

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Projeto de Investimento em renováveis | A
metodologia UNFC**

António Pedro de Novais da Cruz

VERSÃO DE TRABALHO

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professora Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão

Porto, Junho de 2021

Resumo

A redução global das emissões de carbono tornou-se uma prioridade política nos últimos anos, com os governos a serem alvo de pressões com vista a atenuar os efeitos das alterações climáticas.

Encontramo-nos num momento decisivo para os esforços das nações para combater as alterações climáticas.

O número de países que se comprometeram atingir zero emissões até meio do século ou imediatamente depois continuam a aumentar. Acompanhando este aumento vem também o aumento das emissões dos gases com efeito de estufa. Este espaço entre a teoria e ação tem de ser diminuído se quisermos ter alguma chance na luta para atingir o zero líquido para 2050 [1].

O setor de energia é a fonte de cerca de três quartos das emissões de gases com efeito estufa hoje e detém a chave para evitar os piores efeitos das alterações climáticas, talvez o maior desafio que a humanidade já enfrentou. A redução das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) para zero líquido até 2050 é consistente com os esforços para limitar o aumento a longo prazo nas temperaturas globais médias a 1,5°C. Isso exige nada menos do que uma transformação completa de como produzimos, transportamos e consumimos energia. O crescente consenso político sobre como chegar a zero líquido é motivo para um otimismo considerável sobre o progresso que o mundo pode fazer, mas as mudanças necessárias para alcançar emissões líquidas zero globalmente até 2050 são mal compreendidas. É necessário muito trabalho para transformar as impressionantes ambições de hoje em dia, especialmente dada a gama de variadas situações entre os países e as suas diferentes capacidades para fazer as mudanças necessárias.

Com os olhos postos em 2050, a União Europeia, com a sua missão de tornar a Europa no primeiro continente com impacto neutro no clima, desenvolve o European Green Deal (Pacto Ecológico Europeu), um roteiro com o objetivo de tornar a economia da UE sustentável, apresentando um plano de ação para a redução da poluição, restauro da biodiversidade e impulsionar a transição dos recursos de forma eficiente para uma economia limpa.

Contudo, sendo 2050 a meta final para a descarbonização, surgem pelo caminho várias etapas intermédias com compromissos para 2030, como os ODS propostos em 2015 e o Plano Nacional da Energia e Clima.

Os ODS foram propostos em 2015 em que os países do mundo se comprometeram de forma coletiva a erradicar a pobreza, encontrar formas de desenvolvimento sustentável e inclusivas, assegurar que todos os direitos humanos são cumpridos, e de forma geral que até 2030 ninguém é deixado para trás [2].

O PNEC surge no seguimento do Pacote Legislativo “Energia Limpa para todos os Europeus”, desta forma todos os países pertencentes à EU devem apresentar um plano no qual apresentam metas e objetivos a cumprir para 2030 no que diz respeito às emissões carbónicas.

Esta necessidade de gestão sustentável da energia e matérias primas requer um mapeamento preciso de toda a oferta e procura. Os recursos recuperáveis presentes no nosso planeta precisam de uma definição consistente e coerente, bem como uma classificação a níveis locais, nacionais, regionais e globais.

Vários sistemas de classificação de recursos foram evoluindo ao longo do tempo, culminando num standard unificado, o UNFC.

Inicialmente, a aplicação do UNFC era circunscrita ao combustíveis sólidos e minerais, evoluindo para o petróleo, gás e urânio e atualmente já é possível integrar o UNFC nas energias renováveis.

O desenvolvimento das Especificações de Recursos de Energia Renovável permitiu que o UNFC fosse aplicado aos recursos de energia renovável, na tentativa de estabelecer uma forma consistente de comparar recursos de energia renováveis e não renováveis em termos justos.

Temos visto que a Transição Energética vai ter uma narrativa Solar. O Sol é o nosso fornecedor de energia em primeira instância o que torna importante esta aplicação do método UNFC a este recurso.

A classificação dos recursos solares usando as especificações solares tornar-se-á uma importante fonte de informação para investidores, gestores de projetos e autoridades relacionadas à energia e governos na implementação dos seus projetos de acordo com as regras da sustentabilidade. Ajuda a facilitar a monitorização de portfólios de energia solar, oportunidades de investimento e, com isso, apoia a tomada de decisões. Além disso, as especificações solares fornecem termos, conceitos e definições importantes para a classificação da energia solar.

Seguindo as propostas de especificações que permitem que o UNFC seja aplicável à energia solar, neste trabalho usaremos dois casos de estudos para demonstração da sua aplicação na prática. O Projeto do Centro Intergeracional da Pegada e o Projeto da EET de Mangualde foram escolhidos como casos reais, com o objetivo de representar dois cenários com potências instaladas semelhantes mas situados em zonas distintas de Portugal. Utilizando uma abordagem de cenário simplificada para a quantificação dos Recursos Energéticos Solares, e uma avaliação da viabilidade técnica e avaliação socioeconómica, foi fornecida uma classificação completa para Recursos Energéticos Solares em concordância com o UNFC, com a viabilidade de ambos os Projetos confirmada.

A classificação servirá ainda para comparação entre o desempenho dos dois projetos de acordo com os princípios da UNFC.

Abstract

Reducing global carbon emissions has become a political priority in recent years, with governments coming under pressure to mitigate the effects of climate change. We are at a turning point in nations' efforts to combat climate change.

The number of countries that commits to reaching zero transmitted by the middle of the century or immediately thereafter continues to increase. Accompanying this increase is also the increase in those obtained from greenhouse gases. This gap between theory and action has to be closed if we are to have any chance in the struggle to reach net zero for 2050.

The energy sector is the source of about three-quarters of greenhouse gas needs today and holds the key to averting the worst effects of climate change, perhaps the biggest challenge humanity has ever faced. The reduction of global orders of carbon dioxide (CO₂) to net zero by 2050 is consistent with efforts to limit the long-term rise in global averages to 1.5°C. This requires nothing less than a complete transformation of how we produce, transport and consume energy. The growing political consensus on how to reach net zero is cause for optimism and optimism about the progress the world can make, but how the changes needed to achieve net zero globally by 2050 are poorly understood. A lot of work is needed to transform today's impressive ambitions, especially given the range of situations varying between countries and how their different resources to make the necessary changes.

With its eyes set on 2050, the European Union, with its mission to make Europe the first climate-neutral continent, developing the European Green Deal (European Ecological Pact), a roadmap aimed at making the EU economy sustainable, technical an action plan for reducing reduction, restoring biodiversity and driving the resource-efficient transition to a clean economy.

However, with 2050 being the final target for decarbonization, several intermediate stages with commitments for 2030 appear along the way, such as the SDGs proposed in 2015 and the National Energy and Climate Plan.

The SDG's were proposed in 2015 in which the countries of the world collectively committed to eradicating poverty, finding sustainable and inclusive forms of development, ensuring that all human rights are fulfilled, and generally speaking that by 2030 no one is left to behind.

The PNEC follows on from the Legislative Package "Clean Energy for all Europeans", thus all EU countries must present a plan in which they present goals and objectives to be met for 2030 with regard to carbon emissions.

This need for sustainable management of energy and raw materials requires a precise mapping of all supply and demand. The recoverable resources present on our planet need a consistent and coherent definition, as well as a classification at local, national, regional and global levels.

Various resource classification systems have evolved over time, culminating in a unified standard, the UNFC.

Initially, the application of the UNFC was limited to solid fuels and minerals, evolving to oil, gas and uranium, and it is currently possible to integrate the UNFC into renewable energies.

The development of the Renewable Energy Resource Specifications allowed the UNFC to be applied to renewable energy resources in an attempt to establish a consistent way of comparing renewable and non-renewable energy resources on fair terms.

We have seen that the Energy Transition is going to have a Solar narrative. Sol is our energy supplier in the first instance which makes this application of the UNFC method important to this resource.

The classification of solar resources using solar specifications will become an important source of information for investors, project managers and authorities related to energy and governments in implementing their projects in accordance with sustainability rules. It helps to facilitate the monitoring of solar energy portfolios, investment opportunities and thereby support decision-making. In addition, solar specifications provide important terms, concepts and definitions for solar energy classification.

Following the specification proposals that allow the UNFC to be applicable to solar energy, in this work we will use two case studies to demonstrate its application in practice.

The Pegada Intergenerational Center Project and the Mangualde EET Project were chosen as real cases, with the aim of representing two scenarios with similar installed capacities but located in different areas of Portugal. Using a simplified scenario approach to the quantification of Solar Energy Resources, and an assessment of technical feasibility and socio-economic assessment, a complete classification for Solar Energy Resources in accordance with the UNFC was provided, with the viability of both Projects confirmed.

The classification will also be used to compare the performance of the two projects in accordance with UNFC principles.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a várias pessoas, cujo apoio foi fundamental para a concretização do trabalho agora apresentado.

À Professora Teresa Ponce de Leão, pela orientação e pelos contributos no desenvolvimento da dissertação.

Aos meus amigos, Miguel Salústio, Nuno Magalhães e Rui Silva, por toda a disponibilidade prestada na realização deste trabalho, bem como por todas as sugestões técnicas.

Por último, aos meus pais e à minha namorada Gabriela, pelo apoio constante e carinho demonstrado.

Todos estes agradecimentos serão poucos para reconhecer o apoio e incentivo recebidos.

Obrigado.

Índice

Resumo.....	iii
Abstract.....	vi
Agradecimentos.....	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de tabelas	xiv
Abreviaturas e símbolos	xv
1. Introdução	1
1.1 - United Nations Framework Classification for Resources (UNFC)	4
1.2 - Estrutura da dissertação de mestrado	5
2. Especificações da energia Solar	7
2.1 - Efeito Fotovoltaico.....	7
2.2 - Estrutura da célula solar	7
2.3 - Fonte	8
2.4 - Produto	9
2.5 - Recurso	9
2.6 - O Ponto de Referência	10
2.7 - O Projeto	10
2.7.1 - Tempo de vida útil	11
2.7.2 - Questões económicas	11
2.7.3 - Questões ambientais	12
2.7.4 - Questões Sociais	13
3. A metodologia UNFC	17
3.1 - Viabilidade Socioeconómica	18
3.2 - Viabilidade Técnica e Maturidade	18
3.3 - Quantificação de Recursos.....	18
4. Introdução aos Casos de Estudo	21

4.1 - Caso de Estudo 1: Centro Intergeracional da Pegada.....	21
4.2 - Caso de Estudo 2: EET de Mangualde	24
4.3 - Considerações sobre os Casos de Estudo	26
5. Conclusões	28
6. Referências	30
7. Apêndices	32
Apêndice A	33
Apêndice B	34
Apêndice C	37
Apêndice D	40
Apêndice E	42
Apêndice F	43

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Metas e objetivos para Portugal para o horizonte 2030 [4].....	1
Figura 1.2 - Produção de energia em GW pelas diferentes fontes de energia renováveis em 2019 e 2020 [7]	2
Figura 1.3 - Percentagem de fornecimento de energia pelas diferentes fontes [7]	3
Figura 1.4 - Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável presentes na Agenda 2030 [2]	3
Figura 2.1 - Distribuição mundial do potencial fotovoltaico [23].....	10
Figura 2.2 - Evolução do preço do carbono por tonelada Abril 2020 - Presente [26]	12
Figura 2.3 - Empregos gerados globalmente pelas energias renováveis entre 2012 e 2019 [32]	14
Figura 2.4 - Previsão da evolução de empregos em energias limpas [33]	14
Figura 3.1 - Categorias de classificação UNFC e exemplos de classes [15].....	17
Figura 4.1 - Centro Intergeracional da Pegada [34]	22
Figura 4.2 - Vista aérea do EET de Mangualde	24
Figura C.1 - Irradiação registada no local do projeto Centro Intergeracional da Pegada no período entre 2005 e 2016	38
Figura C.2 - Irradiação registada no local do projeto Centro Intergeracional da Pegada nos melhores meses no período entre 2005 e 2016.....	38
Figura C.3 - Irradiação registada no local do projeto do Centro Intergeracional da Pegada nos piores meses no período entre 2005 e 2016	38
Figura D.1 - Irradiação registada no local do projeto do EET de Mangualde no período entre 2005 e 2016	40
Figura D.2 - Irradiação registada no local do projeto do EET de Mangualde nos melhores meses no período entre 2005 e 2016	41
Figura D.3 - Irradiação registada no local do projeto do EET de Mangualde nos piores meses no período entre 2005 e 2016	41

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Resumo da Classificação e da quantidade de recursos para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada	23
Tabela 4.2 - Valores de LCOE para os diferentes graus de confiança do Projeto do Centro Intergeracional da Pegada	24
Tabela 4.3 - Resumo da Classificação e da quantidade de recursos para o projeto do EET de Mangualde.....	25
Tabela 4.4 - Valores de LCOE para os diferentes graus de confiança do Projeto do EET de Mangualde.....	26
Tabela A.1 - Versão abreviada do método UNFC adaptado a projetos solares mostrando classes e subclasses categorias correspondentes	33
Tabela B.1 - Definições das categorias correspondentes ao eixo E	34
Tabela B.2 - Definições das categorias correspondentes ao eixo F	35
Tabela B.3 - Definições das categorias correspondentes ao eixo G.....	36
Tabela C.1 - Dados de irradiação médios, máximos e mínimos entre 2005 e 2016 no local do projeto do Centro Intergeracional da Pegada (kWh/m ²)	37
Tabela C.2 - Valores registados de Irradiação e resultados da estimação de produção com perdas e sem perdas no local do projeto do Centro Intergeracional da Pegada	39
Tabela D.1 - Dados de irradiação médios, máximos e mínimos entre 2005 e 2016 no local do projeto do EET de Mangualde (kWh/m ²).....	40
Tabela D.2 - Valores registados de Irradiação e resultados da estimação de produção com perdas e sem perdas do projeto do EET de Mangualde.....	41
Tabela E.1 - Classificação do Eixo E para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada e respetiva justificação	42
Tabela E.2 - Classificação do Eixo F para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada e respetiva justificação	42
Tabela E.3 - Classificação do Eixo G para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada e respetiva justificação	42
Tabela F.1 - Classificação do Eixo E para o projeto do EET de Mangualde e respetiva justificação	43
Tabela F.2 - Classificação do Eixo F para o projeto do EET de Mangualde e respetiva justificação	43
Tabela F.3 - Classificação do Eixo G para o projeto do EET de Mangualde e respetiva justificação	43

Abreviaturas e símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

EGRM	Expert Group on Resource Management
GEE	Gases com Efeito de Estufa
kWh	Kilowatt-hora
LCOE	Levelised Cost of Electricity
NPD	Norwegian Petroleum Directorate
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PNEC	Plano Nacional de Energia e clima
PR	Performance Ratio
PV	Photovoltaic
SDG	Sustainable Development Goals
SPE OGRC	Society of Petroleum Engineers Oil and Gas Reserves Committee
UNFC	United Nations Framework Classification
UNECE	United Nations Economic Committee for Europe

1. Introdução

Num universo onde diariamente as energias renováveis ganham mais poder e notoriedade perante outras formas de energia à base de combustíveis fósseis que produzem grandes emissões de GEE, colocando uma pressão enorme a nível ambiental surge a necessidade de haver uma aposta cada vez maior nestas fontes de energia “limpas”[3].

As mudanças climáticas são o maior desafio dos nossos tempos e a perceção global do problema é crescente. O Acordo de Paris de 2015 foi decisivo para passar à ação, uma vez que 195 países aprovaram limitar o aumento da temperatura global em 2 °C no final do século com respeito à era pré-industrial e seguir com os esforços para reduzi-lo até 1,5 °C.

Há então o compromisso da descarbonização, ou seja reduzir as emissões de gases de carbono na atmosfera. Com a transição para energias alternativas limpas que emitem apenas aquilo que o planeta é capaz de absorver, tornando o caminho para a descarbonização mais fácil e rápido.

Desde a celebração do Acordo de Paris que surgem por parte da Comissão Europeia vários pacotes estratégicos com o objetivo de dar resposta a este desafio.

Em 2016, a Comissão Europeia apresentou o Pacote Legislativo “Energia Limpa para todos os Europeus” com o objetivo de promover a transição energética na década 2021-2030, tendo em vista o cumprimento do Acordo de Paris e, simultaneamente, o crescimento económico e a criação de emprego. Este pacote prevê que todos os Estados-Membros elaborem e apresentem à Comissão Europeia um PNEC para o horizonte 2030 [3]. Este Plano visa o estabelecimento, pelos Estados Membros, de metas e objetivos em matéria de emissões de gases com efeito de estufa, energias renováveis, eficiência energética, segurança energética, mercado interno e investigação, inovação e competitividade, bem como uma abordagem clara para o alcance dos mesmos. O PNEC é o principal instrumento de política energética e climática para a década 2021-2030.

Havendo reconhecimento da inevitabilidade de transição energética devido à pressão climática, assumiu-se para Portugal a visão de alcançar a neutralidade carbónica em 2050, sendo estabelecidas para 2030 as seguintes metas e objetivos.

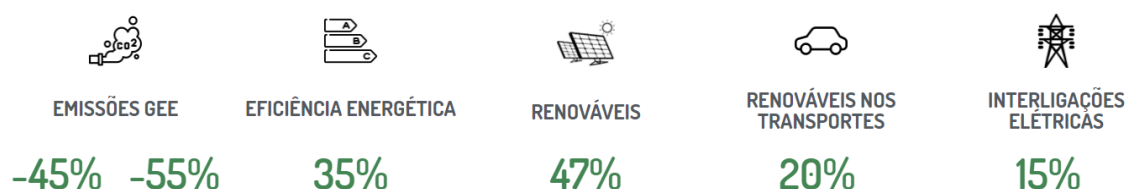


Figura 1.1 - Metas e objetivos para Portugal para o horizonte 2030 [4]

Dentro deste conjunto de pacotes estratégicos surge também o European Green Deal, divulgado em 2019 por Ursula Von der Leyen, com vista a “reconciliar a economia com o nosso planeta”[5].

O European Green Deal prevê um plano de ação:

- impulsionar a utilização eficiente dos recursos através da transição para uma economia limpa e circular,
- restaurar a biodiversidade e reduzir a poluição.

Atualmente, torna-se impossível não falar no impacto do COVID-19 e no que a pandemia causou em todos os setores, estando o setor das renováveis também incluído [6].

Nos primeiros meses de 2020 (entre fevereiro e maio), imensos países do mundo, maioritariamente na Europa, Ásia e Norte América implementaram um regime de confinamento total, enquanto outros optaram apenas por parcial, de forma a conter a pandemia.

Estes confinamentos levaram a quebras nas cadeias de abastecimento, provocando atrasos em instalações de energias renováveis, principalmente em eólicas e solar fotovoltaico.

O incremento total de eletricidade renovável foi 11% menor na primeira metade de 2020 comparativamente com os primeiros seis meses de 2019: foram estimados 40 GW de solar fotovoltaico, 17% menos do que no ano passado, enquanto que a expansão eólica diminuiu perto de 8%.

Em tempos de confinamento a procura por eletricidade diminuiu para valores típicos de Domingo, com drásticas reduções nos serviços e na indústria, apenas parcialmente compensados pelo maior uso residencial, apenas recuperando ligeiramente com a diminuição das medidas.

Por todo o mundo, nas regiões mais desenvolvidas, houve uma maior penetração da produção de energia renovável devido exatamente à diminuição da procura, , à ordem de mérito prioritária na entrada no sistema e aos seus baixos custos de operação.

Na união europeia, a queda na procura de eletricidade e a maior produção renovável levou à redução de produção não-renovável.

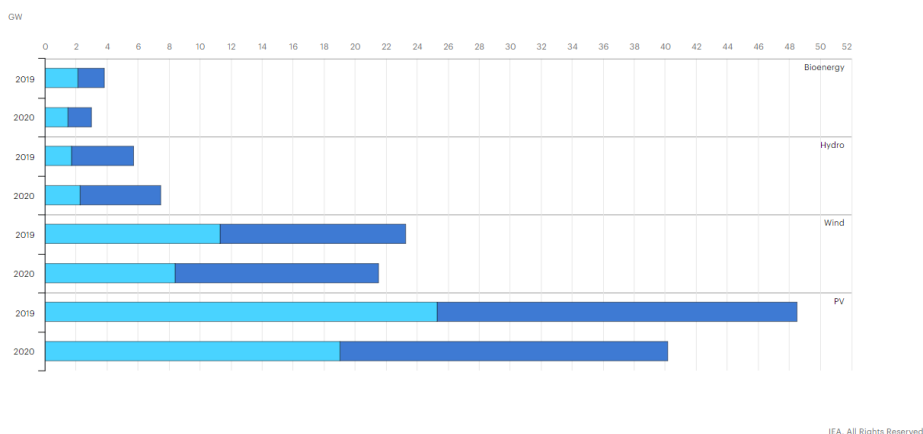


Figura 1.2 - Produção de energia em GW pelas diferentes fontes de energia renováveis em 2019 e 2020 [7]

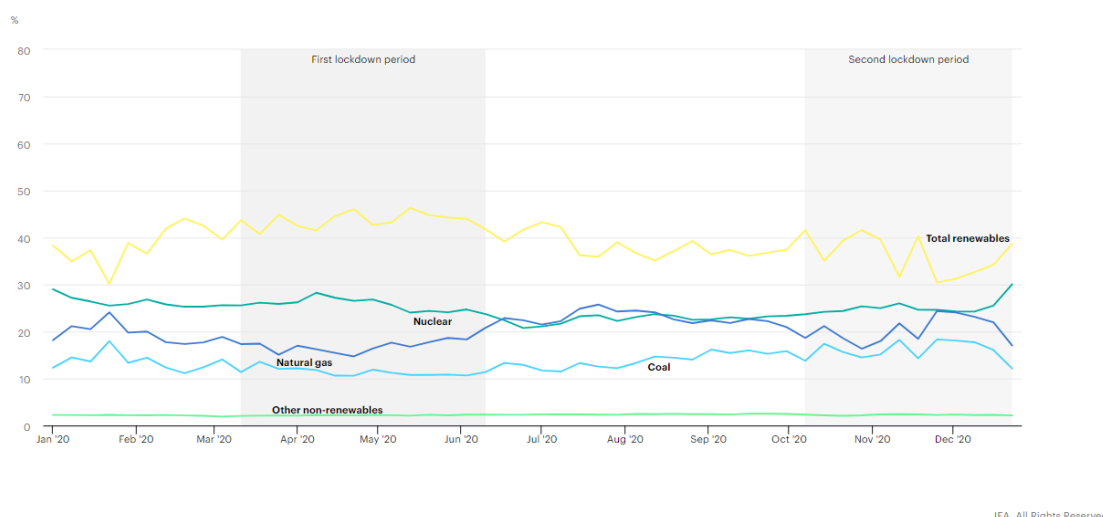


Figura 1.3 - Porcentagem de fornecimento de energia pelas diferentes fontes [7]

Sem dúvida que as energias renováveis demonstraram o seu enorme potencial, resistindo aos impactos pandémicos, adaptando-se rapidamente às adversidades.

Contudo, nem todos os setores demonstraram a resiliência das energias renováveis e, para colmatar os efeitos negativos do COVID-19 foi criado pela União Europeia o NextGenerationEU [8], um instrumento temporário de recuperação no valor de 750 mil milhões de euros destinado a ajudar a reparar os danos económicos e sociais imediatos provocados pela pandemia de coronavírus. A Europa pós-COVID-19 será mais ecológica, mais digital e mais resiliente e estará mais bem preparada para os desafios atuais e futuros.

Recuando ao ano em que foi celebrado o Acordo de Paris (2015) também neste ano foi aprovada pelos líderes mundiais, em Nova Iorque a Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável, constituída por 17 objetivos, desdobrados em 169 metas [2].

Estes 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, aprovados por unanimidade por 193 Estados-membros da ONU visam resolver as necessidades das pessoas, tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento, enfatizando que ninguém deve ser deixado para trás.



Agenda 2030: Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

Figura 1.4 - Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável presentes na Agenda 2030 [2]

Nestes ODS constam objetivos que estão diretamente ligados ao rumo que é necessário tomar para se atingir a descarbonização [9], objetivos como: Garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos; Garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis; Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos. Estes objetivos, se cumpridos, serão mais uma força rumo ao objetivo final para 2050.

1.1 - United Nations Framework Classification for Resources (UNFC)

Para que o mundo enfrente e cumpra os ODS, devemos garantir que os nossos recursos, naturais, renováveis e antropogénicos, sejam geridos para maximizar os seus benefícios e minimizar os seus impactos negativos. A produção e o uso dos recursos naturais devem cumprir os princípios da sustentabilidade para garantir bons resultados ao nível social, ambiental e económico na perspetiva de um novo contrato social para operar. Esta não é uma equação simples mas antes o equilíbrio de três vetores de avaliação muitas vezes conflitantes com parâmetros fixos.

Os agentes de decisão precisam de informações rigorosas, claras, transparentes e consistentes para que possam fazer escolhas esclarecidas.

Acresce que o desenvolvimento circular integrado é crucial para os objetivos a que nos propomos.

Estima-se que as medidas de prevenção dos resíduos, conceção ecológica, reutilização e outras ações “circulares” poderão gerar poupanças líquidas de cerca de 600 mil milhões de euros às empresas da UE (cerca de 8% do total do seu volume de negócios anual), criando 170.000 empregos diretos no sector da gestão de resíduos e, ao mesmo tempo, viabilizando uma redução de 2 a 4% das emissões totais anuais de gases de efeito de estufa.

A Economia Circular é assim apresentada como um catalisador para a competitividade e inovação.

Atualmente não há uma câmara de compensação única para os padrões e informações necessárias, e nenhuma plataforma consistente sobre a qual as decisões podem ser baseadas.

As Nações Unidas, mais concretamente a UNECE têm vindo a desenvolver uma ferramenta que permite de forma consistente avaliar a sustentabilidade dos recursos naturais. Essa ferramenta é o United Nations Framework Classification (UNFC). Este instrumento visa oferecer uma plataforma comum de avaliação para ajudar governos, reguladores, investidores e indústrias a alcançar os objetivos da Agenda 2030 [10].

A aplicação de esquemas de classificação de recursos às energias renováveis são uma pequena parte de uma história muito mais longa de classificação de recursos. Os sistemas de classificação de recursos começaram no início de 1900 para minerais e petróleo e evoluíram para vários padrões diferentes. A categorização e estimativa de recursos tornaram-se fundamentais para as indústrias extrativas. Segundo Ross [11], no que diz respeito à estimação das reservas de petróleo: “É essencial para o planeamento futuro, seja a nível de campo, empresa ou país, e fornece a base para avaliação do valor das empresas”.

Tendo por base estas premissas, uma mudança importante ocorreu na década de 1990, quando classificações como SPE OGRC e NPD, que permitiam classificar projetos de petróleo nos quais avaliam a incerteza na recuperação das quantidades de hidrocarbonetos nas diferentes fases dos projetos [12], mudaram o foco de “o que encontramos” para “o retorno dos nossos investimentos” ao nível dos projetos. Da mesma forma, o UNFC está focado em “retorno sustentável dos nossos investimentos” ao nível de projetos. No que diz respeito às energias renováveis, a questão não é termos recursos (que dependendo da geografia são abundantes), mas sim qual o melhor investimento nesses recursos [13].

Começando por ser aplicado aos recursos minerais (1997), o UNFC foi se expandindo, sendo agora utilizado aos recursos renováveis estando mais recentemente em estudo a sua aplicação à economia circular

O UNFC é uma metodologia baseada na classificação de projetos em função da viabilidade socioeconómica e a viabilidade técnica de projetos para o aproveitamento dos

recursos. O UNFC fornece uma estrutura consistente para descrever o nível de confiança das quantidades futuras produzidas pelo projeto [14].

Fontes, como solar, eólica, geotérmica, hidro-marinha, bioenergia, injeção para armazenamento, hidrocarbonetos, minerais, combustíveis nucleares e água são a matéria-prima para projetos de recursos a partir dos quais os produtos podem ser desenvolvidos. As fontes podem estar no seu estado natural ou secundário (fontes antropogénicas, resíduos, etc.).

Os produtos do projeto podem ser comprados, vendidos ou usados, incluindo eletricidade, calor, hidrocarbonetos, hidrogénio, minerais e água.

Um projeto é um desenvolvimento tecnológico avaliado em função dos aspetos ambientais, sociais, económicos com vista a orientar a tomada de decisão em linha com os padrões de sustentabilidade. O plano do projeto pode ser detalhado ou conceitual (no caso de planeamento de recursos nacionais a longo prazo). O plano do projeto deve ser suficientemente detalhado para permitir uma adequada avaliação para as necessidades das partes interessadas no nível de maturidade definido.

O sistema genérico tem como objetivo classificar os projetos baseado em três critérios: O primeiro (eixo “E”) avalia o nível das condições socio-económico-ambiental no estabelecimento da viabilidade do projeto. O segundo (eixo “F”) designa a maturidade tecnológica, estudos e compromissos necessários para implementar o projeto. O último (eixo “G”) designa o grau de confiança na estimativa das quantidades de produtos do projeto [15].

1.2 - Estrutura da dissertação de mestrado

O documento está estruturado sob a forma de cinco capítulos. Sendo que os capítulos 1, 2 e 3 apresentam conceitos de introdução teórica ao tema em questão com os quais se pretende facilitar a interpretação do trabalho desenvolvido. Nos restantes capítulos, nomeadamente capítulo 4, descrevem-se os casos de estudo utilizados, bem como a contribuição realizada no âmbito do trabalho. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, as referências descrevem a documentação consultada e nos apêndices encontram-se cálculos e análises referente aos casos de estudo.

Capítulo 2 - Especificações da Energia Solar: Neste capítulo caracterizam-se todos os conceitos relevantes ao tema, desde o princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico, a estrutura das células solares, bem como o seu significado na metodologia UNFC.

Capítulo 3 - A metodologia UNFC: Neste capítulo é introduzida a metodologia em questão e que vai ser utilizada na classificação dos casos de estudo. São apresentadas as categorias de classificação e as abordagens possíveis para se fazer a quantificação dos recursos.

Capítulo 4 - Introdução aos Casos de Estudo: Neste capítulo são apresentados os casos de estudo utilizados neste trabalho através da aplicação da classificação destes projetos de acordo com o UNFC.

Capítulo 5 - Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e os objetivos alcançados assim como limitações e trabalhos futuros

2. Especificações da energia Solar

2.1 - Efeito Fotovoltaico

Edmond Becquerel observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico em 1839, verificando que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz .[16]

Depois, em 1877, dois norte americanos, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selénio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz [17]. Tratava-se de um filme de selénio depositado num substrato de ferro e com um segundo filme de ouro, semitransparente, que servia de contacto frontal. Apesar da baixa eficiência de conversão, da ordem de 0,5%, nos finais do século XIX o engenheiro alemão Werner comercializou células de selénio como fotómetros para máquinas fotográficas. Os maiores desenvolvimentos na história da energia fotovoltaica deram-se na primeira metade do século XX, através de Albert Einstein e da sua explicação do efeito fotoelétrico [18]. A primeira célula solar monocristalina em silício foi construída em 1941. Em 1951, surgiram as primeiras células solares em germânio. Os laboratórios Bell publicaram os resultados de operação da célula solar com uma eficiência de 4,5 %. Esta eficiência subiu para 6% num espaço de alguns meses. Em 1957, a Hoffman introduziu a célula solar com 8% de eficácia. Um ano mais tarde, em 1958, a mesma companhia introduziu outra com 9% de eficiência.

Em 1977, a produção mundial de módulos fotovoltaicos já ultrapassava os 500 kW.

Desde então a evolução tecnológica das células solares tem vindo a ser crescente estando a sua produção em termos de custos a permitir um acelerar destes projectos. Vislumbra-se apenas um pequeno (grande senão) temos vindo a verificar que as reservas das matérias primas conhecidas poderão não ser suficientes para a dimensão dos projectos em previsão. Este é no entanto, um tema que não iremos abordar.

2.2 - Estrutura da célula solar

O funcionamento de um sistema fotovoltaico está a cargo das células solares, pois é nelas que se dá o efeito fotovoltaico, onde ocorre a conversão de energia solar em energia elétrica. São utilizados materiais semicondutores como o silício, arseneto de gálio ou disseleneto de cobre e índio, ao qual são adicionados dopantes com o objetivo de criar um meio adequado à ocorrência do efeito fotovoltaico. [19]

Devido à sua boa estrutura atômica cristalina de condutividade elétrica intermediária e por serem sólidos, os materiais semicondutores são os mais adequados para este tipo de uso. Aproximadamente, 95% das células solares de todo o mundo são de silício.

Os materiais semicondutores apresentam uma banda de elétrons de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia. Quando os quatro elétrons de ligação dos átomos de silício se ligam aos seus vizinhos forma-se uma rede cristalina. No entanto, quando são adicionados átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, haverá um elétron restante que não poderá ser emparelhado e consequentemente, devido à baixa energia térmica, este elétron vai para a banda de condução. Devido a este fenómeno, o fósforo é considerado um dopante de elétrons, conhecido por *dopante n* [20].

Quando são introduzidos átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de elétrons para completar as ligações com os átomos de silício da rede. A este fenómeno dá-se o nome de *buraco* ou *lacuna*, e devido à pouca energia térmica, um elétron vizinho pode passar a esta posição, deslocando o buraco. Desse modo, o boro é um aceitador de elétrons ou *dopante p*.

Quando se introduzem átomos de boro numa metade e átomos de fósforo noutra metade, denomina-se *junção pn*, fazendo com que os elétrons livres do lado *n* passem ao lado *p* onde encontram os buracos que os capturam. Gera-se uma acumulação de elétrons no lado *p*, tornando-o negativamente carregado, e uma redução no lado *n*, tornando-o eletricamente positivo. Assim, é criado um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado *n* para o lado *p*.

A diferença de potencial causada pelo deslocamento de cargas denomina-se de efeito fotovoltaico.

2.3 - Fonte

A *fonte de energia solar* é a irradiação solar total recebida pelo coletor solar [14].

A cada segundo, o sol transforma mais de quatro milhões de toneladas de sua própria massa (principalmente hidrogênio e hélio) em energia, produzindo neutrinos e radiação solar, irradiada em todas as direções. Uma pequena fração (meio trilionésimo) desta energia cai na Terra após uma viagem de cerca de 150 milhões de quilômetros, o que leva pouco mais de oito minutos.

A irradiação solar, ou seja, quantidade de energia que o sol deposita por unidade de área que é diretamente exposta à luz solar e perpendicular a ela, é de 1 368 watts por metro quadrado (W/m^2) naquela distância. Essa medida é chamada de constante solar. No entanto, a luz do sol à superfície do nosso planeta é atenuada pela atmosfera da Terra, de modo que menos energia chega à superfície (cerca de 1 000 W/m^2) em condições claras quando o sol está perto do pico [21].

O nosso planeta não é um disco, mas sim uma espécie de bola giratória. A área da superfície de um globo é quatro vezes a área da superfície de um disco de mesmo diâmetro. Como consequência, a energia que chega proveniente do sol, em média ao longo do ano e sobre a área da superfície do globo, é um quarto de 1 368 W/m^2 , ou seja, 342 W/m^2 . Destes 342 W/m^2 , cerca de 77 W/m^2 são refletidos de volta para o espaço por nuvens, aerossóis e o atmosfera e 67 W/m^2 são absorvidos pela atmosfera [22]. Os restantes 198 W/m^2 , ou seja, cerca de 57% do total, atinge a superfície da terra (em média).

A radiação solar que atinge a superfície da Terra tem dois componentes: direta ou radiação “feixe”, que vem diretamente do disco solar; e radiação difusa, que vem indiretamente. A radiação direta cria sombras, a difusa não. Em qualquer dispositivo solar, pode-se também representar um terceiro componente - a radiação difusa refletida pelas superfícies do solo. O termo global radiação solar refere-se à soma dos componentes diretos e difusos.

2.4 - Produto

O *produto de energia solar* proveniente da energia solar fotovoltaica é uma fonte de eletricidade limpa pois o seu funcionamento não emite gases de efeitos indesejados e, dada a natureza inesgotável do sol uma energia renovável e que pode ser vendida e distribuída em mercado.

O objetivo primário é converter a radiação solar para energia elétrica.

Os raios solares podem ser distinguidos de acordo com os seus comprimentos de onda, que determinam a luz visível, radiação infravermelha e ultravioleta. A luz visível constitui cerca de 40% da energia irradiada, infravermelho 50% e ultravioleta os 10% restantes. A maioria dos infravermelhos são “infravermelhos de ondas curtas”, com comprimentos de onda menores que 3.000 nanómetros, portanto, não são considerados “radiação térmica”.

O principal benefício do sol para a maioria das pessoas é a luz, cujo uso pode ser melhorado em edifícios para reduzir o consumo de energia. Esta área de desenvolvimento, chamada de iluminação diurna, é uma das avenidas para reduzir o consumo de energia em edifícios.

A energia solar irradiada é facilmente transformada em calor através da absorção por gases, líquidos ou materiais sólidos. O calor pode então ser usado para conforto, no aquecimento de água sanitária ou na água da piscina aquecimento, para evaporar água e secar coisas (principalmente colheitas e alimentos), e no aquecimento de espaços, que é um dos principais impulsionadores do consumo de energia. O calor também pode ser transformado em trabalho mecânico ou eletricidade, e pode provocar ou facilitar transformações químicas ou físicas e, portanto, processos industriais ou o fabrico de vários vetores de energia ou combustíveis, notavelmente hidrogénio. No entanto, a radiação solar também pode ser vista como um fluxo de partículas eletromagnéticas ou fótons.

Os fótons do sol são altamente energéticos e podem promover fotoreações, como na fotossíntese e gerar condução de eletrões em semicondutores, possibilitando a conversão fotovoltaica da luz solar em eletricidade. Outras fotoreações também estão a ser usadas, por exemplo, na desintoxicação fotocatalítica de água.

Note-se que os dois métodos fundamentais para capturar a energia do sol - calor e fotorreação - também podem ser combinados de várias maneiras para fornecer vetores de energia combinados (por exemplo calor e eletricidade).

Assim, a partir das duas maneiras básicas de capturar a energia do sol, além da iluminação diurna, especificamente, calor e fotorreação, distinguimos quatro domínios principais de aplicações: eletricidade fotovoltaica, aquecimento (e arrefecimento), eletricidade solar térmica e fabrico de combustível solar [21].

2.5 - Recurso

O *recurso solar* é a quantidade de *produtos de energia solar* acumulados que serão gerados através da irradiação solar a partir de um projeto com início na data efetiva de avaliação até ao fim do tempo de vida útil do projeto [14].

No total, o sol oferece uma quantidade considerável de energia: cerca de 885 milhões de terawattthoras (TWh) atingem a superfície da Terra num ano, ou seja, 6.200 vezes a energia primária comercial consumida pela humanidade em 2008 e 4 200 vezes a energia que a humanidade irá consumir em 2035 seguindo o Cenário de Políticas Atuais da IEA. Por outras palavras, leva ao sol uma hora e 25 minutos para nos enviar a quantidade de energia que consumimos atualmente num ano, ou um pouco mais de 4.5 horas para nos transmitir a mesma quantidade de energia apenas em terra. De acordo com este cenário, em 2035, estes números irão crescer para pouco mais de duas horas e um pouco menos de sete horas, respetivamente [21].

Enquanto que as reservas fósseis representam 46 anos (petróleo), 58 (gás natural) e quase 150 anos (carvão) de consumo pelos níveis atuais, a energia recebida pelo sol num

único ano, se totalmente capturada e armazenada, representaria mais de 6000 anos do total consumo de energia. Capturando e distribuindo um décimo da energia solar e o problema de fornecimento de energia acabava.

O potencial fotovoltaico irá variar em quantidade e qualidade tendo em conta a geografia mas também o tempo, de formas que não serão totalmente previsíveis. Devido às diferentes incidências solares por todo o mundo, algumas zonas serão mais adequadas para diferentes escalas de projetos (Figura 2.1). Assim sendo o volume potencial de extração irá variar globalmente.

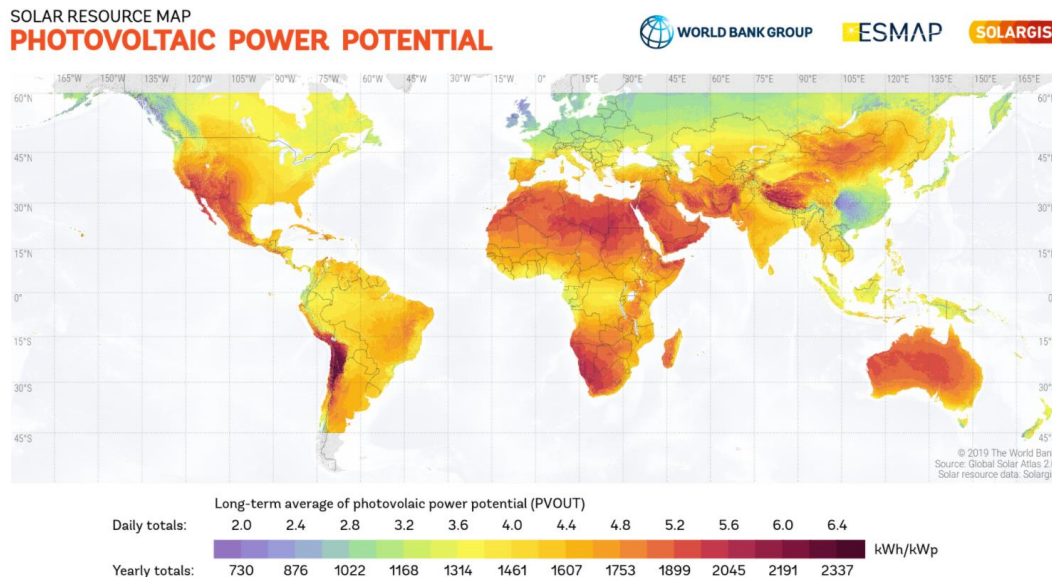


Figura 2.1 - Distribuição mundial do potencial fotovoltaico [23]

2.6 - O Ponto de Referência

O ponto de referência é um local definido dentro do projeto no qual a estimativa ou medição relatada é feito. O ponto de referência pode ser o ponto de venda, transferência ou uso do desenvolvimento ou pode ser um estado intermediário, caso em que as quantidades relatadas contabilizam as perdas antes, mas não após o ponto de entrega. O Ponto de Referência deve ser divulgado em conjunto com a classificação. Onde o ponto de referência não é o ponto de venda para terceiros (ou onde a custódia é transferida para a outras operações da entidade), e tais quantidades são classificadas como E1, as informações necessárias para derivar as vendas estimadas devem também ser fornecidas [14].

O ponto de referência será definido como o local onde o *produto de energia solar* será vendido, usado ou transferido.

2.7 - O Projeto

Para a irradiação solar de um local poder ser utilizada e convertida em *produto de energia solar* é necessário implementar um projeto com alguma forma de tecnologia.

Um projeto é uma conexão direta entre a fonte de energia solar e a extração de produtos da energia solar. O projeto fornece o contexto para decisões económicas e uma análise de custo-benefício do ponto de vista do investidor. Também permite a discussão sobre questões sociais e ambientais para um empreendimento proposto. Durante os estados iniciais de um projeto, as atividades de aquisição de dados e os planos de construção periféricos do projeto conceitual proposto podem ocorrer, com projetos detalhados seguindo em estados posteriores. No âmbito da energia solar, o projeto inclui todos os sistemas e equipamentos de

ligação da fonte de energia solar ao(s) ponto(s) de referência onde o produto de energia solar é vendido, utilizado, transferido ou eliminado. O projeto deve incluir todos os equipamentos e sistemas necessários para a conversão de energia, incluindo, por exemplo, painéis solares, equipamento de transmissão de energia e qualquer equipamento auxiliar necessário. Nos estágios iniciais de avaliação, um projeto pode ser definido apenas em termos conceituais, enquanto projetos mais maduros serão definidos com muito mais detalhes.

2.7.1 - Tempo de vida útil

O tempo de vida útil médio de um projeto fotovoltaico situa-se entre os 25 e os 30 anos.

Os painéis tipicamente apresentam garantia de 25 anos, sendo de esperar que pelo menos durem esse tempo. No entanto, estudos revelam que os painéis continuam a operar passado esse tempo, com uma eficácia reduzida. Segundo um estudo realizado pelo National Renewable Energy Laboratory [24], aproximadamente 80% dos painéis duram mais do que a sua garantia.

O enorme crescimento da energia solar implica que se encontrem soluções sustentáveis e circulares para os painéis em fim de vida.

Segundo o estudo “End of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels” [25], os materiais de fim de vida têm que ser reutilizados para novos painéis ou outros fins. Esta componente deve ser parte integrante de um projeto de investimento.

2.7.2 - Questões económicas

A urgência em travar as alterações climáticas tem acelerado cada vez mais a implementação de mecanismos que promovam a descarbonização, como é o caso da criação do Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), definido pelo Protocolo de Quioto, e que é atualmente a principal ferramenta de incentivo à redução de emissões na Europa.

Significa isto que, para emitir CO₂, nomeadamente para a produção de eletricidade a partir de fontes fósseis, é necessário o pedido das respetivas licenças e, mais importante, o respetivo pagamento, agravado devido à urgência de descarbonização. De uma forma simples, e no caso da produção de eletricidade, quanto mais CO₂ for emitido na sua produção a partir de fontes fósseis, mais cara será a oferta em mercado por parte dos produtores fósseis, o que aumenta o preço de fecho do mercado diário da eletricidade.

Com o custo do carbono por tonelada a atingir diariamente novos recordes, situado atualmente acima dos 50 euros por tonelada, o preço mais elevado desde o lançamento do mercado do carbono em 2005 e com perspetivas de continuar a subir segundo os analistas.

Tendo em vista o compromisso da descarbonização para 2050 e sendo que a maioria das receitas provenientes do mercado de carbono revertem para os governos nacionais, significa que estes terão ainda mais recursos para investirem na descarbonização e em projetos de energias renováveis.



Figura 2.2 - Evolução do preço do carbono por tonelada Abril 2020 - Presente [26]

Os Projetos solares normalmente têm fluxos de energia variáveis através de pontos de referência. Essa variabilidade pode ser devida a uma infinidade de fatores e ocorrer numa faixa de intervalos de tempo ou frequências. Por exemplo, a variação diurna na irradiação solar resulta em nenhuma produção durante a noite no caso da energia solar fotovoltaica. Há também uma variação sazonal e, em determinados anos, eventos climáticos terão impacto na irradiação solar que irá afetar as quantidades de recursos solares.

Se uma proporção do recurso solar não der um benefício económico, por exemplo, vendido a preços zero ou negativos, como o que ocorre sob redução, então isso deve ser apropriadamente considerado nos recursos estimados e na avaliação da viabilidade económica do projeto solar e documentado em conformidade.

Segundo o NREL [27] redução é definida "como uma redução na produção de um gerador relativamente ao que ele poderia produzir dados os recursos disponíveis (por exemplo, vento ou luz solar), normalmente de forma involuntária".

As reduções podem ocorrer quando os operadores comandam os geradores eólicos e solares para reduzir a produção para minimizar o congestionamento da transmissão ou de outra forma gerir o sistema ou alcançar a combinação ideal de recursos. A redução dos recursos eólicos e solares normalmente ocorre devido ao congestionamento da transmissão ou à falta de acesso à mesma, mas também pode ocorrer por motivos como o excesso de geração durante períodos de vazio que podem fazer com que os geradores de carga de base atinjam os limites mínimos de geração, devido a problemas de tensão ou interconexões, ou para manter os requisitos de frequência, especialmente para redes pequenas e isoladas. A redução é uma entre muitas ferramentas para manter o equilíbrio de energia do sistema.

2.7.3 - Questões ambientais

A energia fotovoltaica pode ser considerada uma fonte de energia perfeita, mas é conhecido que as centrais fotovoltaicas têm algumas repercussões negativas para o meio ambiente e para a saúde humana por meio da avaliação do ciclo de vida.

Primeiro, as centrais fotovoltaicas podem causar danos à terra e aos ecossistemas. Centrais fotovoltaicas em grande escala despertam preocupações sobre a degradação do solo, a perda de habitat ou o fim de vida. A maior influência sobre a vida selvagem e o habitat é devido à terra apreendida pela própria central [28]. De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos [29], a central que é normalmente cercada interfere no movimento dos animais.

Em segundo lugar, as centrais fotovoltaicas podem estragar a beleza do cenário [30]. Há também uma visão contrária de que centrais PV coloridas podem ser usadas para decorar belas paisagens.

Terceiro, existe o efeito negativo dos materiais perigosos durante o fabrico e operação. O processo de fabrico de células fotovoltaicas inclui uma série de materiais perigosos, a maioria dos quais são usados para limpar e purificar a superfície do semicondutor. Esses produtos químicos, semelhantes aos usados na indústria geral de semicondutores, incluem ácido clorídrico, ácido sulfúrico, ácido nítrico, fluoreto de hidrogénio, 1,1,1-tricloroetano e acetona [31]. Além disso, as células PV de filme fino contêm uma série de mais materiais tóxicos do que aqueles usados em células fotovoltaicas de silício tradicionais, incluindo arseneto de gálio, disseleneto de cobre-índio-gálio e telureto de cádmio. [24] Se não for manuseado e descartado de maneira adequada, esses materiais podem representar sérias ameaças ao meio ambiente ou à saúde pública. Além disso, os líquidos refrigerantes incluem nitratos, nitritos, sulfitos, sulfatos, glicol e cromatos. Exceto para o uso normal, pode haver o risco de poluição acidental da água por vazamentos de líquidos refrigerantes [30]. Assim sendo, os painéis PV podem ser prejudiciais à saúde, bem como ao solo ou às águas subterrâneas.

2.7.4 - Questões Sociais

O papel das energias renováveis no sistema global de energia continua a expandir-se. Este processo é a chave para estabilizar o clima global, evitando a degradação ambiental, e melhorar a saúde humana. Como a transição global em direção a um sistema de energia mais sustentável se desdobra, também os trabalhadores responsáveis por todos os processos relacionados com as energias renováveis encontram-se em crescimento.

Em 2009, pouco mais de três milhões de pessoas em todo o mundo foram estimados para trabalhar diretamente no setor de energia renovável, com empregos indiretos adicionais empregos muito além desse número.

Sendo que, em 2019 o setor de energia renovável empregou 11,5 milhões de pessoas, direta e indiretamente, O emprego de energia renovável continuou a crescer em todo o mundo desde 2012, quando a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) começou a avaliar numa base anual. As indústrias solar fotovoltaica (PV), bioenergia, energia hidrelétrica e energia eólica têm sido as maiores empregadoras.

A maior parte dos empregos globais está relacionada ao uso moderno de energia, mas a estimativa de 2019 inclui empregos ligados ao uso de energia solar fotovoltaica descentralizada para expandir o acesso à energia em partes de África Subsaariana e no Sul da Ásia. A maioria desses empregos ainda é ocupada por homens. A participação das mulheres em empregos de energia renovável é de cerca de 32%, em comparação com 22% no setor de energia em geral [32].

A indústria de energia solar fotovoltaica mantém o primeiro lugar, com 33% do total de trabalhadores de energia renovável. Em 2019, 91% do emprego fotovoltaico global estava concentrado nos dez países que lideram na implantação mundial e na produção de equipamentos.



Figura 2.3 - Empregos gerados globalmente pelas energias renováveis entre 2012 e 2019 [32]

Prevê-se também que haja uma diminuição no que diz respeito aos empregos relacionados com os recursos fósseis, como se encontra demonstrado na figura 2.4. Em contrapartida as previsões no ramo das energias renováveis apresenta uma estimativa crescimento de mais dez milhões de empregos segundo a IEA [33]

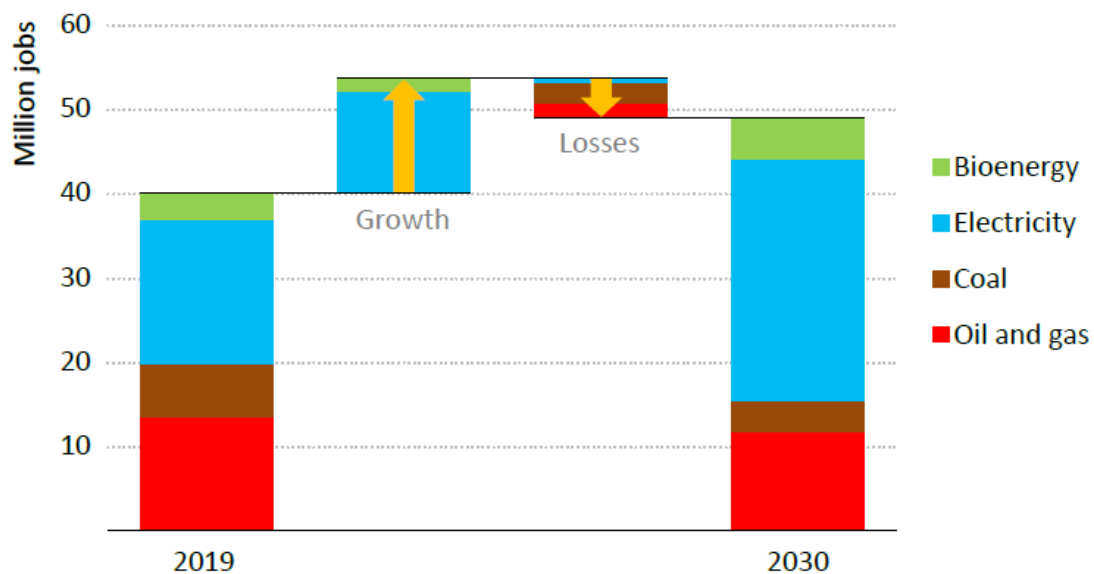


Figura 2.4 - Previsão da evolução de empregos em energias limpas [33]

3. A metodologia UNFC

Como foi explicado na introdução, o UNFC é uma metodologia, aplicada a vários recursos, na qual os projetos são classificados usando três critérios fundamentais:

- Viabilidade Económica, ambiental e social (E)
- Estado do projeto de campo e viabilidade técnica (F)
- Nível de conhecimento do projeto e confiança na potencial recuperação de quantidades (G).

Os princípios fundamentais são a maturidade do projeto (expressas pelos eixos E e F) e a incerteza do projeto (eixo G).

Utilizando um sistema de códigos numéricos, as combinações destes critérios criam a classificação tridimensional mostrada na figura 3.1. Categorias (por exemplo : E1, E2, E3) e, em alguns casos subcategorias (por exemplo E1.1) são definidas para cada um dos três critérios [14].

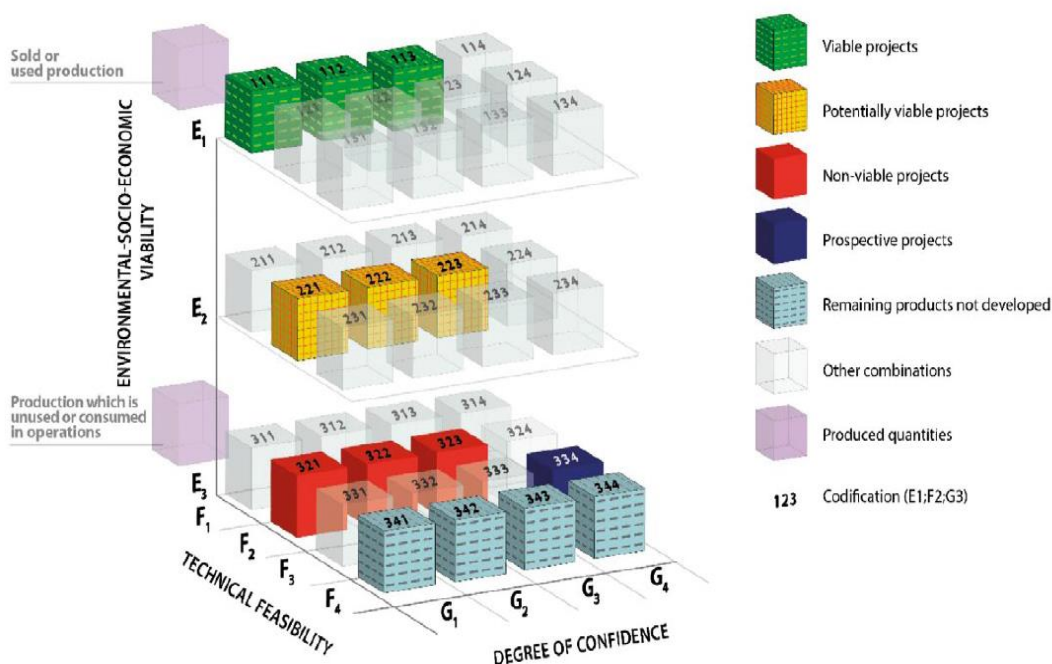


Figura 3.1 - Categorias de classificação UNFC e exemplos de classes [15]

3.1 - Viabilidade Socioeconómica

Segundo as especificações do UNFC para recursos solares [14], o eixo E engloba todas as questões não técnicas que podem impactar diretamente a viabilidade de um projeto, incluindo preços de energia, custos operacionais, estrutura legal, fiscal e reguladora, regulamentações ambientais e impedimentos ou barreiras ambientais ou sociais conhecidas.

A viabilidade ambiental e social é determinada pelos impactos ambientais e sociais positivos e negativos do projeto. Para que um projeto seja viável, os impactos já terão sido avaliados e existe uma licença reguladora e comunitária adequada ou a aceitação para o desenvolvimento.

A Tabela B.1 apresenta as categorias do eixo E, E1 a E3, incluindo definições e explicações do UNFC. Ao lado, estão interpretações e explicações para as especificações solares. As definições e explicações da Especificação Solar são baseadas nas definições e explicações do UNFC, mas usando os termos de energia solar apresentados anteriormente neste documento.

3.2 - Viabilidade Técnica e Maturidade

O eixo F designa a maturidade dos estudos e compromissos necessários à implementação de projetos solares. A avaliação da maturidade cobre tanto a viabilidade técnica do projeto quanto o nível de comprometimento dos patrocinadores do projeto em prosseguir com o projeto e os seus estados de maturação antes da operação.

Para atribuir um recurso solar a qualquer classe, exceto para a categoria F4, um plano de desenvolvimento precisa de ser definido consistindo em um ou mais projetos. O nível de detalhe apropriado para tal plano pode variar de acordo com a maturidade do projeto.

É importante notar que o eixo F destina-se a avaliar tanto a viabilidade técnica quanto a maturidade de um projeto e, ao fazê-lo, representa o nível de risco da tecnologia, bem como o nível de comprometimento do patrocinador do projeto e / ou parceiros financeiros. Geralmente, os projetos F1 não requerem refinações técnicas significativas antes da implementação e do comprometimento dos fundos de capital, ou o patrocinador do projeto não requer nenhum estudo técnico adicional antes da decisão de comprometer o capital. Os projetos F2 ainda estão em processo de desenvolvimento e requerem uma definição técnica adicional antes da decisão de comprometer os fundos de capital, enquanto os projetos F3 não têm informações suficientes para quantificar os produtos *de energia* que podem ser extraídos. A categoria F4 pode ser utilizada por avaliadores onde existe um local identificável de *recurso solar*, mas um projeto para extrair o produto energético não foi definido.

3.3 - Quantificação de Recursos

O eixo G reflete o nível de confiança nas quantidades estimadas de *recursos solares*.

A Tabela B.3 mostra as definições das categorias e explicações da aplicação aos *recursos solares* [14].

As categorias do eixo G destinam-se a refletir todas as incertezas significativas que afetam as quantidades estimadas de recursos solares que estão previstas para serem produzidas pelo Projeto. As incertezas incluem a quantidade específica e a variabilidade da fonte solar, a eficiência da metodologia de extração e conversão, manutenção planeada e não planeada e quanto será produzido.

Existem três abordagens estabelecidas para determinar as estimativas apropriadas para G1, G2 e G3; duas das quais são baseadas na avaliação de uma gama de incerteza para quantidades associadas a um projeto e a outra reflete diferentes níveis de confiança. Os termos usados nessas especificações são os seguintes:

- a) A abordagem "incremental", que se baseia em estimativas para porções discretas da *fonte solar* e / ou do projeto, onde cada estimativa é atribuída com base em seu nível de confiança (alto, moderado e baixo), refletindo o conhecimento disponível sobre o potencial recuperabilidade;
- b) A abordagem de "cenário", que é baseada em três cenários discretos que são projetados para refletir a gama de incertezas nos resultados possíveis (estimativas baixas, melhores e altas) do projeto produzindo energia a partir da *fonte solar* como um todo;
- c) A abordagem "probabilística", onde vários cenários possíveis são gerados (por exemplo, por análise de Monte Carlo) a partir de distribuições de entrada de incerteza de parâmetro associada com o projeto de produção de energia a partir da *fonte solar* como um todo. Três resultados específicos são então selecionados a partir da distribuição de probabilidade de saída como representativos da faixa de incerteza (os valores de P90, P50 e P10 são equacionados para estimativas baixas, melhores e altas, respetivamente, onde P90 significa que há 90% de probabilidade de exceder essa quantidade).

Qualquer uma das três abordagens é permitida. A avaliação deve indicar qual abordagem está sendo usada; entretanto, antecipa-se que as abordagens de "cenário" ou "probabilísticas" serão as mais relevantes.

Quando as abordagens de "cenário" ou "probabilísticas" são usadas, a estimativa baixa (ou P90) é classificada como G1, a melhor (ou P50) estimativa é classificada como G1 + G2, e a estimativa alta (ou P10) é classificada como G1 + G2 + G3.

Em todos os casos, a devida consideração deve ser dada às possíveis dependências entre os parâmetros de entrada. Além disso, qualquer que seja a abordagem usada, todas as três categorias (G1, G2 e G3) devem ser relatadas para fornecer uma indicação da faixa de incerteza na estimativa.

Independentemente da abordagem, a base da avaliação da incerteza e/ou suposições devem ser fornecidas.

Quando o plano financeiro ou operacional a longo prazo de um projeto se encontra a ser usado para fornecer uma estimativa dos recursos solares de um projeto, então esse plano / projeção deve ser normalmente considerado como a melhor (ou P50) estimativa, ou seja, uma classificação G1 + G2.

G4 aplica-se a locais onde nenhum projeto de desenvolvimento ainda foi definido ou onde não existem medições diretas para quantificar a fonte solar. As subcategorias do G4 são definidas no UNFC, denotando diferentes níveis de confiança. Este nível adicional de detalhe não é considerado útil para energia solar.

4. Introdução aos Casos de Estudo

Os seguintes casos de estudo são aplicações simplificações aplicadas a Projetos reais, com o objetivo de representar dois cenários diferentes, e a lógica para a classificação de Recursos Solares de acordo com o UNFC.

4.1 - Caso de Estudo 1: Centro Intergeracional da Pegada

Localização do Projeto: Tavira

Tipo de Projeto: Fotovoltaico

Data dos dados: 2019 - Presente

Data da avaliação: Maio 2021

Método de Quantificação: Análise gráfica dos dados de irradiação

Tipo de estimativa (determinística/probabilística): Determinística baseada nos dados de irradiação.

O Centro Intergeracional da Pegada, tem a sua sede em Tavira, tendo como missão promover a prestação de serviços pautados pela inovação, personalização e qualidade e como objetivo principal, obter a satisfação dos clientes. A instituição, tem como visão, ser reconhecida como uma referência na prestação de serviços geriátricos, destacando-se pelo trabalho de excelência, assente no conforto e qualidade dos serviços, através dos quais pretende o equilíbrio e estímulo ao envelhecimento bem-sucedido. Este complexo tem as valências de Lar de Idosos/ERPI e Creche.

O projeto, com data de ligação em finais de 2019, apresenta 268 painéis do tipo Q-CELLS 285 Wp, tem uma potência instalada de 76,4 kWp, garante uma produção equivalente a 50 famílias e uma estimativa de emissões de CO₂ evitadas de 83,5 Ton CO₂/Ano.



Figura 4.1 - Centro Intergeracional da Pegada [34]

Quantificação dos recursos:

Foram utilizados dados históricos de irradiação (2005-2016) para o local de construção obtidos através do PVGIS, os quais foram analisados tendo em conta uma percentagem de perdas de 10%, onde se incluem manutenções, avarias, desgaste e outros acontecimentos capazes de reduzir a produção. O valor de eficiência do sistema é de 97% durante o primeiro ano, apresentando uma degradação de 0.6% ao ano [35]. Deste modo o valor de 10% utilizado para as perdas irá resultar numa estimativa próxima da realidade da produção do projeto.

Para o cálculo da produção foi utilizada a expressão do Performance Ratio do software PVSyst [36], como está referido no Apêndice C, onde para a estimativa de uma produção sem perdas é multiplicada a potência do painel pela irradiação global.

Tendo em conta o gráfico da irradiação foi calculada a média de valores mensal, sendo que este valor será utilizado como a melhor estimativa de *recursos de energia solar*.

Os *recursos de energia solar* foram estimados para o restante tempo de vida do projeto.

Tipo de Produto:

O Produto deste projeto é a eletricidade, que será injetada na rede e paga com uma feed in tariff.

Ponto de referência:

O Ponto de referência será à saída do inversor, onde a energia produzida em corrente contínua sofre a transformação para corrente alternada.

Classificação UNFC:

Em baixo (Tabela 4.1) encontra-se a classificação resumida do projeto do Centro Intergeracional da Pegada e a justificação na confiança da estimativa de recursos. A classificação mais detalhada e explicação de cada eixo pode ser encontrada no Apêndice G. A definição completa do UNFC no contexto solar encontra-se no Apêndice B.

Tabela 4.1 - Resumo da Classificação e da quantidade de recursos para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada

Classificação	Quantidade de Recursos (kWh)	Justificação da Classificação
E1.1; F1.1; G1	$115\,940.26 \times 24 \text{ anos} = 2\,782\,566.24$	Estimativa menos elevada tendo em conta a irradiação nos piores meses dos anos entre 2005-2016
E1.1; F1.1; G1+G2	$129\,764.90 \times 24 \text{ anos} = 3\,114\,357.60$	Estimativa moderada tendo em conta a irradiação média dos anos entre 2005-2016
E1.1; F1.1; G1+G2+G3	$142\,069.09 \times 24 \text{ anos} = 3\,409\,658.16$	Estimativa mais elevada tendo em conta a irradiação nos melhores meses dos anos entre 2005-2016

Fazendo agora a análise económica no que diz respeito ao LCOE:

O LCOE, ou custo nivelado de eletricidade é o valor presente líquido do custo unitário de eletricidade ao longo da vida útil de um ativo de geração [38].

O LCOE tem como objetivo representar o custo por kWh gerado por determinado investimento.

A utilização do LCOE ajuda a identificar as melhores oportunidades para uma determinada aplicação, permitindo avaliar especificamente se uma determinada mudança de arquitetura, conceito ou componente tem uma implicação de custo benéfica ou não. O cálculo do LCOE permite, por exemplo, avaliar se vale a pena utilizar módulos fotovoltaicos com maior potência e maior eficiência, mas com um preço em €/Wp superior, ou comprar módulos com uma taxa menor de degradação, mas com preço superior.

O LCOE é definido como a divisão dos custos totais do projeto, incluindo não apenas o capital investido (CAPEX) mas também os custos operacionais (OPEX), pela produção estimada ao longo de toda a operação da central.

Quanto ao CAPEX, este valor foi fornecido pela entidade responsável pela construção de ambos os projetos.

Relativamente ao OPEX, segundo o PV LCOE Working Group [39], este terá o valor de aproximadamente 17 €/kWp/ano.

O LCOE indica a lucratividade do projeto, e quanto menor o LCOE, mais lucrativo o projeto, conforme esperado G1 + G2 + G3 irá produzir o menor LCOE.

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX}{PRODUÇÃO ESTIMADA AO LONGO DO TEMPO DE VIDA ÚTIL DO PROJETO}$$

Assumindo:

CAPEX - 75 500 €

OPEX - 17 € x 76.4 kWp x 24 anos = 31 171 €

Tabela 4.2 - Valores de LCOE para os diferentes graus de confiança do Projeto do Centro Intergeracional da Pegada

	LCOE €/kWh
G1	0.0383
G1+ G2	0.0343
G1+G2+G3	0.0313

4.2 - Caso de Estudo 2: EET de Mangualde

Localização do Projeto: Viseu

Tipo de Projeto: Fotovoltaico

Data dos dados: 2014-Presente

Data da avaliação: Maio 2021

Método de Quantificação: Análise gráfica dos dados de irradiação

Tipo de estimativa (determinística/probabilística): Determinística baseada nos dados de irradiação.

Localizado em Mangualde (Viseu), o EET de Mangualde é constituído por 265 painéis Renesola, com uma potência instalada 64,93 kWp.

Até à data foram produzidos 666 040 kWh de eletricidade e foram evitadas 313,04 toneladas de emissões de CO₂. Este projeto encontra-se em ligação desde 20 de Novembro de 2014.

O investimento inicial já foi recuperado em 2019 e atualmente o retorno de investimento encontra-se em 128%.

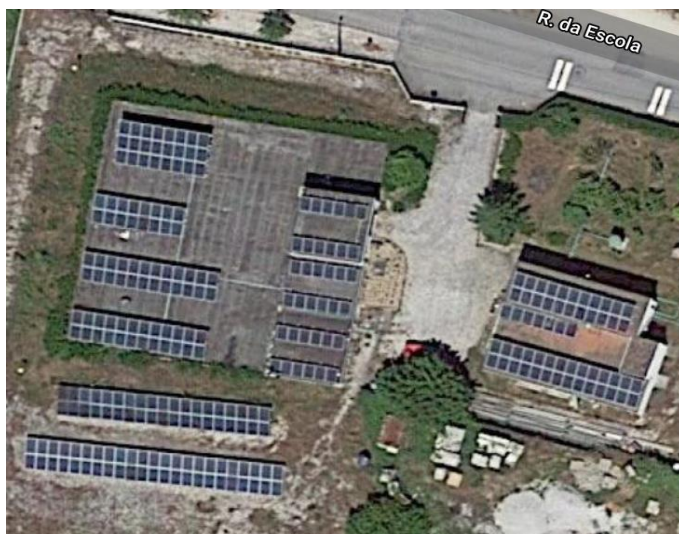


Figura 4.2 - Vista aérea do EET de Mangualde

Quantificação dos recursos:

A quantificação dos *recursos de energia solar* provenientes deste projeto foi obtida através do mesmo processo referido no caso de estudo 1.

Para o sistema utilizados neste projeto a eficiência no primeiro ano é de 97.5% [37]. Também foram utilizadas perdas de 10% para a estimação dos recursos.

Estando o projeto em produção desde 2014, a quantificação de recursos foi feita para os próximos 18 anos, dado o tempo de vida do projeto de 25 anos.

Tipo de Produto:

O Produto deste projeto é eletricidade, que será injetada na rede e paga com uma feed in tariff.

Ponto de referência:

O Ponto de referência será à saída do inversor, onde a energia produzida em corrente contínua sofre a transformação para corrente alternada.

Classificação UNFC:

A razão por detrás da classificação de cada eixo do projeto do EET de Mangualde pode ser encontrada no Apêndice H.

Uma representação resumida e as quantidades de recursos podem ser encontradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.3 - Resumo da Classificação e da quantidade de recursos para o projeto do EET de Mangualde

Classificação	Quantidade de Recursos (kWh)	Justificação da Classificação
E1.1; F1.1; G1	$79\,248.17 \times 18 \text{ anos} = 1\,426\,467.06$	Estimativa menos elevada tendo em conta a irradiação nos piores meses dos anos entre 2005-2016
E1.1; F1.1; G1+G2	$96\,242.87 \times 18 \text{ anos} = 1\,732\,371.66$	Estimativa moderada tendo em conta a irradiação média dos anos entre 2005-2016
E1.1; F1.1; G1+G2+G3	$109\,652.36 \times 18 \text{ anos} = 1\,973\,742.48$	Estimativa mais elevada tendo em conta a irradiação nos melhores meses dos anos entre 2005-2016

Este projeto encontra-se em funcionamento desde 2014, apresentando por isso um OPEX de 20 €/kWp/ano, superior ao projeto do Centro da Pegada, isto deve-se ao facto deste projeto ser mais antigo [39] apresentando custos de operação relativamente maiores. De notar, que a atribuição dos valores do OPEX são difíceis de determinar e variam muito de caso para caso.

CAPEX - 99 100 €

OPEX - 20 € x 64.93 kWp x 18 anos = 23 375 €

Tabela 4.4 - Valores de LCOE para os diferentes graus de confiança do Projeto do EET de Mangualde

	LCOE €/kWh
G1	0.044
G1+ G2	0.039
G1+G2+G3	0.036

4.3 - Considerações sobre os Casos de Estudo

Terminada a análise dos dois projetos considerados, verifica-se que as quantidades estimadas de recursos são, para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada, bastante superiores do para o projeto do EET de Mangualde, apresentando quase o dobro da produção para o caso da estimativa moderada. Esta grande diferença relativamente aos valores deve-se principalmente à diferença de anos restantes para os projetos, uma vez que o projeto da Pegada estando em funcionamento desde finais de 2019 ainda apresenta vinte e quatro anos de vida, enquanto que o projeto do EET de Mangualde, em ligação desde 2014 restam-lhe dezoito anos considerando um tempo de vida de útil de vinte e cinco anos.

No entanto, pressupondo que o tempo de vida restante fosse o mesmo para ambos os projetos (24 anos), também para esta situação o projeto da Pegada apresenta maiores valores de produção estimada. Considerando a estimativa moderada (G1+G2) o projeto do EET de Mangualde apresentaria valores de produção de 2 309 828.88 kWh (96242.87×24 anos) face aos 3 114 357.60 kWh correspondentes ao projeto do Centro da Pegada. Estes valores justificam-se pela melhor localização geográfica no que diz respeito à irradiação solar.

O centro Intergeracional da Pegada, localizado em Tavira, na região do Algarve, apresenta valores de irradiação médios superiores ao projeto de Mangualde, localizado próximo de Viseu, sendo esta diferença de (para o período considerado entre 2005 e 2016) de 157.31 kWh/m²/mês para o projeto da Pegada e 137.25 kWh/m²/mês para o de Mangualde.

Relativamente aos outros eixos considerados na classificação UNFC, o eixo E e F, uma vez que ambos os projetos se encontram em funcionamento e a produzir energia a sua classificação é a mesma, E1 e F1 não sendo possível outras comparações.

O indicador do LCOE mostrou também que, o projeto do Centro Intergeracional da Pegada se revela mais lucrativo, apresentando um LCOE mais baixo uma vez que este indicador é inversamente proporcional à produção estimada, mas também dado que é um projeto mais recente apresenta custos operacionais mais reduzidos em detrimento do projeto de Mangualde.

5. Conclusões

Os resultados apresentados nesta dissertação vieram demonstrar a aplicabilidade da metodologia UNFC e a sua viabilidade no âmbito da classificação de projetos fotovoltaicos.

Estando os dois projetos em análise atualmente em produção apenas se torna possível a sua comparação no que diz respeito à estimação dos recursos, uma vez que a viabilidade social, económica, ambiental e tecnológica se encontra salvaguardada para ambos os projetos.

Comparando os dois projetos, o resultado da estimação dos recursos veio comprovar o esperado. Dada a localização do projeto do Centro Intergeracional da Pegada ser no Sul do país (Algarve), onde a irradiação apresenta valores mais elevados do que no local do projeto do EET de Mangualde, situado na Beira Alta, os resultados de produções estimadas para o projeto da Pegada foram mais elevados do que os de Mangualde.

Relativamente ao LCOE, este é menor para o projeto da Pegada, refletindo uma maior lucratividade, também este valor era expectável uma vez que o LCOE se relaciona de forma inversa com a produção estimada ao longo do tempo de vida. Os investimentos iniciais diferiram aproximadamente em 25 000 € para os dois projetos, sendo o investimento do projeto do Centro da Pegada de 75 500 € e o de Mangualde de 99 100 € e, sendo o projeto do EET de Mangualde mais antigo (2014) também apresenta um custo operacional mais elevado, algo que também se encontra refletido no LCOE.

Também ficou demonstrado neste trabalho uma das formas de proceder à estimação dos recursos, utilizando a abordagem de “cenário”, onde foram calculadas as produções para três possíveis “cenários”. Esta é uma das abordagens que pode ser utilizado em qualquer projeto do mesmo tipo desde que haja informação acerca da fonte de energia.

O método de classificação UNFC para os recursos renováveis é uma ferramenta que já vem sendo utilizada por vários países e que se encontra em grande crescimento dada a informação que apresenta ao agente de decisão, facilita todo o processo e permite comparar de forma mais intuitiva diferentes projetos. Os principais interessados e que mais irão beneficiar desta globalização do UNFC serão governos com o objetivo de gerir os recursos nacionais de forma sustentável, as indústrias, para obterem informação e dados necessários para implementar tecnologia, gestão e finanças e por fim toda a comunidade financeira, pois terão a oportunidade de investir o seu capital de forma mais apropriada.

Como desenvolvimento para trabalhos futuros será interessante avançar para uma classificação determinística e não qualitativa, aprofundar os aspetos socioeconómicos, sendo estes os mais difíceis de avaliar e ainda aprofundar a análise identificando como avaliar o impacto nos Objetivos de Desenvolvimento sustentável (ODS).

6. Referências

- [1] IEA, “Net Zero by 2050 A Roadmap for the,” p. 222, 2021.
- [2] “Sustainable Development Goals | International Partnerships.” https://ec.europa.eu/international-partnerships/sustainable-development-goals_en (accessed Jun. 08, 2021).
- [3] adene, “Bloco 3 - Portugal Energia.” <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-3/> (accessed Apr. 13, 2021).
- [4] “Bloco 3 - Portugal Energia.” <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-3/> (accessed May 18, 2021).
- [5] Comissão Europeia, “Pacto Ecológico Europeu,” *Comissão Eur.*, pp. 1-27, 2019, [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- [6] R. Kent, “Renewables,” *Plast. Eng.*, vol. 74, no. 9, pp. 56-57, 2018, doi: 10.1002/peng.20026.
- [7] “Electricity Market Report,” *Electr. Mark. Rep.*, no. December, 2020, doi: 10.1787/f0aed4e6-en.
- [8] E. E. Strongertogether, ““I welcome today’s agreement on our Recovery Plan and the next Multiannual Financial,” no. November 2020, pp. 2020-2022, 2021.
- [9] Organização das Nações Unidas, “Guia sobre Desenvolvimento Sustentável: 17 objetivos para transformar o nosso mundo,” *Cent. Informação Reg. das Nações Unidas para a Eur. Ocident.*, pp. 1-38, 2018.
- [10] “David MacDonald-16 April 2021 Strategic Vision Expert Group on Resource Management (EGRM).”
- [11] J. G. Ross, “The Philosophy of Reserve Estimation,” Mar. 1997, doi: 10.2118/37960-ms.
- [12] J. Etherington, L. Zuccolo, and Spe, “Comparison of Selected Reserves and Resource Classifications and Associated Definitions,” no. December, p. 126, 2005, [Online]. Available: http://www.spe.org/industry/docs/OGR_Mapping.pdf.
- [13] U. Nations, “Economic and Social Council Application of the United Nations Framework Classification,” no. April, 2021.
- [14] “Specifications for the application of the United Nations framework classification for fossil energy and mineral reserves and resources 2009 (UNFC-2009),” no. September, pp. 15-48, 2014, doi: 10.18356/e472cae3-en.
- [15] United Nations. Economic Commission for Europe, “United Nations Framework Classification for Resources : update 2019,” p. 20, 2019.
- [16] BECQUEREL and M. E., “Memoire sur les Effets Electriques Produits sous l’Influence des Rayons Solaires,” *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, vol. 9, pp. 561-567, 1839, Accessed: Mar. 18, 2021. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10011332091>.
- [17] Adams and R. E. Day, “The Action of Light on Selenium,” *Proc. R. Soc. London*, vol. A25, 1877.
- [18] “Einstein, A. (1905) Annalen der Physik, 17, 132-148. - References - Scientific Research Publishing.” Accessed: Mar. 22, 2021. [Online]. Available: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjct55\)\)/reference/ReferencesPapers.a](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjct55))/reference/ReferencesPapers.a)

- spx?ReferencelD=1853921.
- [19] U. IST, DGS, “Energia Fotovoltaica Manual Sobre Tecnologias, Projeto e instalação,” p. 368, 2004.
 - [20] CRESESB, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2004.
 - [21] C. Phil, *Solar energy perspectives*, vol. 1. 2011.
 - [22] 2001: Climate change IPCC, “Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T. Ding, Y. Griggs, D.J. Noguer, M. Linden, P.J. van der Dai, X. Maskell, K. Johnson, C.A.],” *Cambridge Univ. Press*, p. 94, 2001.
 - [23] “Global Photovoltaic Power Potential by Country,” *Glob. Photovolt. Power Potential by Ctry.*, no. June, 2020, doi: 10.1596/34102.
 - [24] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, “Photovoltaic degradation rates - An Analytical Review,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 21, no. 1, pp. 12-29, 2013, doi: 10.1002/pip.1182.
 - [25] S. Weckend, A. Wade, and G. Heath, *End of Life Management Solar PV Panels*. 2016.
 - [26] “Carbon Price Viewer - Ember.” <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/> (accessed May 18, 2021).
 - [27] L. Bird, J. Cochran, and X. Wang, “Wind and Solar Energy Curtailment: Experience and Practices in the United States,” *Natl. Renew. Energy Lab.*, no. March, p. 58, 2014, [Online]. Available: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1126842/>.
 - [28] D. Turney and V. Fthenakis, “Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 3261-3270, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.04.023.
 - [29] B. S. Office, “ENVIRONMENTAL ASSESSMENT FOR BP SOLAR ARRAY PROJECT BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY UPTON , NEW YORK Brookhaven Site Office December 2009,” no. December, 2009.
 - [30] T. Tsoutsos, N. Frantzeskaki, and V. Gekas, “Environmental impacts from the solar energy technologies,” *Energy Policy*, vol. 33, no. 3, pp. 289-296, 2005, doi: 10.1016/S0301-4215(03)00241-6.
 - [31] NREL, “Renewable Electricity Futures Study: Executive Summary,” *Natl. Renew. Energy Lab.*, vol. 1, pp. 1-43, 2012, [Online]. Available: http://www.nrel.gov/analysis/re_futures/.
 - [32] R. Ferroukhi, A. Khalid, A. Lopez-Peña, and M. Renner, “Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2014,” *Int. Renew. Energy Agency*, no. May, pp. 1-12, 2014.
 - [33] International Energy Agency (IEA), “Net Zero by 2050 : A Roadmap for the Global Energy Sector,” no. June, pp. 1-224, 2021, [Online]. Available: www.iea.org.
 - [34] “Coopérnico - Centro da Pegada.” <https://www.coopernico.org/pt/projects/24-centro-da-pegada> (accessed May 31, 2021).
 - [35] Q Antum, “Q.Plus Bfr-G4.1 275-285,” pp. 1-2, 2019.
 - [36] “PVsyst SA - Route de la Maison-Carrée 30 - 1242 Satigny - Switzerland www.pvsyst.com.”
 - [37] “325W/330W/335W/340W/345W www.renesola.com.”
 - [38] EIA, “Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013,” *US Energy Inf. Adm.*, no. January, pp. 1-5, 2013.
 - [39] E. Vartiainen, G. Masson, and C. Breyer, “PV LCOE in Europe 2014-30 - Final Report, 23 June 2015,” *Eur. PV Technology Platf. Steer. Comm. PV LCOE Work. Gr.*, 2015, [Online]. Available: http://www.etip-pv.eu/fileadmin/Documents/FactSheets/English2015/PV_LCOE_Report_July_2015.pdf.

7. Apêndices

Apêndice A

Tabela A.1 - Versão abreviada do método UNFC adaptado a projetos solares mostrando classes e subclasses categorias correspondentes

			Confiança no recurso		
			Alta	Moderada	Baixa
Classe	Descrição	Subclasse	(Categorias UNFC mínimas do recurso)		
Projetos comerciais de recurso solar	Desenvolvimento do recurso solar é económica, ambiental e socialmente viável e a viabilidade técnica está confirmada	Em produção	(E1, F1.1, G1)	(E1, F1.1, G2)	(E1, F1.1, G3)
		Aprovada para desenvolvimento	(E1, F1.2, G1)	(E1, F1.2, G2)	(E1, F1.2, G3)
		Justificada para desenvolvimento	(E1, F1.3, G1)	(E1, F1.3, G2)	(E1, F1.3, G3)
Projetos de recurso solar potencialmente comerciais	Espera-se que o desenvolvimento do recurso solar seja económica, ambiental e socialmente viável num futuro próxima e a viabilidade técnica ainda não está confirmada	Desenvolvimento Pendente	(E2, F2.1, G1)	(E2, F2.1, G2)	(E2, F2.1, G3)
		Desenvolvimento em espera	(E2, F2.2, G1)	(E2, F2.2, G2)	(E2, F2.2, G3)
Projetos de recurso solar não-comerciais	Não se espera que o desenvolvimento do recurso solar se torne económica, ambiental e socialmente viável no futuro próximo ou a avaliação encontra-se num estágio demasiado precoce para se determinar a viabilidade económica, social e ambiental. A viabilidade técnica ainda não está confirmada.	Desenvolvimento não esclarecido	(E3.2, F2.2, G1)	(E3.2, F2.2, G2)	(E3.2, F2.2, G3)
		Desenvolvimento não viável	(E3.3, F2.3, G1)	(E3.3, F2.3, G2)	(E3.3, F2.3, G3)
Potenciais projetos de recurso solar	Desenvolvimentos associados com a investigação de um ou mais potenciais locais solares. Nenhum projeto em desenvolvimento foi ainda identificado		(E3, F3, G4)		
Quantidades adicionais de recursos solares	Quantidades de irradiação solar que não serão desenvolvidas. Algumas destas poderão ser recuperadas no futuro caso haja desenvolvimentos tecnológicos. Algumas ou todas destas poderão nunca ser utilizadas		(E3, F4, G1)	(E3, F4, G2)	(E3, F4, G3)

Apêndice B

Em baixo, encontram-se as definições das categorias e as respetivas explicações no contexto de Energia Solar e no contexto UNFC.

Tabela B.1 - Definições das categorias correspondentes ao eixo E

Categorias UNFC	Definição UNFC	Explicação UNFC	Interpretação Solar	Explicação Solar
E1	Desenvolvimento confirmado para ser social, ambiental e economicamente viável	O desenvolvimento é social, ambiental e economicamente viável com base nas condições atuais do mercado e em suposições realistas das condições futuras do mercado. Todas as condições necessárias foram atendidas, ou há expectativas razoáveis de que todas as condições necessárias serão atendidas dentro de um prazo razoável e não há impedimentos para a entrega da matéria-prima ou energia ao mercado. A viabilidade social, ambiental e económica não é afetada por condições de mercado adversas de curto prazo, desde que as previsões de longo prazo permaneçam positivas.	O desenvolvimento de recursos solares tem se mostrado economicamente viável, social e ambientalmente.	O desenvolvimento dos recursos solares é social, ambiental e economicamente viável com base nas condições de mercado atuais e em suposições realistas das condições de mercado futuras. Todas as condições necessárias foram atendidas, ou há expectativas razoáveis de que todas as condições necessárias serão atendidas dentro de um prazo razoável e não há impedimentos para a entrega da matéria-prima ou energia ao mercado. A viabilidade social, ambiental e económica não é afetada por condições de mercado adversas de curto prazo, desde que as previsões de longo prazo permaneçam positivas.
E2	Espera-se que o desenvolvimento se torne social, ambiental e economicamente viável em um futuro próximo.	O desenvolvimento ainda não foi confirmado como social, ambiental e economicamente viável, mas, com base em hipóteses realistas de condições futuras, há perspectivas razoáveis de viabilidade social, ambiental e económica no futuro próximo.	Espera-se que o desenvolvimento dos recursos solares se torne social, ambiental e economicamente viável num futuro próximo.	O desenvolvimento dos recursos solares ainda não foi confirmado como social, ambiental e economicamente viável, mas, com base em suposições realistas de condições futuras, há perspectivas razoáveis de viabilidade social, ambiental e económica no futuro próximo.
E3	Não se espera que o desenvolvimento se torne social, ambiental e economicamente viável num futuro próximo ou a avaliação está num estágio muito	Com base em pressupostos realistas de condições futuras, considera-se atualmente que não existem perspectivas razoáveis de viabilidade social, ambiental e económica no futuro	Não se espera que o desenvolvimento de recursos solares se torne social, ambiental e economicamente viável num futuro	Com base em pressupostos realistas de condições futuras, considera-se atualmente que não existem perspectivas razoáveis de viabilidade social, ambiental e económica do desenvolvimento dos recursos solares num futuro próximo; ou, a viabilidade económica da

	precoce para determinar a viabilidade social, ambiental e econômica.	previsível; ou, a viabilidade econômica da extração ainda não pode ser determinada devido a informações insuficientes.	próximo ou a avaliação está em um estágio muito precoce para determinar a viabilidade social, ambiental e econômica.	extração ainda não pode ser determinada devido a informações insuficientes.
		Também estão incluídas as estimativas associadas a projetos que estão previstos para serem desenvolvidos, mas que não estarão disponíveis para venda.		Também estão incluídas estimativas associadas a projetos com previsão de desenvolvimento, mas que não estarão disponíveis para venda ou uso para benefício econômico. Isso inclui as quantidades consumidas na produção (perda parasitária) e outras perdas.

Tabela B.2 - Definições das categorias correspondentes ao eixo F

Categorias UNFC	Definição UNFC	Explicação UNFC	Interpretação Solar	Explicação Solar
F1	Viabilidade de um projeto de desenvolvimento foi confirmada.	O desenvolvimento está concluído ou em andamento ou, estudos suficientemente detalhados foram concluídos para demonstrar a viabilidade do desenvolvimento.	A viabilidade de desenvolvimento de recursos solares foi confirmada.	O desenvolvimento de um projeto de energia solar está concluído ou em andamento ou, estudos suficientemente detalhados foram concluídos para demonstrar a viabilidade do desenvolvimento.
F2	A viabilidade de um projeto de desenvolvimento está sujeita a avaliações adicionais.	Estudos preliminares de um projeto definido fornecem evidências suficientes do potencial de desenvolvimento para que mais estudos sejam necessários. Aquisição de dados adicionais e / ou estudos podem ser necessários para confirmar a viabilidade do desenvolvimento.	A viabilidade de desenvolvimento de recursos solares está sujeita a avaliação adicional.	Estudos preliminares de um projeto de energia solar definido fornecem evidências suficientes do potencial de desenvolvimento para que estudos adicionais sejam necessários. Aquisição de dados adicionais e / ou estudos podem ser necessários para confirmar a viabilidade do desenvolvimento.
F3	A viabilidade de um projeto de desenvolvimento não pode ser avaliada devido a dados técnicos limitados.	Estudos muito preliminares de um projeto definido (pelo menos em termos conceituais) ou projeto potencial, indicam a necessidade de aquisição de dados adicionais ou estudo a fim de avaliar a viabilidade potencial de desenvolvimento.	A viabilidade de desenvolvimento de recursos solares não pode ser avaliada devido a dados técnicos limitados.	Os estudos de escopo de um projeto definido (pelo menos em termos conceituais) de energia solar ou projeto potencial indicam a necessidade de aquisição de dados adicionais ou estudo para avaliar a viabilidade potencial de desenvolvimento.

F4	Nenhum projeto de desenvolvimento foi identificado	Quantidades restantes de comodidades não desenvolvidas por qualquer projeto ou projeto potencial.	Nenhum projeto solar foi identificado.	A irradiação solar não será utilizada por nenhum projeto ou tecnologia solar atualmente definida.
----	--	---	--	---

Tabela B.3 - Definições das categorias correspondentes ao eixo G

Categorias UNFC	Definição UNFC	Explicação UNFC	Interpretação Solar
G1	Estimativas associadas a um projeto que podem ser estimadas com um alto nível de confiança.	As estimativas podem ser categorizadas discretamente como G1, G2 e / ou G3 (juntamente com as categorias E e F apropriadas), com base no nível de confiança nas estimativas (confiança alta, moderada e baixa, respetivamente) com base em evidências diretas. Alternativamente, as estimativas podem ser categorizadas como uma gama de incerteza refletida por (i) três cenários determinísticos específicos (casos baixo, melhor e alto) ou (ii) uma análise probabilística da qual três resultados (por exemplo, P90, P50 e P10) são selecionados. Em ambas as metodologias (abordagem “cenário” e abordagem “probabilística”), as estimativas são então classificadas no Eixo G como G1, G1 + G2 e G1 + G2 + G3	Tipicamente, as várias incertezas combinam-se para fornecer uma gama completa de resultados possíveis. Nesses casos, a categorização deve refletir três cenários ou desfechos equivalentes a G1 (caso baixo ou P90 ¹), G1 + G2 (melhor estimativa ou P50) e G1 + G2 + G3 (caso alto ou P10). As incertezas incluem a variabilidade na irradiação solar, a eficiência da metodologia de extração e conversão e quanto será produzido.
G2	Estimativas associadas a um projeto que podem ser estimadas com um nível de confiança moderado.		

¹ Onde P90 significa que há 90 por cento de probabilidade de que o resultado real irá exceder esta estimativa. Da mesma forma, real excederá a estimativa.

G3	Estimativas associadas a um projeto que podem ser estimadas com um baixo nível de confiança	respetivamente. Em todos os casos, as estimativas são aquelas associadas a um projeto definido. Comentários adicionais : O eixo G reflete o nível de confiança nas estimativas de matéria-prima ou energia. Assim, as categorias do eixo G pretendem refletir todas as incertezas significativas que afetam a previsão estimada para o projeto. As incertezas incluem a variabilidade e a eficiência do desenvolvimento (quando relevante). Normalmente, as várias incertezas combinam-se para fornecer uma gama completa de resultados possíveis. Nesses casos, a categorização deve refletir três cenários ou desfechos equivalentes a G1, G1 + G2 e G1 + G2 + G3.	
G4	Estimativas associadas a um projeto potencial baseadas principalmente em evidências indiretas.		

Apêndice C

Os dados da irradiação mensais do Centro Intergeracional da Pegada foram obtidos através do PVGIS. Os dados médios, máximos e mínimos do período entre 2005 e 2016 encontram-se na tabela C.1. Na figura C.1, é possível ver-se o gráfico da irradiação de todos os meses para os períodos em estudo e na C.3 e C.2, os melhores e piores meses, respetivamente.

Tabela C.1 - Dados de irradiação médios, máximos e mínimos entre 2005 e 2016 no local do projeto do Centro Intergeracional da Pegada (kWh/m²)

Irradiação (kWh/m ²)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média	81.25	98.56	146.99	179.74	220.73	236.19	250.63	221.58	170.14	124.42	84.97	72.50
Máxima	97.72	126.94	164.21	197.34	238.52	248.12	257.87	232.12	181.56	142.84	95.86	83.6
Mínima	37.63	61.51	88.03	105.49	173.67	193.36	217.88	204.88	159.77	109.64	71.36	60.07

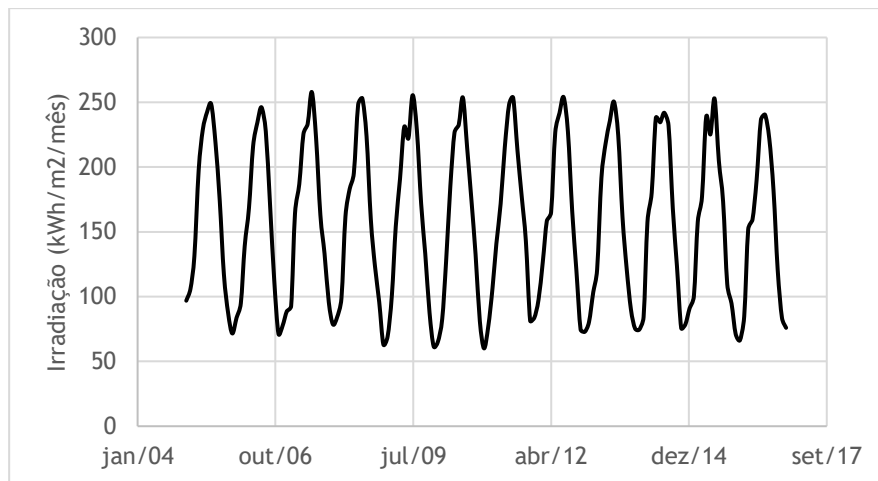


Figura C.1 - Irradiação registrada no local do projeto Centro Intergeracional da Pegada no período entre 2005 e 2016

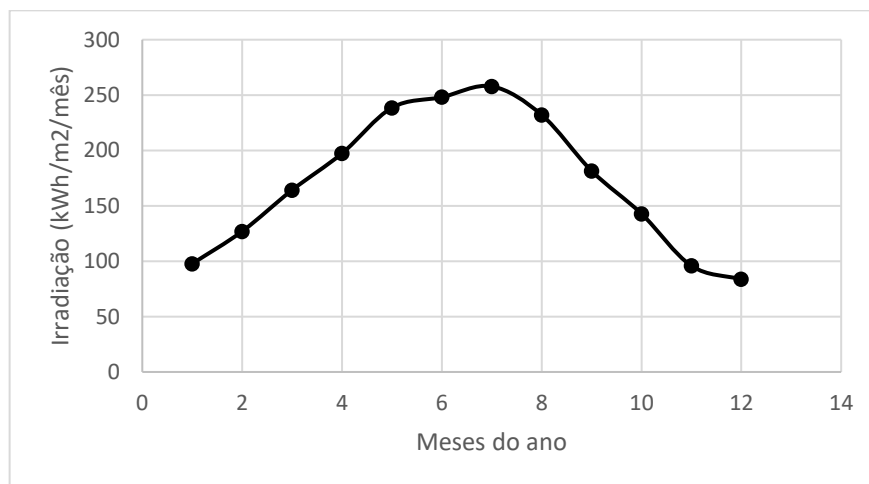


Figura C.2 - Irradiação registrada no local do projeto Centro Intergeracional da Pegada nos melhores meses no período entre 2005 e 2016

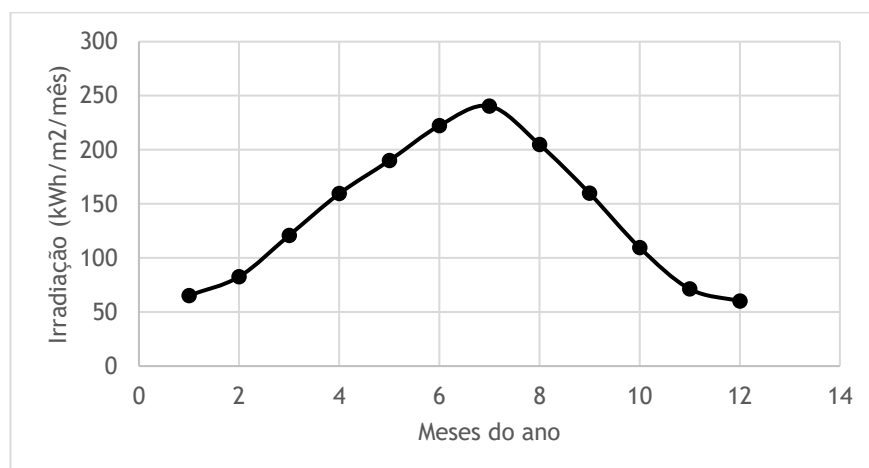


Figura C.3 - Irradiação registrada no local do projeto do Centro Intergeracional da Pegada nos piores meses no período entre 2005 e 2016

A equação utilizada para o cálculo da produção foi a de Performance Ratio, do software PVSystem.

O Performance Ratio é o quociente entre energia total produzida pelo sistema e a energia produzida pelo sistema caso não houvesse perdas.

$$PR = \frac{\text{Energia produzida pelo sistema (kWh)}}{\text{Potência nominal (kWp)} * \text{Irradiação Global (kWh/m}^2\text{)}}$$

Usando um Performance Ratio de 100%, obtém-se a produção sem perdas apenas através do produto da potência nominal pela irradiação global.

Tabela C.2 - Valores registados de Irradiação e resultados da estimação de produção com perdas e sem perdas no local do projeto do Centro Intergeracional da Pegada

	Irradiação (kWh/m ²)	Produção Estimada s/perdas (kWh)	Produção Estimada c/perdas (kWh)
Média Total	1887.71	144 183.2	129 764.9
Média Piores Meses	1686.60	128 822.5	115 940.3
Média Melhores Meses	2066.70	157 854.6	142 069.1

Apêndice D

Em seguida são apresentados os mesmos dados que os apresentados no Apêndice C, desta vez para o EET de Mangualde.

Tabela D.1 - Dados de irradiação médios, máximos e mínimos entre 2005 e 2016 no local do projeto do EET de Mangualde (kWh/m²)

Irradiação (kWh/m ²)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média	62.01	81.44	123.17	152.76	194.09	209.4	233.14	207.83	153.76	103.80	66.50	59.05
Máxima	81.66	110.52	154.91	167.04	222.31	227.7	245.41	224.3	165.77	124.63	87.03	65.14
Mínima	37.63	61.51	88.03	105.49	139.35	191.66	217.88	190.61	134.82	91.1	52.08	45.97

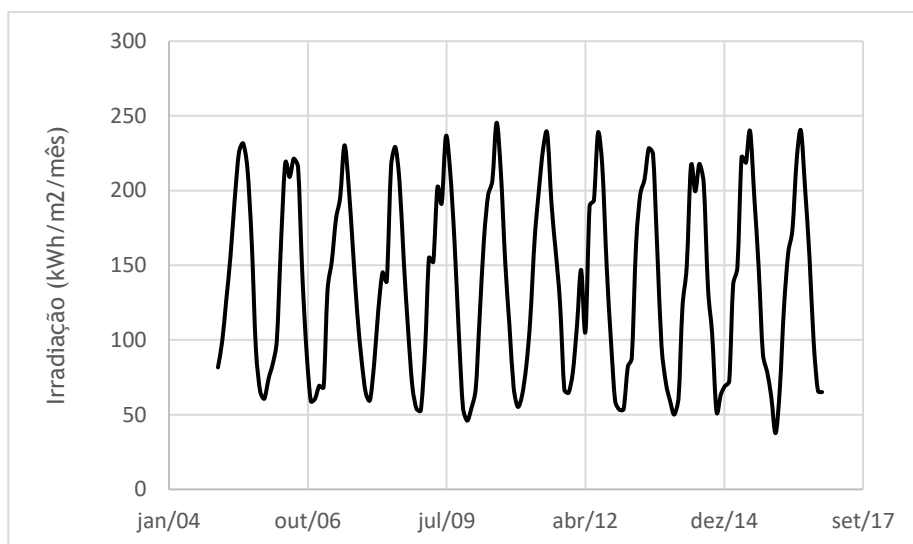


Figura D.1 - Irradiação registada no local do projeto do EET de Mangualde no período entre 2005 e 2016

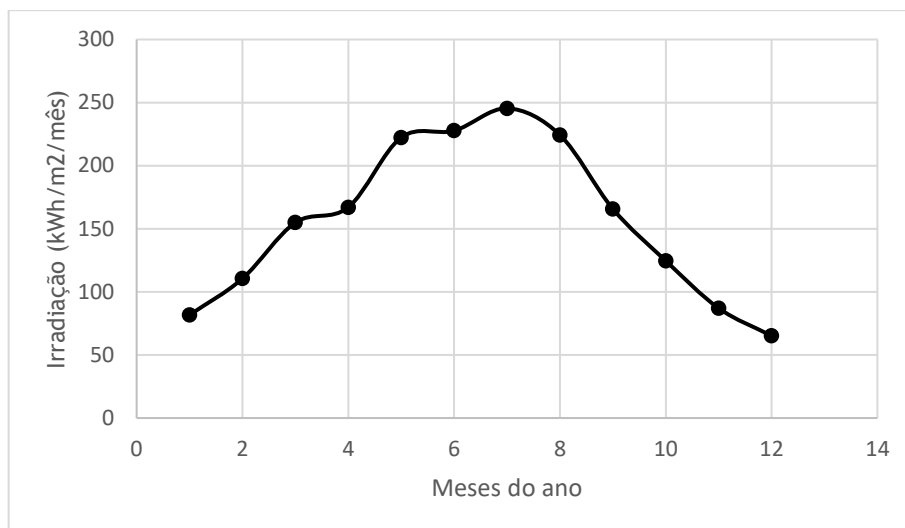


Figura D.2 - Irradiação registada no local do projeto do EET de Mangualde nos melhores meses no período entre 2005 e 2016

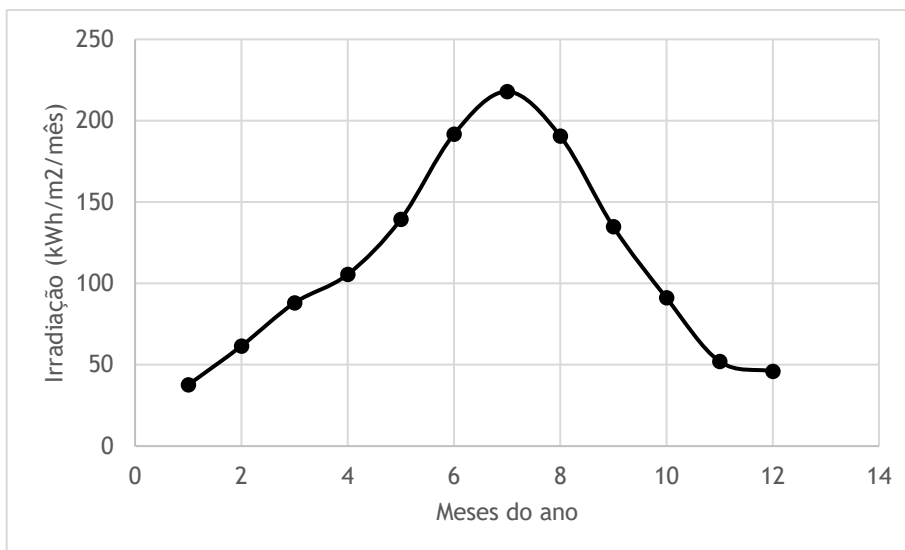


Figura D.3 - Irradiação registada no local do projeto do EET de Mangualde nos piores meses no período entre 2005 e 2016

Tal como no Apêndice C, os cálculos de produção foram feitos através da expressão do PR, estando os resultados apresentados na tabela XX.

Tabela D.2 - Valores registados de Irradiação e resultados da estimativa de produção com perdas e sem perdas do projeto do EET de Mangualde

	Irradiação (kWh/m ²)	Produção Estimada s/perdas (kWh)	Produção Estimada c/perdas (kWh)
Média Total	1646.950833	106 936.5	96 242.9
Média Piores Meses	1356.13	88 053.5	79 248.2
Média Melhores Meses	1876.42	121 836.0	109 652.4

Apêndice E

Tabela E.1 - Classificação do Eixo E para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada e respetiva justificação

Categoria	
E1	O projeto encontra-se a produzir eletricidade desde 2019 com todas as licenças necessárias. A análise económica revela que o retorno aconteça quando a produção atingir os 733 722 kWh
Subcategoria	
E1.1	O projeto é economicamente viável para o seu tempo de vida e foi baseado no preço da eletricidade atual

Tabela E.2 - Classificação do Eixo F para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada e respetiva justificação

Categoria	
F1	Encontra-se a ser gerada eletricidade com a tecnologia disponível. A viabilidade do projeto encontra-se estabelecida para o seu tempo de vida
Subcategoria	
F1.1	O projeto encontra-se a em produção com o Produto a ser vendido à rede

Tabela E.3 - Classificação do Eixo G para o projeto do Centro Intergeracional da Pegada e respetiva justificação

Categoria	
G1	Recursos calculados através da irradiação média dos piores meses registada durante um período de 12 anos (2005-2016). Esta é a menor quantidade de recursos mas o cenário mais confiante, com uma grande probabilidade de ser excedido.
G2	Recursos calculados da geração de energia da irradiação média durante um período de 12 anos (2005-2016). Este oferece um nível moderado de confiança.
G3	Recursos calculados através da irradiação média dos melhores meses registada durante um período de 12 anos (2005-2016). Esta é a maior quantidade de recursos mas o cenário mais confiante, com uma baixa probabilidade de ser excedido.

Apêndice F

Tabela F.1 - Classificação do Eixo E para o projeto do EET de Mangualde e respetiva justificação

Categoria	
E1	O projeto encontra-se a produzir energia desde 2014 com todas as licenças necessárias. O investimento já foi recuperado e atualmente encontra-se nos 129% de retorno.
Subcategoria	
E1.1	O projeto é economicamente viável para o seu tempo de vida e foi baseado no preço da eletricidade atual

Tabela F.2 - Classificação do Eixo F para o projeto do EET de Mangualde e respetiva justificação

Categoria	
F1	Encontra-se a ser gerada eletricidade com a tecnologia disponível. A viabilidade do projeto encontra-se estabelecida para o seu tempo de vida
Subcategoria	
F1.1	O projeto encontra-se a em produção com o Produto a ser vendido à rede

Tabela F.3 - Classificação do Eixo G para o projeto do EET de Mangualde e respetiva justificação

Categoria	
G1	Recursos calculados através da irradiação média dos piores meses registada durante um período de 12 anos (2005-2016). Esta é a menor quantidade de recursos mas o cenário mais confiante, com uma grande probabilidade de ser excedido.
G2	Recursos calculados da geração de energia da irradiação média durante um período de 12 anos (2005-2016). Este oferece um nível moderado de confiança.
G3	Recursos calculados através da irradiação média dos melhores meses registada durante um período de 12 anos (2005-2016). Esta é a maior quantidade de recursos mas o cenário mais confiante, com uma baixa probabilidade de ser excedido.