,75             | 0              | 17,75            | 17,75       | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 12 | 02:45 | 17,75             | 0              | 17,75            | 17,75       | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 13 | 03:00 | 17,5              | 0              | 17,5             | 17,5        | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 14 | 03:15 | 17,5              | 0              | 17,5             | 17,5        | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 15 | 03:30 | 18                | 0              | 18               | 18          | 0                | 23%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 16 | 03:45 | 17,5              | 0              | 17,5             | 17,5        | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 17 | 04:00 | 17,25             | 0              | 17,25            | 17,25       | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 18 | 04:15 | 18                | 0              | 18               | 18          | 0                | 23%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 19 | 04:30 | 17,5              | 0              | 17,5             | 17,5        | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 20 | 04:45 | 17,5              | 0              | 17,5             | 17,5        | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 21 | 05:00 | 18                | 0              | 18               | 18          | 0                | 23%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 22 | 05:15 | 17,25             | 0              | 17,25            | 17,25       | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 23 | 05:30 | 17,5              | 0              | 17,5             | 17,5        | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 24 | 05:45 | 18                | 0              | 18               | 18          | 0                | 23%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 25 | 06:00 | 17,75             | 0              | 17,75            | 17,75       | 0                | 22%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 26 | 06:15 | 17,5              | 2,238411454    | 15,26158855      | 15,26158855 | 0                | 19%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 27 | 06:30 | 17,75             | 4,699495932    | 13,05050407      | 13,05050407 | 0                | 16%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |
| 28 | 06:45 | 17,75             | 6,710123833    | 11,03987617      | 11,03987617 | 0                | 14%     | 6,525                | 0         | 0%      | 0                | 0                    | VERDADEIRO |

Figura 4.11 - Ferramenta desenvolvida para o cálculo do sistema híbrido.

O algoritmo utilizado para a operação do sistema híbrido está presente no fluxograma da Figura 4.12.



**Figura 4.12 - Fluxograma da operação do sistema híbrido.**

O fluxo acaba quando  $i = 35040$  que é o número de registos para um ano de 15 em 15 minutos:

$$n^{\circ} \text{ iterações} = \frac{1}{4} \times 24 \times 365 = 35040$$

#### 4.5.2 Análise de resultados e viabilidade da solução

Os resultados obtidos para as produções dos geradores foram:

Tabela 4.11 - Valores obtidos para os dois geradores em uso.

| Gerador | Regime de carga | Horas | Consumo de combustível (l) | Emissão de CO <sub>2</sub> (ton) |
|---------|-----------------|-------|----------------------------|----------------------------------|
| 1       | Desligado       | 1016  | 0                          | 0                                |
|         | 25%             | 3108  | 81106                      | 219                              |
|         | 50%             | 2651  | 115838                     | 313                              |
|         | 75%             | 968   | 59919                      | 162                              |
|         | 100%            | 1018  | 85003                      | 230                              |
| 2       | Desligado       | 8373  | 0                          | 0                                |
|         | 25%             | 281   | 7341                       | 20                               |
|         | 50%             | 37    | 4217                       | 11                               |
|         | 75%             | 9     | 573                        | 2                                |
|         | 100%            | 0     | 0                          | 0                                |
| Total   |                 |       | 353996                     | 956                              |

Com esta solução consegue-se uma poupança de cerca de 92954 litros de diesel, traduzida numa poupança de 120840€ para o 1º ano, e uma redução de 21% nas emissões de CO<sub>2</sub>, ou seja, mais de 250 toneladas, comparando com a solução do sistema somente com geradores diesel.

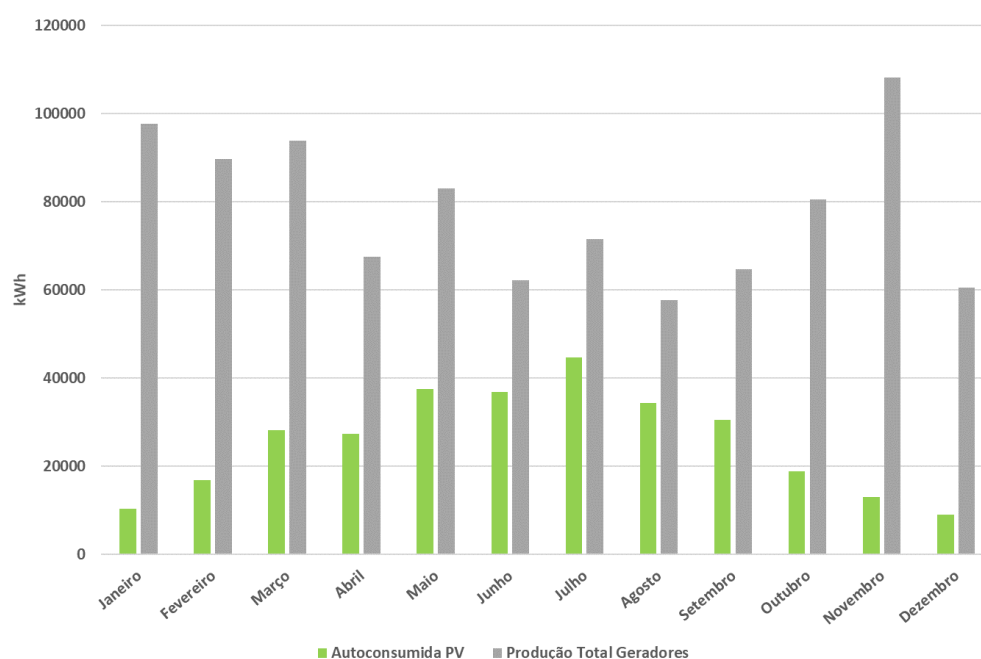


Figura 4.13 - Distribuição das produções na solução diesel + fotovoltaico.

No gráfico da Figura 4.13 está apresentada a distribuição mensal da origem de produção de energia da unidade fabril após instalação do sistema fotovoltaico. Para esta solução a fração de energia produzida de origem renovável é 25% do consumo anual da empresa.

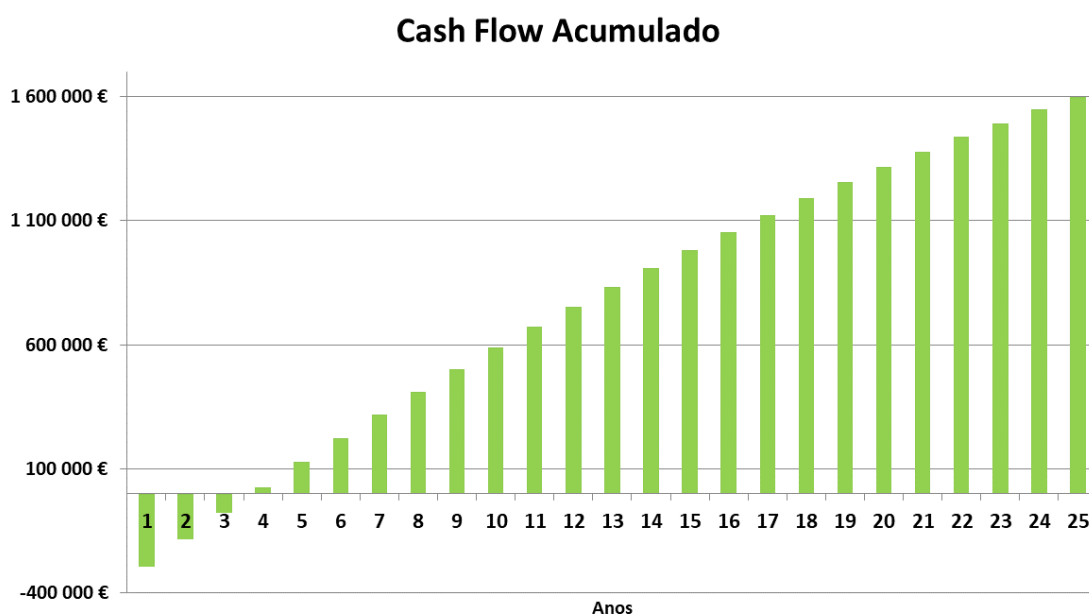
Sabendo que o período de vida útil do sistema é 25 anos, para a análise do período de retorno de investimento, foi considerado um custo de O&M do sistema fotovoltaico de 1,5% do investimento inicial para o 1º ano e um acréscimo de 2,5% do valor da O&M para os restantes anos. Foi considerada também uma degradação da capacidade de produção dos painéis de 2,5% ao ano, ou seja, essa percentagem de energia não produzida foi adicionada à produção dos geradores. Como referido anteriormente, a O&M dos geradores é cerca de 1500€ por gerador, sendo necessário um acréscimo de 2,5% ao ano, devido à utilização intensiva destes. A poupança anual será a diferença entre o que se poupou em combustível e o custo da O&M para o sistema diesel e fotovoltaico.

Para a análise do período de retorno de investimento os dados foram agrupados na seguinte tabela.

**Tabela 4.12 - Análise do período de retorno de investimento para o sistema diesel + fotovoltaico.**

| Ano | Energia Injetada na instalação por PV (kWh) | O&M (Geradores + PV) (€) | Cash Flow (€) | Cash Flow acumulado (€) |
|-----|---------------------------------------------|--------------------------|---------------|-------------------------|
| 0   | -                                           | -                        | -410000       | -410000                 |
| 1   | 307144                                      | -7500                    | 113341        | -296659                 |
| 2   | 299465                                      | -7688                    | 110132        | -186527                 |
| 3   | 291978                                      | -7880                    | 106994        | -79533                  |
| 4   | 284679                                      | -8077                    | 103926        | 24393                   |
| 5   | 277562                                      | -8279                    | 100924        | 125317                  |
| 6   | 270623                                      | -8486                    | 97987         | 223303                  |
| 7   | 263857                                      | -8698                    | 95113         | 318416                  |
| 8   | 257261                                      | -8915                    | 92300         | 410716                  |
| 9   | 250829                                      | -9138                    | 89547         | 500263                  |
| 10  | 244559                                      | -9366                    | 86851         | 587114                  |
| 11  | 238445                                      | -9601                    | 84212         | 671326                  |
| 12  | 232484                                      | -9841                    | 81626         | 752952                  |
| 13  | 226672                                      | -10087                   | 79094         | 832045                  |
| 14  | 221005                                      | -10339                   | 76612         | 908657                  |

|    |        |        |       |         |
|----|--------|--------|-------|---------|
| 15 | 215480 | -10597 | 74180 | 982837  |
| 16 | 210093 | -10862 | 71795 | 1054632 |
| 17 | 204840 | -11134 | 69457 | 1124089 |
| 18 | 199719 | -11412 | 67164 | 1191254 |
| 19 | 194726 | -11697 | 64914 | 1256168 |
| 20 | 189858 | -11990 | 62707 | 1318875 |
| 21 | 185112 | -12290 | 60540 | 1379414 |
| 22 | 180484 | -12597 | 58412 | 1437826 |
| 23 | 175972 | -12912 | 56321 | 1494147 |
| 24 | 171573 | -13235 | 54268 | 1548415 |
| 25 | 167283 | -13565 | 52249 | 1600665 |



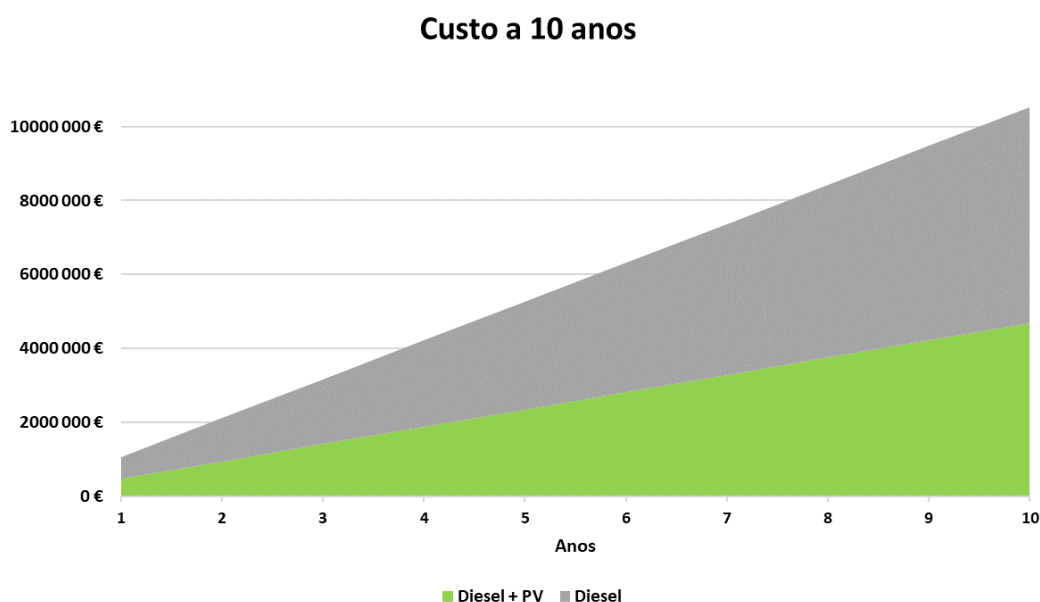
**Figura 4.14 - Período de retorno de investimento.**

Pela análise Tabela 4.12 e do gráfico Figura 4.14 conclui-se que era possível obter retorno pelo investimento neste sistema diesel com fotovoltaico após 4 anos comparando à solução de apenas geradores diesel.



**Tabela 4.13 - Comparativo do custo a 10 anos dos dois sistemas.**

| Ano | Custo anual<br>acumulado sistema<br>Diesel (€) | Custo anual<br>acumulado<br>Sistema Diesel +<br>PV (€) |
|-----|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1   | 584 035                                        | 467 695                                                |
| 2   | 1 182 672                                      | 947 082                                                |
| 3   | 1 781 385                                      | 1 426 661                                              |
| 4   | 2 380 177                                      | 1 906 438                                              |
| 5   | 2 979 050                                      | 2 386 416                                              |
| 6   | 3 578 005                                      | 2 866 601                                              |
| 7   | 4 177 046                                      | 3 346 998                                              |
| 8   | 4 776 173                                      | 3 827 613                                              |
| 9   | 5 375 390                                      | 4 308 451                                              |
| 10  | 5 974 698                                      | 4 789 517                                              |



**Figura 4.15 - Comparação do custo a 10 anos dos dois sistemas.**

Pela análise da Figura 4.15 e da Tabela 4.13 conclui-se que o custo a 10 anos do sistema diesel é muito superior ao custo do sistema diesel com fotovoltaico. Pelo estudo feito prevê-se uma poupança a 10 anos de cerca de 1185181€.

Para fazer a análise da viabilidade do projeto vai-se calcular o VAL e a TIR do projeto.

O VAL ou o valor atualizado líquido é o valor presente de um projeto, calculado a partir dos fluxos de caixa futuros. Trata-se de uma avaliação de todos os cash flows envolvidos no projeto, positivos e negativos. Como os vários fluxos de caixa ocorrem em momentos distintos no tempo, não se pode simplesmente adicionar, pois o dinheiro terá valores diferentes em função do tempo. A inflação tende a desvalorizar o dinheiro. Assim, um euro vale mais hoje do que valerá daqui por dois, cinco ou dez anos. Adicionando o valor presente de todos os cash flows futuros, achar-se-á o valor atualizado líquido. Se for positivo, então o projeto é rentável; se for negativo, o projeto não demonstra ser capaz de gerar dinheiro suficiente.

A Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) é a taxa que torna o valor atual dos benefícios económicos futuros iguais ao valor atual dos respetivos custos, pelo que traduz a taxa de rentabilidade periódica do capital investido.

Para o projeto ser viável a TIR terá de ser superior à taxa de atualização que torna o VAL nulo, ou seja, é a taxa em que o projeto nem dará lucro, nem prejuízo.

Assumiu-se uma taxa de atualização de 8% para o VAL. Ambos os cálculos foram feitos recorrendo às funções do Excel, sendo que os valores obtidos para esta solução foram os apresentados na Tabela 4.14.

**Tabela 4.14 - TIR e VAL calculados para o sistema diesel e fotovoltaico.**

| <b>Taxa Interna de<br/>Rentabilidade a<br/>25 anos</b> | <b>Valor Atualizado<br/>Líquido a 25<br/>anos</b> |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 25%                                                    | 511 276 €                                         |

A TIR é cerca de 25%, pelo que os cash flows gerados pelo projeto igualam o investimento realizado (VAL nulo) para uma taxa de retorno média constante de 25%, superior à taxa de atualização considerada de 8%.

O período de recuperação é cerca de 4 anos o que é um ótimo indicador, uma vez que se espera que o investimento seja recuperado num intervalo temporal muito inferior ao tempo de vida útil do projeto.

## **4.6 Sistema fotovoltaico com unidades geradoras a diesel e BESS**

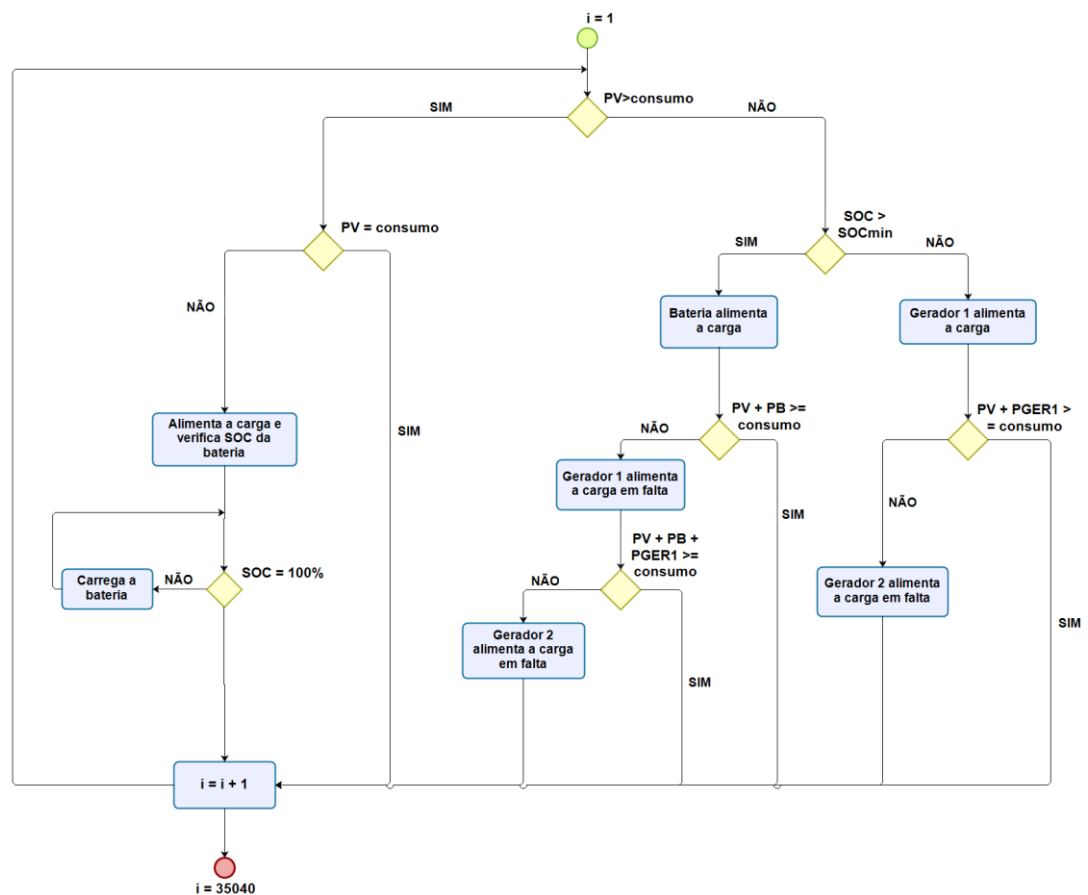
Nesta fase será feita a integração de um sistema de armazenamento de energia a baterias, de forma a armazenar o excedente de energia produzida pelo sistema

fotovoltaico, para se reduzir a dependência dos geradores diesel e consequentemente diminuir o consumo de combustível ao máximo.

#### 4.6.1 Estratégia de Operação

Partindo da solução calculada na alínea anterior vai-se então estudar a integração de um sistema de armazenamento a baterias para o sistema híbrido fotovoltaico com diesel calculado anteriormente.

A estratégia de operação está presente no fluxograma da Figura 4.16.



**Figura 4.16 - Fluxograma da estratégia de operação do sistema híbrido PV + Diesel + BESS.**

O objetivo será minimizar a energia desperdiçada pela produção fotovoltaica, sendo que a função principal do sistema de baterias será armazenar este excedente para utilização quando a produção fotovoltaica não consegue suprir as necessidades energéticas. Outro objetivo será maximizar a poupança de combustível que se conseguirá com o banco de baterias.

É prejudicial para as baterias profundidades de descarga elevadas, bem como manterem-se durante muito tempo descarregadas. Por isto, o SOC mínimo não deverá ser inferior a 40% da capacidade máxima do banco de baterias [39].

Com recurso ao Excel foi desenvolvido o algoritmo do fluxograma acima em que, a cada iteração, é calculado o autoconsumo fotovoltaico e o excedente de energia proveniente das produção fotovoltaica; a energia que entra e que sai das baterias, bem como o estado de carga destas, que não deverá ser inferior a 40% da capacidade da bateria; as produções, percentagem de carga e consumo de combustível dos dois geradores da solução estudada; testes de validade para verificar se a soma das energias produzidas igualam o consumo e também para verificar se a soma da energia que vai para as baterias com o autoconsumo fotovoltaico e com o excedente final igualam a produção fotovoltaica.

#### **4.6.2 Dimensionamento do sistema de baterias**

Alterando a capacidade do sistema de baterias ou dos geradores o programa desenvolvido faz os vários cálculos automáticos para todo o ano. Mantendo a capacidade dos geradores escolhidos para o sistema híbrido fotovoltaico e diesel foram feitos alguns testes para verificar a influência que a mudança de capacidade das baterias tem na poupança de combustível e na redução do excedente de energia. A seguir estão demonstrados os resultados obtidos.

Tabela 4.15 - Escolha da capacidade das baterias.

| Capacidade do sistema de baterias (kWh) | Consumo de combustível do sistema híbrido (litros) | Poupança de combustível (€) | Influência da mudança de capacidade na poupança de diesel | Excedente de Energia (kWh) | Excedente de energia evitado (kWh) | Influência da mudança de capacidade no excedente de energia |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| sem BAT                                 | 353996                                             | -                           | -                                                         | 54330                      | -                                  | -                                                           |
| 200                                     | 334661                                             | 25 135                      | -                                                         | 38317                      | 16013                              | -                                                           |
| 400                                     | 326513                                             | 35 728                      | 30%                                                       | 29927                      | 24402                              | 34%                                                         |
| 600                                     | 323823                                             | 39 225                      | 9%                                                        | 24847                      | 29483                              | 17%                                                         |
| 800                                     | 322222                                             | 41 306                      | 5%                                                        | 21297                      | 33033                              | 11%                                                         |
| 1000                                    | 320921                                             | 42 997                      | 4%                                                        | 18263                      | 36067                              | 8%                                                          |
| 1200                                    | 319944                                             | 44 267                      | 3%                                                        | 15741                      | 38589                              | 7%                                                          |
| 1400                                    | 319265                                             | 45 150                      | 2%                                                        | 13748                      | 40582                              | 5%                                                          |
| 1600                                    | 318636                                             | 45 968                      | 2%                                                        | 11940                      | 42390                              | 4%                                                          |
| 1800                                    | 318124                                             | 46 634                      | 1%                                                        | 10450                      | 43880                              | 3%                                                          |
| 2000                                    | 317719                                             | 47 161                      | 1%                                                        | 9317                       | 45013                              | 3%                                                          |

Como o preço das baterias neste momento é muito elevado deve ser feito um estudo cuidadoso se se deve, ou não, investir num sistema de baterias e qual o tamanho que este deve ter.

Como se observa pela Tabela 4.15, para este caso de estudo, se se optar por um sistema com capacidade de armazenamento de 1600 kWh em vez de um de 1400 kWh vai-se estar a ganhar apenas 2% na poupança de combustível e 4% no excedente de energia evitado, o que, contrabalançando com a diferença de preço entre um e outro sistema, não compensa o investimento no sistema de maior capacidade.

Por isso, escolheu-se a capacidade de 400 kWh uma vez que não há interesse económico para valores superiores de capacidade das baterias.

### 4.6.3 Análise de resultados e viabilidade da solução

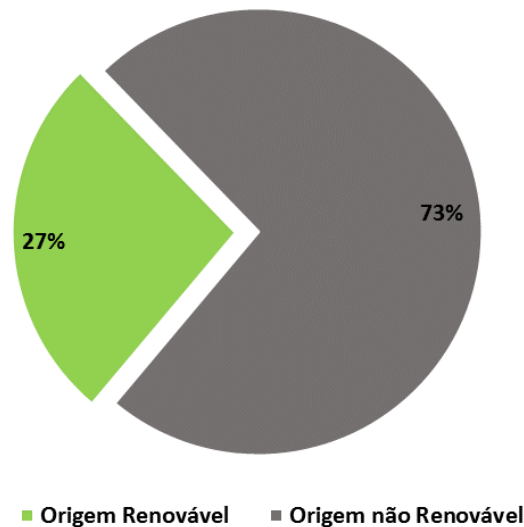
Após os cálculos resolvidos foram agregados todos os dados por mês, durante o ano em estudo. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Valores mensais obtidos.

| Mês       | Consumo (kWh) | Produção Fotovoltaica (kWh) | Autoconsumo fotovoltaico (kWh) | Autoconsumo proveniente das baterias (kWh) | Excedente de energia (kWh) | Consumo pós PV + BESS (kWh) |
|-----------|---------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| janeiro   | 107929        | 12053                       | 10260                          | 1708                                       | 224                        | 95961                       |
| fevereiro | 106394        | 18034                       | 16739                          | 941                                        | 353                        | 88713                       |
| março     | 122085        | 29512                       | 28192                          | 877                                        | 443                        | 93016                       |
| abril     | 94733         | 32269                       | 27265                          | 1794                                       | 3210                       | 65674                       |
| maio      | 120500        | 41717                       | 37525                          | 1954                                       | 2238                       | 81021                       |
| junho     | 98917         | 47023                       | 36827                          | 3351                                       | 6845                       | 58739                       |
| julho     | 116093        | 51381                       | 44586                          | 2904                                       | 3891                       | 68603                       |
| agosto    | 91985         | 46343                       | 34387                          | 3598                                       | 8357                       | 53999                       |
| setembro  | 95147         | 34731                       | 30423                          | 2227                                       | 2081                       | 62497                       |
| outubro   | 99373         | 23003                       | 18886                          | 2087                                       | 2030                       | 78399                       |
| novembro  | 121242        | 14004                       | 13020                          | 885                                        | 98                         | 107336                      |
| dezembro  | 69568         | 11405                       | 9033                           | 2076                                       | 158                        | 58459                       |
| Totais    | 1243964       | 361473                      | 307143                         | 24402                                      | 29927                      | 912418                      |

O consumo pós PV + BESS é o consumo que vai ter de ser satisfeito pelos geradores diesel. Sendo assim, a distribuição das produções está representada no gráfico da Figura 4.17.

**Distribuição da produção**



**Figura 4.17 - Distribuição da produção.**

Com a integração do sistema de baterias conseguiu-se reduzir em 2% a fração de energia produzida de origem não renovável, evitando um excedente de energia produzida em cerca de 24 MWh. Consegue-se uma melhoria técnica, porém, terá de se contrabalançar com o estudo económico, para avaliar a viabilidade da solução.

Como estudado no capítulo 3, os ciclos das baterias devem permitir que estas armazenem o excesso de produção e que descarreguem com uma profundidade de descarga que permita o número de ciclos suficientes, de modo a que a sua vida útil seja no mínimo de 6 anos (tipicamente 2200 ciclos a 50%-60% de DOD, considerando um ciclo por dia) e idealmente 8 a 10 anos [25]. Pela observação da Figura 4.18 o SOC da bateria nunca oscila muito, mantendo uma média mensal entre os 40% e os 55% de profundidade de descarga e preservando assim a vida útil da bateria.

### Estado de carga médio BESS

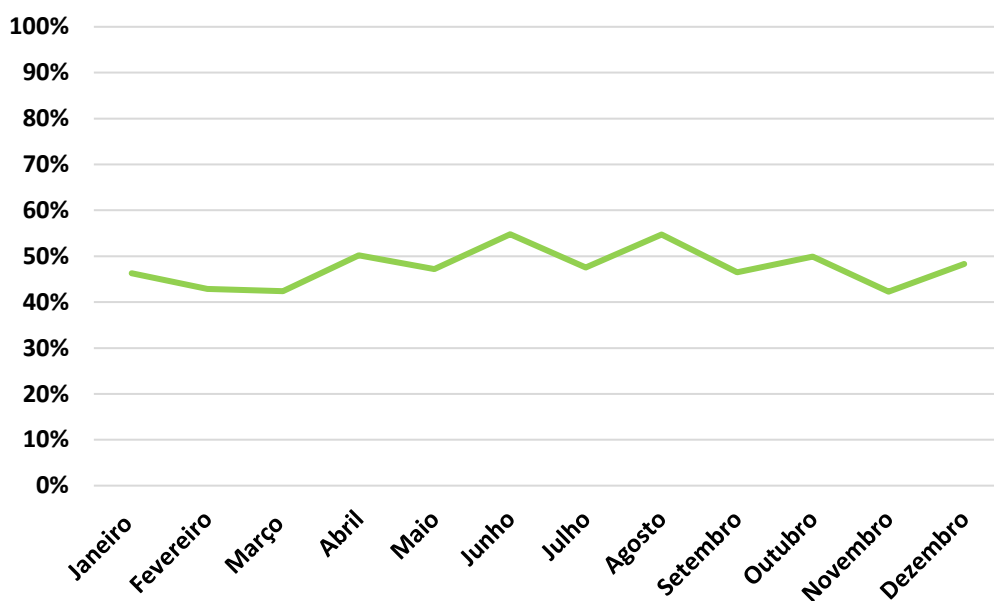


Figura 4.18 - SOC médio mensal do BESS.

Tabela 4.17 - Valores obtidos para os dois geradores em uso.

| Gerador | Regime de carga | Horas | Consumo de combustível (l) | Emissão de CO <sub>2</sub> (ton) |
|---------|-----------------|-------|----------------------------|----------------------------------|
| 1       | Desligado       | 2038  | 0                          | 0                                |
|         | 25%             | 2126  | 55495                      | 150                              |
|         | 50%             | 2615  | 114265                     | 309                              |
|         | 75%             | 964   | 59641                      | 161                              |
|         | 100%            | 1018  | 84982                      | 229                              |
|         |                 |       |                            |                                  |
| 2       | Desligado       | 8373  | 0                          | 0                                |
|         | 25%             | 281   | 7341                       | 20                               |
|         | 50%             | 97    | 4217                       | 11                               |
|         | 75%             | 9     | 573                        | 2                                |
|         | 100%            | 0     | 0                          | 0                                |
|         |                 |       |                            |                                  |
| Total   |                 |       | 326513                     | 882                              |

Consegue-se uma redução nas emissões, comparando com a solução de apenas geradores a diesel, de 27% e uma redução de 8% em relação à solução de geradores diesel com fotovoltaico. Quanto à poupança no combustível, comparando com a solução apenas

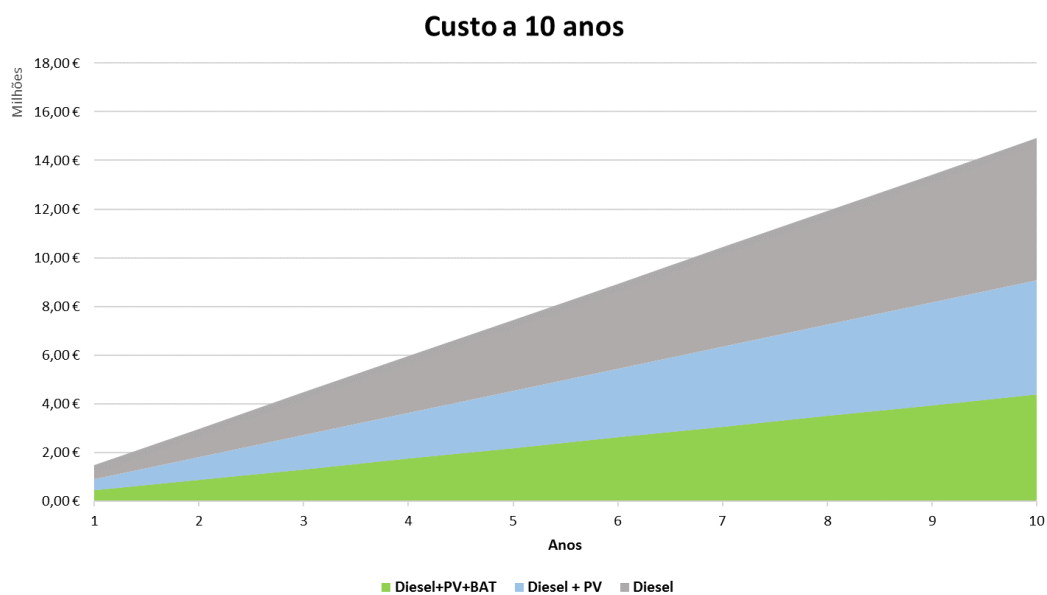


com geradores diesel, consegue-se uma poupança de 156569€ e comparativamente com a solução de geradores diesel com fotovoltaico uma poupança de cerca de 35728€.

Não foi possível contactar um fabricante de baterias e, por isso, foi estabelecido um preço de referência como reunido na Tabela 3.2. Para as baterias utilizou-se 250€/kWh e para a O&M de 5000€ para o 1º ano e um aumento de 2,5% por cada ano de utilização. Isto totaliza um custo do sistema de baterias de 100000€ [7][8][9].

**Tabela 4.18 - Comparativo do custo a 10 anos dos três sistemas.**

| Ano | Custo anual<br>acumulado sistema<br>Diesel (€) | Custo anual<br>acumulado<br>Sistema Diesel +<br>PV (€) | Custo anual<br>acumulado<br>Sistema Diesel +<br>PV + BESS (€) |
|-----|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1   | 584 035                                        | 467 695                                                | 421 303                                                       |
| 2   | 1 182 672                                      | 947 082                                                | 853 138                                                       |
| 3   | 1 781 385                                      | 1 426 661                                              | 1 285 293                                                     |
| 4   | 2 380 177                                      | 1 906 438                                              | 1 717 777                                                     |
| 5   | 2 979 050                                      | 2 386 416                                              | 2 150 598                                                     |
| 6   | 3 578 005                                      | 2 866 601                                              | 2 583 763                                                     |
| 7   | 4 177 046                                      | 3 346 998                                              | 3 017 282                                                     |
| 8   | 4 776 173                                      | 3 827 613                                              | 3 451 163                                                     |
| 9   | 5 375 390                                      | 4 308 451                                              | 3 885 416                                                     |
| 10  | 5 974 698                                      | 4 789 517                                              | 4 320 050                                                     |

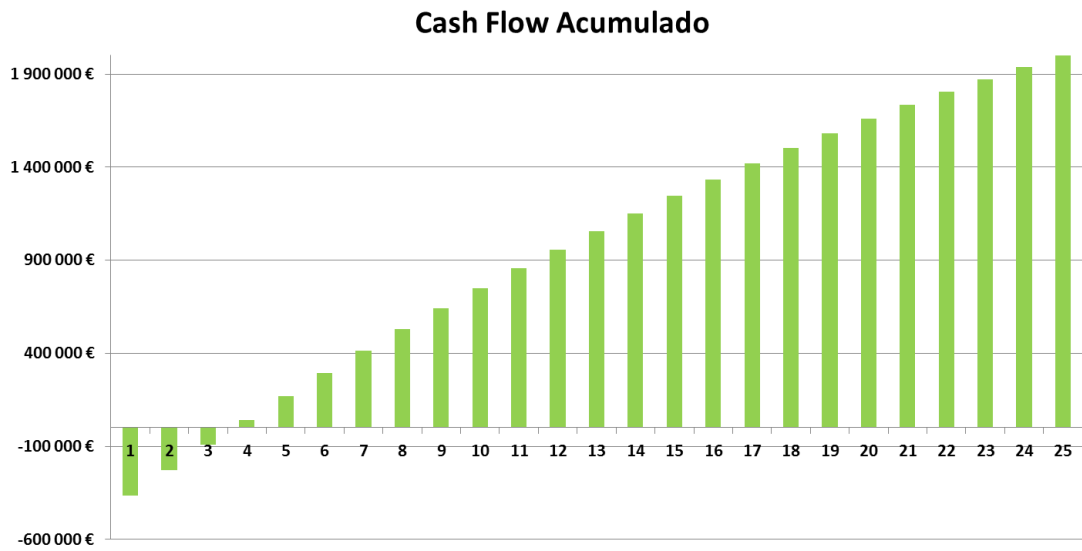


**Figura 4.19 - Comparativo do custo a 10 anos dos três sistemas.**

Pela observação da Figura 4.19 conclui-se que o custo do sistema a 10 anos do sistema Diesel com fotovoltaico e BESS, mesmo com o elevado custo inicial, é o mais barato das três soluções, com uma diferença de cerca de 470000€ para o sistema diesel com fotovoltaico e cerca de 1655000€ de diferença para o sistema com geradores diesel apenas.

**Tabela 4.19 - Análise do período de retorno de investimento para o sistema diesel + fotovoltaico + BESS.**

| Ano | Produção Injetada na instalação (kWh) | O&M (Geradores + PV + BESS) (€) | Cash Flow (€) | Cash Flow acumulado (€) |
|-----|---------------------------------------|---------------------------------|---------------|-------------------------|
| 0   | -                                     | -                               | -510000       | -510000                 |
| 1   | 331546                                | -12500                          | 144069        | -365931                 |
| 2   | 323258                                | -12813                          | 130842        | -226089                 |
| 3   | 315176                                | -13133                          | 135706        | -90383                  |
| 4   | 307297                                | -13461                          | 131656        | 41273                   |
| 5   | 299614                                | -13798                          | 127692        | 168965                  |
| 6   | 292124                                | -14143                          | 123810        | 292774                  |
| 7   | 284821                                | -14496                          | 120007        | 412781                  |
| 8   | 277700                                | -14859                          | 116282        | 529064                  |
| 9   | 270758                                | -15230                          | 112632        | 641696                  |
| 10  | 263989                                | -15611                          | 109055        | 750751                  |
| 11  | 257389                                | -16001                          | 105548        | 856299                  |
| 12  | 250954                                | -16401                          | 102109        | 958408                  |
| 13  | 244681                                | -16811                          | 98736         | 1057145                 |
| 14  | 238564                                | -17231                          | 95428         | 1152572                 |
| 15  | 232599                                | -17662                          | 92180         | 1244752                 |
| 16  | 226784                                | -18104                          | 88993         | 1333745                 |
| 17  | 221115                                | -18556                          | 85863         | 1419608                 |
| 18  | 215587                                | -19020                          | 82788         | 1502396                 |
| 19  | 210197                                | -19496                          | 79768         | 1582164                 |
| 20  | 204942                                | -19983                          | 76799         | 1658962                 |
| 21  | 199819                                | -20483                          | 73879         | 1732842                 |
| 22  | 194823                                | -20995                          | 71008         | 1803850                 |
| 23  | 189953                                | -21520                          | 68183         | 1872033                 |
| 24  | 185204                                | -22058                          | 65403         | 1937436                 |
| 25  | 180574                                | -22609                          | 62665         | 2000101                 |



**Figura 4.20 - Tempo de retorno de investimento.**

Como se observa pela Figura 4.20 e pela

Tabela 4.19, o investimento será retornado em 4 anos.

Porém, é necessário calcular o TIR e o VAL para se verificar qual será a melhor solução. A taxa de atualização utilizada será de 8%, como utilizado anteriormente.

**Tabela 4.20 - TIR e VAL calculados para o sistema diesel com fotovoltaico e sistema de baterias.**

| <b>Taxa Interna de<br/>Rentabilidade a<br/>25 anos</b> | <b>Valor Atualizado<br/>Líquido a 25<br/>anos</b> |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 25%                                                    | 647 929 €                                         |

Como se pode concluir, esta solução apresenta um TIR a 25 anos idêntica à solução anterior, porém apresenta um VAL a 25 anos superior à solução diesel com fotovoltaico. Esta seria uma boa solução, porém os valores dos preços das baterias utilizados foram otimistas e o não foi considerada a possível substituição das baterias. Contudo, com a rápida e constante redução do preço baterias, espera-se que num futuro próximo estes projetos possam ser mais rentáveis.

## **4.7 Ferramenta automática desenvolvida**

Com base nos estudos e cálculos feitos foi desenvolvida uma ferramenta em VBA do Excel com o objetivo de dimensionar sistemas híbridos com geradores diesel e sistemas fotovoltaicos, para uso empresarial da Ecoinside.

Esta ferramenta é um complementar à ferramenta já em uso pela Ecoinside.



**Figura 4.21 - Ecrã principal da ferramenta desenvolvida.**

O primeiro passo será realizar a simulação na ferramenta de dimensionamento fotovoltaico já em uso pela **Ecoinside**. Após a simulação, obtêm-se os valores de produção fotovoltaica que vão ser necessários na nova ferramenta.

#### **4.7.1 Inputs**

O segundo passo será, na nova ferramenta, carregar no botão “Carregar valores”, como mostra na Figura 4.21. Neste passo irão ser carregados os valores da simulação já realizada pelo departamento de engenharia da empresa. A ferramenta nova reúne os dados de quinze em quinze minutos, durante o ano em estudo, do consumo da empresa e da produção fotovoltaica para o sistema fotovoltaico calculado. Após o carregamento destes dados a ferramenta apresenta uma caixa de mensagem com um aviso em que é apresentado o valor mínimo de potência a instalar para o sistema diesel.

Após isto, e sabendo a potência mínima que deverá ser utilizada, o utilizador poderá carregar no botão “Cálculo de geradores”. É mostrada a caixa de introdução dos dados relativos aos geradores a utilizar, como mostrado na Figura 4.22.

UserForm1

### Dimensionamento geradores diesel

nº geradores

Potência Gerador (kW)

Preço Diesel (€/l)

O&M (€)

Preço Gerador (€)

**Consumo combustível**

Consumo Diesel (25% carga)

Consumo Diesel (50% carga)

Consumo Diesel (75% carga)

Consumo Diesel (100% carga)



**Figura 4.22 - Dados de entrada do gerador diesel.**

As variáveis de entrada para o gerador diesel são:

- Nº geradores;
- Potência individual do gerador;
- Preço diesel;
- Operação e manutenção;
- Preço individual do gerador;
- Consumo de diesel:
  - A 25% de carga;
  - A 50% de carga;
  - A 75% de carga;
  - A plena carga.

O utilizador deverá introduzir os dados pedidos sendo que a potência do gerador, a O&M e o preço do gerador são por unidade, ou seja, no caso de se utilizar três geradores (que deverão ser iguais), deve-se introduzir a potência, O&M e preço por unidade. Depois de “Continuar” irá ser pedido ao utilizador que insira o valor da O&M e do investimento inicial do sistema fotovoltaico.

### 4.7.2 Outputs

A ferramenta apresenta no fim cinco folhas de cálculo no Excel em que são apresentadas:

- *Dashboard* com informações sobre poupança de combustível, redução das emissões e VAL a 25 anos do projeto, bem como gráficos de retorno do investimento e da distribuição de produção mensal (Figura 4.23);

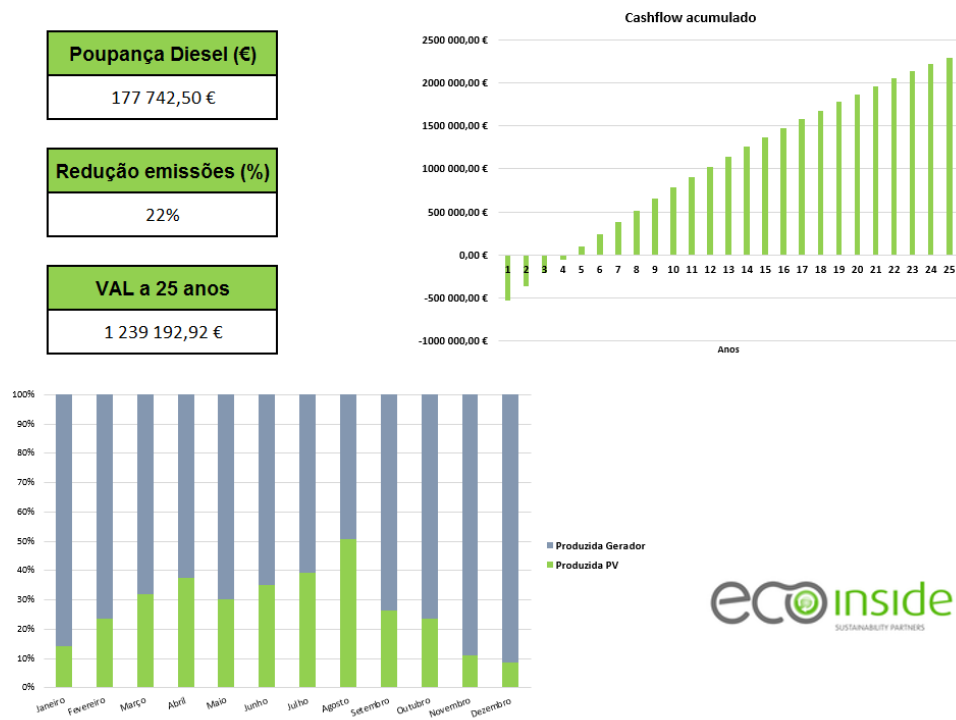


Figura 4.23 - *Dashboard* apresentada no final da simulação.

- Valores discriminados de potência do gerador, percentagem de carga e o consumo de combustível de cada gerador, para o caso do sistema a funcionar apenas com geradores a diesel (Figura 4.24);



| Horas | Dia        | Mês | Consumida | Gerador 1 | %carga | Consumo Diesel 1 | Falta alimentar 1 | Gerador 2 | %carga | Consumo Diesel 2 | Falta alimentar 2 |
|-------|------------|-----|-----------|-----------|--------|------------------|-------------------|-----------|--------|------------------|-------------------|
| 00:15 | 01/01/2017 | 1   | 16,75     | 16,75     | 26%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 00:30 | 01/01/2017 | 1   | 26,75     | 26,75     | 41%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 00:45 | 01/01/2017 | 1   | 23        | 23        | 35%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:00 | 01/01/2017 | 1   | 13,25     | 13,25     | 20%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:15 | 01/01/2017 | 1   | 14,25     | 14,25     | 22%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:30 | 01/01/2017 | 1   | 24,75     | 24,75     | 38%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:45 | 01/01/2017 | 1   | 11,75     | 11,75     | 18%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:00 | 01/01/2017 | 1   | 13,25     | 13,25     | 20%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:15 | 01/01/2017 | 1   | 19,25     | 19,25     | 30%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:30 | 01/01/2017 | 1   | 11,5      | 11,5      | 18%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:45 | 01/01/2017 | 1   | 7,25      | 7,25      | 11%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:00 | 01/01/2017 | 1   | 7,25      | 7,25      | 11%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:15 | 01/01/2017 | 1   | 24,5      | 24,5      | 38%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:30 | 01/01/2017 | 1   | 20,75     | 20,75     | 32%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:45 | 01/01/2017 | 1   | 9,75      | 9,75      | 15%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:00 | 01/01/2017 | 1   | 16,25     | 16,25     | 25%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:15 | 01/01/2017 | 1   | 21        | 21        | 32%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:30 | 01/01/2017 | 1   | 22,25     | 22,25     | 34%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:45 | 01/01/2017 | 1   | 10,25     | 10,25     | 16%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:00 | 01/01/2017 | 1   | 7,5       | 7,5       | 12%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:15 | 01/01/2017 | 1   | 11,5      | 11,5      | 18%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:30 | 01/01/2017 | 1   | 18,5      | 18,5      | 28%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:45 | 01/01/2017 | 1   | 12,25     | 12,25     | 19%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:00 | 01/01/2017 | 1   | 13        | 13        | 20%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:15 | 01/01/2017 | 1   | 22        | 22        | 34%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:30 | 01/01/2017 | 1   | 10,75     | 10,75     | 17%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:45 | 01/01/2017 | 1   | 9,75      | 9,75      | 15%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:00 | 01/01/2017 | 1   | 12,5      | 12,5      | 19%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:15 | 01/01/2017 | 1   | 21        | 21        | 32%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:30 | 01/01/2017 | 1   | 12,5      | 12,5      | 19%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:45 | 01/01/2017 | 1   | 7,5       | 7,5       | 12%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 08:00 | 01/01/2017 | 1   | 15        | 15        | 23%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 08:15 | 01/01/2017 | 1   | 15,75     | 15,75     | 24%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 08:30 | 01/01/2017 | 1   | 35,25     | 35,25     | 54%    | 15               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 08:45 | 01/01/2017 | 1   | 13,75     | 13,75     | 21%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 09:00 | 01/01/2017 | 1   | 8         | 8         | 12%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 09:15 | 01/01/2017 | 1   | 12        | 12        | 18%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 09:30 | 01/01/2017 | 1   | 19,75     | 19,75     | 30%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 09:45 | 01/01/2017 | 1   | 14,75     | 14,75     | 23%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 10:00 | 01/01/2017 | 1   | 17        | 17        | 26%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 10:15 | 01/01/2017 | 1   | 27        | 27        | 42%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 10:30 | 01/01/2017 | 1   | 13,5      | 13,5      | 21%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 10:45 | 01/01/2017 | 1   | 7,75      | 7,75      | 12%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 11:00 | 01/01/2017 | 1   | 9,75      | 9,75      | 15%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |

Figura 4.24 - Valores discriminados de 15 em 15 minutos para o caso sem fotovoltaico.

- Valores discriminados de potência do gerador, percentagem de carga e o consumo de combustível de cada gerador, para o caso do sistema a funcionar com geradores diesel e sistema fotovoltaico (Figura 4.25);

| Horas | Dia        | Mês | Consumida | Produzida   | Energia em falta | Energia Excedente | Gerador 1   | %carga | Consumo Diesel 1 | Falta alimentar 1 | Gerador 2 | %carga | Consumo Diesel 2 | Falta alimentar 2 |
|-------|------------|-----|-----------|-------------|------------------|-------------------|-------------|--------|------------------|-------------------|-----------|--------|------------------|-------------------|
| 00:15 | 01/01/2017 | 1   | 16,75     | 0           | 16,75            | 0                 | 16,75       | 26%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 00:30 | 01/01/2017 | 1   | 26,75     | 0           | 26,75            | 0                 | 26,75       | 41%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 00:45 | 01/01/2017 | 1   | 23        | 0           | 23               | 0                 | 23          | 35%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:00 | 01/01/2017 | 1   | 13,25     | 0           | 13,25            | 0                 | 13,25       | 20%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:15 | 01/01/2017 | 1   | 14        | 0           | 14               | 0                 | 14,25       | 22%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:30 | 01/01/2017 | 1   | 24,75     | 0           | 24,75            | 0                 | 24,75       | 38%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 01:45 | 01/01/2017 | 1   | 12        | 0           | 12               | 0                 | 11,75       | 18%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:00 | 01/01/2017 | 1   | 13,25     | 0           | 13,25            | 0                 | 13,25       | 20%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:15 | 01/01/2017 | 1   | 19 €      | 0           | 19               | 0                 | 19,25       | 30%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:30 | 01/01/2017 | 1   | 11,5      | 0           | 11,5             | 0                 | 11,5        | 18%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 02:45 | 01/01/2017 | 1   | 7,25      | 0           | 7,25             | 0                 | 7,25        | 11%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:00 | 01/01/2017 | 1   | 7,25      | 0           | 7,25             | 0                 | 7,25        | 11%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:15 | 01/01/2017 | 1   | 24,5      | 0           | 24,5             | 0                 | 24,5        | 38%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:30 | 01/01/2017 | 1   | 20,75     | 0           | 20,75            | 0                 | 20,75       | 32%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 03:45 | 01/01/2017 | 1   | 9,75      | 0           | 9,75             | 0                 | 9,75        | 15%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:00 | 01/01/2017 | 1   | 16,25     | 0           | 16,25            | 0                 | 16,25       | 25%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:15 | 01/01/2017 | 1   | 21        | 0           | 21               | 0                 | 21          | 32%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:30 | 01/01/2017 | 1   | 22,25     | 0           | 22,25            | 0                 | 22,25       | 34%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 04:45 | 01/01/2017 | 1   | 10        | 0           | 10,25            | 0                 | 10,25       | 16%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:00 | 01/01/2017 | 1   | 8         | 0           | 7,5              | 0                 | 7,5         | 12%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:15 | 01/01/2017 | 1   | 12        | 0           | 11,5             | 0                 | 11,5        | 18%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:30 | 01/01/2017 | 1   | 19        | 0           | 18,5             | 0                 | 18,5        | 28%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 05:45 | 01/01/2017 | 1   | 12        | 0           | 12,25            | 0                 | 12,25       | 19%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:00 | 01/01/2017 | 1   | 13        | 0           | 13               | 0                 | 13          | 20%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:15 | 01/01/2017 | 1   | 22        | 0           | 22               | 0                 | 22          | 34%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:30 | 01/01/2017 | 1   | 11        | 0           | 10,75            | 0                 | 10,75       | 17%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 06:45 | 01/01/2017 | 1   | 10        | 0           | 9,75             | 0                 | 9,75        | 15%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:00 | 01/01/2017 | 1   | 13        | 0           | 12,5             | 0                 | 12,5        | 19%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:15 | 01/01/2017 | 1   | 21        | 0           | 21               | 0                 | 21          | 32%    | 10               | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:30 | 01/01/2017 | 1   | 13        | 3           | 9,766250449      | 0                 | 9,766250449 | 15%    | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |
| 07:45 | 01/01/2017 | 1   | 7,5       | 5,396566316 | 2                | 0                 | 2           | 3%     | 5                | 0                 | 0         | 0%     | 0                | 0                 |

Figura 4.25 - Valores discriminados de 15 em 15 minutos para o caso com fotovoltaico.

- Valores mensais de produção fotovoltaica e da produção dos geradores; Consumo de combustível antes e pós fotovoltaico, redução consumo combustível e poupança em combustível; Emissões antes e pós fotovoltaico e redução das emissões; Energia consumida antes e pós fotovoltaico, produção total fotovoltaica, energia autoconsumida e excedente de energia; Produção de cada gerador (Figura 4.26);

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Figura 4.26 - Valores mensais de produção fotovoltaica e geradores diesel.

- Análise financeira e período de retorno de investimento (Figura 4.27).

| Ano | Consumo diesel | Poupança diesel | O&M Geradores | O&M PV     | CashFlow      | Cashflow acumulado | TIR a 25 anos  |
|-----|----------------|-----------------|---------------|------------|---------------|--------------------|----------------|
| 0   |                |                 |               |            | -698 000,00 € |                    | 21%            |
| 1   | 475130         | 177 742,50 €    | 6 000,00 €    | 4 000,00 € | 167 742,50 €  | -530 257,50 €      | Payback (anos) |
| 2   | 487008         | 173 298,94 €    | 6 150,00 €    | 4 100,00 € | 163 048,94 €  | -367 208,56 €      | 4,40           |
| 3   | 499183         | 168 966,46 €    | 6 303,75 €    | 4 202,50 € | 158 460,21 €  | -208 748,35 €      | VAL a 25 anos  |
| 4   | 511663         | 164 742,30 €    | 6 461,34 €    | 4 307,56 € | 153 973,40 €  | -54 774,95 €       | 1 239 192,92 € |
| 5   | 524455         | 160 623,74 €    | 6 622,88 €    | 4 415,25 € | 149 585,62 €  | 94 810,67 €        |                |
| 6   | 537566         | 156 608,15 €    | 6 788,45 €    | 4 525,63 € | 145 294,07 €  | 240 104,74 €       |                |
| 7   | 551005         | 152 692,95 €    | 6 958,16 €    | 4 638,77 € | 141 096,01 €  | 381 200,75 €       |                |
| 8   | 564780         | 148 875,62 €    | 7 132,11 €    | 4 754,74 € | 136 988,77 €  | 518 189,52 €       |                |
| 9   | 578900         | 145 153,73 €    | 7 310,42 €    | 4 873,61 € | 132 969,70 €  | 651 159,22 €       |                |
| 10  | 593372         | 141 524,89 €    | 7 493,18 €    | 4 995,45 € | 129 036,26 €  | 780 195,48 €       |                |
| 11  | 608207         | 137 986,77 €    | 7 680,51 €    | 5 120,34 € | 125 185,92 €  | 905 381,40 €       |                |
| 12  | 623412         | 134 537,10 €    | 7 872,52 €    | 5 248,35 € | 121 416,23 €  | 1 026 797,63 €     |                |
| 13  | 638997         | 131 173,67 €    | 8 069,33 €    | 5 379,55 € | 117 724,78 €  | 1 144 522,41 €     |                |
| 14  | 654972         | 127 894,33 €    | 8 271,07 €    | 5 514,04 € | 114 109,22 €  | 1 258 631,63 €     |                |
| 15  | 671346         | 124 696,97 €    | 8 477,84 €    | 5 651,89 € | 110 567,23 €  | 1 369 198,86 €     |                |
| 16  | 688130         | 121 579,55 €    | 8 689,79 €    | 5 793,19 € | 107 096,57 €  | 1 476 295,43 €     |                |
| 17  | 705333         | 118 540,06 €    | 8 907,03 €    | 5 938,02 € | 103 695,00 €  | 1 579 990,43 €     |                |
| 18  | 722967         | 115 576,56 €    | 9 129,71 €    | 6 086,47 € | 100 360,37 €  | 1 680 350,80 €     |                |
| 19  | 741041         | 112 687,14 €    | 9 357,95 €    | 6 238,63 € | 97 090,56 €   | 1 777 441,36 €     |                |
| 20  | 759567         | 109 869,96 €    | 9 591,90 €    | 6 394,60 € | 93 883,46 €   | 1 871 324,82 €     |                |
| 21  | 778556         | 107 123,22 €    | 9 831,70 €    | 6 554,46 € | 90 737,05 €   | 1 962 061,87 €     |                |
| 22  | 798020         | 104 445,13 €    | 10 077,49 €   | 6 718,33 € | 87 649,31 €   | 2 049 711,18 €     |                |
| 23  | 817970         | 101 834,01 €    | 10 329,43 €   | 6 886,28 € | 84 618,29 €   | 2 134 329,47 €     |                |
| 24  | 838420         | 99 288,16 €     | 10 587,67 €   | 7 058,44 € | 81 642,05 €   | 2 215 971,52 €     |                |
| 25  | 859380         | 96 805,95 €     | 10 852,36 €   | 7 234,90 € | 78 718,69 €   | 2 294 690,21 €     |                |

Figura 4.27 - Análise financeira do sistema diesel com fotovoltaico comparado ao sistema apenas com geradores diesel.

### **4.7.3 Validação da ferramenta**

Depois do desenvolvimento foi feito o teste para validação da mesma. Para isso utilizou-se o caso de estudo do capítulo 4, ou seja, foram utilizados os mesmo dados dos geradores utilizados, bem como preços e custos de operação e manutenção.

Os resultados obtidos coincidem com os valores dos cálculos feitos nas secções 4.3.2 e 4.5.2, ficando a ferramenta validada. Estes resultados são mostrados em anexo 0.

Esta nova ferramenta está preparada para o dimensionamento de centrais híbridas com geradores diesel e fotovoltaico, para o número de geradores que o utilizador pretender utilizar, com a potência que desejar.



## 5 Conclusões e trabalhos futuros

### 5.1 Conclusões

A utilização de sistemas híbridos em locais sem ligação à rede elétrica de serviço público tem vindo a tornar-se uma solução cada vez mais viável para o fornecimento de energia elétrica a essas populações. Como nestes casos, o fornecimento de energia é feito, geralmente, com recurso a geradores diesel e, visto que os preços dos derivados de petróleo tendem a subir cada vez mais, há uma enorme preocupação em tornar estas centrais mais eficientes. A integração de sistemas com recurso a fontes de energia renováveis, pela diminuição do consumo de combustível e das emissões de gases poluentes, como se concluiu na secção 4.5, tem vindo a tornar-se cada vez mais popular.

De acordo com a análise técnica feita na secção 4.6 verificou-se que a integração de um sistema fotovoltaico e de um sistema de armazenamento de energia a baterias, era a melhor solução. A inclusão do sistema de baterias iria permitir fazer um melhor aproveitamento da energia excedente da produção fotovoltaica e consequentemente diminuir o consumo de combustível pelo sistema.

## 5.2 Trabalho futuro

É expectável que com o desenvolvimento das tecnologias de armazenamento de energia o custo das mesmas diminua, tornando a integração destas tecnologias em sistemas de produção de energia cada vez mais atrativas e viáveis. Porém, a par do aumento da percentagem de integração de sistemas de armazenamento de energia, está o aumento da complexidade do sistema, sendo necessário também otimizar as estratégias de operação.

Quanto à parte de desenvolvimento de ferramentas automáticas irá haver, num futuro próximo, muito interesse na integração de sistemas de armazenamento de energia e posterior melhoramentos a esta integração, tanto *off-grid* como *on-grid*, devido ao rápido avanço que estas tecnologias estão a experienciar.

Focando na parte desenvolvida para sistemas *off-grid*, a modelização do gerador diesel é muito satisfatória, mas ainda com melhoramentos a fazer, no que concerne aos custos de arranque do gerador diesel, por exemplo.

É importante referir que a integração de um sistema de armazenamento irá valorizar a produção de energia pelos painéis fotovoltaicos, o que poderá fazer com que, o número de painéis ótimo não seja o mesmo que para um dimensionamento sem banco de baterias. É então de grande interesse o dimensionamento dos painéis e do banco de baterias seja feito em conjunto, ao invés dos dois sistemas em separado.

Por fim, será ainda relevante desenvolver outras estratégias de operação que utilizem algoritmos de controlo mais sofisticados para a melhor operação do sistema possível.

## Referências

- [1] DGEG, “Estatísticas Rápidas - Renováveis 2019.” 2019.
- [2] Nayar, Chemmangot V. *"High renewable energy penetration diesel generator systems."* Paths to Sustainable Energy. IntechOpen, 2010.
- [3] Ramírez, C. R. V., “*Representing Battery Energy Storage in Electric Power Systems Studies*”, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, February 2015.
- [4] A. Belila, B. Tabbache, E. Berkouk and M. Benbouzid, *"Integration of a storage system in a hybrid system diesel-photovoltaic for stand-alone applications,"* 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-6.
- [5] Castro, Rui M. G., “*Introdução à energia fotovoltaica*”, Instituto Superior Técnico, novembro de 2002.
- [6] “SMA Fuel Save Solution” disponível em: [https://www.sma.de/fileadmin/intersolar/Hybrid\\_SystemsBrochure\\_Fuel\\_Save\\_Solution\\_EN.pdf](https://www.sma.de/fileadmin/intersolar/Hybrid_SystemsBrochure_Fuel_Save_Solution_EN.pdf)
- [7] Larsson, P., Borjesson, P., “*Cost models for battery energy storage systems*”, KTH School of Industrial Engineering and Management, 2018
- [8] Zagoras, N., “*Battery Energy Storage System (BESS): A Cost/Benefit Analysis for a PV power station.*”, Clemson University Restoration Institute, SC, setembro 2014
- [9] Curry, C., “*Lithium-ion Battery Costs and Market*”, Bloomberg New Energy Finance, julho 2017
- [10] Monteiro, P.C., “*Célula Fotovoltaica. 2013*”: Conteúdos da Unidade Curricular de Energia Eólica e Solar - FEUP.
- [11] Monteiro, P.C., “*Componentes do Sistema FV*”. 2013: Conteúdos da Unidade Curricular de Energia Solar e Eólica - FEUP.
- [12] Lopes, J. M. S., “*Hibridização de Centrais a Diesel, Através de Centrais Fotovoltaicas, no Continente Africano*”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, junho 2014.

- [13] Lima, J. A. L., “*Desenvolvimento de ferramentas automáticas para dimensionamento e otimização de centrais fotovoltaicas (simulação de constrangimentos e sistemas off-grid)*”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, julho 2018.
- [14] IST-GREENPRO, “*Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*”, janeiro de 2004, p. 368.
- [15] F. Maciel Barbosa, “*Gestão de Energia/ Gestão do Diagrama de Cargas*”, FEUP, 2013.
- [16] Lenardic, D. Inverters. 2013; Available from: [www.pvresources.com](http://www.pvresources.com) -> Balance of System ->Inverters.
- [17] Rationelle Energiewandlung, Franz Kininger, “*Photovoltaic Systems Technology*”, Universität Kassel, 2003
- [18] Platero, C.A., et al., “*Coordinated Power Quality Improvement in Multiunit Diesel Power Plants*”. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2010. 25(4): p. 1102-1111.
- [19] Lautier, P., et al. “*Off-Grid Diesel Power Plant Efficiency Optimization and Integration of Renewable Energy Sources*”. in Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada. 2007.
- [20] Lopes, Ricardo J. C., “*Efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos*”, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, dezembro de 2013.
- [21] Ramaprabha Ramabadram e Badrilal Mathur, “*Impact of partial shading on solar PV module containing series connected cells,*” Inter. Journal of Recent Trends in Engineering, vol. 2, no. 7, November 2009.
- [22] M.C.Alonso-García, J.M.Ruiz, W.Herrmann. “*Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays*”. Renewable Energy, Volume 31, Issue 12, October 2006, Pages 1986-1993.
- [23] Morais, Josué, “*Sistemas Fotovoltaicos da Teoria à Prática*”, fevereiro 2012
- [24] Cabral, C., “*Análise de dimensionamento estocástico e determinístico de sistemas fotovoltaicos autónomos, dissertação de mestrado.*” disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/Teses.html>.
- [25] Léna, G., “*Rural Electrification with PV Hybrid Systems*”. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME, 2013: p. 57.
- [26] M. Root, The TABTM “*Battery Book an In-Depth Guide to Construction, Design, and Use*”. The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [27] A. Q. Jakhrani, A. R. H. Rigit, A. Othman, S. R. Samo and S. A. Kamboh, “*Estimation of carbon footprints from diesel generator emissions*” 2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology, Jakarta, 2012, pp. 78-81.
- [28] Wikipedia the free encyclopedia, “*Rechargeable battery,*” 2016. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery).
- [29] Correia, Tiago “*Sistemas de armazenamento de energia integrados em centrais fotovoltaicas*”, Dissertação de mestrado, FEUP janeiro 2016.



- [30] Faruk A Bhuiyan e Amirnaser Yazdani. “*Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications*”, Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2012 IEEE, páginas 303-310. IEEE, 2012.
- [31] BatteryUniversity, “*whats the best battery.*” [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery).
- [32] D. Linden and T. B. Reddy, “*HANDBOOK OF BATTERIES*”, 2001.
- [33] T. Santos, “*Overview of energy storage technologies for renewable energy systems*” 2015.
- [34] Costa, P. M. R. S., “*Simulação de Soluções de Autoconsumo Fotovoltaico: Viabilidade do Armazenamento no Sector Residencial*”, Instituto Superior Técnico, maio 2016.
- [35] G. Provost, “*Residential PV-Storage System Optimization Under Self-Consumption*,” pp. 1-13, 2014.
- [36] V. Cruz, “*Autoconsumo e abandono da rede em Portugal*” 2015.
- [37] EDP Produção, “*Tecnologias de Armazenamento de Energia e seu potencial para os sistemas elétricos*,” p. 112, 2015.
- [38] G. Merei, C. Berger, and D. Uwe, “*Optimization of an off-grid hybrid PV - Wind - Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm*” Sol. Energy, vol. 97, pp. 460-473, 2013.
- [39] Rudolfo, D.-L. and B.-A.J. L., “*Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery Systems*”, Renewable Energy, 2008. 33: p. 2559-2572.
- [40] “*Baterias para Sistemas Solares - Deep Cycle*” disponível em: [http://www.sunlab.com.br/Baterias\\_descarga\\_profunda.html](http://www.sunlab.com.br/Baterias_descarga_profunda.html)
- [41] Gilbert M Masters. “*Renewable and efficient electric power systems*”. John Wiley & Sons, 2013.
- [42] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, e Yulong Ding. “*Progress in electrical energy storage system: A critical review*”. Progress in Natural Science, 19(3):291-312, 2009.
- [43] Bent Sørensen. “*Solar energy storage*”. Academic Press, 2015.
- [44] “*SISTEMA FOTOVOLTAICO ON GRID*” disponível em: <https://www.limersol.com.br/sistema-fotovoltaico-on-grid>
- [45] “*Célula Fotovoltaica - O Guia Técnico Absolutamente Completo*” disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>
- [46] Souza, D. V., Medina Tapia, G. I., “*ANÁLISE DO SOMBREAMENTO ENTRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS*”, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.



# Anexos

## Anexo A - Datasheet do painel utilizado para o dimensionamento



**REC**  
**TWINPEAK 2**  
**SERIES**

**PREMIUM SOLAR PANELS  
WITH SUPERIOR PERFORMANCE**

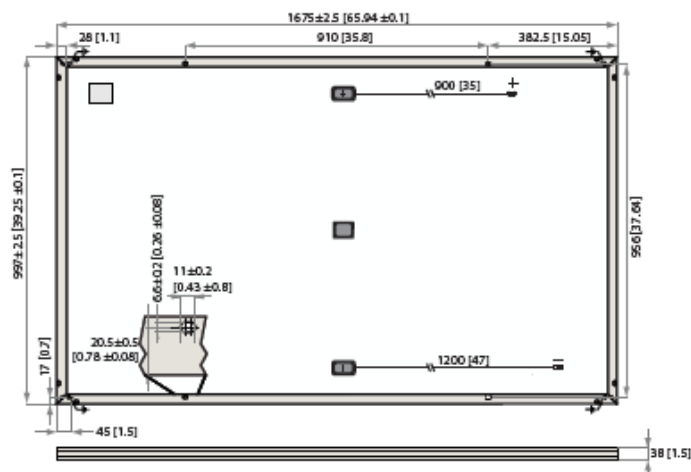
REC TwinPeak 2 Series solar panels feature an innovative design with high panel efficiency and power output, enabling customers to get the most out of the space used for the installation.

Combined with industry-leading product quality and the reliability of a strong and established European brand, REC TwinPeak 2 panels are ideal for residential and commercial rooftops worldwide.

**NOW  
WITH NEW  
WARRANTY!**

-   
**MORE POWER  
OUTPUT PER M<sup>2</sup>**
-   
**IMPROVED PERFORMANCE  
IN SHADED CONDITIONS**
-   
**100%  
PID FREE**
-   
**REDUCES BALANCE OF  
SYSTEM COSTS**

# REC TWINPEAK 2 SERIES



Measurements in mm [in]

| ELECTRICAL DATA @ STC                 | Product code*: RECxxTP2 |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nominal Power - $P_{MPP}$ (Wp)        | 275                     | 280   | 285   | 290   | 295   | 300   |
| Watt Class Sorting - (W)              | -0/+5                   | -0/+5 | -0/+5 | -0/+5 | -0/+5 | -0/+5 |
| Nominal Power Voltage - $V_{MPP}$ (V) | 31.9                    | 31.7  | 31.9  | 32.1  | 32.3  | 32.5  |
| Nominal Power Current - $I_{MPP}$ (A) | 8.74                    | 8.84  | 8.95  | 9.05  | 9.14  | 9.24  |
| Open Circuit Voltage - $V_{OC}$ (V)   | 38.2                    | 38.4  | 38.6  | 38.8  | 39.0  | 39.2  |
| Short Circuit Current - $I_{SC}$ (A)  | 9.52                    | 9.61  | 9.66  | 9.71  | 9.76  | 9.82  |
| Panel Efficiency (%)                  | 16.5                    | 16.8  | 17.1  | 17.4  | 17.7  | 18.0  |

Values at standard test conditions (STC: air mass AM1.5, irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, temperature 25°C) based on a production spread with a tolerance of  $V_{OC}$  and  $I_{SC}$  ±3% within one watt class. At a low irradiance of 200 W/m<sup>2</sup> at least 95% of the STC module efficiency will be achieved.  
\*Where xxx indicates the nominal power class ( $P_{nom}$ ) at STC indicated above and can be followed by the suffix BLK for black framed modules.

| ELECTRICAL DATA @ NMOT                | Product code*: RECxxTP2 |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|
| Nominal Power - $P_{MPP}$ (Wp)        | 206                     | 210  | 214  | 218  | 223  | 226  |
| Nominal Power Voltage - $V_{MPP}$ (V) | 29.2                    | 29.4 | 29.6 | 29.8 | 30.0 | 30.1 |
| Nominal Power Current - $I_{MPP}$ (A) | 7.07                    | 7.15 | 7.24 | 7.32 | 7.43 | 7.51 |
| Open Circuit Voltage - $V_{OC}$ (V)   | 35.4                    | 35.6 | 35.8 | 36.0 | 36.2 | 36.3 |
| Short Circuit Current - $I_{SC}$ (A)  | 7.52                    | 7.59 | 7.68 | 7.75 | 7.85 | 7.91 |

Nominal module operating temperature (NMOT: air mass AM1.5, irradiance 800 W/m<sup>2</sup>, temperature 20°C, wind speed 1 m/s).  
\*Where xxx indicates the nominal power class ( $P_{nom}$ ) at STC indicated above and can be followed by the suffix BLK for black framed modules.

| CERTIFICATIONS                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                              |
| IEC 61215, IEC 61730 & UL 1703; MCS 005, IEC 62804 (PID)<br>IEC 62716 (Ammonia Resistance), IEC 60069-2-68 (Blowing Sand)<br>IEC 61701 (Salt Mist level 6) UN18457/9174 (Class A), ISO11825-2 (Class E)<br>ISO 9001: 2015, ISO14001: 2004, OHSAS 18001: 2007 |

takeaway take-away WEEE-compliant recycling scheme

Founded in Norway in 1996, REC is a leading vertically integrated solar energy company. Through integrated manufacturing from silicon to wafers, cells, high-quality panels and extending to solar solutions, REC provides the world with a reliable source of clean energy. REC's renowned product quality is supported by the lowest warranty claims rate in the industry. REC is a BlueStar Elkem company with headquarters in Norway and operational headquarters in Singapore. REC employs more than 2,000 people worldwide, producing 1.5 GW of solar panels annually.

**Solar Power**  
award winner



**18.0% EFFICIENCY**  
**20 YEAR PRODUCT WARRANTY**  
**25 YEAR LINEAR POWER OUTPUT WARRANTY**

| GENERAL DATA  |                                                                                                                                                           |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cell type:    | 120 half-cut, multicrystalline PERC cells<br>6 strings of 20 cells in series                                                                              |
| Glass:        | 3.2 mm solar glass with<br>anti-reflection surface treatment                                                                                              |
| Backsheet:    | Highly resistant polyester<br>polyolefin construction                                                                                                     |
| Frame:        | Anodized aluminum (silver / black)                                                                                                                        |
| Junction box: | 3-part, 3 bypass diodes, IP67 rated<br>in accordance with IEC 62790                                                                                       |
| Cable:        | 4 mm <sup>2</sup> solar cable, 0.9 m + 1.2 m<br>in accordance with EN 50618                                                                               |
| Connectors:   | Stäubli MC4 PV-KBT4/PV-KST4 (4 mm <sup>2</sup> )<br>Tonglin TL-Cable015-FR (4 mm <sup>2</sup> )<br>in accordance with IEC 62852, IP68 only when connected |
| Origin:       | Made in Singapore                                                                                                                                         |

| MAXIMUM RATINGS          |                                  |
|--------------------------|----------------------------------|
| Operational temperature: | -40 ... +85°C                    |
| Maximum system voltage:  | 1000V                            |
| Design load (+): snow    | 367 kg/m <sup>2</sup> (3600 Pa)* |
| Maximum test load (+):   | 550 kg/m <sup>2</sup> (5400 Pa)  |
| Design load (-): wind    | 163 kg/m <sup>2</sup> (1600 Pa)* |
| Maximum test load (-):   | 244 kg/m <sup>2</sup> (2400 Pa)  |
| Max series fuse rating:  | 25A                              |
| Max reverse current:     | 25A                              |

\* Safety factor 1.5

| TEMPERATURE RATINGS*                   |               |
|----------------------------------------|---------------|
| Nominal Module Operating Temperature:  | 44.6°C (±2°C) |
| Temperature coefficient of $P_{MPP}$ : | -0.36 %/°C    |
| Temperature coefficient of $V_{OC}$ :  | -0.30 %/°C    |
| Temperature coefficient of $I_{SC}$ :  | 0.066 %/°C    |

\* The temperature coefficients stated are linear values

| MECHANICAL DATA |                     |
|-----------------|---------------------|
| Dimensions:     | 1675 x 997 x 38 mm  |
| Area:           | 1.67 m <sup>2</sup> |
| Weight:         | 18.5 kg             |

Specifications subject to change without notice

Rev. H 0019

**REC**  
www.recgroup.com

## Anexo B - Datasheet do inversor utilizado para o dimensionamento

### String Inverter (SUN2000-36KTL)



#### Smart

- 4 MPPTs for versatile adaption to different layouts
- 8 strings intelligent monitoring and 80% time saved for fault detection
- Power Line Communication (PLC) supported

#### Efficient

- Max. efficiency 98.6%, European efficiency 98.3%
- Hand-in-hand design supported for flexible layouts

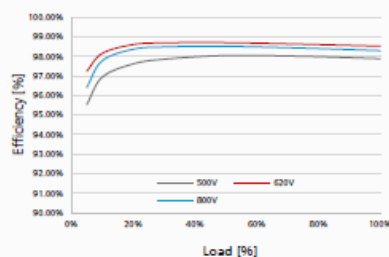
#### Safe

- DC disconnect integrated, safe and convenient for maintenance
- Type II surge arresters for both DC and AC
- Ground fault protection
- Residual Current Detection (RCD) protection

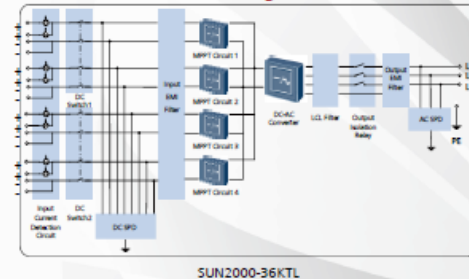
#### Reliable

- No need for external fans with natural cooling technology
- Protection rating of IP65

Efficiency Curve



Circuit Diagram



Always Available for Highest Yields



[www.huawei.com/solar](http://www.huawei.com/solar)

# String Inverter (SUN2000-36KTL)



| Technical Specifications                    | SUN2000-36KTL                                                                                  |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Efficiency</b>                           |                                                                                                |
| Max. Efficiency                             | 98.6%                                                                                          |
| European Efficiency                         | 98.3%                                                                                          |
| <b>Input</b>                                |                                                                                                |
| Max. DC Usable Power                        | 40,800 W                                                                                       |
| Max. Input Voltage                          | 1,100 V                                                                                        |
| Max. Current per MPPT                       | 22 A                                                                                           |
| Max. Short Circuit Current per MPPT         | 30 A                                                                                           |
| Mn. Operating Voltage / Start Input Voltage | 200 V / 250 V                                                                                  |
| Full Power MPPT Voltage Range               | 480 V – 850 V                                                                                  |
| MPPT Operating Voltage Range                | 200 V – 1000 V                                                                                 |
| Rated Input Voltage                         | 620 V                                                                                          |
| Max. Number of Inputs                       | 8                                                                                              |
| Number of MPPT Trackers                     | 4                                                                                              |
| <b>Output</b>                               |                                                                                                |
| Rated AC Active Power                       | 36,000 W                                                                                       |
| Max. AC Apparent Power                      | 40,000 VA                                                                                      |
| Max. AC Active Power (cosφ=1)               | 40,000 W <sup>[1]</sup>                                                                        |
| Rated Output Voltage                        | 220V / 380V, 230V / 400V, 3W+(N)+PE <sup>[2]</sup>                                             |
| Rated AC Grid Frequency                     | 50 Hz / 60 Hz                                                                                  |
| Max. Output Current                         | 57.8 A                                                                                         |
| Adjustable Power Factor                     | 0.8 LG ... 0.8 LD                                                                              |
| Max. Total Harmonic Distortion              | ≤3%                                                                                            |
| <b>Protection</b>                           |                                                                                                |
| Input-side Disconnection Device             | Yes                                                                                            |
| Anti-islanding Protection                   | Yes                                                                                            |
| DC Reverse Polarity Protection              | Yes                                                                                            |
| PV array String Fault Monitoring            | Yes                                                                                            |
| DC Surge Arrester                           | Type II                                                                                        |
| AC Surge Arrester                           | Type II                                                                                        |
| Insulation Monitoring                       | Yes                                                                                            |
| Residual Current Detection                  | Yes                                                                                            |
| <b>Communication</b>                        |                                                                                                |
| Display                                     | LED Indicators                                                                                 |
| USB / Bluetooth +APP                        | Yes                                                                                            |
| RS485                                       | Yes                                                                                            |
| PLC                                         | Yes                                                                                            |
| Fast Ethernet                               | Optional                                                                                       |
| <b>General</b>                              |                                                                                                |
| Dimensions ( W×H×D )                        | 930 × 550 × 280 mm (36.6 × 21.7 × 10.2 inch)                                                   |
| Weight                                      | 55 kg (121 lb.)                                                                                |
| Operation Temperature Range                 | -25 °C – 60 °C (-13°F – 140°F)                                                                 |
| Cooling                                     | Natural Convection                                                                             |
| Operating Altitude                          | 0 – 4,000 m (13,123 ft.)                                                                       |
| Relative Humidity                           | 4 – 100%                                                                                       |
| DC Connector                                | Amphenol HA                                                                                    |
| AC Connector                                | Waterproof PG Terminal + DT Connector                                                          |
| Protection Rating                           | IP65                                                                                           |
| Internal Consumption at Night               | <1 W                                                                                           |
| Topology                                    | Transformerless                                                                                |
| <b>Standards Compliance</b>                 |                                                                                                |
| Safety/EMC                                  | EN/IEC 61000-1, EN/IEC 61000-2, EN/IEC 61000-3, EN/IEC 61000-4, EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2 |
| Grid Code                                   | VDE-AR-N4105, VDE0126-1-1, BDEW 2008, GS9/3, UTE C 15-712-1                                    |

[1] 36,00W optional in settings.  
[2] 3W+PE optional in settings for IT network

Always Available for Highest Yields



[www.huawei.com/solar](http://www.huawei.com/solar)



## Anexo C - Datasheet do gerador diesel C32 utilizado no dimensionamento

### Cat® C32 Diesel Generator Sets



Image shown may not reflect actual configuration

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Bore – mm (in)         | 145 (5.7)   |
| Stroke – mm (in)       | 162 (6.4)   |
| Displacement – L (in³) | 32.1 (1959) |
| Compression Ratio      | 15.0:1      |
| Aspiration             | TA          |
| Fuel System            | EUI         |
| Governor Type          | ADEM™ A4    |

| Standby<br>60 Hz kVA (kW) | Mission Critical<br>60 Hz kVA (kW) | Prime<br>60 Hz kVA (kW) | Continuous<br>60 Hz kVA (kW) | Emissions Performance                               |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1100 (880)                | 1100 (880)                         | 1000 (800)              | 910 (728)                    | Optimized for Low Fuel Consumption or Low Emissions |
| 1250 (1000)               | 1250 (1000)                        | 1100 (880)              | —                            | Optimized for Low Fuel Consumption                  |

#### Standard Features

##### Cat® Diesel Engine

- Designed and optimized for low emissions or low fuel consumption
- Reliable and consistent performance proven in thousands of applications worldwide

##### Generator Set Package

- Accepts 100% block load in one step and meets the NFPA 110 loading requirements
- Conforms to ISO 8528-5 G3 load acceptance requirements.
- Reliability is verified through prototype testing, which includes torsional vibration, fuel consumption, oil consumption, transient performance, and endurance testing

##### Alternators

- Superior motor starting capability minimizes the need for oversizing the generator
- Designed to match the performance and output characteristics of Cat diesel engines

##### Cooling System

- Cooling systems available to operate in ambient temperatures up to 50°C (122°F)
- Tested to ensure proper generator set cooling

##### EMCP 4 Control Panels

- User-friendly interface and navigation
- Scalable system to meet a wide range of installation requirements
- Expansion modules and site specific programming for specific customer requirements

##### Warranty

- 24 months/1000-hour warranty for standby and mission critical ratings
- 12 months/unlimited hour warranty for prime and continuous ratings
- Extended service protection is available to provide extended coverage options

##### Worldwide Product Support

- Cat dealers have over 1,800 dealer branch stores operating in 200 countries
- Your local Cat dealer provides extensive post-sale support, including maintenance and repair agreements

##### Financing

- Caterpillar offers an array of financial products to help you succeed through financial service excellence
- Options include loans, finance lease, operating lease, working capital, and revolving line of credit
- Contact your local Cat dealer for availability in your region

## C32 Diesel Generator Sets Electric Power



### Package Performance

#### 1100 kVA Low Fuel Consumption

| Performance                                                       | Standby        | Mission Critical | Prime          | Continuous     |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| Frequency                                                         | 50 Hz          | 50 Hz            | 50 Hz          | 60 Hz          |
| Gen set power rating with fan                                     | 880 kW         | 880 kW           | 800 kW         | 728 kW         |
| Gen set power rating with fan @ 0.8 power factor                  | 1100 KVA       | 1100 KVA         | 1000 KVA       | 910 KVA        |
| Fueling strategy                                                  | Low Fuel       | Low Fuel         | Low Fuel       | Low Fuel       |
| Performance number                                                | DM9951-02      | EMD447-01        | DM9952-05      | DM9953-01      |
| <b>Fuel Consumption</b>                                           |                |                  |                |                |
| 100% load with fan – L/hr (gal/hr)                                | 226.4 (59.8)   | 226.4 (59.8)     | 206.7 (54.6)   | 189.5 (50.1)   |
| 75% load with fan – L/hr (gal/hr)                                 | 170.3 (45.0)   | 170.3 (45.0)     | 155.5 (41.1)   | 142.8 (37.7)   |
| 50% load with fan – L/hr (gal/hr)                                 | 117.4 (31.0)   | 117.4 (31.0)     | 108.5 (28.7)   | 100.4 (26.5)   |
| 25% load with fan – L/hr (gal/hr)                                 | 69.1 (18.3)    | 69.1 (18.3)      | 65.2 (17.2)    | 60.8 (16.1)    |
| <b>Cooling System</b>                                             |                |                  |                |                |
| Radiator air flow restriction (system) – kPa (in. water)          | 0.12 (0.48)    | 0.12 (0.48)      | 0.12 (0.48)    | 0.12 (0.48)    |
| Radiator air flow – m <sup>3</sup> /min (cfm)                     | 1143 (40364)   | 1143 (40364)     | 1143 (40364)   | 1143 (40364)   |
| Engine coolant capacity – L (gal)                                 | 55 (14.5)      | 55 (14.5)        | 55 (14.5)      | 55 (14.5)      |
| Radiator coolant capacity – L (gal)                               | 36 (9.0)       | 36 (9.0)         | 36 (9.0)       | 36 (9.0)       |
| Total coolant capacity – L (gal)                                  | 91 (23.5)      | 91 (23.5)        | 91 (23.5)      | 91 (23.5)      |
| <b>Inlet Air</b>                                                  |                |                  |                |                |
| Combustion air inlet flow rate – m <sup>3</sup> /min (cfm)        | 66.0 (2332.0)  | 66.0 (2332.0)    | 60.3 (2128.2)  | 55.9 (1974.0)  |
| <b>Exhaust System</b>                                             |                |                  |                |                |
| Exhaust stack gas temperature – °C (°F)                           | 508.7 (947.7)  | 508.7 (947.7)    | 509.3 (948.7)  | 503.4 (938.0)  |
| Exhaust gas flow rate – m <sup>3</sup> /min (cfm)                 | 180.1 (6359.7) | 180.1 (6359.7)   | 165.0 (5824.8) | 152.0 (5368.7) |
| Exhaust system backpressure (maximum allowable) – kPa (in. water) | 6.7 (27.0)     | 6.7 (27.0)       | 6.7 (27.0)     | 6.7 (27.0)     |
| <b>Heat Rejection</b>                                             |                |                  |                |                |
| Heat rejection to jacket water – kW (Btu/min)                     | 319 (18167)    | 319 (18167)      | 300 (17054)    | 281 (15996)    |
| Heat rejection to exhaust (total) – kW (Btu/min)                  | 818 (46518)    | 818 (46518)      | 757 (43047)    | 698 (39684)    |
| Heat rejection to aftercooler – kW (Btu/min)                      | 181 (10283)    | 181 (10283)      | 148 (8412)     | 125 (7133)     |
| Heat rejection to atmosphere from engine – kW (Btu/min)           | 120 (6797)     | 120 (6797)       | 108 (6150)     | 102 (5819)     |
| Heat rejection from alternator – kW (Btu/min)                     | 49 (2789)      | 49 (2789)        | 43 (2448)      | 38 (2163)      |
| <b>Emissions* (Nominal)</b>                                       |                |                  |                |                |
| NOx mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                   | 2966.9 (5.84)  | 2966.9 (5.84)    | 2967.7 (5.84)  | 2914.2 (5.76)  |
| CO mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                    | 308.9 (0.61)   | 308.9 (0.61)     | 316.8 (0.62)   | 315.2 (0.63)   |
| HC mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                    | 4.0 (0.01)     | 4.0 (0.01)       | 7.5 (0.02)     | 10.9 (0.03)    |
| PM mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                    | 14.1 (0.03)    | 14.1 (0.03)      | 17.0 (0.04)    | 18.3 (0.04)    |
| <b>Emissions* (Potential Site Variation)</b>                      |                |                  |                |                |
| NOx mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                   | 3589.9 (7.07)  | 3589.9 (7.07)    | 3590.9 (7.07)  | 3526.2 (6.97)  |
| CO mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                    | 577.6 (1.14)   | 577.6 (1.14)     | 592.4 (1.17)   | 589.4 (1.17)   |
| HC mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                    | 7.5 (0.02)     | 7.5 (0.02)       | 14.1 (0.03)    | 20.5 (0.05)    |
| PM mg/Nm <sup>3</sup> (g/hp-h)                                    | 27.5 (0.07)    | 27.5 (0.07)      | 33.1 (0.08)    | 35.6 (0.09)    |

\*mg/Nm<sup>3</sup> levels are corrected to 5% O<sub>2</sub>. Contact your local Cat dealer for further information



## Anexo D - Datasheet do gerador diesel C13 utilizado no dimensionamento

### ELECTRIC POWER - Technical Spec Sheet STANDARD



C13 ACERT  
320 ekW/ 400 kVA/ 50 Hz/ 1500 rpm/ 400 V/ 0.8 Power Factor

Rating Type: STANDBY

Fuel Strategy: LOW FUEL CONSUMPTION



Image shown may not reflect actual configuration

C13 ACERT  
319 ekW/ 399 kVA  
50 Hz/ 1500 rpm/ 400 V

Metric

English

| Package Performance                             |         |     |
|-------------------------------------------------|---------|-----|
| Genset Power Rating with Fan @ 0.8 Power Factor | 319 ekW |     |
| Genset Power Rating                             | 399 kVA |     |
| Aftercooler (Separate Circuit)                  | N/A     | N/A |

| Fuel Consumption   |           |             |
|--------------------|-----------|-------------|
| 100% Load with Fan | 83.5 L/hr | 22.0 gal/hr |
| 75% Load with Fan  | 61.9 L/hr | 16.4 gal/hr |
| 50% Load with Fan  | 43.7 L/hr | 11.5 gal/hr |
| 25% Load with Fan  | 26.1 L/hr | 6.9 gal/hr  |

| Cooling System*         |        |         |
|-------------------------|--------|---------|
| Engine Coolant Capacity | 14.2 L | 3.8 gal |

| Inlet Air                                |             |           |
|------------------------------------------|-------------|-----------|
| Combustion Air Inlet Flow Rate           | 22.4 m³/min | 789.9 cfm |
| Max. Allowable Combustion Air Inlet Temp | 49 °C       | 120 °F    |

| Exhaust System                                  |             |                |
|-------------------------------------------------|-------------|----------------|
| Exhaust Stack Gas Temperature                   | 529.2 °C    | 984.5 °F       |
| Exhaust Gas Flow Rate                           | 62.8 m³/min | 2216.2 cfm     |
| Exhaust System Backpressure (Maximum Allowable) | 10.0 kPa    | 40.0 in. water |

## Anexo E - Resultados obtidos para validação da ferramenta

|                                |
|--------------------------------|
| <b>Emissões antes PV (ton)</b> |
| 1199                           |
| <b>Emissões pós PV (ton)</b>   |
| 949                            |
| <b>Redução emissões (ton)</b>  |
| 249                            |

|                                         |
|-----------------------------------------|
| <b>Consumo diesel antes PV (litros)</b> |
| 446950                                  |
| <b>Consumo diesel pós PV (litros)</b>   |
| 353996                                  |
| <b>Redução consumo diesel (litros)</b>  |
| 92954                                   |
| <b>Poupança diesel (€)</b>              |
| 120 841 €                               |

| Ano | Consumo diesel | Poupança diesel | O&M Geradores | O&M PV     | CashFlow      | Cashflow acumulado | TIR a 25 anos  |
|-----|----------------|-----------------|---------------|------------|---------------|--------------------|----------------|
| 0   |                |                 |               |            | -410 000,00 € |                    | 25%            |
| 1   | 353996         | 120 840,68 €    | 3 000,00 €    | 4 500,00 € | 113 340,68 €  | -296 659,32 €      |                |
| 2   | 362846         | 117 819,67 €    | 3 075,00 €    | 4 612,50 € | 110 132,17 €  | -186 527,15 €      | Payback (anos) |
| 3   | 371917         | 114 874,17 €    | 3 151,88 €    | 4 727,81 € | 106 994,49 €  | -79 532,66 €       | 3,78           |
| 4   | 381215         | 112 002,32 €    | 3 230,67 €    | 4 846,01 € | 103 925,64 €  | 24 392,98 €        |                |
| 5   | 390745         | 109 202,26 €    | 3 311,44 €    | 4 967,16 € | 100 923,67 €  | 125 316,65 €       | VAL a 25 anos  |
| 6   | 400514         | 106 472,21 €    | 3 394,22 €    | 5 091,34 € | 97 986,64 €   | 223 303,29 €       | 511 275,74 €   |
| 7   | 410527         | 103 810,40 €    | 3 479,08 €    | 5 218,62 € | 95 112,70 €   | 318 415,99 €       |                |
| 8   | 420790         | 101 215,14 €    | 3 566,06 €    | 5 349,09 € | 92 300,00 €   | 410 715,99 €       |                |
| 9   | 431310         | 98 684,76 €     | 3 655,21 €    | 5 482,81 € | 89 546,74 €   | 500 262,73 €       |                |
| 10  | 442092         | 96 217,64 €     | 3 746,59 €    | 5 619,88 € | 86 851,17 €   | 587 113,90 €       |                |
| 11  | 453145         | 93 812,20 €     | 3 840,25 €    | 5 760,38 € | 84 211,57 €   | 671 325,47 €       |                |
| 12  | 464473         | 91 466,90 €     | 3 936,26 €    | 5 904,39 € | 81 626,25 €   | 752 951,72 €       |                |
| 13  | 476085         | 89 180,22 €     | 4 034,67 €    | 6 052,00 € | 79 093,56 €   | 832 045,28 €       |                |
| 14  | 487987         | 86 950,72 €     | 4 135,53 €    | 6 203,30 € | 76 611,89 €   | 908 657,17 €       |                |
| 15  | 500187         | 84 776,95 €     | 4 238,92 €    | 6 358,38 € | 74 179,65 €   | 982 836,82 €       |                |
| 16  | 512692         | 82 657,53 €     | 4 344,89 €    | 6 517,34 € | 71 795,29 €   | 1 054 632,11 €     |                |
| 17  | 525509         | 80 591,09 €     | 4 453,52 €    | 6 680,27 € | 69 457,30 €   | 1 124 089,41 €     |                |
| 18  | 538647         | 78 576,31 €     | 4 564,85 €    | 6 847,28 € | 67 164,18 €   | 1 191 253,59 €     |                |
| 19  | 552113         | 76 611,90 €     | 4 678,98 €    | 7 018,46 € | 64 914,46 €   | 1 256 168,05 €     |                |
| 20  | 565916         | 74 696,61 €     | 4 795,95 €    | 7 193,93 € | 62 706,73 €   | 1 318 874,78 €     |                |
| 21  | 580064         | 72 829,19 €     | 4 915,85 €    | 7 373,77 € | 60 539,57 €   | 1 379 414,35 €     |                |
| 22  | 594565         | 71 008,46 €     | 5 038,75 €    | 7 558,12 € | 58 411,60 €   | 1 437 825,95 €     |                |
| 23  | 609429         | 69 233,25 €     | 5 164,72 €    | 7 747,07 € | 56 321,46 €   | 1 494 147,41 €     |                |
| 24  | 624665         | 67 502,42 €     | 5 293,83 €    | 7 940,75 € | 54 267,84 €   | 1 548 415,25 €     |                |
| 25  | 640282         | 65 814,86 €     | 5 426,18 €    | 8 139,27 € | 52 249,41 €   | 1 600 664,66 €     |                |