



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Estudo de uma Comunidade de Energia nas Escolas de S. António dos Olivais em Coimbra

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Cidades
Sustentáveis e Inteligentes

Autor

Marco António Silva Apura

Orientador

Cristina Isabel Ferreira Figueiras Faustino Agreira



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro de 2025

RESUMO

Este estudo avalia, em contexto real, de que forma as Comunidades de Energia Renovável (CER) podem reforçar a gestão urbana da energia numa perspetiva de cidades sustentáveis e inteligentes. A análise centra-se em três escolas do concelho de Coimbra e compara dois modos de operação: sistemas fotovoltaicos isolados em cada edifício e partilha comunitária em baixa tensão. O trabalho baseia-se nos consumos de 2024 e em simulações realizadas no PVSOL.

É sintetizado o enquadramento jurídico europeu e nacional, garantindo conformidade e reprodutibilidade do modelo. A avaliação organiza-se em grandezas operacionais (Produção, Consumo, Autoconsumo e Injeção) e nos respetivos indicadores, como a Taxa de Autoconsumo, Nível de Autonomia e emissões evitadas, permitindo relacionar decisões de dimensionamento com resultados mensuráveis.

Os dados demonstram que a coordenação comunitária, apoiada na complementaridade dos perfis de carga entre escolas, aumenta de forma consistente o uso local da energia produzida e reduz as exportações à rede, com impacto direto na autonomia energética e nas emissões evitadas. Verifica-se que o desempenho depende sobretudo do alinhamento entre potência instalada e procura efetiva, mais do que de ganhos marginais ao nível dos componentes. Reconhecem-se limitações, nomeadamente a ausência contínua de séries horárias e a falta de armazenamento e de controlo ativo de cargas.

Propõe-se, como evolução, a recolha sistemática de dados horários, a integração piloto de baterias e a implementação de regras de partilha dinâmicas que articulem a CER com outras camadas da cidade inteligente. O resultado é um método replicável para património municipal, assente em métricas claras, dados fiáveis e um modelo de governação simples.

Palavras-chave: Comunidades de Energia Renovável (CER), Autoconsumo, Partilha de Energia, Cidades Sustentáveis e Inteligentes, Energia Solar Fotovoltaica, PVSOL, Coimbra

ABSTRACT

This study assesses, in a real-world context, how Renewable Energy Communities (REC) can strengthen urban energy management from the perspective of sustainable and smart cities. The analysis focuses on three schools in the municipality of Coimbra and compares two operating modes: individual photovoltaic systems installed on each building and low-voltage community energy sharing. The work is based on 2024 consumption data and simulations performed in PVSOL.

The European and national legal frameworks are summarised to ensure compliance and reproducibility of the model. The assessment is organised around operational variables (Production, Consumption, Self-Consumption and Grid Injection) and their associated indicators, such as the Self-Consumption Rate, Autonomy Level and avoided emissions, enabling a clear link between system sizing decisions and measurable outcomes.

Results show that community coordination, supported by the complementarity of load profiles among the schools, consistently increases the local use of generated energy and reduces exports to the grid, with a direct impact on autonomy and emissions. Performance is shown to depend mainly on the alignment between installed capacity and actual demand rather than on marginal gains at the component level. Limitations are acknowledged, particularly the lack of continuous hourly datasets and the absence of storage systems and active load control.

As future development, the study proposes systematic collection of hourly data, pilot integration of battery storage, and the implementation of dynamic sharing rules that connect the REC with broader smart-city layers. The outcome is a replicable method for municipal assets, based on clear metrics, reliable data and a simple governance model.

Keywords: Renewable Energy Communities (REC), Self-Consumption, Energy Sharing, Sustainable and Smart Cities, Solar Photovoltaics, PVSOL, Coimbra

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa o culminar de uma etapa académica exigente e profundamente enriquecedora, que só foi possível graças ao contributo, apoio e incentivo de várias pessoas e instituições, às quais expresso o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), pela formação académica sólida que me proporcionou ao longo do curso, bem como pelas condições técnicas e científicas que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, deixo uma palavra de apreço pela partilha de conhecimentos e pelo espírito de entreaajuda.

Um agradecimento especial à minha orientadora, pela disponibilidade, espírito crítico e constante incentivo ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

À Câmara Municipal de Coimbra, expresso o meu reconhecimento pela colaboração demonstrada e pela disponibilização dos dados essenciais à realização do caso de estudo, sem os quais não teria sido possível desenvolver a componente prática desta investigação. Em particular, agradeço ao Engenheiro Santos Costa, pela sua disponibilidade, apoio técnico e contributos relevantes ao longo deste processo.

Agradeço igualmente à empresa SunEnergy, pelo apoio concedido no desenvolvimento de componentes práticas deste trabalho. O contacto com o contexto profissional permitiu-me adquirir conhecimentos fundamentais, bem como aprofundar competências técnicas essenciais à área das energias renováveis.

À minha família e à minha namorada, deixo um profundo agradecimento pelo apoio incondicional, motivação e incentivo constantes, não só durante a realização deste trabalho, mas ao longo de toda a minha vida académica e pessoal.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu mais sincero agradecimento.

ABREVIATURAS

AIA – Avaliação do Impacto Ambiental

AC – *Alternating Current* (corrente alternada)

AT/MAT – Alta e Muito Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

CEC – Comunidades de Energia Cidadãs

CER – Comunidades de Energias Renováveis

CO₂ - Dióxido de Carbono

CS – Comunidades sustentáveis

DC – *Direct Current* (corrente continua)

DGEG - Direção-Geral de Energia e Geologia

EUA – Estados Unidos da América

GEE – Gases com Efeito de Estufa

Hz - Hertz

kWh - Quilowatt-hora

kWp – Quilowatt-pico

LCOE – *Levelized Cost of Energy* (Custo nivelado da Energia)

MPPT – Maximum Power Point Tracking

MW - MegaWatt

ONU – Organização das Nações Unidas

PDM – Planos Diretores municipais

PEOT – Planos Especiais de Ordenamento do Território

PME – Pequenas e Médias Empresas

PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima

PR – *Performance Ratio* (*rácio de desempenho*)

PRR – Plano de Recuperação e Resiliência

SS – Sustentabilidade Social

TIR – Taxa Interna de Retorno

V - Volt

ÍNDICE

Resumo	ii
Abstract.....	iii
Agradecimentos	iv
Abreviaturas	v
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xii
1 Introdução	1
2 Comunidades de Energia Renovável.....	3
2.1 Origem e evolução das comunidades de energia.....	4
2.1.1 Cidades sustentáveis e inteligentes e o lugar das CER.....	6
2.1.2 Principais impactos das CER.....	8
2.2 Legislação - Antecedentes e Contexto Internacional.....	10
2.2.1 Legislação Europeia: A estrutura inicial para as CER.....	10
2.2.2 Primeiras Diretrizes e o Pacote de Energia e Clima.....	11
2.2.3 Pacote Energia Limpa para Todos os Europeus (2016).....	11
2.2.4 Diretiva de Energia Renovável (RED II) (2018).....	11
2.2.5 Diretiva do Mercado Interno de Eletricidade (2019).....	11
2.2.6 Diretiva RED III (2023).....	12
2.3 Pobreza energética	13
2.3.1 Transposição e Implementação em Portugal.....	13
2.3.2 Entidades Envolvidas	13
2.3.3 Resultados Práticos e Desafios	14
2.3.4 Comparação com outros países da União Europeia	14
2.4 Autoconsumo e o Enquadramento Legal	14
2.4.1 Tipos de Autoconsumo	15
2.4.2 Benefícios do Autoconsumo.....	15
2.4.3 Legislação e apoios.....	15
2.4.4 Estrutura Regulatória e Requisitos de Licenciamento em Portugal ..	15

2.5	Modelos de partilha de energia e conceito de proximidade.....	17
2.6	Perspetiva futurista e novas oportunidades	17
2.7	Conclusão.....	18
3	Energia Solar: A Base para a Transição Energética e Sustentabilidade Global	19
3.1	História e Evolução da Energia Solar.....	19
3.2	A Expansão Global da Energia Solar.....	22
3.3	A Evolução da Energia Solar em Portugal	23
3.4	Unidades de produção fotovoltaica	24
3.5	Constituição de um sistema fotovoltaico	26
3.5.1	Células Fotovoltaicas.....	27
3.5.2	Painel fotovoltaico.....	28
3.5.3	Inversores	29
3.5.4	Contador de energia	30
3.5.5	Smart meter (analisador da rede)	31
3.5.6	Transformadores de intensidade (TI)	31
3.5.7	Quadros DC e AC.....	31
3.6	Ferramenta de simulação de sistemas fotovoltaicos: PVSOL	32
3.7	Sistemas Fotovoltaicos: Benefícios, Desafios e Perspetivas futuras	33
3.8	Conclusões	35
4	desenvolvimento de projeto e discussão: metodologia e caso de estudo	37
4.1	Metodologia	37
4.1.1	Enquadramento	37
4.1.2	Seleção das escolas e fundamentação do caso	38
4.1.3	Localização e raio de proximidade	38
4.1.4	Dados e fontes.....	39
4.1.5	Ferramenta de simulação – PVSOL.....	39
4.1.6	Indicadores e fórmulas e fórmulas de calculo.....	40
4.1.7	Definição dos cenários de análise.....	42
4.2	Caso de Estudo.....	42
4.2.1	Caracterização das Escolas	42
4.2.2	Conservatório de Música de Coimbra	42

4.2.3	Escola Básica Norton de Matos	43
4.2.4	Escola Básica Vale das Flores e Jardim de Infância	44
4.2.5	Raio de proximidade	44
4.2.6	Diagnóstico Energético	45
4.2.7	Simulações PVSOL	48
4.2.8	Seguimento do Cenário A	50
4.2.9	Seguimento do Cenário B.....	54
4.2.10	Discussão de resultados	57
4.3	Conclusão.....	58
5	Conclusão	60
5.1	Perspetivas futuras	60
6	Bibliografia.....	62
7	Anexos.....	67
7.1	Anexo A	67
7.2	Anexo B.....	69
7.3	Anexo C.....	75
7.4	Anexo D.....	81
7.5	Anexo E	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Comunidades de Energia Renovável (CER): fluxo de energia dentro da comunidade e para a rede elétrica.[3]	4
Figura 2 – Representação esquemática de uma <i>Smart City</i> . [15]	7
Figura 3 – Representação gráfica de uma CER.[37]	17
Figura 4 – Representação gráfica da área de trabalho do programa PVSOL.[39] ..	33
Figura 5 – Fotografia de Edmund Becquerel.....	20
Figura 6 – Fotografia do Sastélite Vanguard.[45]	21
Figura 7 - Participação global das diferentes fontes de energia na produção de eletricidade.[47]	23
Figura 8 - Princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico[50]	25
Figura 9 - Consumo e produção ao longo do dia.[50]	26
Figura 10 - Consumo e produção ao longo do dia, com baterias.[50]	26
Figura 11 - Processo de instalação de um sistema fotovoltaico.[51]	27
Figura 12 – Esquema de ligação do sistema fotovoltaico.[52]	27
Figura 13 - Células Fotovoltaicas de Silício Policristalino (a) e monocristalino(b).[53]	28
Figura 14 - Componentes do painel fotovoltaico.[54]	29
Figura 15 – Inversores	30
Figura 16 – Esquema de um inversor.	30
Figura 17 – Smart meter	31
Figura 18 – Zona técnica	32
Figura 19 – Projeção da oferta global de eletricidade até 2050.[65]	35
Figura 20 - Vista aérea do conservatório (Google Earth)	43
Figura 21 - Vista aérea escola Norton de Matos (Google Earth).....	43
Figura 22 - Vista aérea escola Vale das Flores (Google Earth).....	44
Figura 23 – Representação do raio de proximidade (Google Earth).	44
Figura 24 Perfil de consumo mensal 2023 Conservatório - anexo A	45
Figura 25 - Perfil de consumo mensal 2024 Conservatório- anexo A.	45
Figura 26 - Perfil de consumo mensal 2023 Norton de Matos – anexo A.....	46

Figura 27 - Perfil de consumo mensal 2024 Norton de Matos – anexo A.....	46
Figura 28 - Perfil de consumo mensal 2023 Vale das Flores – anexo A.	46
Figura 29 - Perfil de consumo mensal 2024 Vale das Flores – anexo A	47
Figura 30 - Simulação 3D da escola Norton de Matos (anexo B).....	48
Figura 31 - Parâmetros de simulação PVSOL do Conservatório (extraído do anexo B)	49
Figura 32 - Simulação 3D da escola Norton de Matos (anexo C).....	49
Figura 33 - Parâmetros de simulação PVSOL da escola Norton de matos (anexo C).	49
Figura 34 - Simulação 3D da escola vale das flores (anexo D).....	50
Figura 35 -Parâmetros de simulação PVSOL da escola Vale das Flores (anexo D).	50
Figura 36 - Cobertura do consumo no conservatório (PVSOL, anexo B).....	51
Figura 37 - Cobertura do consumo na escola Norton de Matos (PVSOL, anexo C)	51
Figura 38 –Cobertura do consumo na escola Vale das Flores (PVSOL, anexo D)	52
Figura 39 - Utilização da energia fotovoltaica na comunidade (anexo E)	55
Figura 40 - Cobertura do consumo na comunidade (anexo E)	55
Figura 41 - Comunidade alvo de estudo (Google Earth).	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos impactos das CER com base em três dimensões.[21].....	9
Tabela 2 - Consumo anual das três escolas (kWh/ano) anexo A.....	47
Tabela 3 – Resultados por escola, Cenário A (PVSOL, anexos B, C e D).....	52
Tabela 4 – Resultados por escola, Cenário A (PVSOL, anexos B, C e D) (cont.).	53
Tabela 5 – Dados económicos (PVSOL, anexos B C e D).....	53
Tabela 6 – Cenário B: resultados da Comunidade (PVSOL, anexo E).	56
Tabela 7 – Cenário B: resultados da Comunidade (PVSOL, anexo E) (cont.).	56
Tabela 8 - Dados económicos da Comunidade (PVSOL, anexo E).....	56

1 INTRODUÇÃO

Perante a aceleração das políticas de descarbonização e o amadurecimento das tecnologias de geração distribuída, as Comunidades de Energia Renovável (CER) surgem como uma resposta tangível para aproximar a produção de eletricidade dos perfis reais de consumo e, ao mesmo tempo, redistribuir benefícios económicos e ambientais a uma escala local. Em Portugal, a evolução do enquadramento legal abriu espaço à organização de consumidores e produtores em modelos de autoconsumo individual e coletivo que, quando bem desenhados, reduzem perdas, alavancam a autonomia e estabilizam custos de energia ao longo do tempo. O presente trabalho inscreve-se nesse contexto e cruza-o deliberadamente com a agenda das cidades sustentáveis e inteligentes. Ao promover geração próxima da procura, monitorização contínua e gestão ativa de fluxos, as CER transformam edifícios e infraestruturas em nós energéticos participativos, reforçando a resiliência urbana, a eficiência dos ativos públicos e a qualidade do serviço elétrico. O princípio é simples e atual: os sistemas fotovoltaicos dimensionados com rigor e integrados num regime de partilha local tornam-se peças estruturantes de uma cidade que usa dados para otimizar consumos, percorre trajetórias de neutralidade carbónica e cria valor onde a energia é efetivamente utilizada.

Partindo dessa base, o trabalho articula um corpo teórico sólido com uma aplicação concreta no setor da educação, tomando como caso de estudo três estabelecimentos de ensino no concelho de Coimbra. As escolas oferecem um terreno particularmente fértil para a demonstração do conceito: têm importância social evidente, horários característicos e perfis de carga diferenciados que permitem testar, em ambiente realista, o potencial de complementaridade entre consumos. A análise assenta em dados recentes de consumo e em simulações técnico-económicas de sistemas fotovoltaicos realizadas com um software especializado, garantindo transparência na cadeia de cálculo e comparabilidade entre alternativas. Para além de avaliar a adequação tecnológica e o desempenho energético, o trabalho explora o papel da comunidade enquanto mecanismo organizativo que transforma excedentes difusos em recursos úteis a partir de uma lógica de proximidade, alinhada com o paradigma de “cidade inteligente” - uma cidade que mede, gere e aprende, em que a energia deixa de ser apenas um custo de operação para se afirmar como eixo de inovação e serviço público.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento conceptual das CER e a sua inserção na estratégia de cidades sustentáveis e inteligentes, onde se clarificam definições operacionais, se distinguem os modelos de participação e se descreve a evolução da principal legislação aplicável, desde o quadro europeu que reconhece e protege os direitos dos participantes até à transposição nacional que viabiliza o autoconsumo coletivo e a partilha de energia em baixa tensão. O capítulo fixa a

terminologia e os princípios que suportam a análise, permitindo ao leitor situar o papel das CER na gestão urbana da energia, na mitigação de emissões e na promoção de resiliência elétrica a nível local.

O segundo capítulo aprofunda a energia solar fotovoltaica enquanto tecnologia habilitadora do conceito, e são revistos os componentes principais dos sistemas, as relações entre recurso solar, orientação e inclinação, as perdas mais relevantes e os indicadores de desempenho que permitem ler resultados de forma consistente. É também discutida a integração em edifícios com vista à maximização do autoconsumo, a interação com a rede e a leitura de métricas como produção anual, rácio de desempenho, taxa de autoconsumo e nível de autonomia, preparando o terreno para a interpretação crítica dos *outputs* de simulação e para a comparação entre cenários com e sem partilha local de energia.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada e explica as fontes de dados e os critérios de seleção, o tratamento aplicado aos registos de consumo, a construção dos modelos de simulação e o protocolo de cálculo que assegura replicabilidade. Além disso, apresenta os cenários de análise e as hipóteses necessárias para os tornar comparáveis, detalhando a parametrização técnica e económico-financeira, bem como os procedimentos de validação interna dos resultados produzidos pelo software. Este capítulo, estabelece assim, a ligação clara entre objetivos, dados disponíveis e métodos utilizados, eliminando ambiguidades na leitura dos resultados.

O quarto capítulo materializa o caso de estudo das três escolas de Coimbra, onde caracteriza cada instalação, descreve o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, analisa os resultados energéticos e ambientais obtidos, com atenção à forma como a partilha em contexto de comunidade altera o balanço entre autoconsumo e injeção na rede. A leitura é feita à escala de cada edifício e do conjunto.

Por fim, o trabalho termina com um capítulo conclusivo, em que se reúnem as principais implicações técnicas e organizativas observadas ao longo do trabalho.

2 COMUNIDADES DE ENERGIA RENOVÁVEL

As CER afirmam-se como um modelo essencial na concretização das metas de descarbonização e na promoção de uma transição energética sustentável. Estas comunidades consistem em iniciativas de base local, nas quais cidadãos, empreendedores sociais e autoridades públicas se unem para desenvolver e gerir projetos de energia renovável de forma colaborativa, repartindo os custos e os benefícios da produção e consumo de energia limpa [1].

Durante o último século, testemunhamos a evolução dos sistemas elétricos, desde redes locais e de pequena escala, para grandes redes regionais e nacionais. Este desenvolvimento, suportado com infraestruturas de transmissão e distribuição centralizadas, é gerido por entidades estatais ou grandes empresas. É um modelo, ainda presente na América do Norte (Texas, Alasca e Quebeque), que permitiu fornecer eletricidade acessível à maioria da população e impulsionou o desenvolvimento industrial. No entanto, esta forma de gestão remeteu a participação cidadã para um papel passivo de consumidor [2].

Nos últimos anos, temos vindo a verificar uma mudança nesta realidade. Os cidadãos têm vindo a participar mais ativamente como *prosumers* (produtores e consumidores de energia), também designados como "consumidores ativos" [2].

A sustentabilidade social (SS) e as comunidades sustentáveis (CS) são conceitos que têm vindo a ser discutidos desde os anos 80, embora muitas vezes de forma abstrata. Ainda assim, têm influenciado diversas áreas como a renovação urbana, o turismo, a educação, os sistemas alimentares, etc. No setor energético, o progresso tem sido mais claro com a introdução do pacote energia limpa para todos os Europeus da Comissão Europeia. Esta ação estabelece um quadro legal para a criação de comunidades de energia, incluindo duas variantes principais: comunidades de energia cidadãos (CEC) e CER [2].

Na Figura 1 está representado o funcionamento de uma CER, ilustrando o fluxo de energia entre os diferentes membros da comunidade e a rede elétrica pública. É composta por várias habitações, edifícios e uma escola, com diferentes níveis de envolvimento na produção, consumo e partilha energética. Entre os vários intervenientes desta rede, destacam-se as casas H1, H2 e H3, o edifício de apartamentos e a escola, todos eles equipados com sistemas de produção de energia renovável (ex: painéis solares), e alguns incluem sistemas de armazenamento (baterias). Os membros atuam como *prosumers*, isto é, simultaneamente produtores e consumidores de energia, capazes de satisfazer as suas próprias necessidades energéticas e partilhar o excedente com outros membros da comunidade ou com a rede pública, caso a produção exceda a procura interna [3].

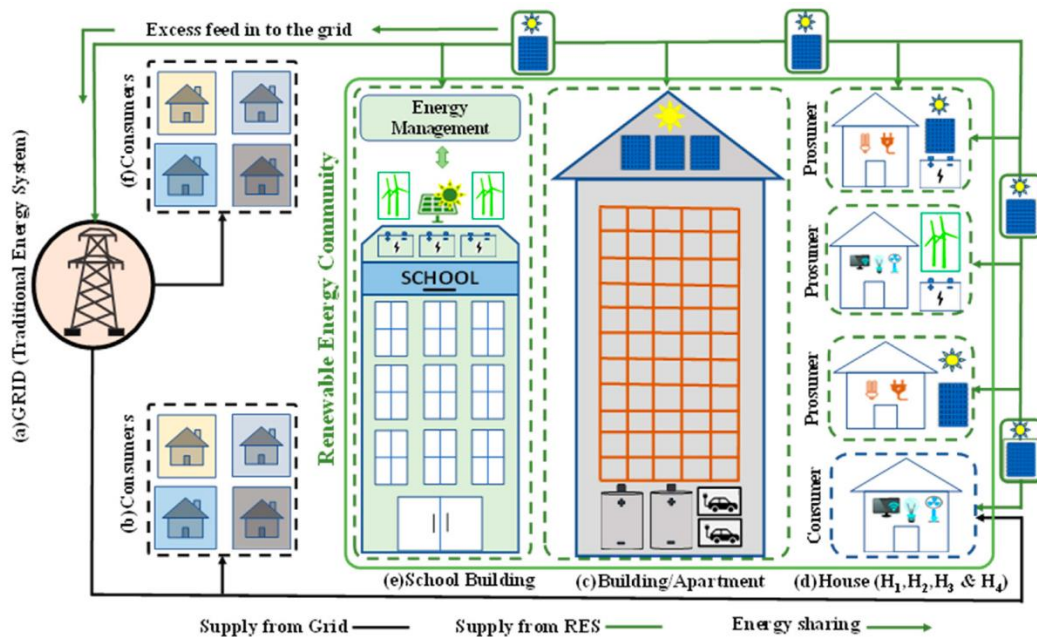


Figura 1 - CER: fluxo de energia dentro da comunidade e para a rede elétrica [3].

A figura evidencia ainda a presença de consumidores passivos, que não produzem energia e dependem do fornecimento proveniente da comunidade ou, em caso de défice, da rede elétrica convencional. A escola, por exemplo, assume um papel relevante ao integrar produção solar e eólica, bem como armazenamento, contribuindo ativamente para o equilíbrio energético da comunidade. O edifício de apartamentos apresenta, além da produção e armazenamento, uma estação de carregamento para veículos elétricos, reforçando a integração entre energia renovável e mobilidade sustentável [3].

As linhas verdes representadas na figura delimitam a área da comunidade, enquanto as linhas externas ilustram os fluxos de energia que saem da comunidade para a rede elétrica pública (em situações de excedente) ou que entram quando a produção de energia interna é insuficiente. O modelo promove o conceito de autoconsumo, flexibilidade energética e independência da rede tradicional, valorizando a produção local de energia, reduzindo custos e emissões de carbono e fomentando o envolvimento ativo dos cidadãos na transição energética. A inclusão de sistemas de armazenamento permite ainda o aproveitamento da energia produzida em momentos de baixa procura, garantindo uma maior estabilidade e resiliência do sistema. Assim, a figura traduz, de forma clara, o funcionamento técnico e colaborativo de uma CER, destacando o seu potencial na construção de um modelo energético mais sustentável e descentralizado [3].

2.1 Origem e evolução das comunidades de energia

As CER emergem como resposta a desafios globais interligados: a crise climática, a necessidade de descarbonização do setor energético, a segurança energética e a democratização do acesso à energia. A origem das CER remonta a movimentos

sociais e políticos que ganharam força no final do século XX, impulsionados por uma crescente consciencialização sobre os impactos ambientais da dependência de combustíveis fósseis e pelas limitações dos modelos centralizados de produção e distribuição de energia [4].

A década de 1970 foi marcada pelas crises do petróleo, que expuseram a vulnerabilidade de sistemas energéticos fortemente dependentes de combustíveis fósseis. Em resposta, vários países começaram a explorar alternativas energéticas renováveis e descentralizadas. A Dinamarca, por exemplo, foi pioneira ao desenvolver cooperativas eólicas, permitindo que cidadãos locais investissem em turbinas eólicas e participassem ativamente na produção de energia. As comunidades não só proporcionaram benefícios económicos diretos às comunidades como também ajudaram a aumentar a aceitação social da energia renovável. O modelo dinamarquês foi amplamente replicado e é considerado um precursor das CER modernas [5].

A evolução tecnológica e a redução dos custos de fontes renováveis, como energia solar e eólica, durante as décadas de 1990 e 2000, tornaram as CER mais acessíveis e economicamente viáveis. Neste período, a Alemanha e os Países Baixos destacaram-se como líderes na implementação de CER. Na Alemanha, o programa *Energiemwende* foi central para o crescimento das CER, incentivando a produção descentralizada de energia através de tarifas *feed-in*, que garantiam preços fixos para a energia produzida de fontes renováveis, proporcionando segurança financeira para os pequenos produtores [6],[7]. Outro exemplo foi a criação de redes de autoconsumo coletivo nos Países Baixos, onde cidadãos e empresas se uniram para produzir e consumir energia renovável em conjunto, que demonstrou, mesmo em áreas urbanas densas, que as CER podem ser implementadas com sucesso, reduzindo custos e promovendo a sustentabilidade local [3].

O reconhecimento formal das CER na União Europeia foi um marco fundamental para o crescimento deste modelo. Em 2001, a Diretiva 2001/2001, também conhecida como *Renewable Energy Directive II*, definiu pela primeira vez o conceito de *Renewable Energy Communities* (RECs). Esta diretiva incentivou os Estados-Membros a estabelecerem regulamentações nacionais para apoiar a criação dessas comunidades, reconhecendo-as como entidades legítimas no mercado energético, onde foi reforçado pelo pacote *Clean Energy for All Europeans*, que promoveu uma transformação no sistema energético europeu para torná-lo mais sustentável e participativo [8],[9].

Em conformidade com a Diretiva 2001/2001, as CER devem priorizar benefícios sociais, ambientais e económicos, em vez de visar exclusivamente o lucro. Isto permitiu que se tornassem ferramentas poderosas para enfrentar a "pobreza energética", ao oferecer tarifas acessíveis e promover a inclusão social em áreas rurais e urbanas [1], [9].

O avanço de tecnologias como redes inteligentes (*smart grids*), baterias de armazenamento e plataformas digitais de monitorização têm permitido que as CER operem de forma eficiente, ajustando a produção e o consumo em tempo real. Além disso, com o desenvolvimento de plataformas de comércio de energia *peer-to-peer*, as CER podem trocar excedentes de eletricidade diretamente entre si, sem depender exclusivamente de grandes empresas de distribuição [10].

As CER têm-se mostrado uma solução prática e eficaz para enfrentar desafios climáticos e energéticos, reduzir emissões de carbono, promover a inclusão social e fortalecer economias locais, enquanto incentivam a transição para um sistema energético descentralizado. À medida que mais países adotam regulamentações e incentivos, as CER têm o potencial de se tornarem peças-chave em um sistema energético global mais sustentável e equitativo. O futuro das CER depende de políticas públicas consistentes e investimentos tecnológicos contínuos. Combinando inovação e participação, as CER oferecem assim uma visão transformadora para o setor energético, alinhada com os objetivos climáticos internacionais e as necessidades locais [11].

2.1.1 Cidades sustentáveis e inteligentes e o lugar das CER

A expressão “cidade inteligente” emergiu à medida que os municípios passaram a usar dados e tecnologias digitais para tornar os serviços urbanos mais eficientes, transparentes e orientados para as pessoas. De forma simples, a Comissão Europeia define *smart city* como um lugar onde as redes e serviços tradicionais são tornados mais eficientes com soluções digitais para benefício dos habitantes e empresas, isto é, tecnologia ao serviço da qualidade de vida, da sustentabilidade e da eficiência económica.[12]

Historicamente, a origem deste conceito remonta aos primeiros esforços de utilização sistemática de dados urbanos. Entre as décadas de 1970-90 surgiram iniciativas associadas ao *urban big data*, que permitiram apoiar a gestão das cidades de forma ainda pouco visível para os cidadãos. Já a partir dos anos 2000, com a transformação digital dos serviços municipais e o surgimento de visões como a *Smarter Planet*, o conceito ganhou maior relevância. A literatura académica aponta, assim, para o início da década de 90 como um marco fundamental, seguido de uma evolução contínua na década seguinte, em que as aplicações passaram gradualmente de soluções internas e técnicas para abordagens centradas no cidadão, promovendo a participação pública [13]. Paralelamente, a agenda das cidades sustentáveis evoluiu de políticas setoriais, com edifícios mais eficientes, mobilidade limpa, gestão de água e resíduos, para abordagens integradas, quantificáveis e comparáveis entre cidades.

Publicada pela primeira vez em 2014, a ISO 37120 tornou-se referência internacional para medir desempenho urbano, com 104 indicadores distribuídos por 19 temas na versão de base e programas de certificação em dezenas de países [14]. Esta norma institucionalizou a mudança que um conjunto de indicadores normalizados para serviços urbanos e qualidade de vida, tais como a energia,

ambiente, mobilidade, finanças, educação, etc., permitindo que as autarquias reportem progresso e tomem decisões com base em evidência comparável.

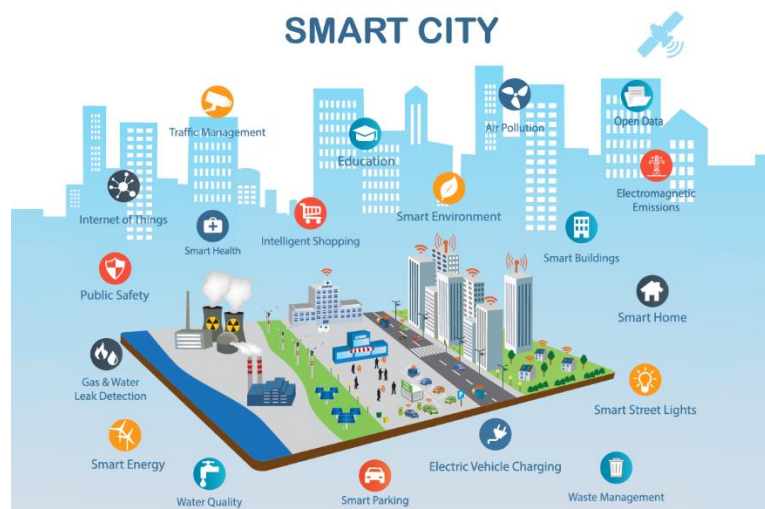


Figura 2 – Representação esquemática de uma *Smart City* [15].

O UN-Habitat resume que as áreas urbanas são responsáveis por 71-76% das emissões de CO₂ do uso final de energia a nível global. Outros documentos da Organização das Nações Unidas (ONU) reforçam a ideia de que os aglomerados urbanos continuam a ser o principal motor do consumo energético e das emissões, apesar de alguns ganhos de eficiência per capita. Se o desafio está nas cidades, a solução tem de se materializar aí, e é precisamente neste ponto que entram as CER enquanto instrumento local da transição energética.[16]

As CER traduzem, no plano urbano, o paradigma de *prosumer* e a descentralização do sistema: cidadãos, autarquias e Pequenas e Médias Empresas (PME) organizam-se para produzir, partilhar, armazenar e valorizar energia renovável, com objetivos ambientais e de interesse local. No enquadramento europeu, as *energy communities* permitem às comunidades agir como uma entidade no mercado, acedendo a múltiplos serviços (autoconsumo, venda de excedentes, flexibilidade), viabilizando modelos cooperativos em bairros, parques empresariais ou carteiras municipais de edifícios (escolas, bibliotecas, pavilhões)[17]. Há estudos de prospetiva da Comissão Europeia/JRC que sugerem, além disso, que a escala potencial não é marginal, e por volta de 2030, as comunidades poderão deter uma fração relevante da capacidade renovável europeia (por ex., >20% do solar), demonstrando o papel sistémico deste instrumento [18].

As CER podem ser entendidas como nós inteligentes da rede urbana. Ao promoverem a instalação de sistemas fotovoltaicos em coberturas e, sempre que adequado, a integração de armazenamento e gestão de cargas, contribuem para a redução das perdas na rede, uma vez que a produção ocorre próxima dos locais de consumo. Adicionalmente, ajudam a atenuar picos de procura e facilitam a integração de fontes renováveis variáveis, reduzindo a pressão sobre as infraestruturas elétricas. Este efeito é reforçado quando o dimensionamento dos

sistemas considera orientações Este/Oeste, permitindo uma distribuição mais uniforme da produção ao longo do dia. Aqui, o *smart* não é um adereço, mas sim os contadores inteligentes, algoritmos de partilha, limitação ativa de exportação quando necessário, dados abertos e *dashboards* para gestão e transparência municipal. A componente digital reforça a capacidade de resposta a falhas e picos, melhora a qualidade do serviço e cria dados que alimentam indicadores ISO nos domínios de Energia e Ambiente [19]. A contribuição de uma CER é direta e mensurável, pois cada quilowatt-hora (kWh) autoconsumido substitui um kWh que seria comprado à rede, logo evita emissões segundo o fator de emissão do sistema elétrico. Esta relação simples permite integrar a CER nos inventários municipais de Gases com Efeito de Estufa (GEE) e nos relatórios de descarbonização de políticas públicas de cidade (ex.: indicadores ISO de energia e clima). Ao mesmo tempo, as CER adicionam valor económico (poupanças orçamentais, e eventualmente receita de excedentes quando permitido) e social (envolvimento cívico, coesão).

A literatura europeia recente sobre *energy communities* sintetiza estes benefícios climáticos, económicos e sociais, com efeitos laterais em inovação local e criação de capacidades [20].

2.1.2 Principais impactos das CER

As CER representam um instrumento importante para a transição energética justa e sustentável na União Europeia. Na Tabela 1 estão descritos os principais impactos assentes em três dimensões: i) Económica, ii) Social e iii) Técnica [21].

Tabela 1 - Resumo dos impactos das CER com base em três dimensões [21].

Dimensão	Impacto	Descrição
Económica	Redução de custos energéticos	Partilha de energia e autoconsumo coletivo reduzem a fatura energética dos membros.
	Acesso a tecnologias renováveis	Permite o investimento coletivo em sistemas como o solar fotovoltaico, acessível a consumidores que não teriam meios individuais.
	Valorização da produção local	Promove a rentabilidade dos sistemas de energia renovável, reduz perdas e aumenta o autoconsumo.
	Incentivos financeiros	Alguns países oferecem subsídios, tarifas feed-in e remunerações específicas para energia partilhada.
Social	Mitigação da pobreza energética	Facilita o acesso de famílias vulneráveis à energia limpa, reduzindo o peso da energia no orçamento familiar.
	Literacia energética e cidadania ativa	Estimula a educação sobre energia e o envolvimento cívico na transição energética.
	Democracia e justiça energética	Promove modelos participativos, com controlo local e decisões tomadas pelos membros da comunidade.
	Promoção do desenvolvimento económico local e da criação de postos de trabalho	Estimula a economia local através da instalação e operação dos sistemas renováveis.
Técnica	Descentralização do sistema energético	Transição de um modelo centralizado para um modelo distribuído, com produção e consumo locais.
	Alívio da rede elétrica	Redução de picos de carga e menor dependência da rede graças ao autoconsumo e ao armazenamento local.
	Desafios técnicos	Possíveis impactos negativos na rede (ex: variações de tensão), exigindo planeamento e tecnologias adequadas.
	Flexibilidade e inovação tecnológica	Uso de baterias, veículos elétricos e plataformas digitais para otimizar a gestão energética dentro da comunidade.

Em síntese, as Comunidades de Energia Renovável (CER) representam uma solução inovadora e abrangente que responde simultaneamente aos desafios económicos, sociais e técnicos da transição energética. Através da sua estrutura cooperativa e descentralizada, as CER possibilitam o acesso equitativo a fontes de

energia limpa, promovem a justiça energética e fomentam a participação ativa dos cidadãos na gestão dos recursos energéticos. Mais do que os benefícios diretos na redução de custos e na mitigação da pobreza energética, estas comunidades reforçam a resiliência das redes elétricas e impulsionam o desenvolvimento local sustentável. Assim, a implementação eficaz das CER, acompanhada de quadros regulamentares adequados e incentivos bem desenhados, poderá desempenhar um papel central na concretização das metas de neutralidade carbónica da União Europeia e na construção de um sistema energético mais inclusivo, eficiente e sustentável [21].

2.2 Legislação - Antecedentes e Contexto Internacional

A implementação do Pacto Ecológico Europeu, desde 2020, tem impulsionado novas legislações em várias áreas, com o objetivo de alcançar a neutralidade climática até 2050. Estas mudanças estão a transformar o setor elétrico e a abrir espaço para a governação energética local e regional, promovendo a autossuficiência energética. A evolução da legislação CER reflete esse compromisso crescente, tanto da União Europeia quanto de Portugal, em promover a transição energética e garantir a sustentabilidade ambiental.[2] É um processo legislativo que se desenvolveu ao longo de várias décadas, com acordos internacionais, diretivas europeias e leis nacionais que consolidam o quadro regulamentar para as CER. Os pontos que se seguem reavaliam a trajetória legislativa, exploram o impacto de cada marco regulatório e a sua implementação em Portugal, bem como os desafios presentes para a plena adoção e desenvolvimento das CER [22].

Um dos primeiros marcos significativos foi a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1992, também conhecida como Cúpula da Terra, realizada no Rio de Janeiro, que consolidou a ideia de desenvolvimento sustentável e encorajou a redução do uso de combustíveis fósseis [23]. A partir desse ponto, vários acordos internacionais foram estabelecidos, culminando no Protocolo de Quioto (1997), onde os países se comprometeram a reduzir as emissões de GEE. Embora o Protocolo não fosse diretamente focado em energia renovável, criou as bases para uma mudança na matriz energética e incentivou a adoção de fontes renováveis para mitigar as emissões de GEE [23], [24].

O ponto de viragem no compromisso global com a transição energética foi o Acordo de Paris de 2015, assinado por 195 países, que estabeleceu o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 °C, com esforços para limitar a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. A Europa, como uma das principais signatárias, assumiu o compromisso de reduzir drasticamente as emissões de carbono e impulsionou a necessidade de políticas para energias renováveis [25].

2.2.1 Legislação Europeia: A estrutura inicial para as CER

A União Europeia destaca-se na liderança de iniciativas políticas para a transição energética, com o objetivo de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e

combater as alterações climáticas [26]. Ao longo dos anos, o quadro regulamentar europeu evoluiu para integrar não apenas grandes projetos de energias renováveis, mas também a participação ativa dos cidadãos e comunidades locais, com a democratização do setor energético, a promoção da produção descentralizada e o incentivo a modelos de consumo e produção coletivos.

De seguida, apresentam-se os principais marcos legislativos que estabeleceram a estrutura inicial para as CER na Europa, promovendo um modelo mais inclusivo e sustentável de produção e consumo de energia [26].

2.2.2 Primeiras Diretrizes e o Pacote de Energia e Clima

Na União Europeia, a discussão sobre a transição para energias renováveis consolidou-se com o Pacote de Energia e Clima 2020, adotado em 2009, que estabeleceu as metas “20-20-20”: uma redução de 20% nas emissões de GEE, um aumento de 20% na eficiência energética e uma meta de 20% para o uso de energia renovável até 2020 (Diretiva 2009/28/CE) [27].

2.2.3 Pacote Energia Limpa para Todos os Europeus (2016)

Em 2016, a UE lançou o Pacote Energia Limpa para Todos os Europeus, um conjunto de oito diretivas e regulamentos que procuravam promover uma transição mais democrática, onde os consumidores passavam a ser protagonistas [28]. O pacote concedeu, pela primeira vez, aos cidadãos europeus o direito de serem *prosumers* e introduziu o conceito de Comunidades de Energia e de Autoconsumo Coletivo. A ideia era possibilitar a criação de CERs que permitissem aos cidadãos, empresas e governos locais produzirem, armazenarem e partilharem energia renovável dentro de comunidades, sem fins lucrativos [28].

2.2.4 Diretiva de Energia Renovável (RED II) (2018)

A Diretiva de Energia Renovável (RED II), aprovada em 2018, trouxe avanços importantes para a estrutura legal das CER, definindo-as formalmente e estabelecendo direitos e obrigações para esses agrupamentos (Diretiva 2018/2001/EU)[29]. A RED II reconhece-as como entidades jurídicas cujo principal objetivo é oferecer benefícios ambientais, económicos e sociais aos seus membros ou à comunidade local, em vez de pretender o lucro financeiro. A diretiva também especificou que os membros de uma CER devem ter acesso facilitado a subsídios e apoios financeiros, incentivando a inclusão de cidadãos comuns e grupos vulneráveis na transição energética [29].

2.2.5 Diretiva do Mercado Interno de Eletricidade (2019)

A Diretiva do Mercado Interno de Eletricidade, aprovada em 2019, expandiu ainda mais o papel dos consumidores, criou o conceito de Comunidades de Energia

de Cidadãos e estabeleceu regras para o acesso aos mercados de eletricidade (Diretiva 2019/944/EU).[30] A diretiva garantiu aos consumidores o direito de se associarem em comunidades e permitiu que as CER atuassem como participantes do mercado, possibilitando a venda de eletricidade para outros membros ou para o sistema elétrico nacional. O quadro reforçou ainda o seu papel impulsionador da independência energética e reduziu barreiras para a sua integração no mercado de eletricidade europeu [30].

2.2.6 Diretiva RED III (2023)

A mais recente Diretiva de Energia Renovável, conhecida como RED III, aprovada em 2023, representa um avanço significativo na política energética da União Europeia. Além de aumentar a meta vinculativa de energias renováveis para 45% até 2030 (Diretiva 2023/2001/EU), a RED III introduziu uma abordagem mais abrangente para fomentar a sustentabilidade e a equidade na transição energética.[31] Entre as principais inovações estão:

- i. Fortalecimento dos Direitos das CER: A diretiva reforça os direitos das CER para participar ativamente nos mercados de energia, garantindo acesso facilitado a subsídios e financiamentos. Assim, estas podem operar como entidades comerciais para venda direta de energia excedente, promovendo uma maior autonomia financeira [31].
- ii. Promoção de Micro-redes Comunitárias: Incentiva a criação de micro-redes locais adaptadas às necessidades específicas de cada região, permitindo maior flexibilidade e resiliência energética. Estas redes têm um papel fundamental na melhoria do abastecimento em áreas rurais e no fortalecimento da infraestrutura energética descentralizada [31].
- iii. Integração de Novas Tecnologias: A RED III destaca a importância de tecnologias inovadoras, como armazenamento de energia e redes inteligentes, mas também incentivos para a utilização de hidrogénio verde como fonte complementar de energia [31].
- iv. Prioridade à Inclusão Social: Redução da pobreza energética através da democratização do acesso à energia renovável. A diretiva recomenda que os Estados-Membros implementem medidas específicas para incluir famílias vulneráveis em projetos de CER, assegurando tarifas sociais e suporte técnico [31].
- v. Simplificação de Licenciamento: Introduce procedimentos simplificados para a aprovação de projetos renováveis, especialmente aqueles com impacto ambiental reduzido e procura acelerar a implementação de projetos CER e diminuir barreiras administrativas [31].

Ao integrar estas inovações, a RED III reforça o papel destas comunidades de energia como motor central da transição energética europeia, equilibrando o crescimento sustentável com inclusão social e eficiência tecnológica [31].

2.3 Pobreza energética

A pobreza energética é um dos principais desafios enfrentados por muitos países europeus, incluindo Portugal. Esta condição refere-se à incapacidade de um agregado familiar manter níveis adequados de conforto térmico e acesso a serviços energéticos essenciais devido a baixos rendimentos, custos elevados de energia e habitações ineficientes.[32]

Na União Europeia, a pobreza energética foi reconhecida como uma questão social prioritária. A RED II exige que os Estados-Membros adotem estratégias para mitigar a pobreza energética—e promove o acesso equitativo à energia renovável (Diretiva 2018/2001/EU) [29]. Em Portugal, alguns indicadores como a incapacidade de manter a casa adequadamente aquecida ou atrasos no pagamento de contas de energia são usados para medir o problema. As CER ao permitirem a produção e partilha local de energia renovável, reduzem os custos energéticos dos agregados familiares e promovem o acesso equitativo à energia. Surgem assim como um instrumento particularmente relevante no combate à pobreza energética [33].

2.3.1 Transposição e Implementação em Portugal

Portugal, enquanto Estado-Membro da União Europeia, comprometeu-se a transpor as diretivas europeias relativas à energia renovável para o seu ordenamento jurídico. Neste contexto, o Decreto-Lei n.º 162/2019 constituiu um marco inicial ao regulamentar o autoconsumo de energia e ao introduzir um enquadramento legal para a produção descentralizada, incluindo disposições relativas às Comunidades de Energia Renovável. Posteriormente, o Decreto-Lei n.º 15/2022 consolidou e aprofundou este regime, estabelecendo um quadro jurídico mais robusto para a criação, gestão e operação das CER, em alinhamento com as diretivas RED II e RED III [34], [35].

O governo português implementou uma série de incentivos financeiros e fiscais para estimular a adoção de CER. Entre os principais instrumentos estão:

- i. Fundo Ambiental: Financia projetos de transição energética, incluindo instalações de energia renovável e infraestruturas de autoconsumo coletivo.
- ii. Plano de Recuperação e Resiliência (PRR): Inclui verbas significativas para apoiar a instalação de painéis solares, sistemas de armazenamento e outros componentes necessários para o sucesso das CER.
- iii. Isenções e Reduções Fiscais: Algumas CER beneficiam de isenção do IVA em equipamentos de energias renováveis e redução de taxas de acesso à rede elétrica.

2.3.2 Entidades Envolvidas

A implementação das CER em Portugal envolve várias entidades-chave:

- i. DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia): Responsável pelo registo, licenciamento e supervisão das CER.
- ii. ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos): Define as tarifas de acesso à rede e supervisiona os mecanismos de partilha de energia.
- iii. Municípios: Apoiam a criação de CER locais e fornecem licenças para instalações em áreas classificadas.

2.3.3 Resultados Práticos e Desafios

Desde a introdução do quadro legal, tem-se verificado um aumento significativo no número de CER registadas em Portugal, no entanto, ainda permanecem alguns desafios, nomeadamente:

- i. Burocracia: Os processos administrativos complexos atrasam a criação de novas CER.
- ii. Falta de Sensibilização: Alguns cidadãos ainda desconhecem os benefícios das CER e do autoconsumo coletivo.
- iii. Financiamento Continuado: Apesar dos apoios iniciais, garantir a sustentabilidade financeira a longo prazo continua a ser um obstáculo para muitas comunidades.

2.3.4 Comparação com outros países da União Europeia

Portugal encontra-se entre os estados que adotaram medidas significativas para regulamentar e incentivar a criação de CER. Apesar de poder ser comparado com outros países da União Europeia, ainda há algumas diferenças que podem ser observadas:

- i. Liderança em Energia Renovável: Portugal destaca-se por ser um dos países com maior percentual de energia renovável na matriz energética, graças a políticas proativas e ao aproveitamento do seu potencial solar e eólico. A Dinamarca e Alemanha têm historicamente liderado na inovação tecnológica e na criação de sistemas de partilha de energia mais avançados.
- ii. Apoio às Comunidades Vulneráveis: Enquanto Portugal introduziu medidas fiscais e apoios financeiros, a Holanda e a Bélgica implementaram programas específicos para combater a pobreza energética através das CER, que permitem um acesso mais justo à energia limpa e barata.

2.4 Autoconsumo e o Enquadramento Legal

O autoconsumo refere-se à produção de energia elétrica para consumo próprio, ao utilizar fontes renováveis, como a solar fotovoltaica. Em Portugal, o conceito está legalmente enquadrado no Decreto-Lei n.º 162/2019 e posteriormente atualizado

pelo Decreto-Lei n.º 15/2022 [34], [35]. Este regime permite que os particulares, empresas e comunidades energéticas produzam a sua própria energia e reduzam a dependência da rede elétrica tradicional.

2.4.1 Tipos de Autoconsumo

- A. Autoconsumo individual: A energia é produzida e consumida por um único produtor-consumidor, geralmente em pequenas instalações residenciais ou empresariais.
- B. Autoconsumo coletivo: A energia produzida é partilhada entre vários consumidores, como acontece em edifícios residenciais ou comunidades locais.

2.4.2 Benefícios do Autoconsumo

- i. Ambientais: Reduz as emissões de gases com efeito de estufa ao privilegiar fontes renováveis e diminuir a dependência de combustíveis fósseis.
- ii. Económicos: Permite poupanças significativas na fatura de eletricidade e promove a independência energética.

2.4.3 Legislação e apoios

De acordo com a legislação portuguesa, produtores em regime de autoconsumo têm:

- i. Isenção de controlo prévio para pequenas instalações de autoconsumo (até 700 W);
- ii. Direito de injetar excedentes na rede elétrica e receber compensação financeira;
- iii. Apoios financeiros em programas como o PRR.

2.4.4 Estrutura Regulatória e Requisitos de Licenciamento em Portugal

Em Portugal, o licenciamento das CER é regulado pela Direção-Geral de Energia e Geologia (DGE) e varia conforme a capacidade instalada das unidades de produção. Consoante a capacidade instalada, o licenciamento das CER pode enquadrar-se nos seguintes tipos [36]:

- i. Isenção de controlo prévio: Aplicável a unidades com até 700W, desde que a energia excedente não seja injetada na rede pública;
- ii. Comunicação prévia: Exigida para instalações entre 700W e 30kW. As CER nesse nível são registadas na plataforma da DGE e podem injetar excedentes na rede;

- iii. Certificado de exploração e registo prévio: Necessário para instalações de 30kW a 1MW, com um processo mais detalhado e requisitos técnicos específicos;
- iv. Licença de produção e exploração: Requerida para CERs acima de 1MW, envolvendo análise detalhada dos impactos e articulação com o operador de rede.

Adicionalmente, a recente publicação do Decreto-Lei n.º 72/2022 trouxe regras específicas para instalações em áreas classificadas, como patrimónios históricos e zonas protegidas. Para garantir o respeito pelas normas ambientais e paisagísticos, é imperativo seguir alguns critérios:

- i. Avaliação de Impacto Ambiental (AIA): Os projetos devem ser submetidos a uma AIA obrigatória, e considerar impactos no ecossistema, flora, fauna e qualidade do solo;
- ii. Preservação do Património Cultural: Há necessidade de autorização da Direção-Geral do Património Cultural (DGPC) ou autoridades locais competentes, e garantir a preservação da estética e integridade de patrimónios históricos;
- iii. Planeamento territorial: Alinhamento com os Planos Diretores Municipais (PDM) e Planos Especiais de Ordenamento do Território (PEOT), com aprovação específica em áreas protegidas.
- iv. Critérios de paisagem: Integração paisagística adequada, e minimizar impactos visuais ao implementar medidas compensatórias, como barreiras vegetais ou reflorestamento.
- v. Conformidade com Zonas Protegidas: Respeito pelos limites de exploração definidos em regulamentos de parques naturais ou outras áreas classificadas.
- vi. Consulta Pública: Participação obrigatória das comunidades locais em consultas públicas antes da aprovação dos projetos.

2.5 Modelos de partilha de energia e conceito de proximidade

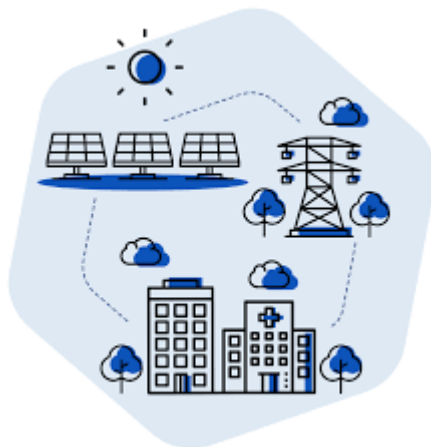


Figura 3 – Representação gráfica de uma CER [37].

Para garantir que a energia produzida pelas CER (Figura 3) seja utilizada pelos membros da comunidade, a regulamentação estabelece o conceito de proximidade, que define limites geográficos para a conexão entre a unidade de produção e o consumidor. Os limites variam de acordo com a tensão de conexão:

- A. Baixa Tensão (BT): Distância máxima de 2 km entre a unidade produtora e o consumidor, ambos ligados ao mesmo transformador.
- B. Média Tensão (MT): Distância de até 4 km, conectando consumidores a uma subestação comum.
- C. Alta e Muito Alta Tensão (AT/MAT): Distâncias máximas de 10 km e 20 km, respetivamente, com base na conexão à mesma subestação.

Os modelos de partilha de energia regulamentados pela ERSE incluem:

- i. Coeficientes Fixos: Definidos com base em períodos de pico e sazonalidade;
- ii. Coeficientes Proporcionais ao Consumo: Divisão proporcional ao consumo de cada membro, e promove equidade na partilha.

2.6 Perspetiva futurista e novas oportunidades

O futuro das CER apresenta-se promissor, com novos desafios e oportunidades que deverão moldar o setor energético em Portugal e na União Europeia. Algumas dessas perspetivas incluem:

- i. Meta Climática de 2050: Alcançar a neutralidade carbónica exigirá uma integração ainda maior das CER, juntamente com avanços em armazenamento energético e redes inteligentes-

- ii. Digitalização e Redes Inteligentes: A implementação de tecnologia de blockchain e IoT (Internet das Coisas) promete melhorar a gestão de energia, rastreabilidade e eficiência nas CER.
- iii. Apoio Financeiro: Fundos europeus como o *Horizon Europe* e o Mecanismo de Recuperação e Resiliência continuarão a desempenhar um papel crucial no financiamento de projetos inovadores de CER.

2.7 Conclusão

As CER emergem como um instrumento central na transição para um sistema energético mais sustentável, inclusivo e participativo. Ao longo deste capítulo, ficou evidente que as comunidades não representam apenas uma inovação tecnológica, mas também uma transformação social e económica ao promoverem o envolvimento ativo dos cidadãos, tornar mais fácil o acesso à energia renovável e contribuir para a mitigação da pobreza energética.

Historicamente, a evolução das CER reflete respostas a crises energéticas e ambientais, com experiências pioneiras em países como Dinamarca, Alemanha e Países Baixos, e culmina hoje num enquadramento jurídico sólido na União Europeia e em Portugal, através das diretivas RED II e RED III e do Decreto-Lei n.º 15/2022. O quadro legal garante não apenas a legitimidade das comunidades, mas também incentiva a sua expansão, apoiando a criação de modelos de autoconsumo coletivo, armazenamento energético e partilha local de energia. Além disso, as CER assumem um papel estratégico no contexto das cidades inteligentes e sustentáveis, funcionando como unidades energéticas locais que contribuem para a eficiência, resiliência e monitorização das redes urbanas, reforçando a ligação entre planeamento urbano, inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental.

3 ENERGIA SOLAR: A BASE PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE GLOBAL

A energia solar é amplamente reconhecida como uma das soluções mais importantes para enfrentar os desafios globais de energia e clima. É abundante, renovável e limpa, e destaca-se não apenas pela sua capacidade de diversificar as matrizes energéticas, mas também pelo seu papel central na mitigação das emissões de gases de efeito estufa.[41] Com os avanços tecnológicos contínuos e um declínio acentuado nos custos de produção, a energia solar tornou-se acessível a países em desenvolvimento e desenvolvidos, promovendo o seu crescimento como uma das principais fontes de energia do futuro [42].

3.1 História e Evolução da Energia Solar

A energia solar tem uma história longa e fascinante, que se estende desde os primórdios da civilização até o seu papel proeminente na transição energética atual. Desde os tempos mais antigos, o sol foi visto como uma fonte essencial de vida e calor, e foi reverenciado por diversas culturas e utilizado de maneira rudimentar para atender às necessidades humanas básicas. No Egito Antigo, por exemplo, o sol era adorado como a “divindade Rá”, e a sua energia era aproveitada para aquecer casas e secar alimentos [43]. Os egípcios utilizavam técnicas simples, mas eficazes, para captar o calor solar, como a construção de templos e habitações voltadas para o sol. De maneira semelhante, os gregos antigos valorizavam a orientação solar das suas construções, projetando casas que captavam a luz e o calor do sol durante o inverno e proporcionavam sombra durante o verão, um exemplo inicial de arquitetura solar passiva [41]. Os romanos, por sua vez, introduziram inovações como o uso de vidro para criar estufas que capturavam e retinham o calor do sol, permitindo o cultivo de plantas mesmo em climas frios.

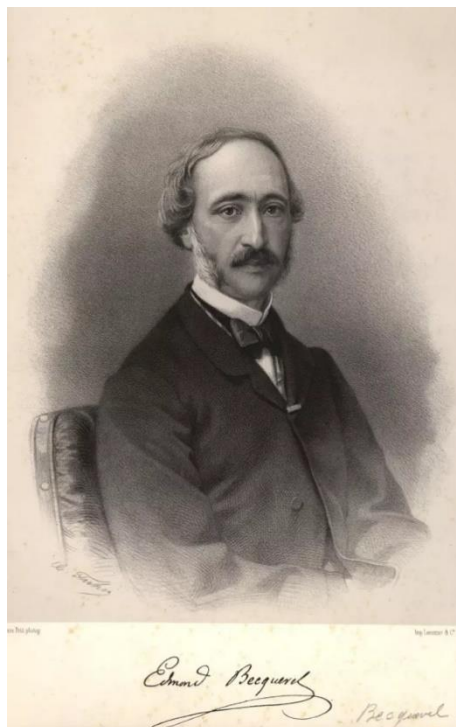


Figura 4 – Fotografia de Edmund Becquerel.

Embora essas civilizações antigas não possuíssem o conhecimento científico para compreender os mecanismos da energia solar, elas demonstraram uma profunda intuição sobre a sua importância e aplicabilidade. No entanto, foi apenas no século XIX que os avanços científicos começaram a lançar luz sobre os processos fundamentais que permitiriam o aproveitamento direto da luz solar para produzir eletricidade. Em 1839, o físico francês Edmond Becquerel, (Figura 4), fez uma descoberta que mudou o curso da história: o efeito fotovoltaico. Durante os ensaios, Becquerel observou que certos materiais produziam uma corrente elétrica quando expostos à luz solar e foi o marco inicial para o desenvolvimento das células solares modernas, embora ainda levasse décadas para que essa tecnologia se tornasse viável [44].

Outros cientistas deram continuidade ao trabalho de Becquerel nas décadas seguintes. Em 1873, Willoughby Smith descobriu que o selênio apresentava propriedades fotocondutivas, ou seja, a sua condutividade elétrica aumentava quando exposto à luz [41]. Poucos anos depois, em 1876, William Grylls Adams e Richard Day demonstraram que o selênio podia produzir eletricidade diretamente da luz solar, provando que o efeito fotovoltaico era viável. Esses avanços abriram caminho para a criação da primeira célula solar funcional, desenvolvida em 1883 por Charles Fritts, que utilizou uma camada fina de selênio revestida por ouro. Fritts criou um dispositivo capaz de converter a luz solar em eletricidade, embora a sua eficiência fosse inferior a 1%, o que limitava as suas aplicações práticas [41], [43].

No início do século XX, a energia solar ganhou um novo impulso graças ao trabalho de Albert Einstein, que em 1905 publicou uma teoria revolucionária sobre o efeito fotoelétrico. Explicou como os fótons da luz solar interagem com os elétrons

de materiais condutores, libertando-os e criando assim uma corrente elétrica. O trabalho não apenas rendeu a Einstein o Prémio Nobel de Física em 1921, mas também forneceu a base teórica para o desenvolvimento de células solares mais eficientes [42]. Apesar de todos esses avanços, a energia solar ainda era vista como uma curiosidade científica, sem aplicações práticas significativas.

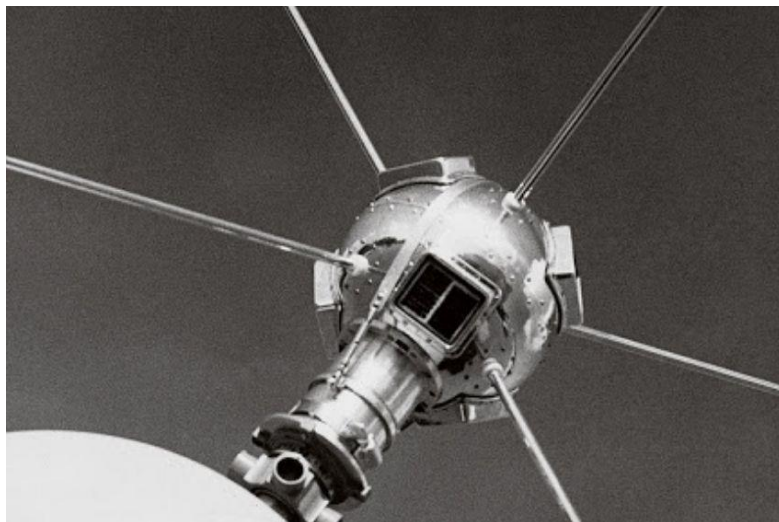


Figura 5 – Fotografia do Sastélite Vanguard [45].

A mudança começou a ocorrer na década de 1950, quando os Laboratórios Bell nos Estados Unidos desenvolveram a primeira célula solar de silício com uma eficiência de 6%. A inovação representou um salto tecnológico significativo, tornando a energia solar viável para aplicações práticas pela primeira vez [44], e não demorou para que essa tecnologia encontrasse um uso prático no setor espacial.

Em 1958, o satélite Vanguard 1 (Figura 5), tornou-se o primeiro a ser alimentado por células solares, demonstrando a confiabilidade e a durabilidade da tecnologia em condições extremas. A energia solar passou a ser rapidamente indispensável para a exploração espacial, e foi utilizada em satélites, sondas e estações espaciais [41], [43].

Nas décadas de 1970 e 1980, a energia solar ganhou destaque no cenário global devido à crise do petróleo de 1973 que expôs a vulnerabilidade das economias dependentes de combustíveis fósseis. Impulsionou a procura por fontes alternativas de energia e os governos de todo o mundo começaram a investir em pesquisas e subsídios para tecnologias solares. Durante esse período, surgiram os primeiros sistemas solares térmicos para uso residencial e os primeiros parques solares comerciais, embora em pequena escala [41]. A energia solar começou a ser vista como uma solução promissora para diversificar as matrizes energéticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

A partir da década de 1990, a energia solar passou a ser utilizada em larga escala, graças aos avanços tecnológicos e à queda nos custos de produção. A China emergiu como o maior produtor mundial de painéis solares, ao reduzir significativamente os preços globais e tornar a energia solar acessível a países em desenvolvimento. Na

Europa, países como Alemanha e Espanha lideraram a adoção da energia solar, ao introduzir políticas como tarifas *feed-in*, que garantiam preços fixos para a eletricidade produzida por sistemas solares.[42] Durante esse período, foram construídos grandes parques solares, como a central de Olmedilla, na Espanha, que destacou o potencial da energia solar para atender à necessidade em larga escala.

No século XXI, a energia solar testou uma verdadeira revolução, e entre 2010 e 2020, o custo dos módulos fotovoltaicos caiu mais de 90%, e tornou a energia solar uma das fontes de eletricidade mais baratas em várias regiões do mundo. As inovações tecnológicas, como células solares de *perovskita* e painéis bifaciais, aumentaram ainda mais a eficiência e a competitividade da tecnologia.

Hoje, a energia solar é uma das principais ferramentas para enfrentar as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade energética.

3.2 A Expansão Global da Energia Solar

A energia solar tem-se consolidado como um dos pilares da transição energética mundial. Apesar de em 2022 representar apenas cerca de 3,6% da produção global de eletricidade, a sua capacidade instalada atingiu mais de 1.000 GW, tornando-se a segunda fonte renovável mais utilizada, imediatamente após a hídrica. Entre 2021 e 2022, o crescimento foi de 22%, liderado sobretudo pela China, que sozinha representa 37% da capacidade solar mundial, seguida pelos EUA, Japão, Alemanha e Índia [46].

Este crescimento acelerado é o resultado de uma dinâmica virtuosa: quanto maior a difusão da tecnologia, maiores as reduções de custo o que, por sua vez, amplia a competitividade e atrai novos investimentos. O custo nivelado da eletricidade (LCOE) solar caiu quase 90% entre 2010 e 2022, atingindo valores competitivos em comparação com os combustíveis fósseis [46].

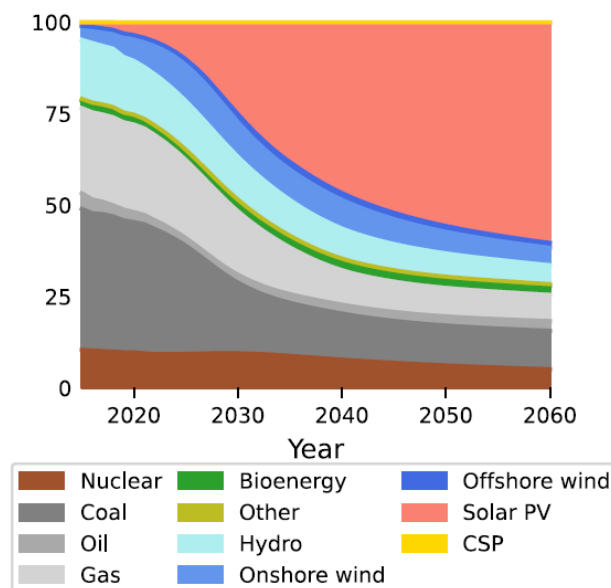


Figura 6 - Participação global das diferentes fontes de energia na produção de eletricidade [47].

Segundo projeções recentes, o setor poderá ter já ultrapassado um ponto de não retorno “*solar tipping point*”, no qual a energia solar passará a dominar os mercados globais de eletricidade, mesmo sem políticas climáticas adicionais. Estima-se que, até 2050, a energia solar fotovoltaica possa responder por mais de 25% da eletricidade mundial, podendo inclusive atingir 50–60% em alguns cenários (Figura 6) [46], [47].

Contudo, esta expansão enfrenta várias barreiras estruturais. Entre elas destacam-se a integração na rede elétrica e a estabilidade do sistema, devido à intermitência solar, bem como a necessidade de financiamento acessível em países em desenvolvimento, onde o potencial solar é elevado mas o capital disponível é limitado. Acrescem ainda as restrições nas cadeias de abastecimento, sobretudo na disponibilidade de minerais críticos como lítio, cobre e terras raras, e as resistências políticas e sociais em regiões dependentes dos combustíveis fósseis [47].

No entanto, apesar destes desafios, a trajetória global aponta para uma transformação energética irreversível. A energia solar, pela sua abundância, modularidade e viabilidade económica crescente, tende a tornar-se a fonte dominante da nova matriz elétrica mundial [46], [47].

3.3 A Evolução da Energia Solar em Portugal

Portugal, com o seu clima mediterrânico e uma das maiores taxas de radiação solar da Europa, apresenta condições privilegiadas para a utilização da energia solar. O potencial é particularmente elevado no sul do país, onde a incidência solar anual ultrapassa os 1.750 kWh/m², tornando a energia fotovoltaica uma alternativa competitiva e sustentável [48].

No início dos anos 2000, a presença da energia solar no sistema elétrico nacional era praticamente nula. A matriz energética dependia fortemente da hídrica e dos combustíveis fósseis. O ponto de viragem ocorreu em 2006, com a introdução das tarifas *feed-in*, que criaram condições para os primeiros investimentos significativos. O projeto mais notável foi o da Central Solar de Amareleja (2008), que, à época, se destacava como uma das maiores centrais solares da Europa, com capacidade de 46 MegaWatts (MW) [48].

A década de 2010 marcou o início da expansão acelerada. Entre 2010 e 2020, a capacidade instalada passou de cerca de 134 MW para mais de 1 GigaWatt (GW), marcando o início da expansão acelerada. Este crescimento foi sustentado pelos leilões solares, pelo enquadramento regulatório e pela crescente adesão ao autoconsumo, que democratizou a geração descentralizada de eletricidade [48].

Nos últimos anos, Portugal consolidou-se como um dos mercados mais atrativos para a energia solar. O primeiro leilão solar nacional, realizado em 2019, alcançou preços recorde de 0,0146 €/kWh, sinalizando a forte competitividade da tecnologia. Em 2022, o país registou um dos maiores crescimentos percentuais da Europa, com a instalação de 2,5 GW adicionais, traduzindo-se num aumento de 250% da capacidade solar em apenas um ano.[48]

Atualmente, mais de 80% da eletricidade produzida em Portugal Continental provém de fontes renováveis, sendo a hídrica (cerca de 32%) e a eólica (cerca de 31%) as principais contribuintes. A energia solar já representa cerca de 11% do mix elétrico e continua a crescer de forma consistente. Em contrapartida, os combustíveis fósseis reduziram para apenas 11%, com o abandono completo do carvão em 2021 [48].

Esta evolução trouxe benefícios ambientais, económicos e sociais, nomeadamente: a redução das emissões de gases de efeito estufa, a menor dependência energética do exterior, a criação de emprego qualificado e novas oportunidades de investimento. Contudo, persistem desafios, como a necessidade de reforçar a flexibilidade da rede elétrica, investir em armazenamento e preparar soluções de reciclagem para os painéis no fim de vida [48].

O Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030) prevê que Portugal atinja mais de 9 GW de capacidade instalada solar até 2030, consolidando a sua liderança europeia no setor e reforçando o compromisso com a neutralidade carbónica.[48], [49]

3.4 Unidades de produção fotovoltaica

A instalação de uma unidade de produção solar fotovoltaica em uma habitação baseia-se no esquema de funcionamento ilustrado na Figura 7. O sistema de autoconsumo é estruturado em torno de um gerador fotovoltaico composto por múltiplos módulos interligados, que têm a capacidade de captar a energia do sol e

convertê-la em eletricidade. Este sistema utiliza a energia solar de forma eficiente para atender às necessidades energéticas da residência.

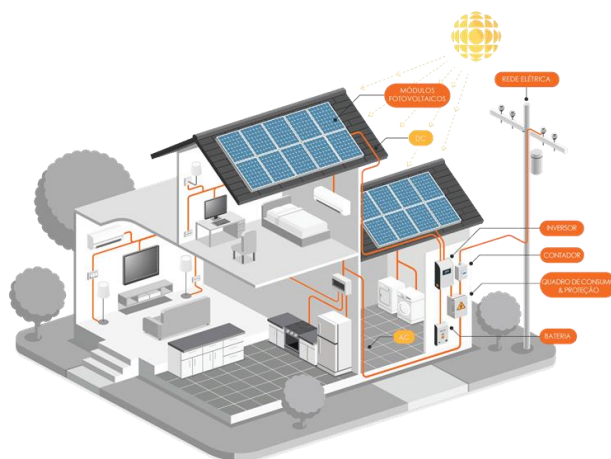


Figura 7 - Princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico[50]

Os módulos fotovoltaicos são formados por células solares que produzem corrente contínua (DC) proporcional à intensidade da radiação solar que recebem. As células solares utilizam materiais semicondutores, como o silício, que produzem eletricidade quando expostos à luz solar por meio do efeito fotovoltaico.[43] A energia produzida em corrente contínua é então direcionada para um dispositivo essencial chamado inversor solar. O equipamento converte a corrente contínua em corrente alternada (AC), compatível com a frequência e a tensão da rede elétrica convencional (50 Hertz (Hz) e 230 Volts (V) na Europa) [41].

A energia elétrica em corrente alternada é distribuída através de um quadro de distribuição elétrica, sendo consumida diretamente pelos aparelhos da habitação. Caso o sistema inclua um componente de armazenamento, o excedente de energia gerada é direcionado para baterias, que permitem o uso dessa energia armazenada em períodos de baixa produção solar, como à noite ou em dias nublados, aumentando a autossuficiência energética do sistema [41].

Além disso, é comum que o sistema seja integrado com um contador bidirecional, onde regista tanto a energia consumida da rede elétrica quanto a energia excedente injetada de volta na rede. Durante períodos em que a produção solar é maior que o consumo doméstico, o excedente é enviado para a rede elétrica, como ilustrado na Figura 8, onde permite que os consumidores sejam compensados por meio de mecanismos como tarifas *feed-in* ou créditos energéticos [41].

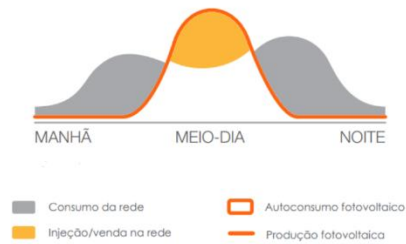


Figura 8 - Consumo e produção ao longo do dia [50].

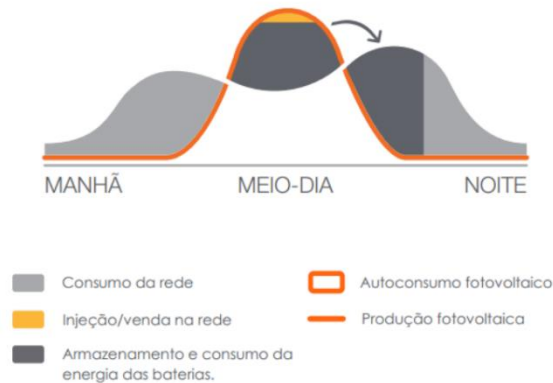


Figura 9 - Consumo e produção ao longo do dia, com baterias [50].

A Figura 9 ilustra a vantagem de utilizar baterias no sistema. Com o armazenamento de energia, o consumidor reduz ainda mais a dependência da rede elétrica, uma vez que o excedente produzido pode ser utilizado em períodos de maior demanda. Isso melhora a eficiência energética do sistema e pode resultar em economia significativa na fatura de energia.

3.5 Constituição de um sistema fotovoltaico

Como foi descrito anteriormente, o processo de instalação de um sistema fotovoltaico tem várias fases e requisitos distintos. A Figura 10 apresenta um esquema simplificado do funcionamento de um sistema fotovoltaico com armazenamento, mostrando o percurso da energia desde os painéis solares até ao consumo e à rede elétrica. A energia produzida em corrente contínua pelos painéis passa por proteções DC e segue para o inversor, que a converte em corrente alternada, gerindo também o carregamento das baterias. Após a conversão, a energia atravessa proteções AC e um contador que faz a interface com a instalação elétrica do edifício. A energia pode então ser utilizada nos consumos internos ou, se houver excedente, ser injetada na rede elétrica; quando a produção é insuficiente, o edifício importa energia da rede.



Figura 10 - Processo de instalação de um sistema fotovoltaico [51].

A instalação de um sistema fotovoltaico envolve a integração de diversos componentes, não apenas com o intuito de produzir energia elétrica a partir da radiação solar, mas também de permitir a utilização segura dessa energia nas instalações elétricas residenciais (Figura 11). Para além disso, é fundamental assegurar a monitorização do desempenho global do sistema, tanto no que concerne à produção energética, quanto ao consumo [51].

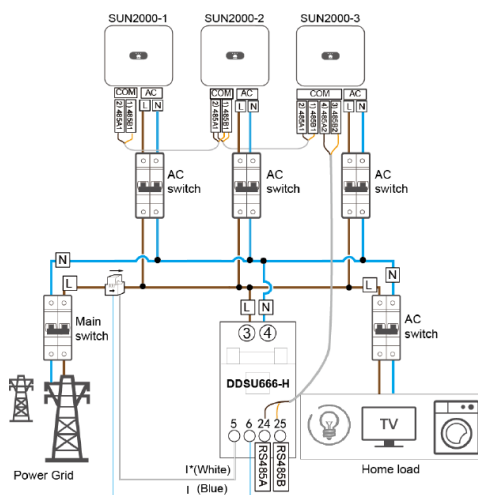


Figura 11 – Esquema de ligação do sistema fotovoltaico [52].

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos por vários elementos, nomeadamente:

3.5.1 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas, normalmente constituídas por silício, são a base tecnológica responsável pela conversão da radiação solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. Estas podem ser essencialmente de dois tipos (Figura 12):

- Células de silício policristalino:** São formadas por múltiplos cristais de silício, apresentando uma aparência semelhante a vidro estilhaçado, e tradicionalmente, possuem rendimentos mais modestos em comparação com as monocristalinas, contudo o seu custo é mais reduzido. É um fator que

aliado às constantes melhorias tecnológicas no fabrico, tem tornado as células policristalinas cada vez mais atrativas e eficientes [53].

- b) **Células de silício monocristalino:** São constituídas por um único cristal de silício de elevada pureza, e apresentam eficiências superiores. Contudo, o seu processo de produção é mais complexo e dispendioso. Apesar de ainda serem consideradas as mais eficientes, a diferença de desempenho entre as células monocristalinas e policristalinas é, atualmente, bastante reduzida [53].

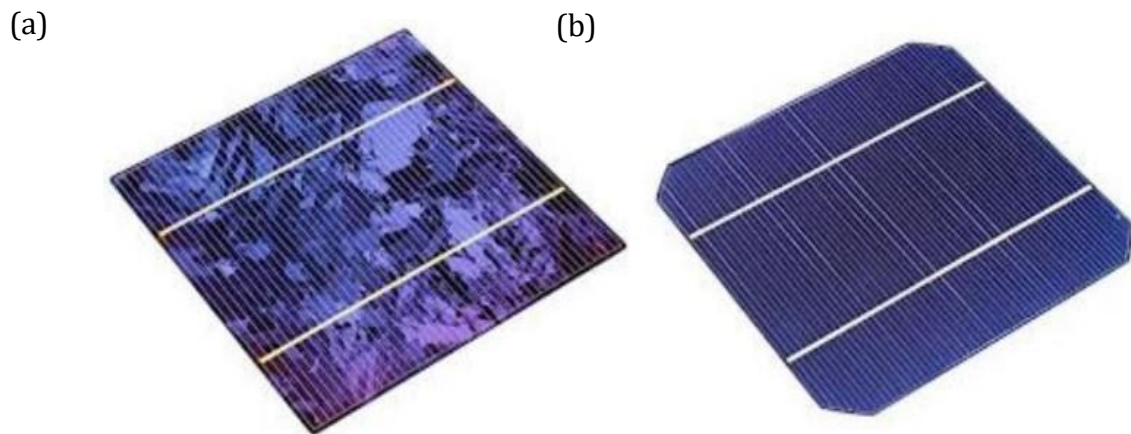


Figura 12 - Células Fotovoltaicas de Silício Policristalino (a) e monocristalino(b) [53].

3.5.2 Painel fotovoltaico

Um painel fotovoltaico resulta da junção de várias células fotovoltaicas interligadas, encapsuladas e protegidas por materiais específicos, assegurando a sua durabilidade e desempenho ao longo de toda a vida útil (Figura 13) [54]. As células, com uma espessura aproximada de 185 micrómetros, representam cerca de 60% do custo total do painel, dada a utilização de silício (tendencialmente monocristalino) de alta qualidade. Outros componentes do painel garantem a sua proteção e longevidade, nomeadamente:

- a) **Películas de EVA:** Funcionam como isolantes térmicos transparentes, protegendo as células contra vibrações, impactos e humidade, sem prejudicar a transmissão da radiação solar [54].
- b) **Caixa de junção:** Agrupa as ligações elétricas internas do painel, permitindo a interligação das sequências de células (*strings*) que, ligadas em série e paralelo, asseguram a tensão e corrente adequadas ao sistema. A energia produzida sai em corrente contínua (DC) através de cabos positivo e negativo, conectando-se a outras caixas de junção e, posteriormente, ao inversor [54].

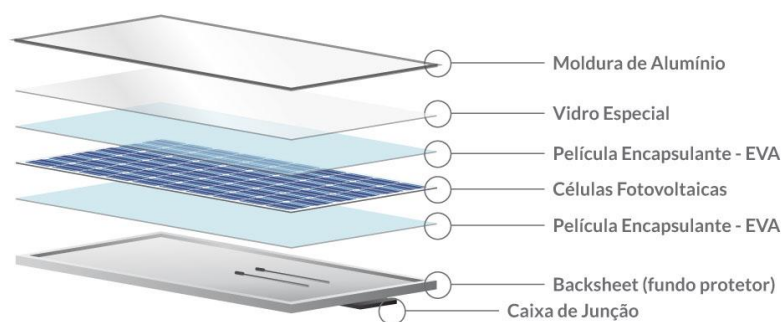


Figura 13 - Componentes do painel fotovoltaico [54].

A instalação de painéis fotovoltaicos em sistemas fixos deve ter em conta a orientação, preferencialmente voltados a sul no hemisfério norte, e a inclinação cerca de 30° em relação ao plano horizontal, de modo a maximizar a captação de radiação solar. Em sistemas mais avançados, podem ser utilizados sistemas rotativos, equipamentos capazes de ajustar continuamente a posição dos painéis, otimizando a produção elétrica [54].

3.5.3 Inversores

O inversor é o componente central do sistema fotovoltaico, responsável pela conversão da energia DC produzida pelos painéis em energia AC, compatível com a rede elétrica e com os equipamentos domésticos (Figura 14). Além da conversão de corrente, o inversor pode desempenhar outras funções:

- a) **Otimização da produção:** Inclui a função de procura do ponto de potência máxima (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), garantindo o máximo aproveitamento da radiação solar disponível.
- b) **Monitorização e segurança:** Pode incluir conectividade para monitorização remota do desempenho, bem como proteções contra sobretensão e integração com sistemas de armazenamento (baterias).



Figura 14 – Inversores

Na Figura 15 está representado o esquema do inversor fotovoltaico.

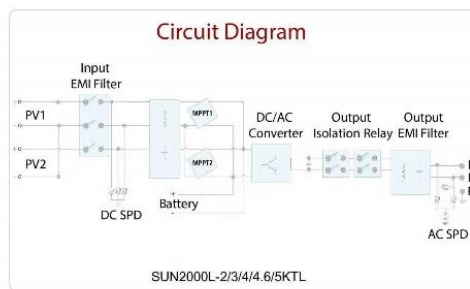


Figura 15 – Esquema de um inversor.

O diagrama mostra um sistema fotovoltaico com entrada de duas strings que estão protegidas antes de chegar ao inversor. A energia passa por controladores MPPT e é armazenada numa bateria, depois convertida de DC para AC através de um inversor, passando por um quadro de isolamento com proteção AC antes da ligação à rede elétrica.

3.5.4 Contador de energia

O contador é utilizado para registar a quantidade de energia elétrica consumida e/ou produzida num determinado local, geralmente em kWh ou MWh. No caso de sistemas fotovoltaicos com potência instalada superior a 4 kW, a legislação nacional [34] exige a instalação de um contador de produção, viabilizando a venda do excedente à rede e permitindo o controlo da energia injetada.

3.5.5 Smart meter (analisador da rede)

O analisador da rede (*Smart Meter*) (Figura 16) é um dispositivo eletrónico que efetua leituras em tempo real do consumo e da produção de energia, transmitindo esses dados a intervalos regulares através de redes de comunicação. A monitorização detalhada e contínua permite uma gestão mais eficiente do consumo energético.



Figura 16 – Smart meter

3.5.6 Transformadores de intensidade (TI)

Os transformadores de intensidade reduzem a corrente elétrica medida, protegendo assim os equipamentos de monitorização e de contagem. Ao diminuir a corrente para valores adequados à leitura, estes componentes contribuem para a segurança e precisão da análise do sistema.

3.5.7 Quadros DC e AC

Numa instalação fotovoltaica, são usados quadros DC e AC, assegurando a proteção e segurança de todo o sistema:

- a) **Quadro DC:** É instalado entre os painéis e o inversor, responsável por proteger a linha de corrente contínua. Caso ocorram curto-circuitos, este quadro impede que ocorra algum dano ao inversor, salvaguardando a longevidade dos equipamentos.

- b) **Quadro AC:** Está localizado após o inversor, e possibilita o isolamento dos equipamentos de produção em relação à instalação de consumo, é incorporado com um descarregador, um dispositivo de segurança cuja função é proteger a instalação contra sobretensões, sobrecargas ou curto-circuitos, que garante a integridade da rede elétrica do utilizador.

Na Figura 17 seguinte está representada a zona técnica, devidamente ligada, com os equipamentos mencionados acima.

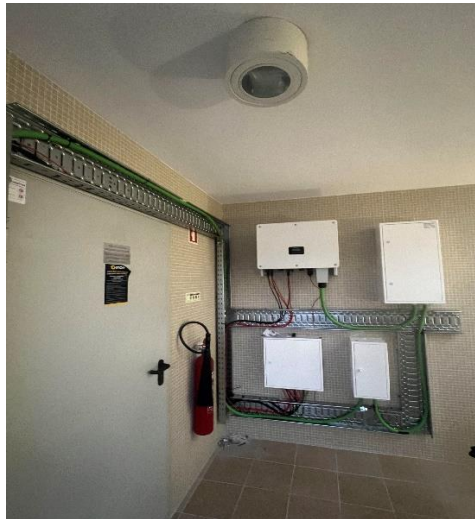


Figura 17 – Zona técnica

3.6 Ferramenta de simulação de sistemas fotovoltaicos: PVSOL

O PVSOL (Figura 18) é a ferramenta principal de simulação porque integra num único ambiente, o desenho do sistema fotovoltaico, a caracterização do local e a avaliação do desempenho ao longo do ciclo de vida. O software permite modelar geometrias em 2D/3D, calcular sombreamentos com base na trajetória solar e refletir, de forma explícita, as perdas reais de operação como efeitos térmicos nos módulos, cablagem, seguimento do ponto de máxima potência, eficiência dos inversores e indisponibilidades. O PVSOL trabalha com dados meteorológicos típicos do local, tais como a radiação, temperatura e quando aplicável vento. A partir destas entradas produz indicadores energéticos como a produção, autoconsumo, injeção, autonomia e rendimento específico, e económicos como LCOE, *payback* e a Taxa Interna de Retorno (TIR), bem como métricas de qualidade como a Performance Ratio (PR) [38].

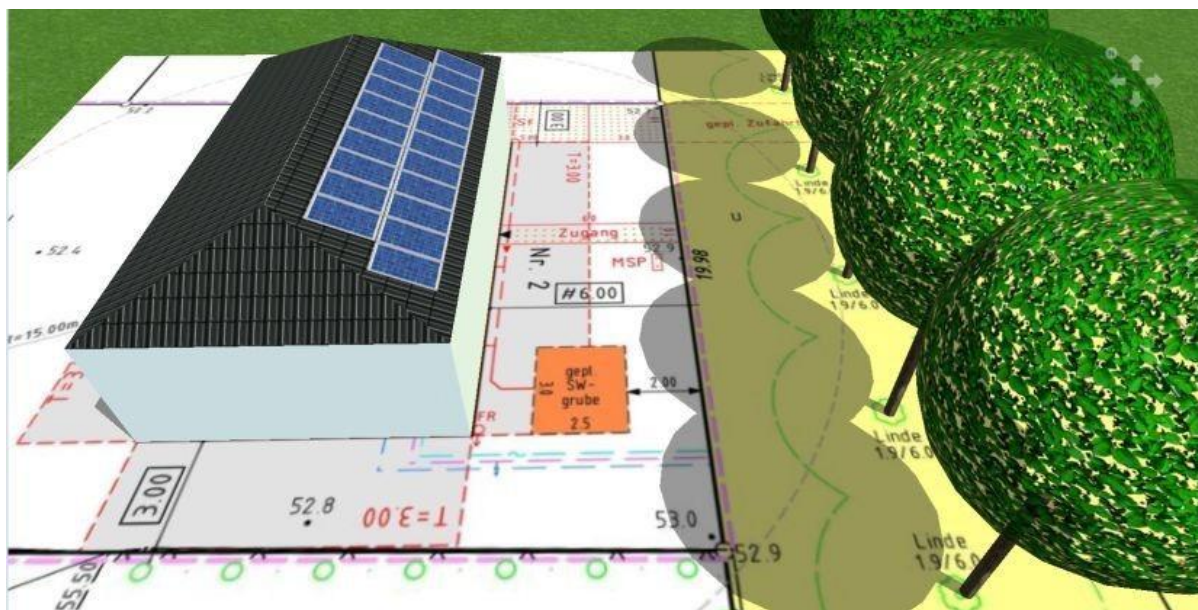


Figura 18 – Representação gráfica da área de trabalho do programa PVSOL [39].

A biblioteca interna de equipamentos assegura o dimensionamento elétrico correto, a compatibilidade módulo-*string*-inversor, limites de tensão e corrente, enquanto as opções de tarifário e de perfis de carga aproximam a simulação aos padrões reais de consumo.

Para garantir clareza e comparabilidade, adotam-se unidades e convenções coerentes com a prática do setor. A potência nominal é expressa em kWp (quilowatt-pico), distinguindo-se da potência elétrica instantânea, em kW, que descreve o valor operativo em cada momento. A energia é apresentada em kWh para períodos agregados, constituindo a base para consumos, produção e balanços. Para comparar sistemas com diferentes dimensionamentos, usa-se o rendimento específico em kWh/kWp, que traduz a energia anual por kWp instalado. Os dados climáticos seguem a mesma lógica, ou seja a irradiância é tratada como grandeza instantânea em W/m² e a irradiação como grandeza acumulada em kWh/m². Nos indicadores relativos a operação e qualidade, utilizam-se percentagens quando pertinente, por exemplo, Taxa de Autoconsumo, Autonomia e PR. As emissões evitadas são reportadas em kg CO₂/ano ou t CO₂/ano, consoante a escala e o fator de emissão adotado. Nos aspetos económico-financeiros, os montantes são expressos em euros (€) e os custos de energia em €/kWh [40].

3.7 Sistemas Fotovoltaicos: Benefícios, Desafios e Perspetivas futuras

Os sistemas fotovoltaicos têm vindo a desempenhar um papel cada vez mais relevante no panorama energético global. Com a crescente necessidade de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e a procura por fontes de energia mais sustentáveis, os sistemas fotovoltaicos apresentam uma solução promissora.

Os benefícios associados aos sistemas fotovoltaicos são diversos e abrangem áreas como a sustentabilidade ambiental, a economia e a segurança energética. Primeiramente, a energia solar é uma fonte renovável e inesgotável, o que significa que, ao contrário dos combustíveis fósseis, não será esgotada ao longo do tempo. Além disso, a produção de eletricidade a partir de painéis fotovoltaicos é limpa, pois não emite emissões de gases de efeito estufa durante a sua operação, e contribui significativamente para a redução da pegada de carbono.

Outro benefício é a autonomia e independência energética que os sistemas fotovoltaicos proporcionam. As comunidades, empresas e indivíduos que adotam esta tecnologia podem reduzir a sua dependência de redes elétricas tradicionais e de fornecedores de energia, o que é particularmente vantajoso em regiões remotas ou com infraestruturas energéticas limitadas.

A instalação de sistemas fotovoltaicos pode resultar em economias significativas ao longo do tempo. Apesar do elevado investimento inicial, os custos de operação e manutenção são relativamente baixos, e os utilizadores podem beneficiar de reduções nas contas de eletricidade. Inclusive, os avanços tecnológicos e a crescente concorrência no mercado têm contribuído para a redução do custo dos equipamentos fotovoltaicos, tornando-os mais acessíveis.[43] Também oferecem flexibilidade e escalabilidade, e podem ser implementados em diferentes escalas, desde pequenos sistemas para residências até grandes centrais solares que fornecem eletricidade a milhares de pessoas, o que torna uma opção viável para diferentes contextos e necessidades.

No entanto, apesar dos inúmeros benefícios, estes sistemas enfrentam vários desafios e limitações que precisam de ser superados para que o seu potencial seja plenamente aproveitado. Um dos principais desafios é a intermitência da energia solar. Como a produção de energia depende da radiação solar, há variações significativas na produção ao longo do dia e entre estações, e os períodos de baixa luminosidade, como dias nublados ou meses de inverno, podem reduzir consideravelmente a eficiência do sistema.

A necessidade de armazenamento de energia é outra limitação crítica, e para superar a intermitência, muitas instalações fotovoltaicas dependem de sistemas de baterias, que ainda apresentam custos elevados e limitações tecnológicas, como capacidade e durabilidade [55]. Além disso, o impacto ambiental associado à produção e ao descarte de baterias é uma preocupação crescente.

A integração dos sistemas fotovoltaicos na rede elétrica também representa um desafio, como as redes elétricas tradicionais podem não estar preparadas para lidar com a natureza descentralizada e intermitente da energia solar, exigindo investimentos significativos em infraestruturas e sistemas de gestão de energia [42].

No que diz respeito à produção dos painéis fotovoltaicos, há preocupações ambientais relacionadas à extração de matérias-primas, como o silício, e ao descarte de equipamentos ao final da sua vida útil, que pode originar um impacto ambiental significativo, ao reduzir parte dos benefícios ecológicos da tecnologia.

As perspetivas futuras para os sistemas fotovoltaicos são promissoras, especialmente à medida que os avanços tecnológicos e as mudanças políticas e sociais promovem a sua adoção. Uma das principais áreas de desenvolvimento é a melhoria na eficiência dos painéis solares. As tecnologias emergentes, como as células solares de perovskita, têm demonstrado grande potencial para aumentar significativamente a eficiência da conversão de energia e reduzir os custos de produção, e já alcançaram eficiências superiores a 25% em laboratório, aproximando-se das células de silício tradicionais [57], [58].

As tecnologias complementares como redes inteligentes (*smart grids*) e sistemas de gestão de energia estão a ser desenvolvidas para otimizar a integração dos sistemas fotovoltaicos na rede elétrica, que permitem uma melhor monitorização, distribuição e armazenamento da energia, tornando o sistema mais eficiente, resiliente e sustentável [61].

É esperado um aumento no apoio à adoção de energia solar, através de políticas de incentivo que contribuem para tornar os sistemas fotovoltaicos mais acessíveis à população em geral. Os compromissos internacionais para reduzir as emissões de carbono, como o Acordo de Paris, continuam a impulsionar o investimento em tecnologias solares [62], [63].

Projeta-se que, até 2050 (Figura 19), a energia solar represente mais de 25% da eletricidade mundial, e mais de 50% em alguns cenários, assumindo-se como a espinha dorsal de um sistema energético limpo e sustentável [64].

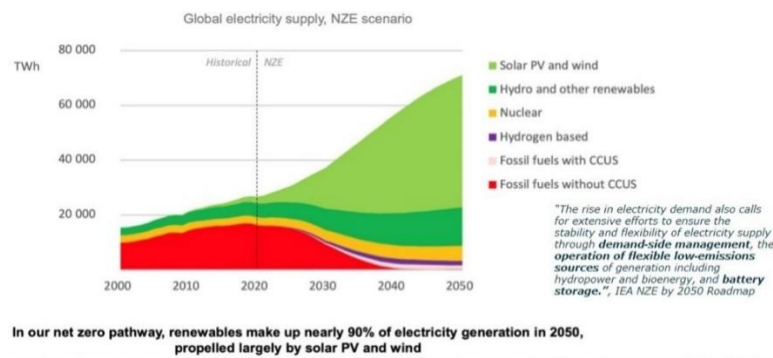


Figura 19 – Projeção da oferta global de eletricidade até 2050 [65].

3.8 Conclusões

A energia solar afirma-se, ao longo da sua evolução histórica e tecnológica, como um dos principais pilares da transição energética e da sustentabilidade global. Desde as primeiras utilizações pelas civilizações antigas, passando pela descoberta fundamental do efeito fotovoltaico no século XIX e pelos avanços decisivos do século XX, a energia solar percorreu um caminho que a transformou de curiosidade científica em tecnologia relevante e profícua. A queda acentuada dos custos, a melhoria contínua da eficiência dos sistemas e a crescente competitividade face às

fontes fósseis consolidaram o seu papel estratégico no panorama energético mundial.

A expansão global da energia solar evidencia uma tendência irreversível: os países têm vindo a aumentar substancialmente a capacidade instalada, impulsionados por políticas públicas, metas climáticas e, sobretudo, pela atratividade económica da tecnologia. Embora persistam desafios como a intermitência, as limitações no armazenamento, as necessidades de reforço das redes elétricas e a dependência de matérias-primas críticas, o setor apresenta soluções tecnológicas emergentes que apontam para um futuro mais eficiente, flexível e resiliente.

Portugal destaca-se como um caso de sucesso na adoção da energia solar, beneficiando de condições naturais excecionais e de políticas públicas que aceleraram a introdução dos sistemas fotovoltaicos no sistema elétrico nacional. Atualmente, o país está entre os líderes europeus, com uma trajetória de crescimento sustentado, marcada pela democratização do autoconsumo, pela redução da dependência energética externa e pela crescente competitividade dos projetos solares de grande escala.

Os sistemas fotovoltaicos, detalhados ao longo do capítulo, revelam-se como soluções robustas, adaptáveis e capazes de gerar benefícios económicos, ambientais e sociais. Contudo, o seu desenvolvimento carece de uma abordagem integrada que inclua inovação tecnológica, regulamentação eficiente e estratégias de economia circular que assegurem um ciclo de vida sustentável, especialmente na gestão de baterias e na reciclagem de painéis.

Deste modo, destaca-se a utilização da energia solar como uma tecnologia-chave para enfrentar os desafios climáticos do século XXI. De acordo com as projeções internacionais, que apontam para um contributo superior a 25% da eletricidade mundial até 2050, destaca-se o potencial técnico da energia solar, como também a sua importância estruturante na construção de um sistema energético mais limpo.

4 DESENVOLVIMENTO DE PROJETO E DISCUSSÃO: METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO

4.1 Metodologia

O presente capítulo aplica ao caso real o enquadramento teórico anteriormente desenvolvido, demonstrando de forma prática a implementação de sistemas fotovoltaicos em três estabelecimentos de ensino do concelho de Coimbra. A análise visa não apenas caracterizar os consumos e a produção solar prevista, mas também avaliar a mais-valia da constituição de uma CER.

Os subcapítulos seguintes apresentam o desenho metodológico, a técnica de recolha de dados e o processo de simulação que sustentam a análise técnica.

4.1.1 Enquadramento

O método usado nesta investigação teve como objetivo garantir que o estudo fosse sólido e que houvesse uma ligação clara entre a teoria e a prática. O trabalho seguiu uma abordagem de caso de estudo, focada num grupo de escolas, escolhidas de forma intencional por apresentarem padrões de consumo de energia diferentes, mas complementares.

Primeiro, a escolha das escolas baseou-se no facto de serem elegíveis para fazer parte de uma CER, segundo a legislação portuguesa, tendo em conta a proximidade geográfica e a ligação à rede elétrica. Depois de confirmados os locais de estudo, a metodologia avançou com uma caracterização detalhada do consumo de energia e das condições das infraestruturas de cada escola. A seguir, foram descritos os procedimentos de recolha de dados e as ferramentas de simulação usadas, com destaque para o PVSOL.

A investigação identifica e explica os principais indicadores usados na análise do desempenho, como a energia produzida, a taxa de autoconsumo, a dependência da rede elétrica, a redução das emissões de CO₂ e os fatores económicos, como o tempo de retorno do investimento e a poupança anual.

Por fim, o processo metodológico termina com uma análise comparativa entre dois cenários:

- Cenário A: um sistema de autoconsumo individual, instalado em cada escola;
- Cenário B: um modelo colaborativo, onde as escolas partilham a energia dentro de uma CER.

4.1.2 Seleção das escolas e fundamentação do caso

A seleção das três escolas teve por base critérios pedagógicos e técnicos, de forma a garantir que o caso de estudo fosse representativo e exequível. As escolas escolhidas foram o Conservatório de Música de Coimbra, a Escola Básica Norton de Matos e a Escola Básica Vale das Flores e Jardim de Infância.

As instituições foram escolhidas pelo seu papel de destaque na comunidade e pela sua capacidade de representar diferentes realidades dentro do contexto escolar. O Conservatório de Música de Coimbra é uma escola de referência, frequentada por alunos provenientes de várias zonas da região, com atividades prolongadas ao longo do dia e um perfil de consumo energético elevado, que resulta da utilização de equipamentos de iluminação para espetáculos, instrumentos elétricos, sistemas de som e climatização, que funcionam muitas vezes durante várias horas seguidas.

As duas escolas básicas, por outro lado, representam infraestruturas públicas mais convencionais, com um consumo moderado e regular, associado às atividades letivas, administrativas e à utilização pontual dos sistemas de climatização. Os seus perfis de carga variam consoante o horário escolar e as condições sazonais, nomeadamente a temperatura ambiente.

A diferença entre os perfis de consumo das três escolas foi um dos principais fatores que justificou a sua escolha. Outro fator determinante foi a proximidade geográfica entre as três escolas, que se encontram dentro do mesmo contexto urbano de Coimbra. Esta característica cumpre os requisitos legais estabelecidos para a criação de uma CER, previstos no Decreto-Lei n.º 15/2022, que exige que os participantes estejam fisicamente ligados à mesma rede elétrica e dentro de um raio de proximidade definido. Assim, a localização das escolas torna viável e tecnicamente justificável a criação de uma CER, permitindo a partilha de energia e a implementação do autoconsumo coletivo.

4.1.3 Localização e raio de proximidade

As três escolas estudadas localizam-se no concelho de Coimbra, uma cidade com uma forte tradição no ensino e que, nos últimos anos, tem apostado cada vez mais em políticas de eficiência energética e sustentabilidade. As instituições selecionadas foram escolhidas com base em critérios de representatividade, diversidade funcional e proximidade geográfica.

De acordo com a legislação portuguesa em vigor, as comunidades de energia devem estar situadas dentro de um mesmo perímetro geográfico, de modo a possibilitar a partilha da eletricidade produzida localmente, reduzindo perdas de energia e assegurando uma maior eficiência na rede elétrica. No caso em análise, as três escolas encontram-se a uma distância entre cerca de 600 e 1200 metros umas das outras, o que cumpre plenamente os requisitos técnicos definidos para a criação de uma pequena comunidade energética. Esta proximidade física permite que a

eletricidade produzida por qualquer uma das escolas possa ser partilhada com as restantes, desde que estejam ligadas através de uma rede de baixa tensão comum.

A escolha destas instituições não se baseou apenas na sua localização, mas também no seu perfil de utilização e consumo energético. As três escolas apresentam padrões de consumo diferentes, ajustados aos seus horários de funcionamento e ao tipo de atividades que realizam, o que cria uma complementaridade energética benéfica. O Conservatório de Música de Coimbra, por exemplo, regista o maior pico de consumo ao final da tarde, quando decorrem as aulas de prática musical e os ensaios. Já as escolas básicas Norton de Matos e Vale das Flores concentram a sua atividade no período diurno, com consumo mais acentuado durante o horário escolar.

4.1.4 Dados e fontes

A análise realizada neste estudo baseou-se em duas fontes principais de informação. A primeira corresponde aos registos de consumo anual de eletricidade das três escolas, relativos aos anos de 2023 e 2024, disponibilizados em formato Excel pela Câmara Municipal de Coimbra, que permitiu identificar com precisão as necessidades energéticas de cada estabelecimento de ensino e compreender as suas variações ao longo do tempo.

A segunda fonte foi constituída pelos relatórios técnicos criados no software PVSOL, utilizados após o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos propostos para cada escola. Os relatórios forneceram informação detalhada sobre a produção anual prevista, e a combinação destas duas fontes de dados permitiu desenvolver uma análise completa, integrando os consumos reais com os resultados simulados, garantindo maior rigor e consistência na avaliação dos cenários estudados.

4.1.5 Ferramenta de simulação – PVSOL

O software PVSOL foi utilizado como ferramenta principal de simulação e modelação dos sistemas fotovoltaicos. A escolha desta aplicação deve-se à sua fiabilidade e precisão reconhecidas na análise de sistemas solares em condições reais, tanto a nível técnico como económico [38].

Para o presente trabalho, foi desenvolvido um modelo 3D individual para cada escola e também um modelo onde engloba as três escolas, com base nas dimensões reais das coberturas e em fotografias recolhidas no local. O objetivo foi garantir que a simulação refletisse com precisão as características arquitetónicas e espaciais de cada edifício. Nos modelos virtuais foram definidos o posicionamento e a inclinação dos painéis, bem como os elementos de sombreamento relevantes, como árvores, edifícios vizinhos e estruturas existentes.

As simulações utilizaram dados meteorológicos da estação de Coimbra, incluídos na base de dados do PVSOL, que correspondem a anos meteorológicos típicos. Os

dados incluem temperatura ambiente, radiação solar, vento e humidade, permitindo estimar o desempenho dos sistemas de forma representativa para as condições locais.

O software considerou também as perdas elétricas do sistema, incluindo as da cablagem, inversores e temperatura dos módulos, e calculou automaticamente o PR. Foram ainda avaliadas diferentes opções de projeto, de modo a otimizar a potência instalada e o rendimento energético de cada sistema.

Os relatórios de simulação obtidos apresentaram os principais resultados energéticos e económicos: produção anual (kWh), rendimento específico (kWh/kWp), emissões de dióxido de carbono (CO₂) evitadas, investimento inicial, período de retorno (*payback*), TIR e LCOE, que permitiram comparar o cenário de autoconsumo individual com o cenário de comunidade de energia partilhada, avaliando a eficiência de cada modelo.

4.1.6 Indicadores e fórmulas e fórmulas de calculo

Para garantir a transparência e a reprodutibilidade dos resultados obtidos com o software, é importante apresentar de forma clara a lógica de cálculo e os principais indicadores de desempenho utilizados na avaliação técnica, ambiental e económica dos sistemas fotovoltaicos. A definição destes indicadores segue as boas práticas recomendadas na literatura sobre autoconsumo e comunidades de energia renovável, mantendo um equilíbrio entre simplicidade conceptual e rigor metodológico.

Foram definidas várias variáveis energéticas para representar os fluxos essenciais de uma instalação fotovoltaica:

- P – Produção anual de energia fotovoltaica (kWh/ano);
- C – Consumo anual total de eletricidade do edifício (kWh/ano);
- A – Energia autoconsumida localmente (kWh/ano);
- I – Energia injetada na rede pública (kWh/ano).

As variáveis estão relacionadas através de uma equação de balanço energético, que expressa o comportamento global do sistema:

$$P = A + I$$

Num cenário ideal, em que a produção solar e o consumo do edifício ocorrem exatamente ao mesmo tempo, a energia autoconsumida (A) seria igual ao valor mais baixo entre a produção (P) e o consumo (C). No entanto, em condições reais, os períodos de produção e de consumo raramente coincidem. Por isso, o PVSOL calcula automaticamente, hora a hora, os valores de A e I, considerando fatores como sombreamento, temperatura dos módulos e eficiência dos inversores.

A Taxa de Autoconsumo (TAC), expressa em percentagem, representa a fração da energia fotovoltaica produzida que é consumida diretamente no local:

$$TAC = \frac{A}{P} \times 100$$

O indicador mostra a capacidade do sistema em adaptar a produção à procura real do edifício.

O Nível de Autonomia (Aut) mede a proporção do consumo total do edifício que é satisfeita pela energia solar produzida localmente:

$$Aut = \frac{A}{C} \times 100$$

Este valor permite avaliar o grau de independência energética da instalação e é especialmente relevante na análise da sustentabilidade das comunidades de energia.

A energia injetada na rede (I) resulta diretamente da diferença entre a produção total e o autoconsumo local:

$$I = P - A$$

O PVSOL calcula também as emissões de dióxido de carbono evitadas (kg CO₂/ano), aplicando os fatores de emissão correspondentes ao mix energético nacional, que reflete o benefício ambiental da substituição da eletricidade convencional por energia solar e traduzem o contributo do sistema para os objetivos de descarbonização definidos pela União Europeia.

Foram considerados indicadores financeiros simples, mas robustos. O *payback* representa o número de anos necessários para recuperar o investimento inicial através das poupanças anuais de eletricidade. No entanto, para manter a coerência metodológica com o modelo do software, privilegiaram-se as métricas calculadas automaticamente:

- TIR;
- *Payback*;
- LCOE.

Os indicadores acima permitem avaliar o desempenho económico global ao longo do ciclo de vida do sistema, considerando fatores como degradação dos equipamentos, inflação e evolução das tarifas de energia.

4.1.7 Definição dos cenários de análise

Para avaliar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos instalados nas três escolas, foram definidos dois cenários distintos:

- I. Cenário A: cada escola funciona de forma independente, utilizando apenas a energia solar que produz e injetando na rede pública os excedentes que não são consumidos no momento da produção. É o modelo mais comum no enquadramento atual em Portugal, especialmente em edifícios públicos. O cenário traduz-se num autoconsumo direto com benefícios limitados, uma vez que a energia excedente vendida à rede tem um valor reduzido. Ainda assim, é um modelo simples e eficiente, que reflete o funcionamento real das escolas com instalações solares individuais.
- II. Cenário B: representa uma abordagem comunitária, em que as três escolas partilham virtualmente a energia produzida. Nesta configuração, o excedente de produção de uma escola pode ser utilizado por outra dentro da mesma comunidade, desde que todas estejam ligadas à mesma rede de baixa tensão. O objetivo é maximizar o autoconsumo global e reduzir a energia injetada na rede, aumentando assim a eficiência e a sustentabilidade do sistema.

No entanto, devido à ausência de perfis horários de consumo e produção, não foi possível determinar com precisão a coincidência temporal entre a produção solar e a procura elétrica. Para cada cenário foi considerado o consumo anual de 2024, uma vez que as diferenças do ano 2023 e 2024 não eram consideráveis.

4.2 Caso de Estudo

O presente capítulo apresenta o caso de estudo desenvolvido no âmbito deste trabalho, aplicado a três estabelecimentos de ensino do concelho de Coimbra.

O objetivo principal é avaliar o impacto técnico, ambiental e económico da implementação de sistemas fotovoltaicos e da eventual constituição de uma CER entre estas instituições.

4.2.1 Caracterização das Escolas

As três escolas estão situadas no concelho de Coimbra, com distâncias entre 600 e 1200 metros, cumprindo assim os critérios legais e técnicos para a criação de uma CER em baixa tensão (BTN), conforme previsto no Decreto-Lei n.º 15/2022.

4.2.2 Conservatório de Música de Coimbra

O Conservatório de Música de Coimbra (Figura 20) apresenta um perfil de consumo elevado. O edifício possui grande potencial de integração de sistemas

fotovoltaicos pela área disponível na cobertura e pelo funcionamento alargado ao longo do dia.



Figura 20 - Vista aérea do Conservatório

4.2.3 Escola Básica Norton de Matos

A Escola Básica Norton de Matos (Figura 21) caracteriza-se por um consumo regular e moderado. As suas características construtivas e o espaço disponível na cobertura tornam viável a instalação de painéis fotovoltaicos com boa exposição solar.

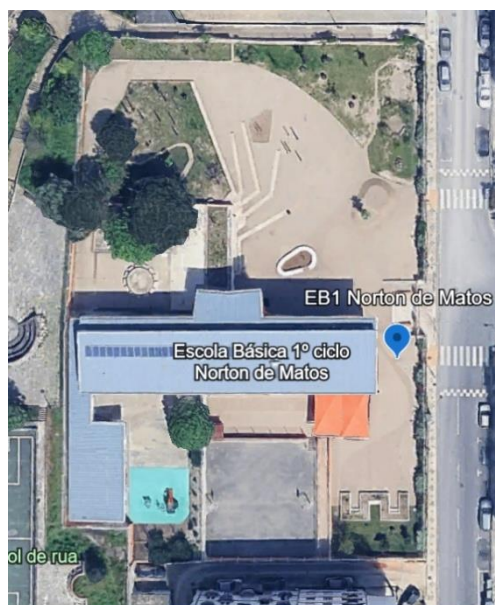


Figura 21 - Vista aérea Escola Norton de Matos

4.2.4 Escola Básica Vale das Flores e Jardim de Infância

A Escola Básica Vale das Flores (Figura) apresenta um perfil de consumo semelhante ao da EB Norton de Matos. O edifício oferece boas condições para a instalação de módulos fotovoltaicos com inclinação otimizada e mínima interferência de sombreamento.



Figura 22 - Vista aérea Escola Vale das Flores

4.2.5 Raio de proximidade

A Figura 23 apresenta um mapa elaborado com base em coordenadas reais, onde se destacam os três edifícios escolares e o respetivo raio de proximidade em que cada círculo tem raio de 1km.

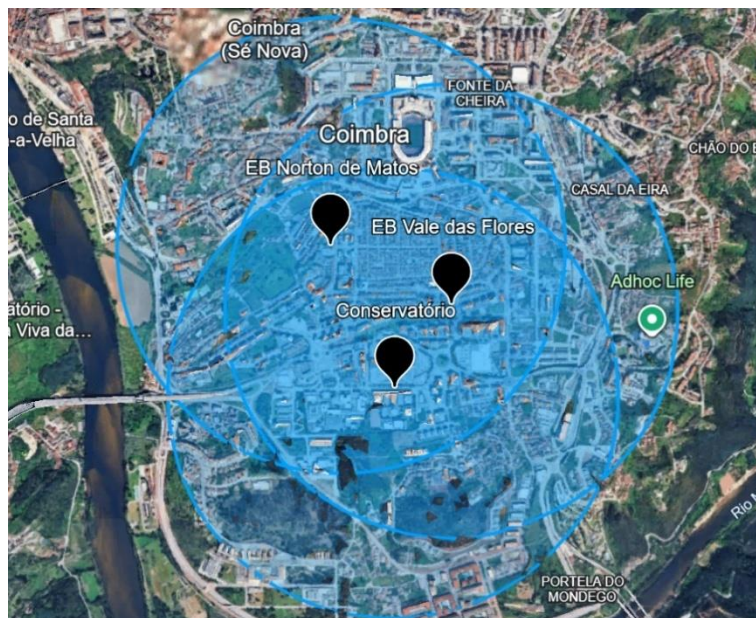


Figura 23 – Representação do raio de proximidade

A representação espacial confirma que existe viabilidade geográfica e técnica para a criação de uma Comunidade de Energia Renovável em Coimbra, demonstrando que as três escolas se encontram num raio menor que 1km e são suficientemente

próximas para formar um sistema de partilha de energia sustentável e economicamente vantajoso.

4.2.6 Diagnóstico Energético

A caracterização do consumo elétrico foi realizada com base em registos dos anos de 2023 e 2024 (Anexo A). A análise dos consumos permite identificar as diferenças entre as escolas e o potencial de integração fotovoltaica em cada uma. A tabela da e as figuras seguintes ilustram todos os consumos das escolas:

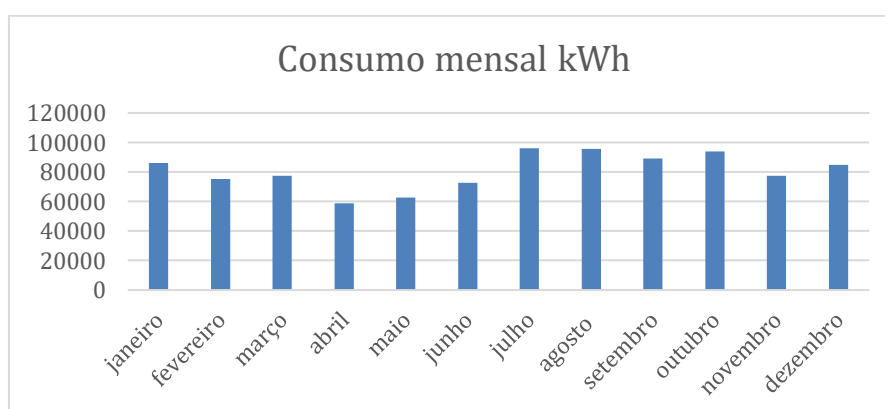


Figura 24 Perfil de consumo mensal 2023 do Conservatório - anexo A

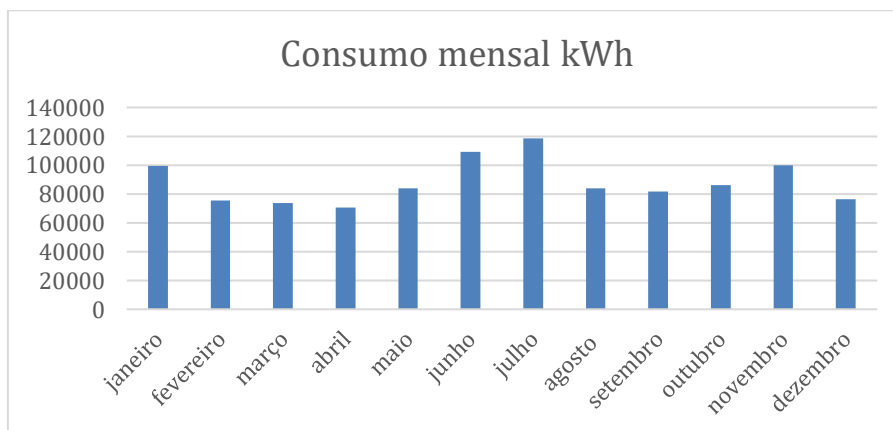


Figura 25 - Perfil de consumo mensal 2024 do Conservatório- anexo A.

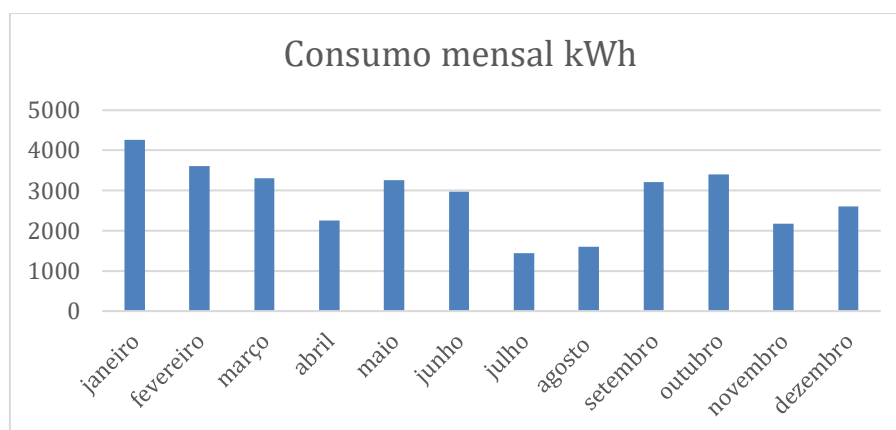


Figura 26 - Perfil de consumo mensal 2023 Norton de Matos – anexo A.

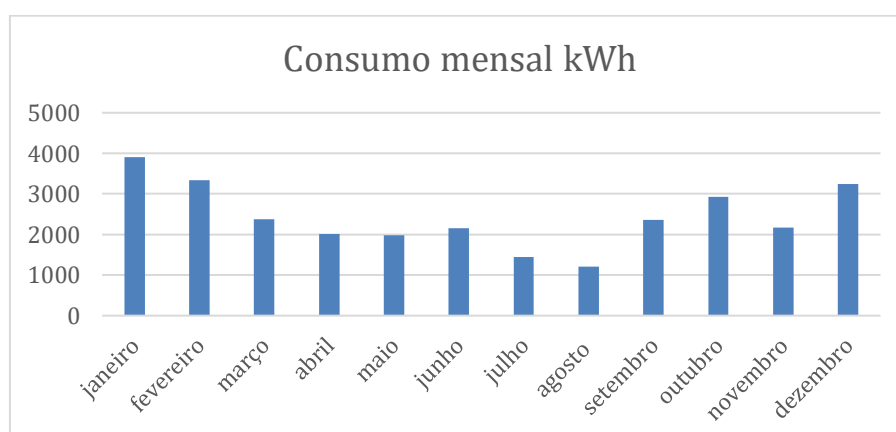


Figura 27 - Perfil de consumo mensal 2024 Norton de matos – anexo A

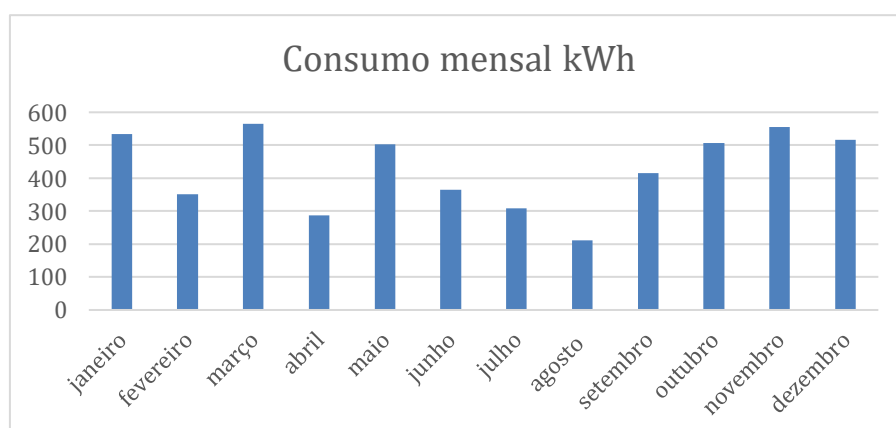


Figura 28 - Perfil de consumo mensal 2023 Vale das Flores – anexo A.

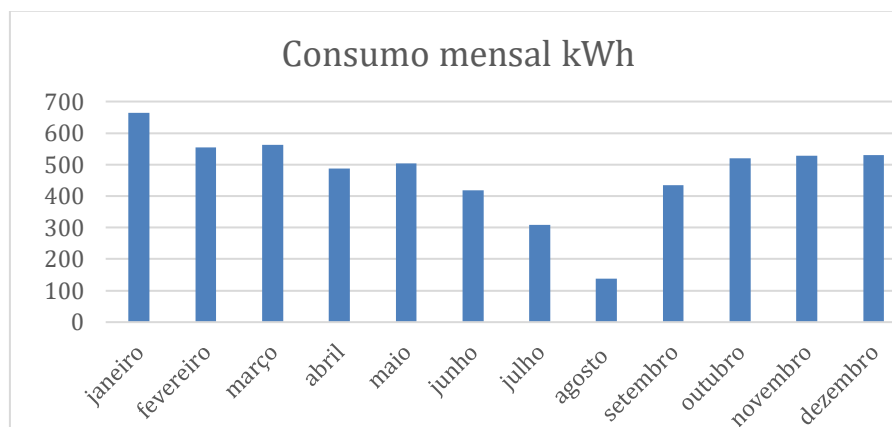


Figura 29 - Perfil de consumo mensal 2024 Vale das Flores – anexo A

Tabela 2 - Consumo anual das três escolas (kWh/ano) anexo A

Ano	Conservatório (kWh)	Norton de Matos (kWh)	Vale das Flores (kWh)	Total (kWh)
2023	969 830	34 097	5 122	1 009 049
2024	1 058 717	29 134	5 647	1 093 498

Os dados utilizados na Tabela 2 correspondem aos registos de consumo anual de eletricidade dos anos 2023 e 2024. Os ficheiros, resultantes da monitorização energética das três escolas, permitiram determinar o consumo total anual de cada edifício e observar variações ao longo do tempo. Apesar de os registos não estarem segmentados por períodos tarifários, foi possível extrair conclusões sólidas sobre o perfil de utilização, sazonalidade e comportamento energético global de cada edifício.

O Conservatório de Música de Coimbra destaca-se por apresentar o maior consumo energético absoluto entre as três instituições analisadas. Em ambos os anos estudados, o consumo foi bastante elevado, revelando uma utilização intensiva e contínua da infraestrutura. O perfil de consumo caracteriza-se por uma distribuição relativamente uniforme ao longo do ano, com ligeiros aumentos nos meses de inverno devido à utilização de equipamentos de climatização e picos em períodos de maior atividade cultural.

A Escola Básica Norton de Matos apresenta um perfil de consumo intermédio, com valores anuais próximos dos 35 000 kWh, o que é consistente com o tamanho e a ocupação da instalação.

O consumo é fortemente condicionado pelo calendário escolar, concentrando-se durante o período letivo e reduzindo significativamente nas pausas e nas férias de verão.

Ao longo do ano, observa-se uma tendência de consumo mais elevado nos meses de inverno, justificada pela maior necessidade de aquecimento e iluminação, e níveis mais baixos entre julho e setembro, período de encerramento letivo.

Por funcionar predominantemente durante o dia, o perfil de consumo da EB Norton de Matos coincide de forma favorável com a produção solar fotovoltaica, o que lhe confere um elevado potencial de autoconsumo direto.

A Escola Básica Vale das Flores e Jardim de Infância é a instituição com menor consumo anual, ao registar valores entre 5100 a 5 600 kWh/ano, o que reflete a menor dimensão do edifício e a natureza mais limitada das suas atividades.

A variação anual mostra picos de consumo nos meses frios, quando o aquecimento é utilizado, e mínimos acentuados no verão, período de encerramento total. A constância e previsibilidade deste perfil tornam a EB Vale das Flores energeticamente estável e com grande potencial de produção excedentária quando equipada com um sistema fotovoltaico, já que a produção solar tende a ultrapassar a procura em várias horas do dia.

Como a diferença do consumo do ano 2023 e do ano 2024 não é considerável, vai ser considerado o ano de 2024 nos cenários de estudo.

4.2.7 Simulações PVSOL

De forma a avaliar o potencial de produção de energia fotovoltaica em cada escola, foi desenvolvido um modelo tridimensional detalhado no software PVSOL, ao representar com elevada precisão as dimensões, inclinações e orientações reais dos edifícios.

Na Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 estão apresentados os modelos tridimensionais e os parâmetros de simulação utilizados para cada escola (anexos B, C e D):



Figura 30 - Simulação 3D da escola Norton de Matos (anexo B)

Sistema fotovoltaico

3D, Sistema fv conectado à rede com consumo

Dados climáticos	Coimbra, PRT (2001 - 2020)
Fonte dos valores	Meteonorm 8.2(i)
Potência do gerador fotovoltaico	333,5 kWp
Area do gerador fotovoltaico	1 631,8 m ²
Quantidade de módulos	667
Quantidade de inversores	6

Figura 31 - Parâmetros de simulação PVSOL do Conservatório (extraído do anexo B)



Figura 32 - Simulação 3D da Escola Norton de Matos (anexo C).

Sistema fotovoltaico

3D, Sistema fv conectado à rede com consumo

Dados climáticos	Coimbra, PRT (2001 - 2020)
Fonte dos valores	Meteonorm 8.2
Potência do gerador fotovoltaico	53 kWp
Area do gerador fotovoltaico	259,3 m ²
Quantidade de módulos	106
Quantidade de inversores	3

Figura 33 - Parâmetros de Simulação PVSOL da Escola Norton de Matos (anexo C).



Figura 34 - Simulação 3D da Escola Vale das Flores (anexo D).

Sistema fotovoltaico

3D, Sistema fv conectado à rede com consumo

Dados climáticos	Coimbra, PRT (2001 - 2020)
Fonte dos valores	Meteonorm 8.2
Potência do gerador fotovoltaico	30 kWp
Area do gerador fotovoltaico	146,8 m ²
Quantidade de módulos	60
Quantidade de inversores	1

Figura 35 - Parâmetros de simulação PVSOL da escola vale das flores (anexo D).

As simulações consideraram as condições meteorológicas típicas da cidade de Coimbra, nomeadamente a radiação solar global, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. Para garantir a fiabilidade dos resultados, foram também contabilizadas as principais perdas do sistema, como as perdas por sombreamento, perdas por temperatura, perdas nos inversores, e quedas de tensão associadas à cablagem.

4.2.8 Seguimento do Cenário A

O Cenário A demonstra que a instalação de sistemas fotovoltaicos individuais em cada escola proporciona uma redução da dependência da rede elétrica, especialmente no Conservatório, cuja dimensão permite elevados níveis de autoconsumo e retorno económico mais rápido.

Apesar de as escolas de menor dimensão apresentarem percentagens de autoconsumo mais reduzidas, a sua contribuição ambiental e a rentabilidade dos investimentos mantêm-se positivas, reforçando a viabilidade técnica e económica do modelo descentralizado.

As figuras e as tabelas seguintes e demonstram os resultados das simulações realizadas para o ano 2024 (Anexos B, C e D):

Estudo de uma Comunidade de Energia nas Escolas de S. António dos Olivais em Coimbra

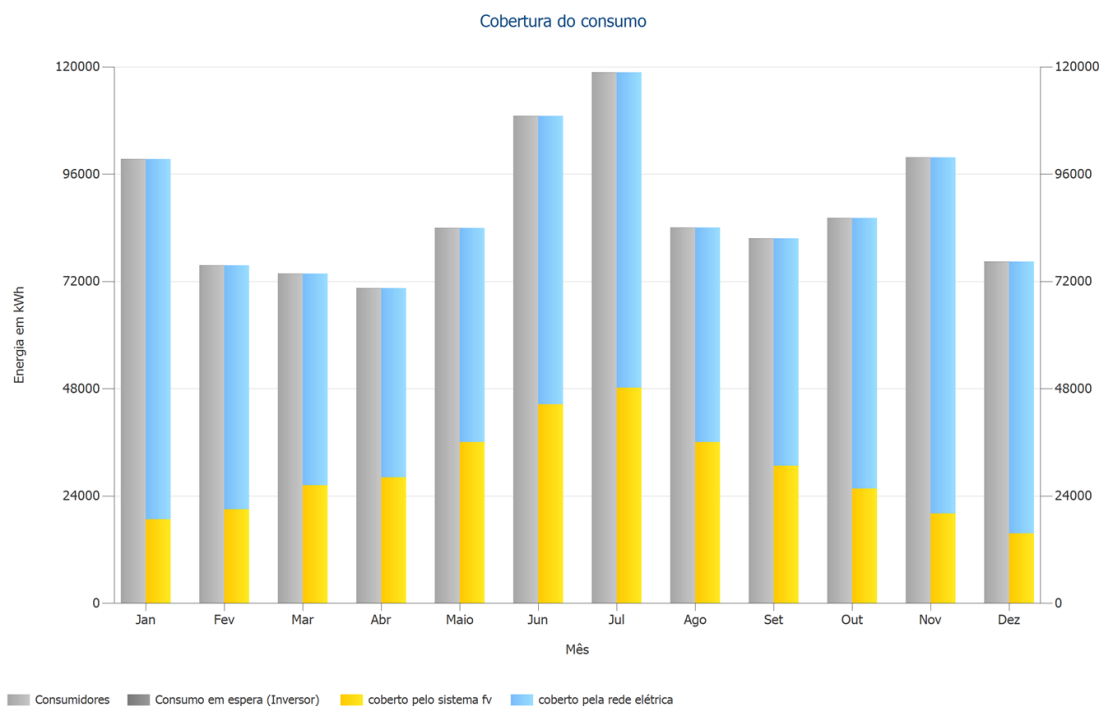


Figura 36 - Cobertura do consumo no Conservatório (Anexo B)

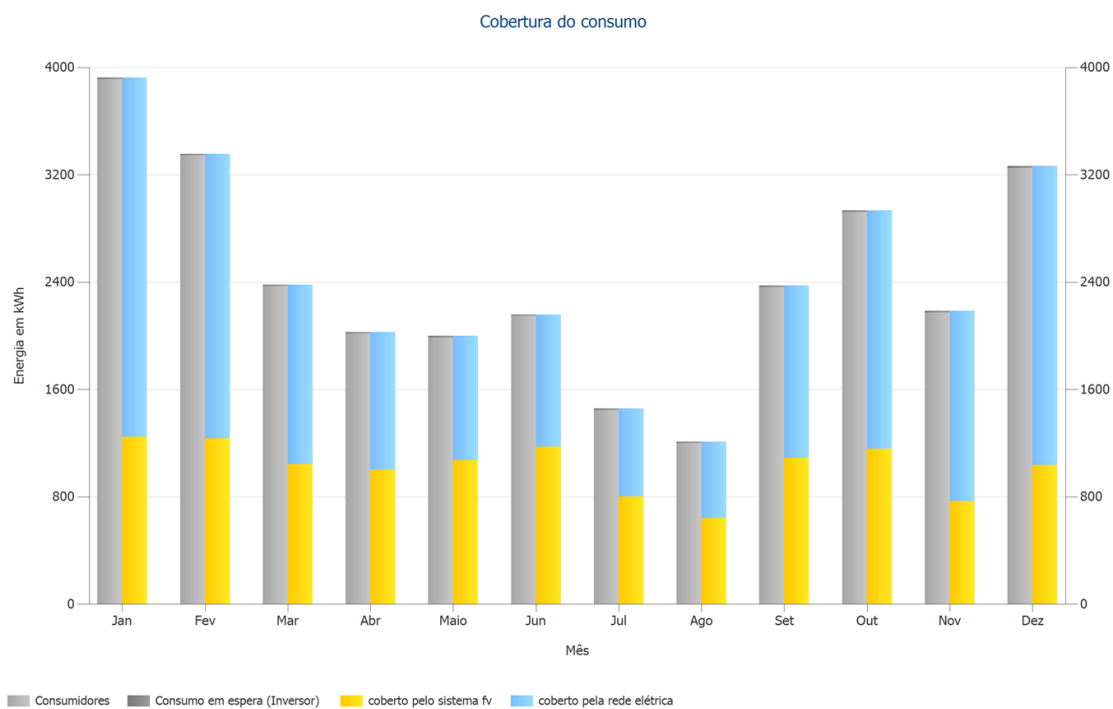


Figura 37 - Cobertura do consumo na escola Norton de matos (Anexo C)

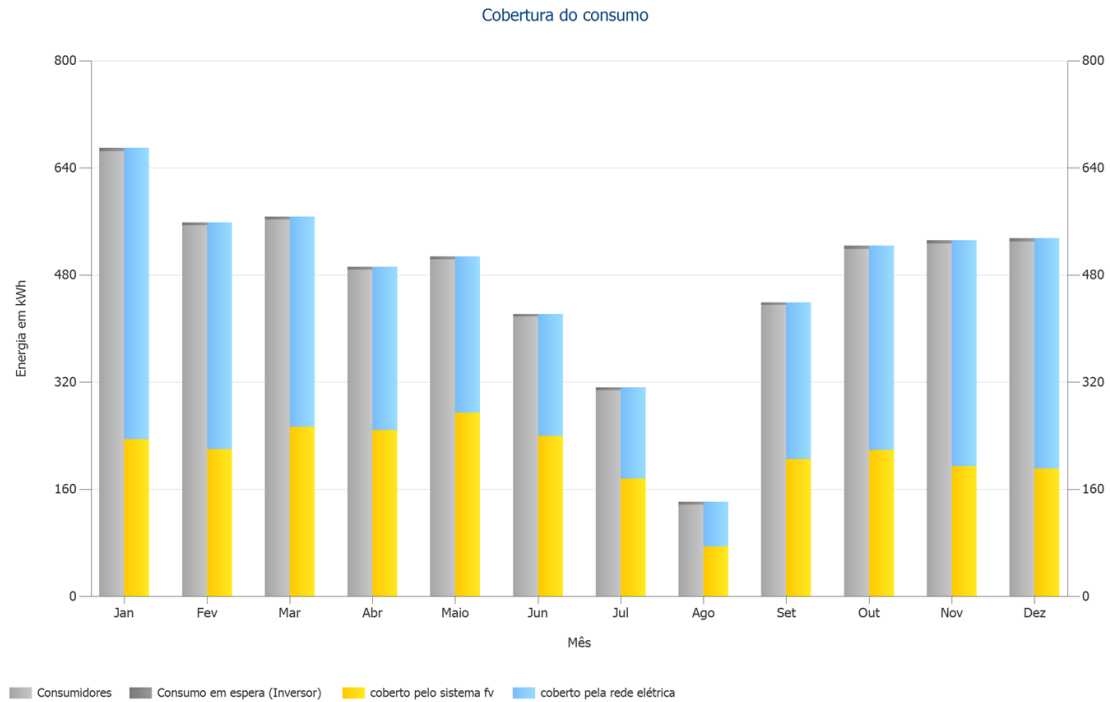


Figura 38 – Cobertura do consumo na escola vale das flores (Anexo D)

Tabela 3 – Resultados por escola, Cenário A (Anexos B, C e D).

Escola	Potência (kWp)	Específico (kWh/kWp)	PR (%)	Produção (kWh)	Autoconsumo (kWh)
Conservatório de Música de Coimbra	333,5	1 423,74	84,51	474 848	351 296
EB Norton de Matos	53	1 402,99	87,4	74 501	12 276
EB Vale das Flores	30	1 400,94	87,27	42 080	2 530

Tabela 4 – Resultados por escola, Cenário A (Anexos B, C e D) (cont.).

Escola	Injeção (kWh)	TAC (%)	Autonomia (%)	CO ₂ evitado (kg/ano)
Conservatório de Música de Coimbra	123 552	74	33,2	180 430
EB Norton de Matos	62 225	16,3	41,9	28 256
EB Vale das Flores	39 551	5,9	44,4	15 971

Tabela 5 – Dados económicos (Anexos B C e D)

Escola	Investimento (€)	Payback (anos)	TIR (%)	LCOE (€/kWh)
Conservatório de Música de Coimbra	500 250	5,7	18,3	0,0584
EB Norton de Matos	79 500	5,9	16,8	0,0592
EB Vale das Flores	45 000	5,9	16,7	0,0593

O sistema fotovoltaico instalado no Conservatório é composto por 333,5 kWp de potência nominal, distribuídos por 667 módulos *Risen Energy RSM150-8-500M* e 8 inversores *SolaX Power*. Os módulos estão dispostos em coberturas com orientação sul e inclinação de 30°, garantindo uma boa exposição solar e ventilação adequada.

O PVSOL indica uma produção anual estável e eficiente, com rendimento específico superior a 1 400 kWh/kWp e PR na ordem dos 84%, refletindo perdas controladas e dimensionamento correto.

O perfil de consumo contínuo do Conservatório permite absorver grande parte da energia produzida localmente, e resulta numa taxa de autoconsumo elevada e numa autonomia energética superior a 30%. Traduz-se assim num melhor desempenho económico, com tempo de retorno inferior a seis anos e taxa interna de rentabilidade superior a 18%, demonstrando a solidez do investimento (Anexo B).

A EB Norton de Matos dispõe de um sistema de 53 kWp, composto por 106 módulos *Risen Energy RSM150-8-500M* e 1 inversor *SolaX Power*. Os módulos estão instalados em cobertura plana com orientação sul e inclinação de 0°, otimizados para maximizar a captação durante as horas letivas.

O sistema apresenta rendimento específico próximo de 1 400 kWh/kWp e PR acima de 87%, confirmando assim a eficiência técnica.

Devido ao perfil de carga reduzido fora do horário escolar, grande parte da energia é injetada na rede, resultando numa taxa de autoconsumo baixa, mas com autonomia próxima dos 40%. Reflete a elevada produção em relação à procura.

O investimento apresenta *payback* inferior a seis anos e rentabilidade próxima de 17%, o que comprova a viabilidade da instalação mesmo com menor autoconsumo (Anexo C).

Na EB Vale das Flores foi instalado um sistema de 30 kWp, constituído por 60 módulos do mesmo modelo e 1 inversor *SolaX Power*. Tal como na EB Norton de Matos, os painéis estão orientados a sul e dispostos em cobertura plana, otimizados para captar radiação durante o período letivo.

O rendimento específico situa-se próximo de 1 400 kWh/kWp e o PR é da ordem dos 87%, confirmando a eficiência global do sistema.

O consumo reduzido face à energia produzida origina uma taxa de autoconsumo bastante baixa, mas uma autonomia anual superior a 40%, valores típicos de edifícios com carga limitada e produção relativamente elevada.

Na componente económica, o projeto revela prazo de retorno de cerca de seis anos e rentabilidade média de 16–17%, ao assegurar assim viabilidade técnica e financeira (Anexo D).

4.2.9 Seguimento do Cenário B

O Cenário B representa a constituição de uma CER formada pelas três escolas com partilha de energia fotovoltaica entre os três edifícios. O objetivo desta simulação é avaliar o desempenho energético, ambiental e económico do sistema quando a produção fotovoltaica é partilhada internamente, reduzindo as perdas por injeção e maximizando o consumo local de energia renovável.

A simulação foi realizada em modo de comunidade, o que permite ao software efetuar o balanço energético entre todos os participantes. Assim, toda a energia produzida pelas diferentes instalações é automaticamente redistribuída entre as três escolas, de forma a cobrir o consumo agregado antes de se considerar qualquer injeção na rede.

As figuras e tabelas seguintes demonstram o resultado de toda a simulação, com base nos dados energéticos de 2024 (Anexo E):

Estudo de uma Comunidade de Energia nas Escolas de S. António dos Olivais em Coimbra

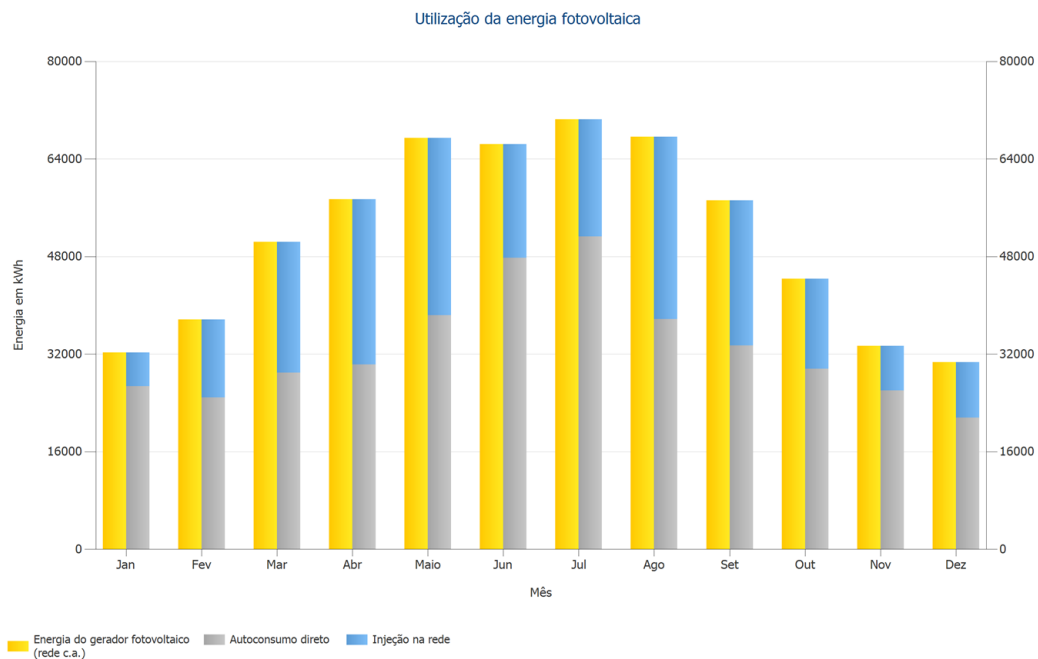


Figura 39 - Utilização da energia fotovoltaica na Comunidade (Anexo E)

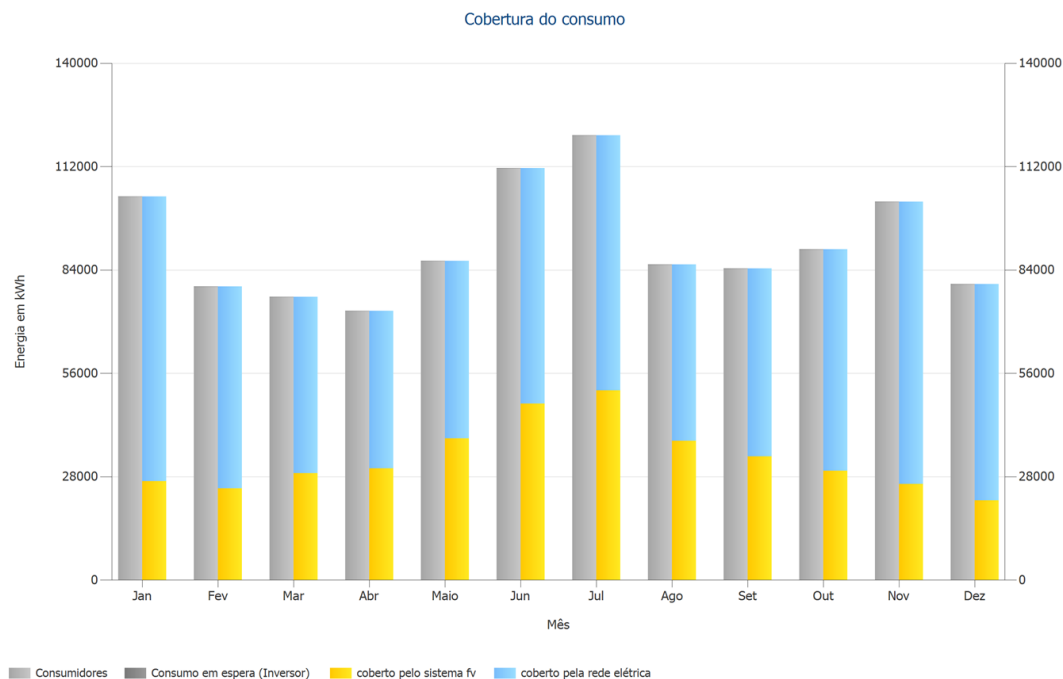


Figura 40 - Cobertura do consumo na Comunidade (Anexo E)

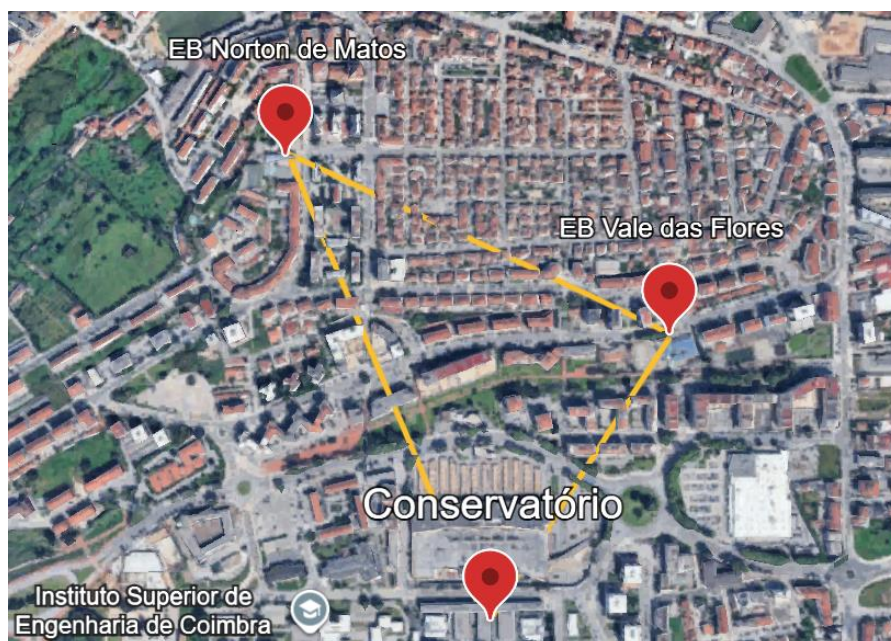


Figura 41 - Comunidade alvo de estudo

Tabela 6 – Cenário B: resultados da Comunidade (Anexo E).

Indicador	Potência Instalada (kWp)	Produção Anual (kWh)	Autoconsumo (kWh)	Injeção (kWh)	TAC (%)
Comunidade	416,5	615 392	396 749	218 642	64,5

Tabela 7 – Cenário B: resultados da Comunidade (Anexo E) (cont.).

Indicador	Autonomia (%)	PR (%)	Rendimento Específico (kWh/kWp)	CO ₂ Evitado (kg/ano)
Comunidade	36,3	83,72	1 476,99	233 763

Tabela 8 - Dados económicos da Comunidade (Anexo E).

Investimento (€)	Payback (anos)	TIR (%)	LCOE (€/kWh)	Fluxo de Caixa 20 anos (€)	Economia 1.º Ano (€)
624 750	6,75	15,21	0,0563	1 351 692	87 949

A comunidade é alimentada por um sistema fotovoltaico de 416,5 kWp, composto por 833 módulos (*Risen Energy RSM150-8-500M*) e 10 inversores *SolaX Power* de diferentes gamas (X3-ULT, X3-AELIO, X3-MGA). A área total de módulos é de 2 037,9 m², instalada nas coberturas dos três edifícios. As orientações predominam a sul, com inclinações de 0° nas escolas básicas e 30° no Conservatório, condições que asseguram uma boa captação solar e ventilação adequada. (Anexo E)

O consumo anual agregado das três escolas é de 1 093 498 kWh, valor usado como referência para o dimensionamento. A simulação considerou as perdas habituais de temperatura, sombreamento e conversão, sem restrições de potência no ponto de ligação à rede.

O sistema fotovoltaico da comunidade atinge uma produção anual de 615 392 kWh, com rendimento específico de 1 476,99 kWh/kWp e PR de 83,72%, confirmando a boa eficiência técnica e a conformidade do dimensionamento. A energia autoconsumida dentro da CER é de 396 749 kWh, enquanto 218 642 kWh são injetados na rede. Estes valores traduzem-se numa TAC de 64,5% e numa autonomia energética de 36,3%, que significa mais de um terço do consumo total das três escolas é agora suprido por energia solar produzida localmente (Anexo E).

É estimada uma redução anual de 233,8 toneladas de CO₂, reforçando o impacto positivo da integração de renováveis no setor público e educativo. (Anexo E)

Na vertente económica, o PVSOL apresenta um investimento total de 624 750 €, com um prazo de amortização de aproximadamente 6 anos e 9 meses. A TIR é de 15,21%, valor que demonstra uma rentabilidade sólida mesmo num contexto de elevada capacidade instalada e consumo diversificado. O LCOE situa-se em 0,0563 €/kWh, inferior ao custo médio de aquisição de energia da rede, confirmando a vantagem económica da produção local. O fluxo de caixa acumulado em 20 anos é de cerca de 1,35 milhões de euros, com uma poupança no primeiro ano de 87 949 €, valores obtidos a partir das parametrizações financeiras do PVSOL (tarifa de injeção de 0,0154 €/kWh e inflação energética anual). (Anexo E)

4.2.10 Discussão de resultados

Os resultados confirmam, que agregar consumidores numa CER aumenta a eficiência técnica, energética e ambiental face ao autoconsumo isolado. Em termos agregados, a Taxa de Autoconsumo evolui de 61,9% no Cenário A para 64,5% no Cenário B um ganho de 2,6%. A autonomia energética sobe de 33,5% para 36,3% u aumento de 2,8 %. Ao mesmo tempo, a injeção anual à rede diminui de 225 328 kWh para 218 642 kWh, uma redução de 6 686 kWh, sinal de maior valorização local da energia produzida.

No perfil entre escolas, a complementaridade é clara, uma vez que no Cenário A, o Conservatório, com consumo mais contínuo, apresenta TAC de 74% e Autonomia

de 33,2%, já a EB Norton de Matos e a EB Vale das Flores, com cargas letivas diurnas menores, registam TAC de 16,3% e 5,9%, mas autonomias de 41,9% e 44,4%. Em comunidade, os excedentes das EB são absorvidos pelo Conservatório, elevando o autoconsumo agregado e reduzindo perdas por injeção.

Do lado da produção, com a mesma potência instalada (416,5 kWp), a energia anual aumenta de 591 429 kWh (soma dos individuais) para 615 392 kWh, um aumento de 23 963 kWh correspondente a 4%. O rendimento específico coletivo atinge 1 476,99 kWh/kWp, acima dos valores isolados, que traduz assim melhor aproveitamento operacional quando as instalações funcionam como sistema. Por último, as emissões evitadas sobem para aproximadamente 233,8 toneladas de dióxido de carbono por ano (CO₂/ano), ou seja mais 4,1% face à soma individual.

Nos indicadores económicos, com investimento total idêntico (624 750 €), a comunidade apresenta LCOE de 0,0563 €/kWh, inferior à média ponderada dos sistemas individuais (aproximadamente 0,0586 €/kWh), uma redução de 3,9% no custo nivelado da energia. Em contrapartida, o *payback* passa de aproximadamente 5,8-5,9 anos nas escolas para 6,75 anos na CER e a TIR desce de 16,7-18,3% para 15,21%. Ainda assim, o fluxo de caixa acumulado em 20 anos é muito expressivo e a poupança no 1.º ano é 87 949 €, confirmando robustez económica do modelo comunitário.

Os resultados demonstram que a passagem de um modelo de autoconsumo individual para um modelo de partilha cooperativa de energia representa uma evolução técnica e estrutural com benefícios evidentes. Para além de melhorar o desempenho energético esta mudança atua como impulsionador para um futuro mais sustentável e eficiente, plenamente ajustado às necessidades e valores das instituições de ensino do concelho de Coimbra.

4.3 Conclusão

A análise realizada ao longo deste capítulo demonstra de forma inequívoca que a produção descentralizada de energia solar fotovoltaica representa uma solução eficaz para a redução dos consumos energéticos, das emissões de carbono e dos custos operacionais das escolas analisadas.

O Cenário A confirmou que a instalação isolada de sistemas fotovoltaicos contribui significativamente para a autonomia energética de cada edifício, permitindo reduções expressivas no recurso à rede elétrica e assegurando períodos de retorno atrativos. Contudo, também evidenciou limitações estruturais, nomeadamente o baixo aproveitamento dos excedentes e a reduzida taxa de autoconsumo em edifícios com perfis de carga menos intensivos.

Já o Cenário B demonstrou que a integração das três escolas numa Comunidade de Energia Renovável potencia de forma substancial a eficiência energética ao aumentar o autoconsumo, reduzir a energia excedentária, otimizar economicamente

o investimento e ampliar o impacto ambiental positivo. A complementaridade entre os perfis de consumo e o enquadramento legal favorável permitem que a CER funcione como um sistema coletivo mais equilibrado e sustentável, colocando o conjunto das escolas num patamar superior de desempenho energético.

Em síntese, os resultados obtidos permitem concluir que, embora o autoconsumo individual constitua uma solução válida, é o modelo comunitário que assegura o melhor compromisso entre eficiência, sustentabilidade e benefício económico.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que a articulação entre Comunidades de Energia Renovável e sistemas fotovoltaicos em edifícios públicos vai muito além da sua viabilidade técnica. Trata-se de um instrumento de gestão urbana capaz de gerar valor energético, ambiental e económico, em linha com as ambições associadas às cidades sustentáveis e inteligentes. A análise realizada a partir do caso de três escolas do concelho de Coimbra permitiu observar, com um nível de detalhe suficiente para sustentar decisões informadas, de que forma a proximidade entre produção e consumo se traduz em aumentos consistentes do autoconsumo e da autonomia energética, sem introduzir complexidade desnecessária. Quando a produção é corretamente dimensionada em função do perfil real de carga e existem regras claras de partilha, a rede deixa de assumir o papel de destino preferencial dos excedentes e passa a funcionar como um elemento de suporte ao sistema local, que é onde se revela mais útil.

A base conceptual e regulamentar analisada oferece suporte a esta abordagem. O enquadramento europeu e nacional cria condições favoráveis ao autoconsumo coletivo e à partilha de energia, abrindo um espaço de atuação que, quando bem aproveitado, permite às entidades públicas converter a energia produzida nos edifícios em energia efetivamente utilizada nos espaços de uso diário. A partir disto, o trabalho contribuiu para consolidar uma linguagem operacional comum, assente em conceitos como produção, consumo, autoconsumo e injeção na rede, e para definir indicadores simples e auditáveis, como a Taxa de Autoconsumo e o Nível de Autonomia, capazes de traduzir opções de projeto em resultados observáveis e comparáveis.

A componente prática, baseada em dados recentes de consumo e em simulações realizadas com recurso ao PVSOL, evidenciou que a complementaridade entre os perfis de carga das escolas é determinante para uma utilização eficiente da produção local. Em vez de procurar ganhos marginais ao nível da tecnologia, a análise focou-se na adequação da potência instalada, na orientação e inclinação dos módulos e na validade cuidada das perdas mais relevantes. Os resultados foram consistentes, demonstrando que o cenário comunitário permite captar sinergias que não estão disponíveis quando os edifícios operam de forma isolada. Esta vantagem é alcançada com instrumentos simples e facilmente replicáveis, o que estabelece uma ligação direta com a agenda das cidades sustentáveis e inteligentes..

Neste contexto, a Comunidade de Energia deixa de ser encarada como um fim em si mesma e passa a assumir o papel de meio para reorganizar fluxos, introduzir previsibilidade e ligar decisões técnicas a impactos sociais concretos. O estudo evidencia que este caminho é viável desde que se cumpram condições mínimas, mas incontornáveis, assentes na disponibilidade de dados fiáveis, na objetividade das regras de funcionamento e na definição de métricas claras. É esta combinação que protege os resultados do projeto face às flutuações conjunturais dos preços da

energia e que permite aos municípios comparar alternativas com rigor e transparência metodológica.

O principal contributo deste trabalho reside na demonstração de que a transição energética à escala local pode ser construída com soluções ao alcance de qualquer município, desde que assentes num dimensionamento criterioso e numa partilha devidamente regulada. Quando estes elementos são aplicados com método, os benefícios manifestam-se onde são mais relevantes, no ponto de consumo, traduzindo-se numa redução de emissões, em faturas mais previsíveis e numa maior resiliência operacional. É neste sentido que se materializa o alinhamento entre Comunidades de Energia Renovável e cidades sustentáveis e inteligentes, utilizando a energia não apenas como um recurso, mas como uma infraestrutura de conhecimento e de serviço, em que cada quilowatt-hora produzido localmente contribui simultaneamente para o funcionamento dos edifícios e para a melhoria da decisão pública.

5.1 Perspetivas futuras

Num futuro breve é recomendável a implementação de uma política municipal de dados energéticos que garanta perfis horários, dados meteorológicos locais e metadados de qualidade. Em paralelo, será vantajoso testar sistemas de armazenamento de energia em pelo menos um dos edifícios, testando estratégias de carregamento e descarga ligadas a previsões simples de produção e a horários de consumo conhecidos. A médio prazo é sugerido a adoção de controlos de carga programáveis, tais como Ar condicionado, bombas de calor, carregadores de veículos elétricos, com sinalização de hora de excedente, e a testagem de coeficientes de partilha dinâmicos dentro da CER, ajustados por janelas temporais e limites mínimos de serviço.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] E. De Simone, A. Rochira, and T. Mannarini, "Individual and community catalysts for Renewable Energy Communities (RECs) development," Apr. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.copsyc.2024.101987.
- [2] B. Lennon and N. Dunphy, "Sustaining energetic communities: energy citizenship and participation in an age of upheaval and transition," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-53367-8.
- [3] S. Ahmed, A. Ali, and A. D'Angola, "A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations," Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su16051749.
- [4] H. M. Saleh and A. I. Hassan, "The challenges of sustainable energy transition: A focus on renewable energy," 2024, *Arts and Science Press Pte. Ltd.* doi: 10.59429/ace.v7i2.2084.
- [5] M. Rüdiger, "The 1973 oil crisis and the designing of a Danish energy policy," *Historical Social Research*, vol. 39, no. 4, pp. 94–112, 2014, doi: 10.12759/hsr.39.2014.4.94-112.
- [6] "Energiewende." Accessed: Jul. 13, 2025. [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/energiewende>
- [7] C. Romero-Rubio and J. R. de Andrés Díaz, "Sustainable energy communities: A study contrasting Spain and Germany," *Energy Policy*, vol. 85, pp. 397–409, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.06.012.
- [8] European Parliament and Council of the European Union, "European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources," 2018. Accessed: Jun. 25, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>
- [9] I. López *et al.*, "European energy communities: Characteristics, trends, business models and legal framework," Jun. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2024.114403.
- [10] B. Anthony Jnr, "Enabling sustainable energy sharing and tracking for rural energy communities in emerging economies," Oct. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ref.2024.100633.
- [11] A. Fichera, E. Marrasso, C. Martone, G. Pallotta, M. Sasso, and R. Volpe, "Ten questions concerning renewable energy communities," *Build Environ*, vol. 281, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.buildenv.2025.113193.
- [12] "European Commission," https://commission.europa.eu/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en?utm.
- [13] "IBM+1." Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/smart-city?>

- [14] “Cidades sustentáveis.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.dataforcities.org/iso-37120?>
- [15] “Smart city.” Accessed: Aug. 15, 2025. [Online]. Available: <https://sienge.com.br/blog/smart-cities-construtalk-curitiba/>
- [16] “UN-Habitat+1.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://unhabitat.org/topic/climate-change?>
- [17] “Comunidades de energia.” Accessed: Aug. 16, 2025. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumers-and-prosumers/energy-communities_en?utm_source=chatgpt.com
- [18] A. Caramizaru, “Energy communities: an overview of energy and social innovation”, doi: 10.2760/180576.
- [19] “Smart cities and communities.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/smart-cities-and-communities?>
- [20] “Clean energy.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.catf.us/resource/clean-energy-ground-up-energy-communities-european-union/>
- [21] G. Taromboli *et al.*, “Renewable Energy Communities: Frameworks and Implementation of Regulatory, Technical, and Social Aspects Across EU Member States,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 9, May 2025, doi: 10.3390/su17094195.
- [22] “Objetivos de desenvolvimento sustentável.” Accessed: Aug. 12, 2025. [Online]. Available: <https://ods.pt/>
- [23] “United Nations Conference on Environment & Development.” [Online]. Available: <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21.htm>.
- [24] D. Limited, “UNITED NATIONS Subject to technical revision,” 1997.
- [25] “United Nations Conference on Environment & Development.” Accessed: Aug. 06, 2025. [Online]. Available: <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21.htm>.
- [26] U. Von Der Leyen, “Estado da união - Discurso,” 2021. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/pt/speech_21_4701/SPEECH_21_4701_PT.pdf
- [27] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, “DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009,” Jun. 2009. Accessed: May 15, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0028>
- [28] “European Commission - Clean energy for all Europeans package completed — good for consumers, good for growth and jobs, and good for the planet.” Accessed:

- Sep. 06, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/news-and-media/news/clean-energy-all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-05-22_en
- [29] “Diretiva 2018/2001/EU.” Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:4372645>
- [30] “DIRETIVA (UE) 2019/ 944 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO,” 2019. Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944>
- [31] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, “DIRECTIVE (EU) 2023/2413 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 October 2023,” *Official Journal of the European Union*, Oct. 2023.
- [32] S. Bouzarovski, “Energy poverty in the European Union: Landscapes of vulnerability,” 2014, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1002/wene.89.
- [33] “Eurostat - Renewable energy.” Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics
- [34] “Decreto-Lei nº 15/2022, 14 de Janeiro,” Jan. 2022. Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/15/2022/01/14/p/dre/pt/html>
- [35] “Decreto-Lei n.º 162/2019, de 25 de outubro,” Oct. 2019. Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/162/2019/10/25/p/dre/pt/html>
- [36] “DGEG - Balanço Energético Nacional 2023.” Accessed: Jun. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/destaques/balanco-energetico-nacional-2023/>
- [37] “Representação CER.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://comunidadesolar.pt/>
- [38] “PV*SOL,” <https://pvsol.software/>. Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://pvsol.software/>
- [39] “Representação gráfica PV*SOL.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.greenbuildingafrica.co.za/what-is-pvsol-premium-solar-software/>
- [40] “PV*SOL.” Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/?utm_source
- [41] International Renewable Energy Agency, *RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2023*. 2023. Accessed: Jul. 06, 2025. [Online]. Available: www.irena.org
- [42] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2020,” 2020. Accessed: Jul. 08, 2025. [Online]. Available: www.iea.org/weo

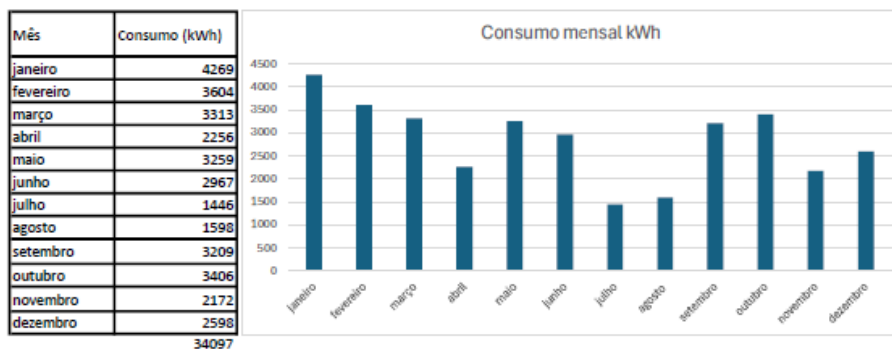
- [43] FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE, "Fraunhofer Annual Report, 2023," 2023, Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.fraunhofer.de/en/media-center/publications/fraunhofer-annual-report/annual-report-2023.html>
- [44] "RENEWABLES 2023 - GLOBAL STATUS REPORT," 2023. Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.ren21.net/gsr-2023/>
- [45] "Satélite Vanguard." Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://canalsolar.com.br/63-anos-do-lancamento-do-primeiro-satelite-alimentado-por-energia-solar/>
- [46] H. H. Pourasl, R. V. Barenji, and V. M. Khojastehnezhad, "Solar energy status in the world: A comprehensive review," Nov. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.egy.2023.10.022.
- [47] F. J. M. M. Nijse *et al.*, "The momentum of the solar energy transition," *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-41971-7.
- [48] O. R. Brás, V. Ferreira, and A. Carvalho, "People of the sun: Local resistance and solar energy (in)justice in southern Portugal," *Energy Res Soc Sci*, vol. 113, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.erss.2024.103529.
- [49] F. Maia, S. Leitão, and M. C. Marques, "Energy transition in Portugal: The harnessing of solar photovoltaics in electric mobility and its impact on the carbon footprint," *J Clean Prod*, vol. 477, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143834.
- [50] "Princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico ." Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.sunenergy.pt/particulares/autoconsumo/paineis-solares-para-autoconsumo/>
- [51] "Processo de instalação de um sistema fotovoltaico." Accessed: Aug. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.sunenergy.pt/particulares/autoconsumo/paineis-solares-para-autoconsumo/>
- [52] "Esquema de ligação do sistema fotovoltaico ." Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.wccsolar.net/pt/inversores-huawei-paralelos/>
- [53] "Células Fotovoltaicas de Silício Policristalino (a) e monocristalino(b)." Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: <https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/>
- [54] "Componentes de um painel fotovoltaico." Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: <https://sunergia.com.br/blog/painel-solar/>
- [55] "Bloomberg NEF, 2023." Accessed: Sep. 05, 2025. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook-series/>

- [56] “World Economic Forum, 2023.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/meetings/world-economic-forum-annual-meeting-2023/>
- [57] “NREL – National Renewable Energy Laboratory,” Best Research-Cell Efficiency Chart. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [58] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, “Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells,” *J Am Chem Soc*, vol. 131, no. 17, pp. 6050–6051, May 2009, doi: 10.1021/ja809598r.
- [59] Q. Zhao, S. Stalin, C.-Z. Zhao, and L. A. Archer, “Designing solid-state electrolytes for safe, energy-dense batteries,” *Nat Rev Mater*, vol. 5, no. 3, pp. 229–252, Feb. 2020, doi: 10.1038/s41578-019-0165-5.
- [60] J. Janek and W. G. Zeier, “A solid future for battery development,” *Nat Energy*, vol. 1, no. 9, p. 16141, Sep. 2016, doi: 10.1038/nenergy.2016.141.
- [61] “International Energy Agency (IEA),” Smart grids. . Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/smart-grids>
- [62] “UNEP – United Nations Environment Programme,” Climate change and the Paris Agreement. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action>
- [63] “European Commission,” EU solar energy strategy. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy/eu-solar-energy-strategy_en
- [64] “International Energy Agency ,” Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [65] I. Energy Agency, “Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector,” 2050. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/

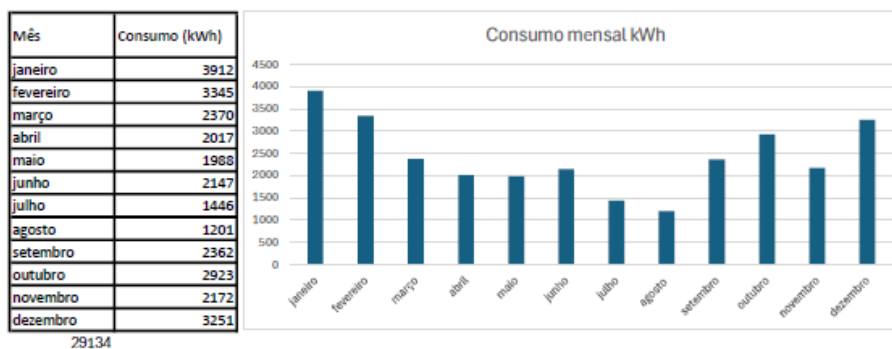
7 ANEXOS

7.1 Anexo A

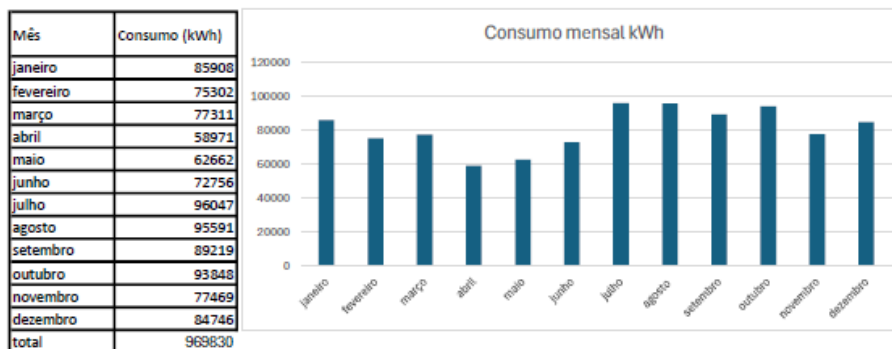
Norton 23



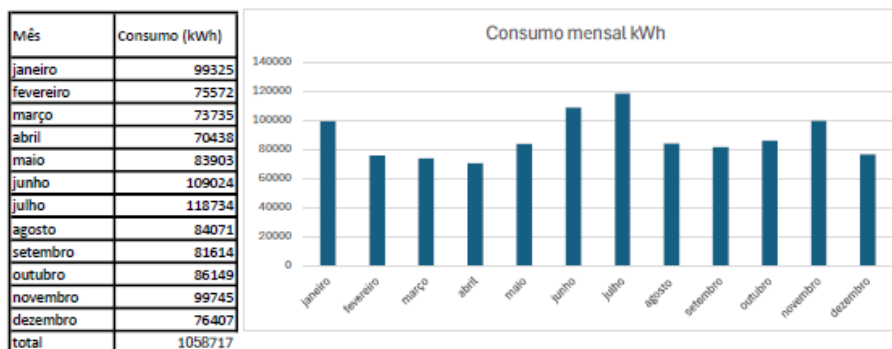
Norton 24



Conservatorio 23

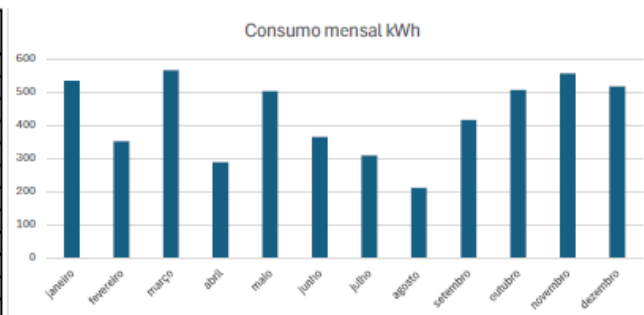


Conservatorio 24



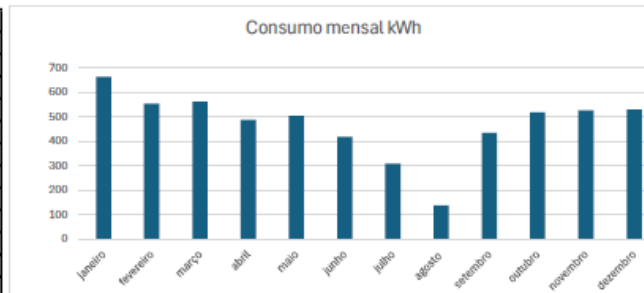
Vale flores 23

Mês	Consumo (kWh)
janeiro	534
fevereiro	352
março	566
abril	288
maio	503
junho	364
julho	308
agosto	211
setembro	416
outubro	507
novembro	556
dezembro	517
total	5122



vale das flores 24

Mês	Consumo (kWh)
janeiro	665
fevereiro	554
março	563
abril	488
maio	503
junho	418
julho	308
agosto	137
setembro	435
outubro	519
novembro	527
dezembro	530
total	5647



7.2 Anexo

B

Conservatório

Original Sunenergy, Lda

Número da proposta: Conservatório_2025



Vista geral do projeto



Figura: Imagem panorâmica, Modelagem 3D

Sistema fotovoltaico

3D, Sistema fv conectado à rede com consumo

Dados climáticos	Coimbra, PRT (2001 - 2020)
Fonte dos valores	Meteonorm 8.2(ii)
Potência do gerador fotovoltaico	333,5 kWp
Area do gerador fotovoltaico	1 631,8 m ²
Quantidade de módulos	667
Quantidade de inversores	6



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 2 de 27

Conservatório

Original Sunenergy, Lda

Número da proposta: Conservatório_2025

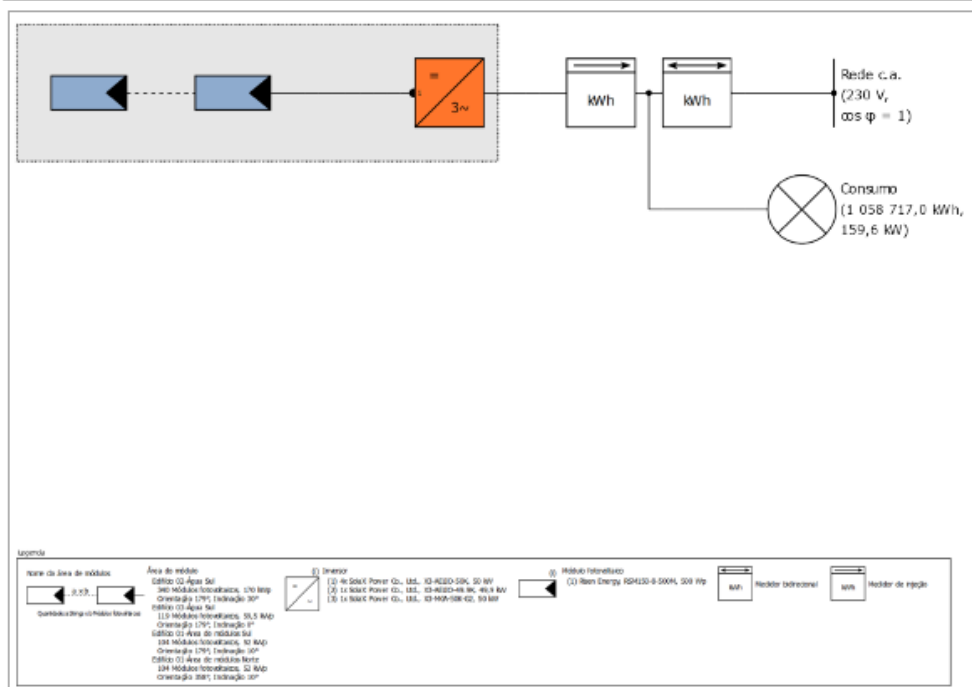


Figura: Esquema elétrico

Previsão de rendimento

Previsão de rendimento

Potência do gerador fotovoltaico	333,50 kWp
Rendimento anual específico	1 423,74 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	84,51 %
Diminuição do rendimento por sombreamento	3,2 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	474 848 kWh/Ano
Autoconsumo	351 296 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	123 552 kWh/Ano
Autoconsumo	74,0 %
Emissões de CO ₂ evitadas	180 430 kg/ano
Nível de autonomia	33,2 %

Conservatório

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: Conservatório_2025



Análise financeira

Seus lucros

Investimento total	500 250,00 €
Taxa interna de retorno	18,38 %
Prazo de amortização	5 Anos, 7 months
Custos de geração da energia	0,0584 €/kWh
Balanço / Conceito de injeção	Injeção do excedente

Os resultados foram determinados com base em um modelo de cálculo matemático da Valentin Software GmbH (algoritmos PV*SOL). Os rendimentos efetivos do sistema de energia solar podem variar em função de oscilações meteorológicas, da eficiência dos módulos e dos inversores, e outros fatores.



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 4 de 27

Conservatório

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: Conservatório_2025



Resultados da simulação

Resultados Sistema completo

Sistema fotovoltaico

Potência do gerador fotovoltaico	333,50 kWp
Rendimento anual específico	1 423,74 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	84,51 %
Diminuição do rendimento por sombreamento	3,2 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	474 848 kWh/Ano
Autoconsumo	351 296 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	123 552 kWh/Ano
Autoconsumo	74,0 %
Emissões de CO ₂ evitadas	180 430 kg/ano

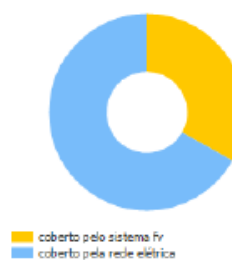
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)



Consumidores

Consumidores	1 058 717 kWh/Ano
Consumo em espera (Inversor)	31 kWh/Ano
Consumo total	1 058 748 kWh/Ano
coberto pelo sistema fv	351 296 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	707 452 kWh/Ano
Fração solar	33,2 %

Consumo total



Nível de autonomia

Consumo total	1 058 748 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	707 452 kWh/Ano
Nível de autonomia	33,2 %



Conservatório

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: Conservatório_2025

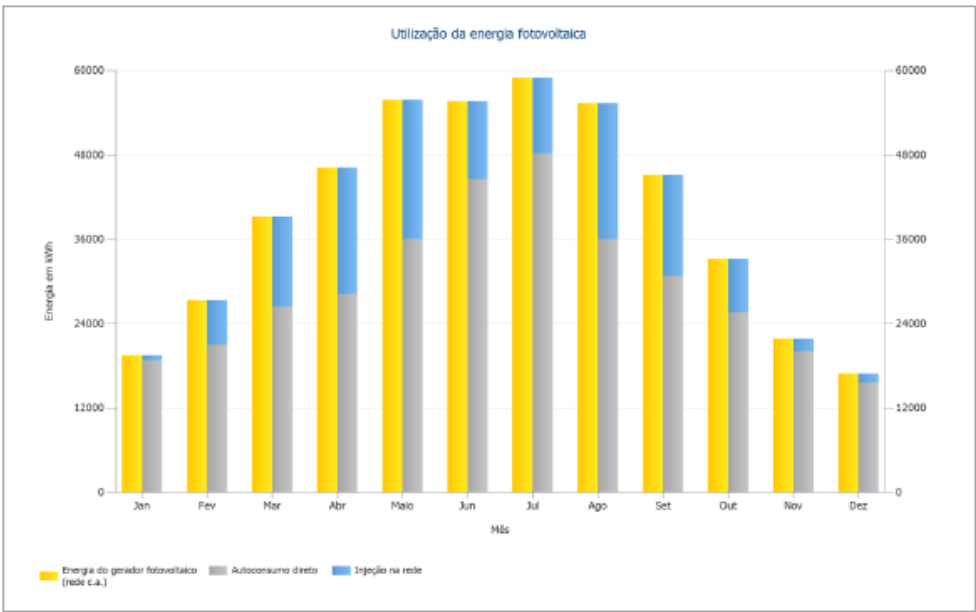


Figura: Utilização da energia fotovoltaica

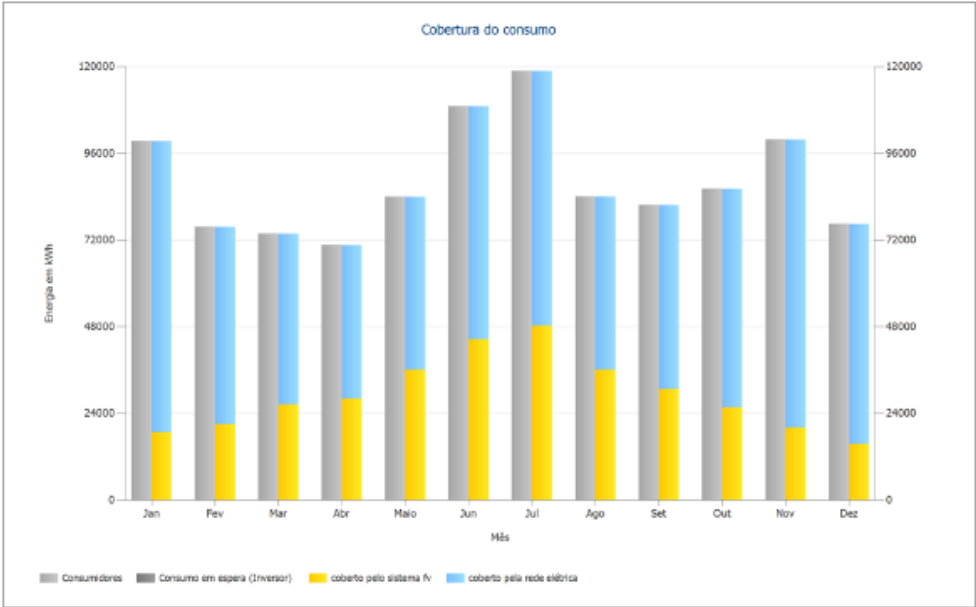


Figura: Cobertura do consumo

Conservatório

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: Conservatório_2025



Análise financeira

Vista geral

Dados do sistema

Injeção na rede no primeiro ano (incl. degradação do módulo)	123 552 kWh/Ano
Potência do gerador fotovoltaico	333,5 kWp
Prazo do projeto (Input)	20 Anos
Juro do capital	1 %

Start, duration and end of remuneration

Início da operação do sistema	26/04/2025
Remuneration period	20 Anos
End of remuneration	25/04/2045

Parâmetros econômicos

Taxa interna de retorno	18,38 %
Fluxo de caixa acumulado	1 350 295,58 €
Prazo de amortização	5 Anos, 7 months
Custos de geração da energia	0,0584 €/kWh

Vista geral de pagamentos

Investimento específico	1 500,00 €/kWp
Custos de investimento	500 250,00 €
Pagamentos únicos	0,00 €
Subsídios	0,00 €
Custos anuais	0,00 €/Ano
Outros lucros ou economias	0,00 €/Ano

Remuneração e Economia

Remuneração total no primeiro ano	23 141,30 €/Ano
Economia no primeiro ano	65 791,93 €/Ano

Nova tarifa - Sistema em edifício

Validade	26/04/2025 - 25/04/2045
Tarifa de injeção específica	0,1873 €/kWh
Tarifa de injeção	23141,3042 €/Ano

Nova tarifa (Example)

Tarifa da energia	0,1873 €/kWh
Inflação da tarifa de energia	2 %/Ano



7.3 Anexo

C



EB Norton de Matos



Original Sunenergy, Lda

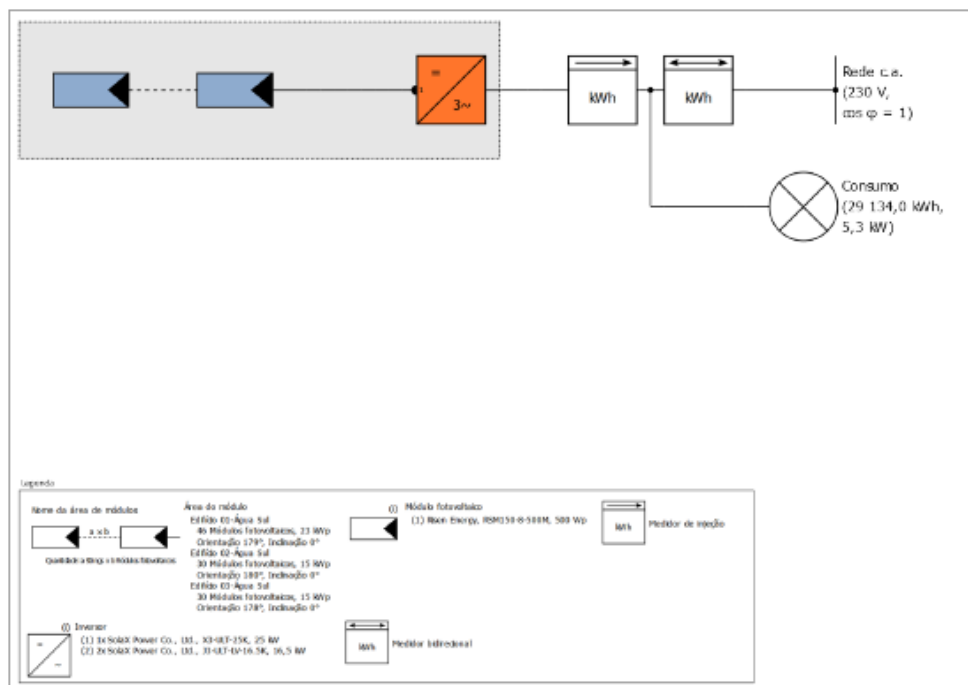


Figura: Esquema elétrico

Previsão de rendimento

Previsão de rendimento

Potência do gerador fotovoltaico	53,00 kWp
Rendimento anual específico	1 402,99 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	87,40 %
Diminuição do rendimento por sombreamento	0,0 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	74 501 kWh/Ano
Autoconsumo	12 276 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	62 225 kWh/Ano
Autoconsumo	16,3 %
Emissões de CO ₂ evitadas	28 256 kg/ano
Nível de autonomia	41,9 %



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 3 de 26

EB Norton de Matos



Original Sunenergy, Lda

Análise financeira

Seus lucros

Investimento total	79 500,00 €
Taxa interna de retorno	16,79 %
Prazo de amortização	5 Anos, 11 months
Custos de geração da energia	0,0592 €/kWh
Balanço / Conceito de injeção	Injeção do excedente

Os resultados foram determinados com base em um modelo de cálculo matemático da Valentin Software GmbH (algoritmos PV*SOL). Os rendimentos efetivos do sistema de energia solar podem variar em função de oscilações meteorológicas, da eficiência dos módulos e dos inversores, e outros fatores.



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 4 de 26

EB Norton de Matos



Original Sunenergy, Lda

Resultados da simulação

Resultados Sistema completo

Sistema fotovoltaico

Potência do gerador fotovoltaico	53,00 kWp
Rendimento anual específico	1 402,99 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	87,40 %
Diminuição do rendimento por sombreamento	0,0 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	74 501 kWh/Ano
Autoconsumo	12 276 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	62 225 kWh/Ano
Autoconsumo	16,3 %
Emissões de CO ₂ evitadas	28 256 kg/ano

Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)



Autoconsumo
Limitação no ponto de injeção
Injeção na rede

Consumidores

Consumidores	29 134 kWh/Ano
Consumo em espera (Inversor)	143 kWh/Ano
Consumo total	29 277 kWh/Ano
coberto pelo sistema fv	12 276 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	17 000 kWh/Ano
Fração solar	41,9 %

Consumo total



coberto pelo sistema fv
coberto pela rede elétrica

Nível de autonomia

Consumo total	29 277 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	17 000 kWh/Ano
Nível de autonomia	41,9 %



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 11 de 26

EB Norton de Matos



Original Sunenergy, Lda

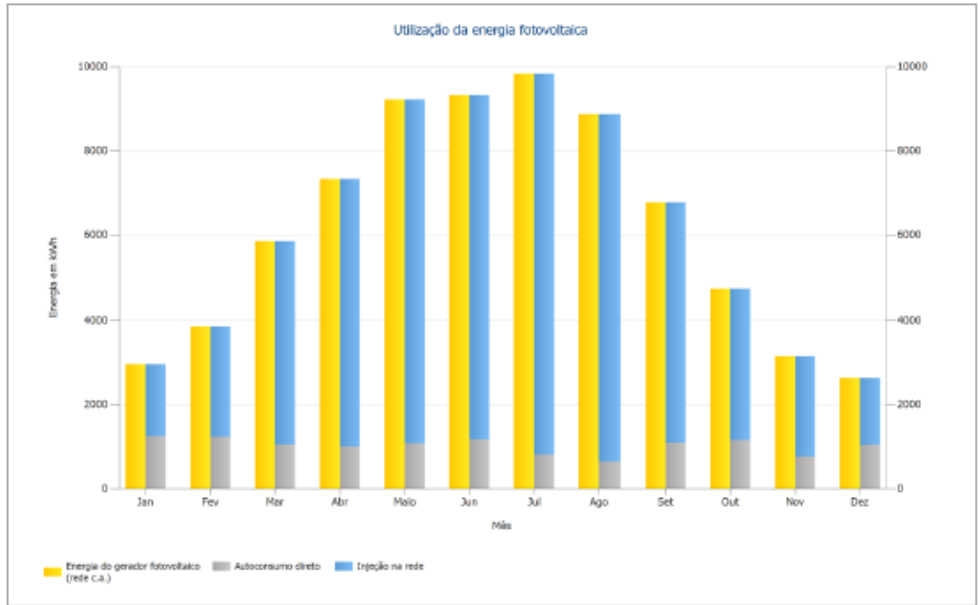


Figura: Utilização da energia fotovoltaica

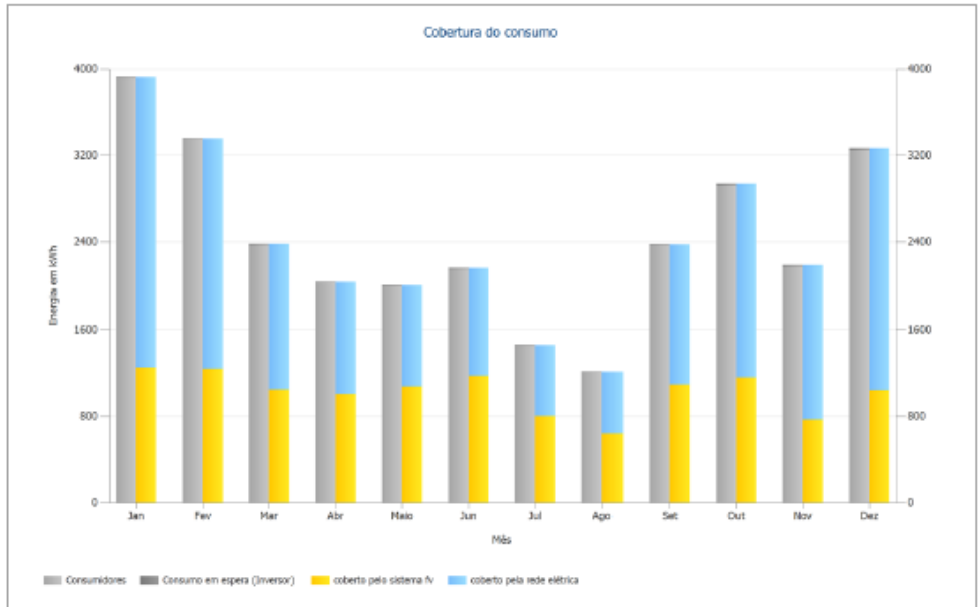


Figura: Cobertura do consumo



EB Norton de Matos



Original Sunenergy, Lda

Análise financeira

Vista geral

Dados do sistema

Injeção na rede no primeiro ano (incl. degradação do módulo)	62 225 kWh/Ano
Potência do gerador fotovoltaico	53 kWp
Prazo do projeto (Input)	20 Anos
Juro do capital	1 %

Start, duration and end of remuneration

Início da operação do sistema	06/04/2025
Remuneration period	20 Anos
End of remuneration	05/04/2045

Parâmetros econômicos

Taxa interna de retorno	16,79 %
Fluxo de caixa acumulado	175 818,16 €
Prazo de amortização	5 Anos, 11 months
Custos de geração da energia	0,0592 €/kWh

Vista geral de pagamentos

Investimento específico	1 500,00 €/kWp
Custos de investimento	79 500,00 €
Pagamentos únicos	0,00 €
Subsídios	0,00 €
Custos anuais	0,00 €/Ano
Outros lucros ou economias	0,00 €/Ano

Remuneração e Economia

Remuneração total no primeiro ano	11 654,69 €/Ano
Economia no primeiro ano	2 272,64 €/Ano

Nova tarifa - Sistema em edifício

Validade	26/04/2025 - 25/04/2045
Tarifa de injeção específica	0,1873 €/kWh
Tarifa de injeção	11654,6923 €/Ano

Nova tarifa (Example)

Tarifa da energia	0,1873 €/kWh
Inflação da tarifa de energia	1 %/Ano



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 14 de 26

7.4 Anexo

D



EB Vale das Flores



Original Sunenergy, Lda

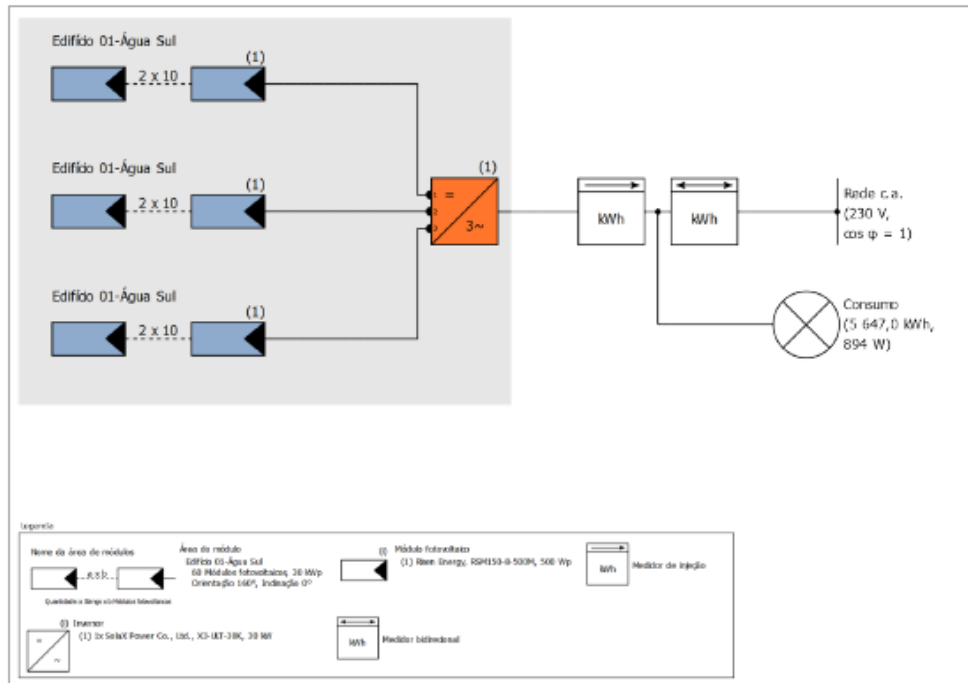


Figura: Esquema elétrico

Previsão de rendimento

Previsão de rendimento

Potência do gerador fotovoltaico	30,00 kWp
Rendimento anual específico	1 400,94 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	87,27 %
Diminuição do rendimento por sombreamento	0,0 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	42 080 kWh/Ano
Autoconsumo	2 530 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	39 551 kWh/Ano
Autoconsumo	5,9 %
Emissões de CO ₂ evitadas	15 971 kg/ano
Nível de autonomia	44,4 %



EB Vale das Flores



Original Sunenergy, Lda

Análise financeira

Seus lucros

Investimento total	45 000,00 €
Taxa interna de retorno	16,72 %
Prazo de amortização	5 Anos, 11 months
Custos de geração da energia	0,0593 €/kWh
Balanço / Conceito de injeção	Injeção do excedente

Os resultados foram determinados com base em um modelo de cálculo matemático da Valentin Software GmbH (algoritmos PV*SOL). Os rendimentos efetivos do sistema de energia solar podem variar em função de oscilações meteorológicas, da eficiência dos módulos e dos inversores, e outros fatores.



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 4 de 19

EB Vale das Flores



Original Sunenergy, Lda

Resultados da simulação

Resultados Sistema completo

Sistema fotovoltaico

Potência do gerador fotovoltaico	30,00 kWp
Rendimento anual específico	1 400,94 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	87,27 %
Diminuição do rendimento por sombreamento	0,0 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	42 080 kWh/Ano
Autoconsumo	2 530 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	39 551 kWh/Ano
Autoconsumo	5,9 %
Emissões de CO ₂ evitadas	15 971 kg/ano

Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)



Consumidores

Consumidores	5 647 kWh/Ano
Consumo em espera (Inversor)	52 kWh/Ano
Consumo total	5 699 kWh/Ano
coberto pelo sistema fv	2 530 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	3 170 kWh/Ano
Fração solar	44,4 %

Consumo total



Nível de autonomia

Consumo total	5 699 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	3 170 kWh/Ano
Nível de autonomia	44,4 %



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 8 de 19

EB Vale das Flores



Original Sunenergy, Lda

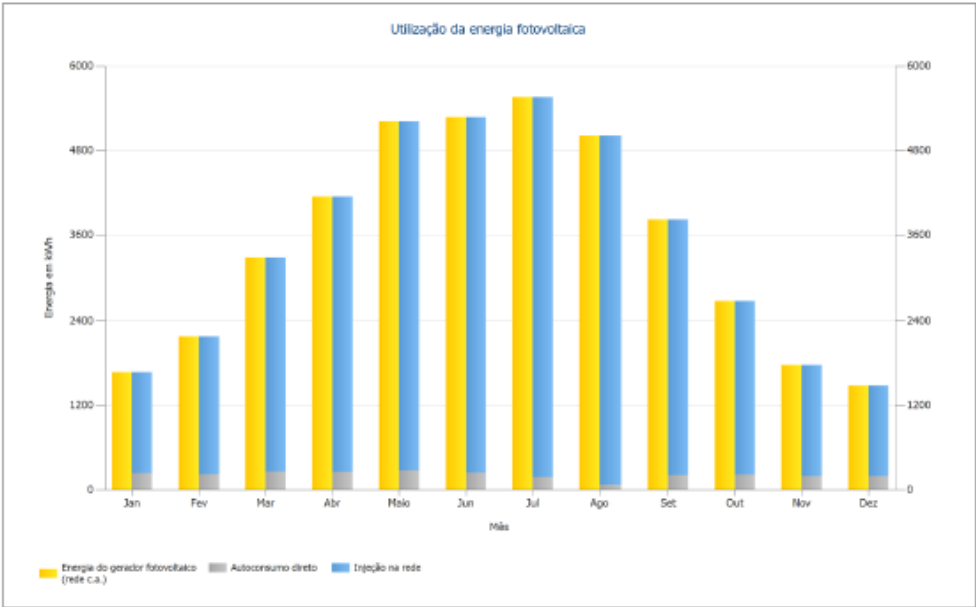


Figura: Utilização da energia fotovoltaica

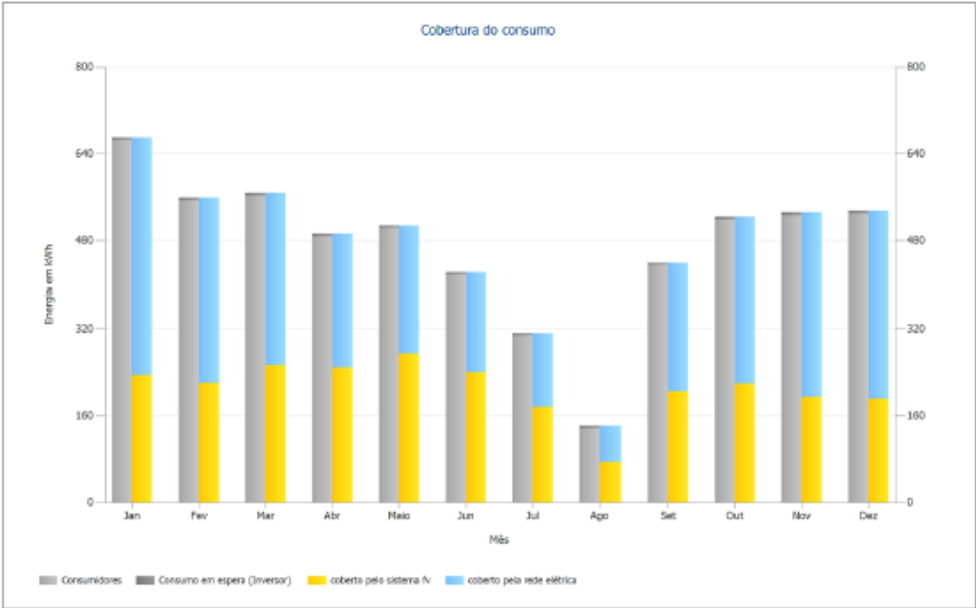


Figura: Cobertura do consumo



EB Vale das Flores



Original Sunenergy, Lda

Análise financeira

Vista geral

Dados do sistema

Injeção na rede no primeiro ano (incl. degradação do módulo)	39 551 kWh/Ano
Potência do gerador fotovoltaico	30 kWp
Prazo do projeto (Input)	20 Anos
Juro do capital	1 %

Start, duration and end of remuneration

Início da operação do sistema	05/04/2025
Remuneration period	20 Anos
End of remuneration	04/04/2045

Parâmetros econômicos

Taxa interna de retorno	16,72 %
Fluxo de caixa acumulado	98 784,68 €
Prazo de amortização	5 Anos, 11 months
Custos de geração da energia	0,0593 €/kWh

Vista geral de pagamentos

Investimento específico	1 500,00 €/kWp
Custos de investimento	45 000,00 €
Pagamentos únicos	0,00 €
Subsídios	0,00 €
Custos anuais	0,00 €/Ano
Outros lucros ou economias	0,00 €/Ano

Remuneração e Economia

Remuneração total no primeiro ano	7 407,88 €/Ano
Economia no primeiro ano	463,98 €/Ano

Nova tarifa - Sistema em edifício

Validade	26/04/2025 - 25/04/2045
Tarifa de injeção específica	0,1873 €/kWh
Tarifa de injeção	7407,8782 €/Ano

Nova tarifa (Example)

Tarifa da energia	0,1873 €/kWh
Inflação da tarifa de energia	2 %/Ano



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 11 de 19

7.5 Anexo

E

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: comunidade_escolas_2024

Vista geral do projeto
Sistema fotovoltaico

Sistema fv conectado à rede com consumo

Dados climáticos	Coimbra, PRT (2001 - 2020)
Fonte dos valores	Meteonorm 8.2(i)
Potência do gerador fotovoltaico	416,5 kWp
Area do gerador fotovoltaico	2 037,9 m ²
Quantidade de módulos	833
Quantidade de inversores	10

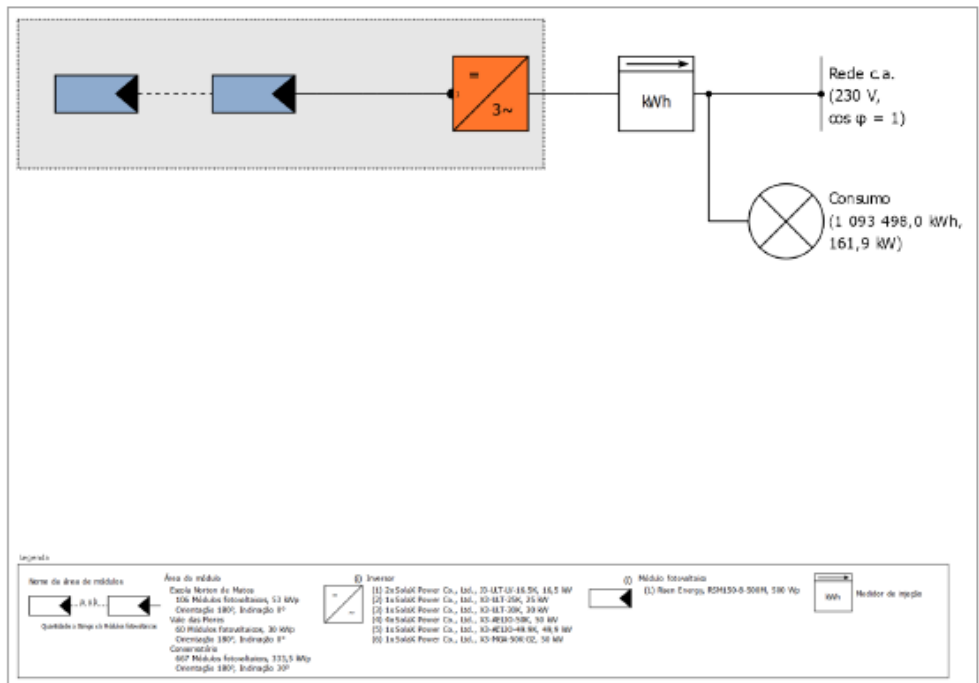


Figura: Esquema elétrico

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: comunidade_escolas_2024

Previsão de rendimento

Previsão de rendimento

Potência do gerador fotovoltaico	416,50 kWp
Rendimento anual específico	1 476,99 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	83,72 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	615 392 kWh/Ano
Autoconsumo	396 749 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	218 642 kWh/Ano
Autoconsumo	64,5 %
Emissões de CO ₂ evitadas	233 763 kg/ano
Nível de autonomia	36,3 %

Análise financeira

Seus lucros

Investimento total	624 750,00 €
Taxa interna de retorno	15,21 %
Prazo de amortização	6 Anos, 9 months
Custos de geração da energia	0,0563 €/kWh
Balanço / Conceito de injeção	Injeção do excedente

Os resultados foram determinados com base em um modelo de cálculo matemático da Valentin Software GmbH (algoritmos PV*SOL). Os rendimentos efetivos do sistema de energia solar podem variar em função de oscilações meteorológicas, da eficiência dos módulos e dos inversores, e outros fatores.



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 3 de 17

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: comunidade_escolas_2024

Áreas do módulo

1. Área do módulo - Escola Norton de Matos

Gerador fotovoltaico, 1. Área do módulo - Escola Norton de Matos

Nome	Escola Norton de Matos
Módulos fotovoltaicos	106 x RSM150-8-500M (v1)
Fabricante	Risen Energy
Inclinação	0 °
Orientação	Sul 180 °
Situação de montagem	Integrado no telhado - sem ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	259,3 m ²

2. Área do módulo - Vale das Flores

Gerador fotovoltaico, 2. Área do módulo - Vale das Flores

Nome	Vale das Flores
Módulos fotovoltaicos	60 x RSM150-8-500M (v1)
Fabricante	Risen Energy
Inclinação	0 °
Orientação	Sul 180 °
Situação de montagem	Integrado no telhado - sem ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	146,8 m ²

3. Área do módulo - Conservatório

Gerador fotovoltaico, 3. Área do módulo - Conservatório

Nome	Conservatório
Módulos fotovoltaicos	667 x RSM150-8-500M (v1)
Fabricante	Risen Energy
Inclinação	30 °
Orientação	Sul 180 °
Situação de montagem	Integrado no telhado - sem ventilação traseira
Area do gerador fotovoltaico	1 631,8 m ²

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: comunidade_escolas_2024

Resultados da simulação

Resultados Sistema completo

Sistema fotovoltaico

Potência do gerador fotovoltaico	416,50 kWp
Rendimento anual específico	1 476,99 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	83,72 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	615 392 kWh/Ano
Autoconsumo	396 749 kWh/Ano
Limitação no ponto de injeção	0 kWh/Ano
Injeção na rede	218 642 kWh/Ano
Autoconsumo	64,5 %
Emissões de CO ₂ evitadas	233 763 kg/ano

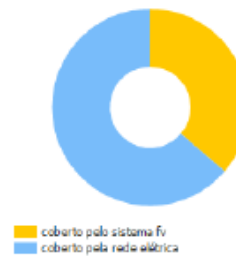
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)



Consumidores

Consumidores	1 093 498 kWh/Ano
Consumo em espera (Inversor)	225 kWh/Ano
Consumo total	1 093 723 kWh/Ano
coberto pelo sistema fv	396 749 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	696 974 kWh/Ano
Fração solar	36,3 %

Consumo total



Nível de autonomia

Consumo total	1 093 723 kWh/Ano
coberto pela rede elétrica	696 974 kWh/Ano
Nível de autonomia	36,3 %

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: comunidade_escolas_2024

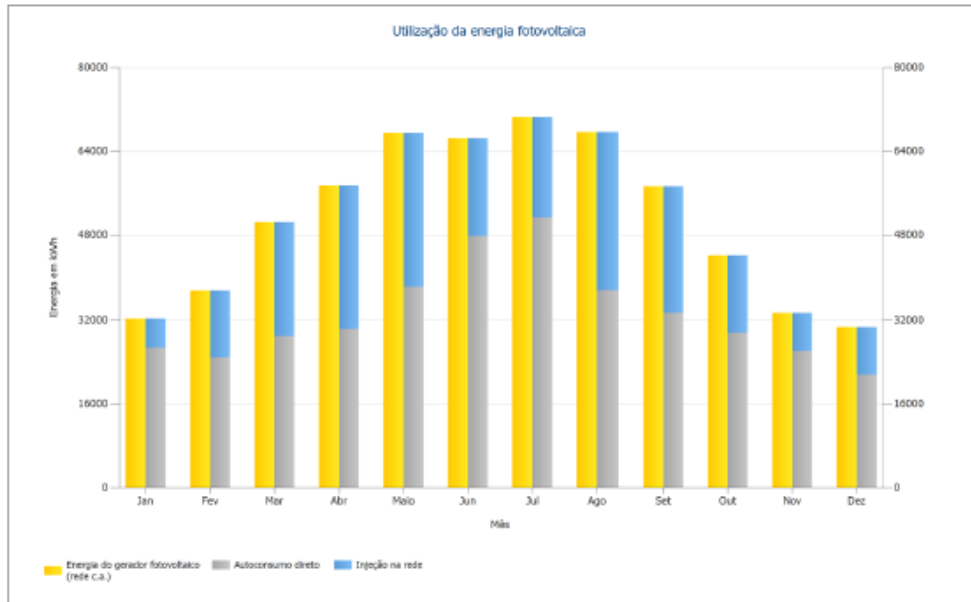


Figura: Utilização da energia fotovoltaica

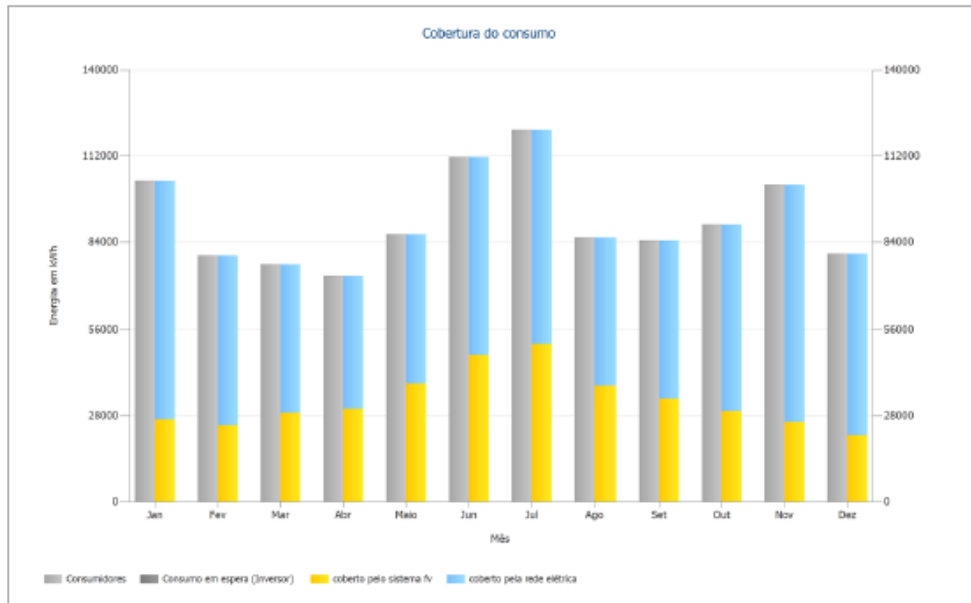


Figura: Cobertura do consumo

Original Sunenergy, Lda
Número da proposta: comunidade_escolas_2024

Análise financeira

Vista geral

Dados do sistema

Injeção na rede no primeiro ano (incl. degradação do módulo)	218 642 kWh/Ano
Potência do gerador fotovoltaico	416,5 kWp
Prazo do projeto (Input)	20 Anos
Juro do capital	1 %

Start, duration and end of remuneration

Início da operação do sistema	08/09/2025
Remuneration period	20 Anos
End of remuneration	07/09/2045

Parâmetros econômicos

Taxa interna de retorno	15,21 %
Fluxo de caixa acumulado	1 351 691,63 €
Prazo de amortização	6 Anos, 9 months
Custos de geração da energia	0,0563 €/kWh

Vista geral de pagamentos

Investimento específico	1 500,00 €/kWp
Custos de investimento	624 750,00 €
Pagamentos únicos	0,00 €
Subsídios	0,00 €
Custos anuais	0,00 €/Ano
Outros lucros ou economias	0,00 €/Ano

Remuneração e Economia

Remuneração total no primeiro ano	3 375,44 €/Ano
Economia no primeiro ano	87 949,05 €/Ano

EEG 2023 (Teileinspeisung) - Gebäudeanlagen

Validade	08/09/2025 - 31/12/2045
Tarifa de injeção específica	0,0154 €/kWh
Tarifa de injeção	3375,4393 €/Ano

Example Private (Example)

Tarifa da energia	0,2218 €/kWh
Base de preço	6,9 €/Mês
Inflação da tarifa de energia	2 %/Ano



Criado com PV*SOL premium 2025 (R6)
Valentin Software GmbH

Página 12 de 17

