



Ana Rita Grilo Godinho

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Desenvolvimento de plataforma para gestão de Comunidades de Energia Renovável

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Universidade NOVA de Lisboa

novembro, 2021



Desenvolvimento de plataforma para gestão de Comunidades de Energia Renovável

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Ana Rita Grilo Godinho

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Rui Miguel Amaral Lopes,
Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: João Francisco Alves Martins,
Professor Associado, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Pedro Alexandre Sousa,
Professor Associado, NOVA School of Science and Technology | FCT
NOVA

Arguentes: Pedro Miguel Ribeiro Pereira,
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology | FCT
NOVA

Vogais: Rui Miguel Amaral Lopes,
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology | FCT
NOVA

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Universidade NOVA de Lisboa
novembro, 2021

Desenvolvimento de plataforma para gestão de Comunidades de Energia Renovável

Copyright © Ana Rita Grilo Godinho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu excelente orientador, o professor Rui Amaral Lopes, pela orientação, partilha de conhecimentos, apoio e confiança no meu trabalho. Obrigada por me confiar este desafio. Agradeço também ao meu coorientador, o professor João Martins, pela ajuda e por todos os conhecimentos transmitidos. Gostaria também de agradecer a toda a equipa do projeto POCITYF com a qual tive o prazer de poder trabalhar e aprender, e em particular ao Humberto Queiroz, por toda a ajuda, conselhos e partilha de conhecimentos.

Quero agradecer também a todos os meus colegas de MIEEC com os quais pude trabalhar, aprender e crescer, sem eles esta experiência incrível não seria a mesma. Particularmente à Margarida Grilo, ao Pedro Oliveira e ao Gui Russo, que estão comigo desde o início destes cinco anos de curso, por serem pessoas incríveis e por me fazerem crescer convosco, vocês são a minha segunda família. E ao Pedro Albuquerque, pela companhia, conversas e passeios à beira-mar.

Um agradecimento especial às que estiveram sempre aqui, mesmo longe, para me levantar nos maus momentos e festejar nos bons, as minhas amigas de sempre, a Ana Almeida, Beatriz Brito, Elisa Sério, Mónia Sério e Rita Silva.

Por fim, e o agradecimento mais importante de todos, é dirigido à minha família, que está sempre ao meu lado a apoiar para que alcance todos os meus sonhos. Especialmente aos meus pais, devo a eles a pessoa que sou, obrigada por serem seres extraordinários, por me proporcionarem a melhor educação, por me apoiarem, por acreditarem sempre em mim, por não me deixarem cair nos momentos mais difíceis e por nunca me colocarem barreiras e ainda ajudarem a enfrentar as que encontro.

Sou uma sortuda por ter todas estas pessoas na minha vida, obrigada!

*"Nunca ande pelo caminho traçado,
pois ele conduz somente até onde os outros já foram."
(Alexander Graham Bell)*

RESUMO

Devido às consequências das alterações climáticas sentidas nas últimas décadas, a Comissão Europeia demonstrou, no Pacto Ecológico Europeu, a sua preocupação com a urgente descarbonização dos sistemas energéticos, lançando como meta o alcance da neutralidade carbónica no ano de 2050. Para que tal ocorra, é necessário um aumento da geração de energia renovável, permitindo o surgimento de novas entidades no mercado energético, tais como as Comunidades de Energia Renovável (CER).

Neste contexto, o trabalho descrito na presente dissertação apresenta como principal objetivo o desenvolvimento de uma plataforma que permite a gestão de membros, receitas e partilha de energia através de coeficientes de partilha numa CER que pratique autoconsumo coletivo. Para validação das funcionalidades da plataforma desenvolvida foi realizado um estudo de caso. Os resultados obtidos permitem concluir que com coeficientes de partilha de energia dinâmicos e proporcionais ao consumo das instalações de consumo, e com a otimização dos consumos de uma forma coletiva, é possível obter uma maior redução na fatura energética e diminuir o valor da potência de pico anual registada na rede de distribuição de energia elétrica, oferecendo vantagens a nível económico para a CER e operacionais a nível da rede elétrica. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto europeu POCITYF (*a positive energy city transformation framework*) financiado pelo programa H2020 (*Grant Agreement ID 864400*).

Palavras chave: Comunidades de Energia Renovável, Autoconsumo Coletivo, Coeficientes de Partilha de Energia.

ABSTRACT

Due to the consequences of climate change experienced in recent decades, the European Commission expressed, in the European Ecological Pact, its concern with the urgent decarbonization of energy systems, setting the goal of achieving carbon neutrality in the year 2050. For this to happen, an increase in renewable energy generation is needed, allowing the emergence of new entities in the energy market, such as the Renewable Energy Communities (REC).

In this context, the work described in this dissertation has as its main objective the development of a platform that allows the management of members, revenues and energy sharing through sharing coefficients in a REC that implements collective self-consumption. To validate the features of the developed platform, a case study was carried. The results obtained allowed to conclude that with dynamic energy sharing coefficients, proportional to energy consumption, and with the optimization of consumption in a collective way, it is possible to obtain a greater reduction in the energy bill and reduce the value of peak power registered in the electricity distribution grid, offering economic advantages for CER and operational advantages at the level of the electricity grid. This work was carried out under the context of European POCITYF project (a positive energy city transformation framework) financed by H2020 (Grant Agreement ID 864400).

Keywords: Renewable Energy Communities, Collective Self-Consumption, Energy Sharing Coefficients.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	4
1.3.	ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	4
2.	ESTADO DA ARTE	5
2.1.	COMUNIDADES DE ENERGIA RENOVÁVEL	5
2.1.1.	<i>Mercados de Energia</i>	7
2.1.2.	<i>Gestão de energia ao nível da comunidade</i>	12
2.1.3.	<i>Exemplos de CER Existentes</i>	18
2.2.	PLATAFORMAS PARA GESTÃO DE COMUNIDADES.....	20
2.3.	REGULAMENTO DE AUTOCONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	24
2.4.	DISCUSSÃO	25
3.	PLATAFORMA PROPOSTA	28
3.1.	ESTRUTURA DE DADOS.....	32
3.2.	TIPO DE COMUNIDADE E CONSUMO	33
3.3.	COEFICIENTES DE PARTILHA DE ENERGIA	35
3.3.1.	<i>Coeficientes Fixos</i>	35
3.3.2.	<i>Coeficientes Fixos Proporcionais ao Consumo</i>	35
3.3.3.	<i>Coeficientes Dinâmicos Proporcionais ao Consumo</i>	36
3.3.4.	<i>Coeficientes Dinâmicos com Pesos</i>	36
3.4.	CUSTO DA ENERGIA	37
3.5.	INTERFACE GRÁFICA.....	42
3.5.1.	<i>Menu da Entidade Gestora</i>	42
3.5.2.	<i>Menu do Consumidor</i>	49
4.	RESULTADOS E ANALISE	50
4.1.	CASO DE ESTUDO.....	50
4.2.	RESULTADOS.....	52
4.2.1.	<i>Cenário 1</i>	52
4.2.2.	<i>Cenário 2</i>	53

4.2.3.	<i>Cenário 3</i>	55
4.2.4.	<i>Cenário 4</i>	57
4.2.5.	<i>Cenário 5</i>	60
4.2.6.	<i>Cenário 6</i>	62
4.3.	DISCUSSÃO	65
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1.	REVISÃO GERAL.....	69
5.2.	CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	70
5.3.	TRABALHOS FUTUROS.....	70
6.	BIBLIOGRAFIA	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - MODELO DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA P2P (ADAPTADO DE [25]).	7
FIGURA 2.2 - ESTRUTURA DE MERCADO DO MERCADO EXCLUSIVAMENTE P2P (ADAPTADO DE [24]).	8
FIGURA 2.3 - ESTRUTURA DE MERCADO COMUNITÁRIO (ADAPTADO DE [24]).	9
FIGURA 2.4 - ESTRUTURA DO MERCADO P2P HÍBRIDO (ADAPTADO DE [24]).	10
FIGURA 2.5 - DIFERENTES TIPOS DE RESIDÊNCIAS NUMA MICRO-REDE (ADAPTADO DE [31]).	12
FIGURA 2.6 - LIGAÇÃO ENTRE CASAS DE UMA MICRO-REDE COM EMS CENTRAL [31].	13
FIGURA 2.7 - CONFIGURAÇÃO DA EMS CENTRAL NUMA MICRO-REDE [31].	14
FIGURA 2.8 - ESQUEMÁTICO DA GESTÃO DE ENERGIA NUMA <i>SMART GRID</i> (ADAPTADO DE [33]).	17
FIGURA 2.9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLATAFORMA PARA UM MERCADO DE ENERGIA P2P (ADAPTADO DE [34]).	18
FIGURA 2.10 - ESQUEMA DE ORGANIZAÇÃO DA COMUNIDADE E LOCALIZAÇÃO DOS TAGE (ADAPTADO DE [37]).	21
FIGURA 2.11 - CONCEITO DE <i>HIVE</i> [47].	23
FIGURA 3.1 - ESQUEMÁTICO DAS INTERAÇÕES ENTRE A CER, PLATAFORMA DE GESTÃO DA CER, UTILIZADORES E ENTIDADES EXTERIORES.	29
FIGURA 3.2 - ESQUEMÁTICO DE ENTRADAS E SAÍDAS DA PLATAFORMA DE GESTÃO DE CER.	31
FIGURA 3.3 - FLUXOGRAMA CORRESPONDENTE À SELEÇÃO DO TIPO DE COMUNIDADE.	34
FIGURA 3.4 - FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DA POTÊNCIA IMPORTADA E EXPORTADA POR CADA MEMBRO.	40
FIGURA 3.5 - FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DA FATURAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA DENTRO DA CER.	40
FIGURA 3.6 - <i>LOGIN</i> NA PLATAFORMA COM DIFERENCIAÇÃO NO UTILIZADOR.	42
FIGURA 3.7 - MENU PRINCIPAL DO GESTOR DA CER (A); OPÇÃO "ADICIONAR MEMBRO" (B); OPÇÃO "ELIMINAR MEMBRO" (C).	43
FIGURA 3.8 - MENU DA OPÇÃO PROGRAMAR COMUNIDADE (A); OPÇÕES PARA DEFINIR O TIPO DE COMUNIDADE (B); MENU PARA ESCOLHA DO MÉTODO DE CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE PARTILHA (C).	44
FIGURA 3.9 - OPÇÃO PARA INSERIR O VALOR DOS COEFICIENTES FIXOS (A); OPÇÃO PARA INSERIR O VALOR DOS PESOS PARA O CÁLCULO DOS COEFICIENTES DINÂMICOS COM PESOS (B); AVISO DE QUE A SOMA DOS VALORES INTRODUZIDOS ANTERIORMENTE TERÁ DE SER IGUAL A UM (C).	45
FIGURA 3.10 - OPÇÃO PARA INTRODUÇÃO DAS TARIFAS DE VENDA (A); MENU CORRESPONDENTE À OPÇÃO VER DADOS DA COMUNIDADE (B) E (C).	45
FIGURA 3.11 - LISTA DE MEMBROS PARTICIPANTES NA CER (A); DIAGRAMA DE CARGA ANUAL (B); DIAGRAMA DE CARGA MENSAL (C).	46
FIGURA 3.12 - DIAGRAMA DE CARGA DIÁRIO (A); DIAGRAMA DE CARGA ANUAL (B); LISTA DE INVESTIMENTOS DE TODOS OS MEMBROS NA CER (C).	47
FIGURA 3.13 - OPÇÃO DE VER OS COEFICIENTES DE PARTILHA QUANDO ESTES SÃO DINÂMICOS (A); OPÇÃO DE VER OS COEFICIENTES DE PARTILHA QUANDO ESTES SÃO FIXOS (B); VISUALIZAR AS TARIFAS DE CADA MEMBRO (C).	48
FIGURA 3.14 - VISUALIZAR AS TARIFAS REFERENTES À COMUNIDADE (A); VISUALIZAÇÃO DAS FATURAS ENERGÉTICAS E POUPANÇAS ASSOCIADAS DE CADA MEMBRO (B); MENU CORRESPONDENTE À OPÇÃO DE VER A COMUNIDADE COMO UM TODO (C).	48
FIGURA 3.15 - MENU PRINCIPAL DO CONSUMIDOR (A); OPÇÃO VER POTÊNCIA ATRIBUÍDA (B); OPÇÃO VER POTÊNCIA IMPORTADA (C).	49
FIGURA 4.1 - REPRESENTAÇÃO DO BAIRRO HABITACIONAL CONSIDERADO PARA O CASO DE ESTUDO.	50

FIGURA 4.2 - POTÊNCIAS DE PICO EM kW NO NÓ DO TRANSFORMADOR, DE TODOS OS MESES AO LONGO DE UM ANO, PARA O CENÁRIO 1.	52
FIGURA 4.3 - POTÊNCIAS DE PICO EM kW NO NÓ DO TRANSFORMADOR, DE TODOS OS MESES AO LONGO DE UM ANO, PARA O CENÁRIO 2.	54
FIGURA 4.4 - DIAGRAMAS DE CARGA DO DIA 22 DE JUNHO: POTÊNCIA IMPORTADA (A) POTÊNCIA EXPORTADA (B).....	56
FIGURA 4.5 - DIAGRAMAS DE CARGA DO DIA 22 DE DEZEMBRO: POTÊNCIA IMPORTADA (A) POTÊNCIA EXPORTADA (B). 57	
FIGURA 4.6 - DIAGRAMAS DE CARGA DO CONSUMO TOTAL DA CER DO DIA 22 DE JUNHO: CENÁRIO 2 (A) E CENÁRIO 4 (B).....	58
FIGURA 4.7 - POTÊNCIAS DE PICO EM kW NO NÓ DO TRANSFORMADOR, DE TODOS OS MESES AO LONGO DE UM ANO, PARA O CENÁRIO 4.	58
FIGURA 4.8 - DIAGRAMAS DE CARGA ANUAIS CORRESPONDENTES À POTÊNCIA IMPORTADA PELA CER: CENÁRIO 3 (A) E CENÁRIO 4 (B).....	59
FIGURA 4.9 - COEFICIENTES DINÂMICOS CORRESPONDENTES AO DIA 22 DE JUNHO, PARA O CENÁRIO 5.....	60
FIGURA 4.10 - DIAGRAMAS DE CARGA DO CONSUMO TOTAL DA CER DO DIA 22 DE JUNHO: CENÁRIO 2 (A) E CENÁRIO 6 (B).....	63
FIGURA 4.11 - POTÊNCIAS DE PICO EM kW NO NÓ DO TRANSFORMADOR, DE TODOS OS MESES AO LONGO DE UM ANO, PARA O CENÁRIO 6.	63
FIGURA 4.12 - DIAGRAMAS DE CARGA DA POTÊNCIA TOTAL IMPORTADA PELA CER NO DIA 22 DE DEZEMBRO: CENÁRIO 4 (A) E CENÁRIO 6 (B).....	64
FIGURA 4.13 - POTÊNCIAS DE PICO EM kW REGISTRADAS AO LONGO DE UM ANO EM TODOS OS CENÁRIOS DE ESTUDO. 65	

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1.1 - CER VERSUS CEE: SÍNTESE DE ASPETOS DIFERENCIADORES [13].	3
TABELA 2.1 - SUMÁRIO DAS TRÊS ESTRUTURAS DE MERCADOS P2P [24] [26].....	11
TABELA 2.2 - PRIORIDADE DE PARTILHA DE ENERGIA NA EMS PRIMARIA (ADAPTADO DE [31]).	14
TABELA 2.3 - PRIORIDADE DE PARTILHA DE ENERGIA NO EMS SECUNDÁRIO (ADAPTADO DE [31]).	14
TABELA 2.4 - RESULTADOS OBTIDOS NO ESTUDO EFETUADO NA AUSTRÁLIA [31].	16
TABELA 3.1 - ESTRUTURA DE DADOS DA PLATAFORMA DE GESTÃO DE CERS.....	32
TABELA 3.2 - METODOLOGIA DO CÁLCULO DA FATURAÇÃO CONSOANTE O TIPO DE CER.	39
TABELA 4.1 - TARIFAS TRANSITÓRIA DE VENDA A CLIENTES FINAIS EM BAIXA TENSÃO NORMAL (BTN) ATÉ 20,7 KVA [52].	51
TABELA 4.2 - CUSTO ANUAL DE ENERGIA, EM EUROS, DE CADA EDIFÍCIO CORRESPONDENTE AO CENÁRIO 1.....	53
TABELA 4.3 - CUSTO ANUAL DE ENERGIA, EM EUROS, DE CADA EDIFÍCIO CORRESPONDENTE AO CENÁRIO 2.....	54
TABELA 4.4 - CUSTO ANUAL DE ENERGIA, EM EUROS, DE CADA EDIFÍCIO CORRESPONDENTE AO CENÁRIO 3.....	55
TABELA 4.5 - CUSTO ANUAL DE ENERGIA, EM EUROS, DE CADA EDIFÍCIO CORRESPONDENTE AO CENÁRIO 4.....	59
TABELA 4.6 - CUSTO ANUAL DE ENERGIA, EM EUROS, DE CADA EDIFÍCIO CORRESPONDENTE AO CENÁRIO 5.....	61
TABELA 4.7 - DIFERENÇA DE CUSTOS ANUAIS DE ENERGIA ENTRE O CENÁRIO 3 E O CENÁRIO 5, EM EUROS.....	62
TABELA 4.8 - CUSTO ANUAL DE ENERGIA, EM EUROS, DE CADA EDIFÍCIO CORRESPONDENTE AO CENÁRIO 6.....	64
TABELA 4.9 - POTÊNCIAS DE PICO EM KW ANUAIS DE TODOS OS CENÁRIOS EM ESTUDO.....	65
TABELA 4.10 - CUSTOS TOTAIS ANUAIS DA ENERGIA PARA OS CENÁRIOS DO CASO DE ESTUDO.....	66

SIGLAS E ABREVIATURAS

BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
CCE	Comunidades de Cidadãos para a Energia
CER	Comunidades de Energia Renovável
CPE	Código de Ponto de Entrega
EGAC	Entidade Gestora do Autoconsumo Coletivo
EMS	<i>Energy Management Scheme</i>
ER	Energia Renovável
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FER	Fontes de Energia Renováveis
IA	Instalação de Armazenamento participante em autoconsumo
IC	Instalação de Consumo participante em autoconsumo
IPr	Instalação de Produção de eletricidade para autoconsumo
P2P	Ponto-a-Ponto
RED	Recursos de Energia Distribuída
ORD	Operador de Rede de Distribuição de eletricidade
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo

Introdução

O presente capítulo contém o enquadramento e motivação para o tema desenvolvido na dissertação, os objetivos a serem alcançados e a estrutura do documento apresentado.

1.1. Enquadramento e Motivação

As consequências das alterações climáticas sentidas são alvo de grandes preocupações para todo o mundo. As últimas décadas foram as mais quente algumas vez registadas, o que fez com que a ocorrência e a intensidade dos fenómenos meteorológicos extremos aumentassem, provocando uma enorme devastação e perda de vidas [1]. Em 2015, com a assinatura do Acordo de Paris [2], surge uma mudança de paradigma, onde é reconhecido que é necessário o contributo de todos para combater as alterações climáticas. É reconhecida a inevitabilidade da transição energética dada a urgência climática e a necessidade de mudança do paradigma económico, em particular, no que toca à utilização de combustíveis fósseis [3].

Por parte da Comissão Europeia surgem diversos pacotes estratégicos como resposta para este desafio global [3]. Destes destacam-se o Pacote Energia Clima 2030 [4], o Pacote Mobilidade Limpa [5] e o Pacote Energia Limpa para todos os Europeus [6]. A Comissão Europeia, no Pacto Ecológico Europeu, demonstra também a sua preocupação com as alterações climáticas e com a urgência da descarbonização dos processos industriais, colocando metas ambiciosas para 2030 e 2050, tendo como objetivo a neutralidade carbónica para 2050. Para que os objetivos sejam alcançados, é necessário diminuir o consumo de combustíveis fósseis e desenvolver um setor energético baseado em fontes de energia renováveis (FER), pois mais de 75% das emissões de gases com efeito de estufa na União Europeia são provenientes da produção e da utilização de energia em todos os setores económicos. Além disso é imperativo priorizar a eficiência energética [7].

No âmbito do Plano Nacional de Energia e Clima para o horizonte 2021-2030 [3], Portugal estabeleceu metas para 2030 no sentido de estar na vanguarda da transição energética. Uma das metas a alcançar é atingir uma quota de 47% de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto no horizonte estipulado (meta definida no PNEC) [8]. Para ser possível alcançar esta quota é necessário que as FER contribuam com pelo menos 80% da

produção de eletricidade do país, sendo que a capacidade instalada de tecnologia fotovoltaica deverá atingir pelo menos 1GW [8]. Até 2030, Portugal pretende reduzir a emissão de dióxido de carbono (CO₂) em 45% a 55%, aumentar em 35% a eficiência energética, aumentar 20% de renováveis nos transportes e 15% nas interligações elétricas, comparativamente ao ano de 2005 [3] [9].

Ainda no âmbito do referido plano [3], e com os objetivos de redução da dependência energética do país e reforço da produção de energia a partir das FER, verificou-se a importância do desenvolvimento de mecanismos que permitam uma promoção e disseminação da produção descentralizada de eletricidade a partir de FER [8]. Ou seja, é necessário encontrar novas vias inovadoras de projetar, organizar e operar o modelo atual de produção de energia elétrica de forma que seja possível uma integração significativa de FER [10].

Posto isto, é necessária uma transição para um sistema energético sustentável, ou seja, um afastamento do modelo de produção centralizado tradicional, onde os cidadãos são consumidores passivos da energia gerada e colocada nos pontos de consumo. É pretendido garantir uma participação ativa dos cidadãos e empresas na transição energética [9] [10]. A descentralização da geração de energia elétrica não oferece apenas vantagens para o setor energético do país, mas também oferece benefícios a nível social, nomeadamente através da criação de emprego e da melhoria da competitividade das empresas distribuídas no território nacional, havendo assim uma melhoria na coesão social e territorial [8]. É cada vez mais frequente o surgimento de políticas de apoio e incentivo para a instalação de sistemas fotovoltaicos. No caso de consumidores domésticos, estes incentivos permitem reduzir substancialmente os montantes das faturas de energia ao mesmo tempo que ajudam o meio ambiente e contribuem para o alcance das metas ambientais estabelecidas. Com isso, conseguem identificar-se também algumas contribuições a nível social, uma vez que estas medidas, quando aproveitadas, acabam por colaborar para uma redução nas desigualdades sociais pelo aumento do poder de compra conseguido pelas poupanças proporcionadas [1] [9].

Com a transição energética é pretendido, para além de um sistema baseado maioritariamente em fontes de energia renováveis, alcançar um modelo energético mais democrático, onde seja possível a partilha de energia e autoconsumo coletivo [11]. Neste contexto, o autoconsumo é regulamentado através do decreto de lei 162/2019 (25 out), onde é referido que o autoconsumidor para além de produzir e consumir a energia produzida, pode também partilhar, armazenar ou vender os excedentes de produção. Através deste dispositivo legal também é possível um regime no qual uma ou mais unidades de produção de energia renovável podem estar ligadas a um ou mais pontos de consumo, realizando assim autoconsumo coletivo [8] [12].

Através do avanço tecnológico, nomeadamente na comunicação e na digitalização de processos, é possível converter as redes tradicionais em redes inteligentes, o que abre novas oportunidades para a melhoria na gestão de consumos, utilização da flexibilidade energética

ou a integração de uma maior quantidade de produção distribuída. Tudo isto facilita a transição para uma produção descentralizada, que é o primeiro passo para o autoconsumo [11].

Neste contexto, surgem as Comunidades de Energia Renovável (CER), um modelo de gestão e organização que visa permitir, não apenas o uso coletivo de sistemas de produção e armazenamento, mas colocar a sua gestão nas mãos das comunidades e dos cidadãos [11]. Existem duas abordagens associadas às comunidades de energia entendidas como entidades juridicamente reconhecidas pelo atual quadro Regulamentar Europeu, sendo estas, as Comunidades de Energia Renovável (CER) e as Comunidades de Cidadãos para a Energia (CCE) [13]. Na Tabela 1.1 é possível observar as principais diferenças entre as duas topologias de comunidades. Concretamente, as CER são comunidades suportadas por um conceito de base social, que promovem a produção de energia através de FER local para satisfazer necessidades locais. O seu principal objetivo é *"proporcionar aos seus acionistas ou membros ou às localidades onde opera benefícios ambientais, económicos e sociais em vez de lucros financeiros"* [13]. As CCE *"podem participar em atividades de produção, inclusive de energia de fontes renováveis, de distribuição, de comercialização, de consumo, de agregação, de armazenamento de energia, de prestação de serviços de eficiência energética, ou de serviços de carregamento para veículos elétricos ou prestar outros serviços energéticos aos seus membros ou aos titulares de participações sociais."* [13].

Tabela 1.1 - CER versus CEE: Síntese de aspetos diferenciadores [13].

CER	CCE
Adesão limitada & Governação específica	Governação específica, mas adesão não limitada
Proximidade à geração de ER	Sem limitação geográfica
Todas as fontes de ER	Apenas considera eletricidade
100% ER	Tecnologicamente neutra
Definida na Diretiva UE 2018/2001 (11 Dez) [14]	Definida na Diretiva UE 2019/944 (5 jun) [15]

O regime jurídico aplicável às CER é estabelecido pelo decreto de lei 162/2019 (25 Out) [8], onde é referido que consumidores com proximidade física podem organizar-se coletivamente de forma a realizarem autoconsumo coletivo ou individual na comunidade, podendo até mesmo estabelecer uma comunidade de energia. Para tal é necessário um regulamento interno onde são definidos os direitos e as obrigações dos consumidores, ou no caso da criação de uma comunidade de energia, esta é organizada através de uma entidade jurídica do tipo cooperativa ou sociedade participada tanto por autoconsumidores como por outras entidades envolvidas no projeto de autoconsumo [12]. O princípio de funcionamento das CER é regulado pelo regulamento 373/2021 da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) [16].

1.2. Objetivos

No âmbito do projeto europeu POCITYF (*a positive energy city transformation framework*), financiado pelo programa H2020 (*Grant Agreement ID 864400*), e considerando a informação reportada na secção anterior, os objetivos a atingir com a dissertação são os seguintes:

1. Desenvolver uma metodologia que permita a gestão das trocas energéticas dentro de uma comunidade de energia renovável (CER), bem como a gestão das trocas de energia entre comunidades;
2. Desenvolver uma plataforma de suporte às CER e de simulação, onde seja possível efetuar uma gestão de trocas energéticas, membros e receitas na CER;
3. Utilizar a plataforma desenvolvida num estudo de caso, permitindo analisar os resultados obtidos e mostrar o funcionamento da plataforma.

1.3. Estrutura do documento

O presente documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Introdução: é feita uma introdução ao tema desenvolvido, apresentando o enquadramento, a motivação e os objetivos a alcançar;
- Capítulo 2 - Estado da Arte: são abordados os dois temas principais do presente documento, as comunidades de energia renovável e as plataformas de gestão de comunidades;
- Capítulo 3 - Plataforma Proposta: é descrita a plataforma para gestão de CER proposta, particularizando a estrutura de dados considerada, a metodologia de escolha do tipo de CER, a metodologia de cálculo dos coeficientes de partilha de energia e de faturação na CER. É feita também uma descrição da interface gráfica da plataforma;
- Capítulo 4 - Resultados e Análise: é apresentado o caso de estudo considerado para a obtenção de resultados e é feita uma análise e discussão dos resultados obtidos;
- Capítulo 5 - Considerações Finais: é feita uma revisão geral do trabalho desenvolvido na presente dissertação, bem como uma descrição das contribuições originais e trabalhos futuros.

Estado da Arte

O presente capítulo tem como objetivos apresentar o conceito de CER, citar algumas vantagens na sua criação e demonstrar diversas formas organizacionais das mesmas, mostrando exemplos reais. São abordados também os diferentes tipos de mercados possíveis de implementar numa comunidade em conjunto com algumas metodologias de gestão de energia elétrica dentro de uma CER. São dados exemplos de algumas plataformas para gestão de comunidades existentes e com diferentes funcionamentos, quer seja na gestão da energia, na gestão dos membros da CER ou ambas. Por fim é apresentada uma discussão sobre todos os tópicos abordados no capítulo.

2.1. Comunidades de Energia Renovável

As comunidades de energia renovável, cuja definição se encontra na introdução do presente documento, são descritas em [17] como sendo um projeto ou programa realizado por um grupo de pessoas que partilham uma localização geográfica e um conjunto de interesses, tais como o consumo e produção de ER, apoiando assim a geração de energia distribuída. Os benefícios e custos desta iniciativa são aplicados, na sua maioria, aos seus membros. A criação deste tipo de comunidade apresenta inúmeras vantagens, tanto para os seus membros, como para as localidades e países nas quais estas se encontram. Algumas das principais vantagens apresentadas são as seguintes [18]:

- Contribuem para a produção e desenvolvimento do consumo energético renovável, auxiliando o cumprimento das metas e objetivos europeus para a energia e clima;
- Os seus membros beneficiam de uma redução na fatura de eletricidade;
- Ocorre um aumento da autonomia dos consumidores e das comunidades;
- Pode existir a partilha e comercialização do excedente da energia produzida pelos seus membros, os produtores de ER obtêm receita com a venda do excedente e os consumidores conseguem comprar energia a um preço comercialmente vantajoso.

Na literatura os conceitos de CER e de cooperativa energética são frequentemente relacionados. No entanto, no contexto da legislação portuguesa, existem vários aspetos que diferem estes dois conceitos, desde a sua organização à interação com a rede de distribuição de energia elétrica. Os próximos pontos apresentam as designações mais comuns encontradas na literatura:

- Cooperativa Energética, organizações estas que englobam um determinado tipo de ativo gerido pelos próprios membros, neste caso os projetos de ER, e os proprietários da cooperativa são os seus membros e não os seus investidores [19]. Estas são geridas por membros locais, que têm como objetivo o consumo de ER para a comunidade onde a cooperativa se insere e a venda de excedentes em alguns planos de negócios [20]. Segundo Kuller *et al.* [21], as cooperativas energéticas têm como principais métodos de remuneração i) a venda direta ou distribuição de eletricidade por uma rede local, frequente em países como a Alemanha; ii) fornecimento de serviços, tais como a instalação de painéis fotovoltaicos ou serviços de eficiência energética, sendo uma situação *win-win*, pois a cooperativa é remunerada pelos serviços prestados e os clientes usufruem de poupanças na fatura da eletricidade; e iii) angariação de fundos para investimento em projetos. Este financiamento pode ser estatal, local ou nacional, na maioria das situações proveniente de fundos comunitários, ou financiamento coletivo através de plataformas colaborativas de investimentos operadas pela Internet. As cooperativas são o meio mais eficaz para os cidadãos conseguirem ultrapassar algumas barreiras de aceitação e investimento das energias renováveis, pois apostam na educação e sensibilização dos atores locais sobre os potenciais benefícios das ER, realizando seminários e eventos que promovem a transição energética. Por outro lado, servem de intermediário entre as FER e o consumidor fazendo a distribuição de energia, com possibilidade de obter preços mais reduzidos na eletricidade comparativamente aos preços praticados no mercado comercial tradicional [22].
- Grupos comunitários de cariz social, sendo este outro modelo de CER, segundo [23]. Os participantes desta organização aliam-se a projetos que tenham potencial para adquirir infraestruturas de FER. A sua remuneração é semelhante à das cooperativas. No entanto, é recorrente aliarem-se a instituições públicas ou privadas. Os exemplos mais comuns destes grupos comunitários são hospitais e escolas.
- Grupo organizado se alia com empresas energéticas locais para a formação de uma CER, gerindo em conjunto os recursos associados. Este é outro modelo possível para uma CER (Organizações que partilham os projetos com empresas) [23].

Posto isto, existem divisos temas relacionados com as CER que são importantes abordar para o desenvolvimento do trabalho da presente dissertação. Os principais tópicos são os

modelos de mercados que uma CER pode implementar e a gestão da energia dentro da comunidade, estes são abordados nas seguintes secções.

2.1.1. Mercados de Energia

O mercado da energia vem sofrendo alterações com a integração contínua de Recursos de Energia Distribuída (RED), tais como sistemas solares fotovoltaicos e dispositivos de armazenamento de energia, levando ao surgimento de consumidores ativos, com a capacidade de gerir a sua produção, consumo e armazenamento de energia, chamados de "*prosumers*", trazendo novas oportunidades e desafios na forma como é feita a distribuição de energia elétrica. Com estas alterações surgiu uma nova proposta de operação dos mercados de eletricidade, os mercados Ponto-a-Ponto (P2P) ou comercialização entre pares (Figura 2.1), que permitem aos *prosumers* partilhar entre si, de forma direta, a sua energia produzida, sendo a perspetiva central deste mercado o consumidor e a liberdade de escolha na forma de adquirir energia elétrica. Neste tipo de mercado um Ponto ou um membro, no contexto de comunidade, é definido como qualquer pessoa que possui ou opera um ativo ou grupo de ativos, por exemplo, produção, consumo e armazenamento [24].

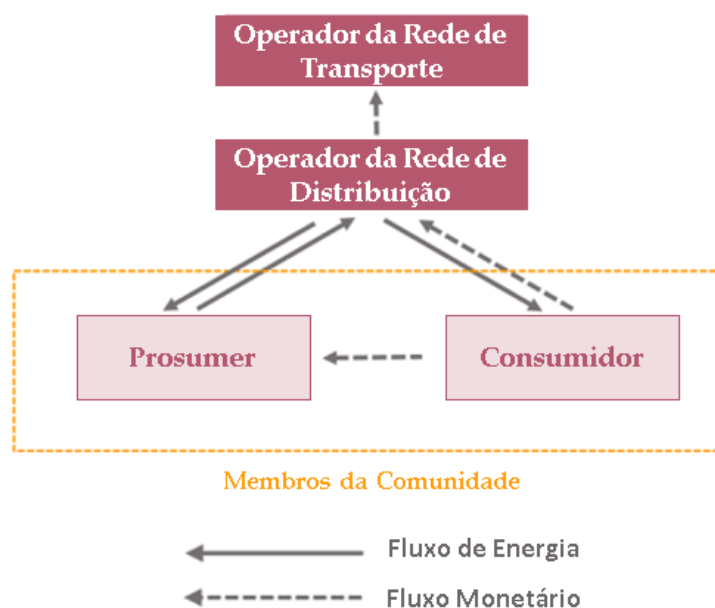


Figura 2.1 - Modelo de comercialização de energia P2P (Adaptado de [25]).

A estrutura P2P é inerentemente distribuída, onde os elementos do mercado (membros) desenvolvem diversas relações dentro de uma comunidade [26]. O grau de descentralização e a topologia dentro dos mercados P2P variam de acordo com a sua estrutura, existindo três topologias [24]:

- Mercado exclusivamente P2P;
- Mercado comunitário;

- Mercado P2P híbrido.

Nos **mercados exclusivamente P2P** os membros negociam diretamente entre si e com os comercializadores de eletricidade para vender e comprar energia elétrica, fazendo assim as trocas energéticas de forma direta e sem supervisão central, podendo utilizar a rede de distribuição, como ilustrado na Figura 2.2. Estes podem acordar a quantia de energia transacionada e o seu preço. Esta estrutura de mercado permite que os consumidores escolham o produtor de energia que os fornece, baseando-se no tipo de energia produzida (e.g., solar ou eólica), local de produção e preço da transação da energia. Os consumidores podem também estabelecer diferentes contratos com diferentes *prosumers* tendo em conta a sua preferência e necessidade [24]. Sorin *et al.* [27] propõem uma estrutura de mercado exclusivamente P2P entre produtores e consumidores, que depende de um despacho económico multilateral.



Figura 2.2 - Estrutura de mercado do mercado exclusivamente P2P (Adaptado de [24]).

Os **mercados comunitários** são mais estruturados do que os mercados exclusivamente P2P, pois possuem uma entidade gestora, que faz a gestão das atividades comerciais dentro da comunidade e, se necessário, com o exterior, sendo o intermediário entre esta e as outras comunidades vizinhas ou comercializadores energéticos, como ilustrado na Figura 2.3. Este tipo de mercado é aplicado a micro-redes de energia ou grupos de *prosumers* próximos geograficamente e com interesses e objetivos comuns em relação ao consumo de energia elétrica. As micro-redes de energia são sistemas de distribuição de energia elétrica que têm recurso a elementos de energia distribuída, que podem operar de forma autónoma ou com ligação à rede principal [24]. Cada membro negocia dentro da comunidade através da sua

entidade gestora, não tendo interação direta com os outros membros. Por exemplo, um membro duma comunidade informa à sua entidade gestora que pretende adquirir determinada quantidade de energia que, por sua vez verifica qual o *prosumer* habilitado a fornecer energia ao membro, efetuando a transação de energia e de pagamento. Como tal, todas as interações dos membros dentro da comunidade são feitas através da entidade gestora. Por outro lado, cada membro pode escolher negociar com o exterior da comunidade. Para tal, basta passar essa informação à sua entidade gestora, que efetua a negociação com as comunidades/mercados exteriores [24]. Moret e Pinson [28] formularam um mercado comunitário com *prosumers* a trabalhar de forma colaborativa.

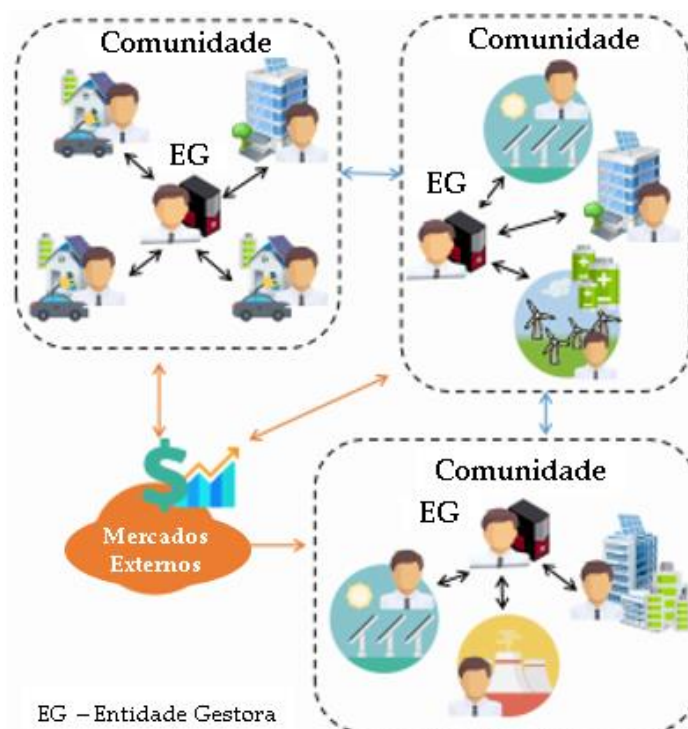


Figura 2.3 - Estrutura de mercado comunitário (Adaptado de [24]).

Por fim, os **mercados P2P** híbridos combinam as duas estruturas anteriores, através de camadas distintas para a transação de energia, onde cada camada de comunidades e agentes individuais podem interagir diretamente entre si, como ilustrado na Figura 2.4. No nível superior (nível dois) das camadas encontram-se os agentes individuais e/ou entidades gestoras de comunidades, que trocam energia entre si (transações P2P) e que também podem interagir com mercados existentes. No nível inferior (nível um) as CER têm um comportamento baseado num mercado comunitário, em que a entidade gestora da comunidade supervisiona o comércio dentro da comunidade. Ou seja, no nível um encontram-se apenas as comunidades que implementam um mercado comunitário, e no nível dois encontram-se os ativos individuais, as entidades gestoras de comunidades e os comercializadores de energia, que negociam entre

si de forma direta, implementando um mercado exclusivamente P2P [24]. Long *et al.* [29] desenvolveram uma estrutura híbrida com três níveis distintos de distribuição da rede. No nível superior os ativos individuais negociam entre si. No nível intermedio as negociações são feitas entre micro-redes. No nível inferior é aplicado um mercado comunitário para cada micro-rede. Por outro lado, o Liu *et al.* [30] fazem uma proposta de abordagem híbrida para micro-redes que se encontram na mesma rede de distribuição, onde as restrições da rede são incluídas nas negociações P2P entre as micro-redes. Este trabalho usa uma formulação de fluxo de potência AC ideal e remove o preço e mecanismos de negociação entre micro-redes.

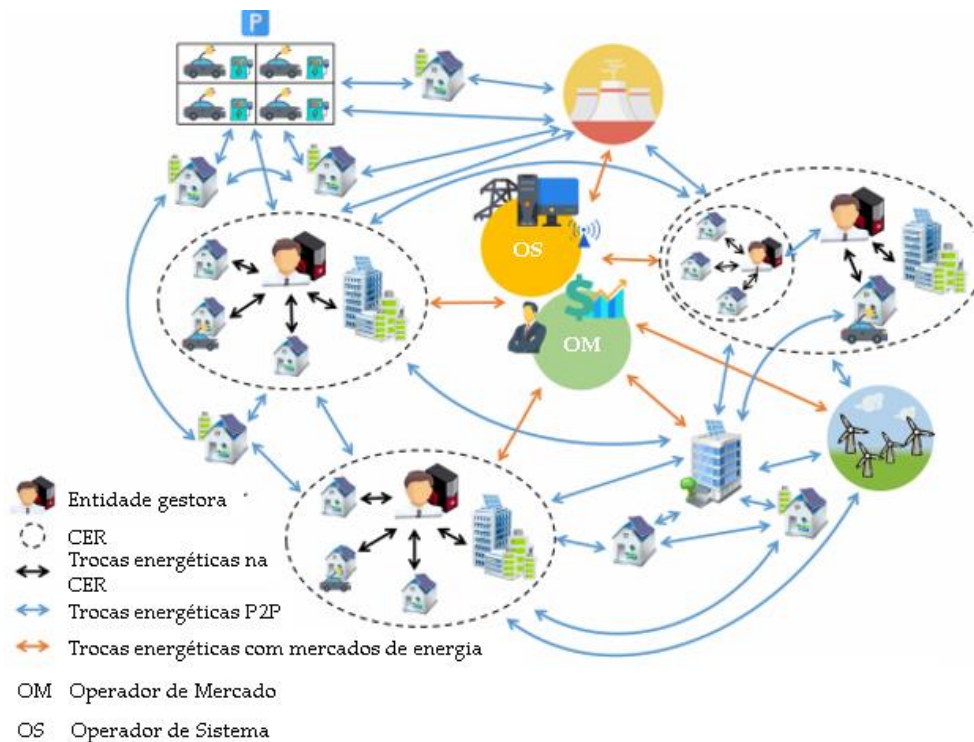


Figura 2.4 - Estrutura do mercado P2P híbrido (Adaptado de [24]).

Em suma, a literatura converge até agora para as três estruturas de mercados descritas ao longo desta subsecção, mesmo que algumas referências utilizem termos diferentes para descrever o mesmo tipo de estrutura de mercado. As principais vantagens e desafios dos três modelos de mercados P2P são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Sumário das três estruturas de mercados P2P [24] [26].

Estruturas de Mercado P2P	Vantagens	Desafios
Exclusivamente P2P	<p>O consumidor tem liberdade total de escolha e autonomia, sendo mais ativo na comunidade;</p> <p>Consumo de energia de acordo com a preferência do consumidor;</p> <p>Completa democratização do uso da energia.</p>	<p>Investimento e manutenção com infraestruturas TIC para estabilidade de todo o sistema;</p> <p>Convergência lenta para obter um consenso na entrega final da energia;</p> <p>Previsão do comportamento do sistema por operadores de rede, devido à falta de controle centralizado;</p> <p>Garantia de segurança e entrega de alta qualidade de energia.</p>
Comunitário	<p>Melhor relacionamento e envolvimento dos membros da comunidade por partilharem um bem comum;</p> <p>Membros da comunidade mais cooperantes e resilientes;</p> <p>Novos serviços para operadores de rede fornecidos pela entidade gestora da comunidade.</p>	<p>Alcançar a preferências do uso da energia para todos os membros da comunidade em todos os momentos;</p> <p>A entidade gestora da comunidade tem de registar todos os dados dos membros e dar uma resposta às suas expectativas;</p> <p>Ter uma justa e imparcial distribuição da energia entre os membros da comunidade.</p>
Híbrido	<p>A infraestrutura de TIC e os mecanismos de computação são adaptáveis para todos os sistemas;</p> <p>Pode ser visto como um projeto coexistente com os dois anteriores;</p> <p>Mais previsível para os operadores de rede.</p>	<p>Coordenar negociações internas nas comunidades com negociações entre agentes de alto nível.</p>

2.1.2. Gestão de energia ao nível da comunidade

Um dos maiores desafios de uma CER é a gestão eficaz da energia dentro da sua fronteira, de forma a satisfazer todos os interesses e necessidades dos seus membros. Esta gestão normalmente é feita implementando uns dos mercados descrito anteriormente e/ou priorizando a minimização dos custos das trocas energéticas. Até ao momento foram desenvolvidos inúmeros modelos de gestão, algoritmos de minimização de custos e plataformas de implementação de mercados P2P. Alguns exemplos destas abordagens são descritos a seguir.

Akter *et al.* [31] apresentam uma estrutura hierárquica de três níveis para facilitar a gestão das transações de energia numa micro-rede residencial, onde os residentes vizinhos podem partilhar o excesso de energia solar produzida entre si. Os *prosumers* vendem o seu excedente energético aos consumidores tradicionais a um preço inferior ao preço de compra de energia proveniente da rede, mas superior à tarifa *feed-in* (tarifa por injeção do excedente energético na rede publica). As residências que possuem geração própria (*prosumers*) atendem primeiro às suas necessidades de consumo, vendendo unicamente a energia produzida que não é consumida, ou seja, o excedente de energia produzido. Numa micro-rede existem três tipos diferentes de residências, como representado na Figura 2.5, que estão ligadas entre si através da rede de distribuição de energia e de uma rede de circulação de dados e camadas inteligentes, designadas pelo autor como EMS (*Energy Management Scheme*), onde é feita a recolha e gestão de todos os dados de consumo, produção e armazenamento de energia de cada edifício, com o objetivo de não importar energia da rede. As **casas tradicionais**¹ (Ht) não possuem qualquer tipo de produção ou armazenamento de energia, sendo unicamente consumidoras. As **casas proativas**¹ (Hp) possuem painéis fotovoltaicos para produção de energia. A energia produzida em excesso pode ser vendida às casas vizinhas, tipicamente casas tradicionais, ou caso estas não queiram comprar energia o excedente energético é exportado para a rede, não havendo assim desperdício energético. Por último, as **casas entusiásticas**¹ (He) possuem painéis fotovoltaicos e baterias (BESS) para armazenamento da energia excedente.

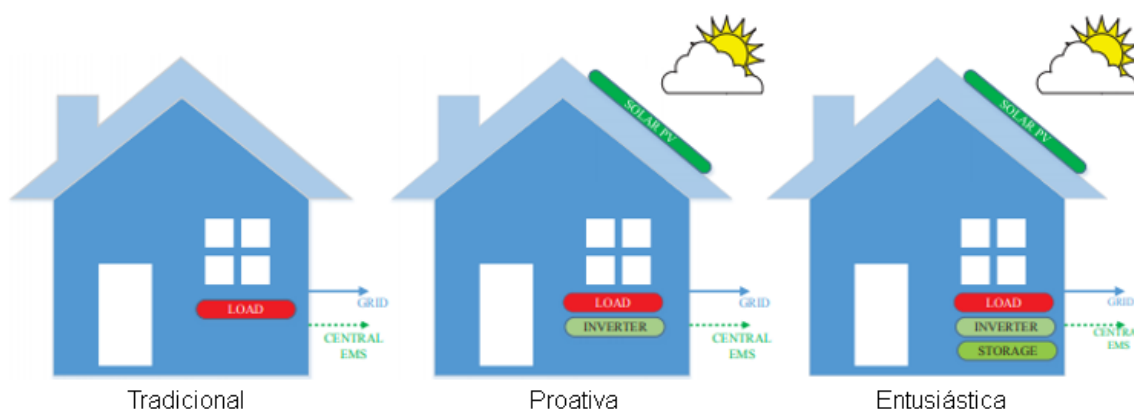


Figura 2.5 - Diferentes tipos de residências numa micro-rede (Adaptado de [31]).

¹ Termos utilizados em Akter *et al.* [31].

A eficiência da partilha energética entre os diferentes tipos de casas numa micro-rede está diretamente relacionada com o projeto e inteligência da EMS. Na Figura 2.6 é possível observar a ligação feita entre as diferentes casas através da EMS com uma EMS central [31].

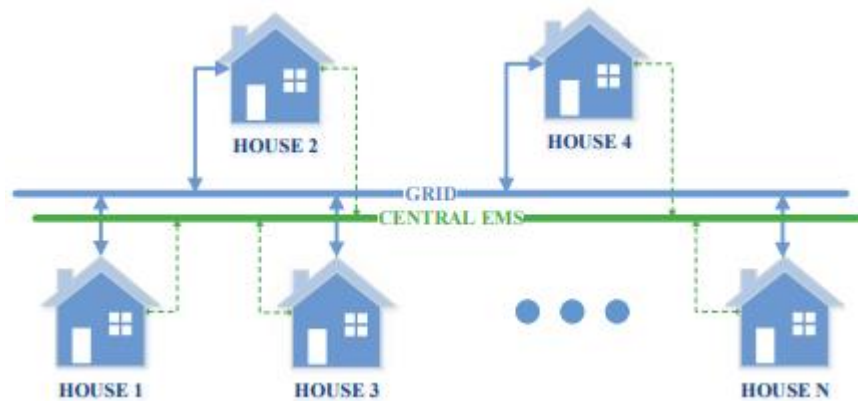


Figura 2.6 - Ligação entre casas de uma micro-rede com EMS central [31].

A EMS central é composta por três níveis de comunicação através das EMS primárias, EMS secundária e EMS terciária, sendo possível observar a sua configuração na Figura 2.7. O **nível primário** é composto pelas EMSs de todas as casas e é responsável pela comunicação do estado dos consumos, produção e armazenamento de cada residência para o nível secundário. Este nível também faz a partilha, com o nível seguinte, dos preços de venda de energia de cada proprietário. O **nível secundário** é responsável por recolher a informação fornecida pelo nível primário e estabelecer as partilhas de energia, tendo em conta as prioridades estabelecidas. Após a partilha de energia entre vizinhos a EMS secundária comunica com a EMS terciária, partilhando também com o nível seguinte os preços praticados no nível primário. Por fim, o **nível terciário** é responsável pela supervisão geral de toda a micro-rede e pela tomada de decisão de compra ou venda de energia à rede principal. Neste nível é feita a recolha dos preços praticados pelas residências, bem como os preços praticados pela rede. Como tal é possível realizar a análise custo-benefício para importação e exportação de energia. Outra função importante da EMS terciária é a comunicação com micro-redes vizinhas, quando várias micro-redes estão ligadas entre si. As atividades dos três tipos de EMSs dentro da EMS central depende da sua inteligência. As prioridades de transação de energia das EMSs primárias e secundária estão representadas nas Tabelas 2.2 e 2.3, respetivamente [31].

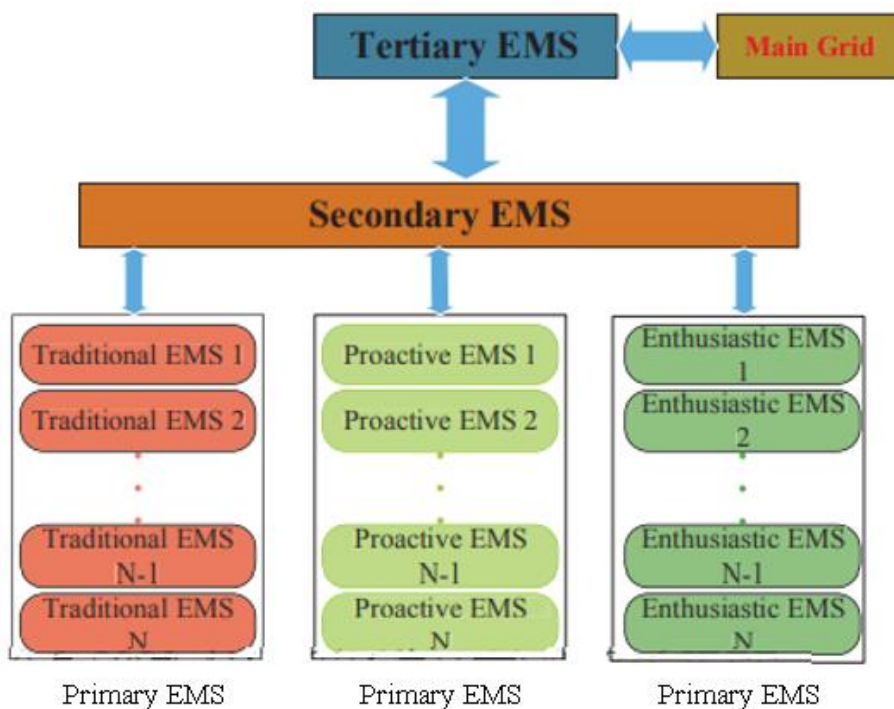


Figura 2.7 - Configuração da EMS central numa micro-rede [31].

Tabela 2.2 - Prioridade de partilha de energia na EMS primária (Adaptado de [31]).

Tipos de Casas	Prioridades		
	Autoconsumo	Armazenamento	Venda
Tradicional	0	0	0
Proativa	1º	0	2º
Entusiástica	1º	2º	3º

Tabela 2.3 - Prioridade de partilha de energia no EMS secundário (Adaptado de [31]).

Total de energia	Prioridades				
	Consumo Ht	Consumo Hp	Consumo He	Armazenamento	Rede Principal
EMS Secundária	1º	2º	3º	4º	5º

A inteligência dentro da EMS central pode ser classificada em duas categorias: Inteligência para partilha de potência e Inteligência para análise de custo-benefício. A **inteligência para partilha de potência** está diretamente relacionada com o funcionamento das EMSs primárias. As EMSs das casas tradicionais fazem a comparação do valor da potência de consumo (PLTi) com a potência disponível a ser fornecida por qualquer fonte (PDTi). Se $PLTi > PDTi$, a casa necessita de mais energia. Se $PLTi = PDTi$ a casa não requer mais energia. Esta informação é

enviada para a EMS secundária. No caso das EMSs das casas proativas são efetuados três passos. Primeiro é feita a comparação da potência requerida pela casa i (PLP_i) com a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos da casa i ($PPPV_i$) e é calculado o valor de potência em falta ($PSP_i = PLP_i - PPPV_i$). De seguida é recolhido o valor de potência disponível para as casas proativas (PDP_i) e efetuado o seguinte cálculo: $PP_i = PSP_i - PDP_i$. Por último, a EMS primária comunica o valor de potência anteriormente calculado com a EMS secundária. No caso das EMSs das casas entusiásticas o seu funcionamento é mais complexo. Primeiro é feita a comparação da potência exigida pela casa i (PLE_i) com a potência produzida pelos painéis fotovoltaicos ($PEPV_i$) e é calculada a potência em falta ($PSE_i = PLE_i - PEPV_i$) se $PEPV_i < PLE_i$. Esta falta de potência será suprimida pela potência armazenada no sistema de armazenamento da casa ($PSBE_i$) ou com a potência disponível proveniente de outras fontes (PDE_i). Nestes casos é calculada a potência em falta ou em excesso da seguinte forma: $PSEE_i = PSE_i - PDE_i - PSBE_i$. Se $PSEE_i > 0$ ainda existe falta de potência, se $PSEE_i < 0$ existe excesso de potência e se $PSEE_i = 0$ não existe falta ou excesso de potência. Em segundo lugar, se $PEPV_i > PLE_i$ a EMS irá calcular a quantidade de potência armazenada nas baterias. ($PEB_i = PEPV_i - PLE_i$). De seguida, se $PEB_i > PEBC_i$ (Capacidade das baterias) é calculado o excesso de potência que estará disponível para partilha ($PEE_i = PEB_i - PEBC_i$). Por fim a EMS primária comunica com a EMS secundária os valores de $PSEE_i$ ou PEE_i . Assim sendo, a EMS secundária recebe as informações da potência utilizada (P_u), potência disponível para compartilhamento (P_a) e falta de potência (P_s) das EMSs primárias. As informações relacionadas com a utilização da energia são enviadas para a EMS terciária para o cálculo de retorno [31].

A **inteligência para o cálculo de custo-benefício** está diretamente relacionada com a inteligência da EMS terciária, pois esta é responsável pelas transações de energia com a rede principal e pela análise de custo-benefício. Considerando CT_t como o custo total de investimento para todas as casas tradicionais é possível concluir que $CT_t = 0$, pois estas não possuem sistemas fotovoltaicos ou baterias. Para uma casa proativa nP o custo de investimento total é dado por C_p , que inclui o custo do sistema fotovoltaico, este custo pode ser calculado da seguinte forma: $C_p(nP) = CS(nP) + CI(nP)$, $\forall nP \in [1, 2, \dots, NP]$, onde CS representa o custo do painel solar e CI representa o custo do inversor. Os investimentos totais para todas as casas proativas podem ser escritos como: $C_{Pt} = \sum_{nP=1}^{NP} C_p(nP)$. Nas casas entusiásticas, dada a presença de sistema para armazenamento de energia (BESS), é necessário considerar seu custo para o cálculo dos investimentos da casa. Se CE é o custo total de investimento para uma casa nE entusiástica, o custo total pode ser escrito como: $CE(nE) = CS(nE) + CI(nE) + CB(nE)$, $\forall nE \in [1, 2, \dots, NE]$, onde CB é o investimento feito no sistema de armazenamento de energia. Assim, o custo total de investimento para todas as casas entusiásticas de uma micro-rede pode ser calculado da seguinte forma: $C_{Et} = \sum_{nE=1}^{NE} C_E(nE)$. Logo o custo total de investimento de uma micro-rede é dado por: $C = CT_t + C_{Pt} + C_{Et}$. Este custo pode ser usado para calcular o período de retorno para um projeto de uma micro-rede bem como para uma única casa, conforme discutido em [32]. A tarifa para venda/compra de energia dentro da micro-rede num

determinado instante de tempo deve ser superior à tarifa de venda de energia excedente à rede principal (normalmente esta taxa é fixa) e inferior à tarifa de compra de energia à rede principal, num determinado instante de tempo, disponibilizada pelo comercializador de energia, de forma a ser vantajoso para os utilizadores da micro-rede. A taxa de retorno R é uma medida de custo-benefício de uma família individual que investe em energia solar fotovoltaica e em baterias para armazenamento de energia, para partilhas energéticas dentro da micro-rede. Esta taxa de retorno varia com o investimento inicial e com o tipo de casa da família, podendo ser calculada através da quantidade de energia autoconsumida, vendida para casas vizinhas ou para a rede principal, e consumida proveniente de casas vizinhas ou da rede principal. O número de dias para obter o retorno do investimento total pode ser calculado, de uma forma simplificada, por: $ND=C/R$ [31].

Posto isto, o autor Akter *et al.* efetuou um estudo real na Austrália, que provou que com esta organização de micro-redes os *prosumers* e os consumidores da CER beneficiaram do esquema de transação de energia anteriormente descrito. Neste estudo foi feita uma recolha de dados em duas micro-redes com o mesmo número de consumidores e *prosumers*, com a mesma quantidade total de energia consumida e apenas com a diferença em que numa delas existe partilha do excedente energético com consumidores vizinhos e na outra isso não se verifica. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 2.4. Através da sua observação é possível concluir que no caso em que existe partilha do excedente de energia na micro-rede os resultados são mais favoráveis para as residências, pois a energia vendida à rede é menor (reduzindo assim o impacto da reduzida taxa de *feed-in*), ocorrendo a venda de energia a outros membros da comunidade a um preço mais vantajoso, a quantidade de energia proveniente da rede pública também é menor; e o período de retorno do investimento inicial também é menor, comparativamente ao caso onde não ocorre partilha de energia [31].

Tabela 2.4 - Resultados obtidos no estudo efetuado na Austrália [31].

	Sem partilha de energia	Com partilha de energia
Energia consumida (KWh)	61,29	61,29
Energia vendida à rede (KWh)	68,16	58,83
Energia partilhada (KWh)	0	12,85
Energia comprada à rede (KWh)	74,52	65,18
Taxa de retorno	22,17	33,13
Período de retorno (dias)	1971	1319

Abordando o problema da gestão de energia na comunidade de outra forma, mas ainda com base em micro-redes, Guo *et al.* [33] conduziu um estudo cujo objetivo é minimizar o custo total de energia num determinado bairro pertencente a uma *smart grid*, cuja estrutura está representada na Figura 2.8, com uma entidade gestora da energia, onde os tipos de casas existentes na comunidade são iguais aos descritos anteriormente. Cada casa possui um *Smart*

Meter e uma *Home EMS* que recolhem toda a informação de produção, consumo e armazenamento de cada casa. Para os objetivos serem alcançados foi desenvolvido um algoritmo, designado por LCMA, de controlo *online*, denominado de algoritmo de minimização de custos baseado nos teoremas matemáticos de Lyapunov, que efetua uma série de decisões de gestão da energia e gestão de consumos. O LCMA necessita apenas da informação instantânea de cada edifício para tomar uma decisão, não sendo necessário o conhecimento estatístico dos consumos nas habitações. Para além disso, foi também desenvolvido um algoritmo descentralizado para implementar o LCMA, que preserva a privacidade dos proprietários das residências.

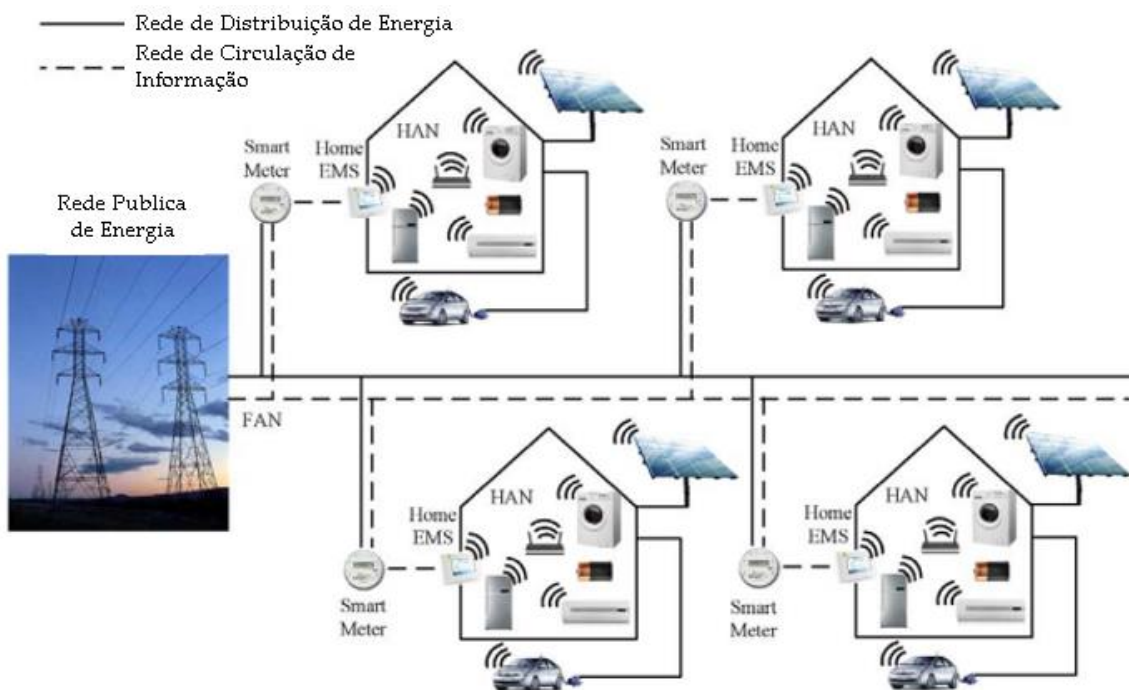


Figura 2.8 - Esquemático da gestão de energia numa *Smart Grid* (Adaptado de [33]).

Com uma abordagem diferente das micro-redes, Morstyn *et al.* [34] apresentam uma plataforma que implementa um mercado de energia P2P com base no conceito de gestão de energia multiclasse, para coordenar a negociação entre os consumidores e os *prosumers* dentro da comunidade, com diferentes preferências (por exemplo no tipo de energia consumida, local de produção ou preço da energia). Esta plataforma, cujo diagrama de blocos está representado na Figura 2.9, coordena a negociação entre os *prosumers* inscritos e o mercado de eletricidade, bem como a negociação entre membros da comunidade. A estrutura da plataforma é explorada para conciliar um mecanismo de otimização do preço de distribuição da energia dentro da comunidade e fornecer privacidade de dados ao consumidor final. O controlo preditivo permite ao *prosumer* ajustar os seus fluxos de energia com base no preço da energia no mercado, consultar a produção de energia renovável em tempo real e consultar previsões de carga na comunidade.

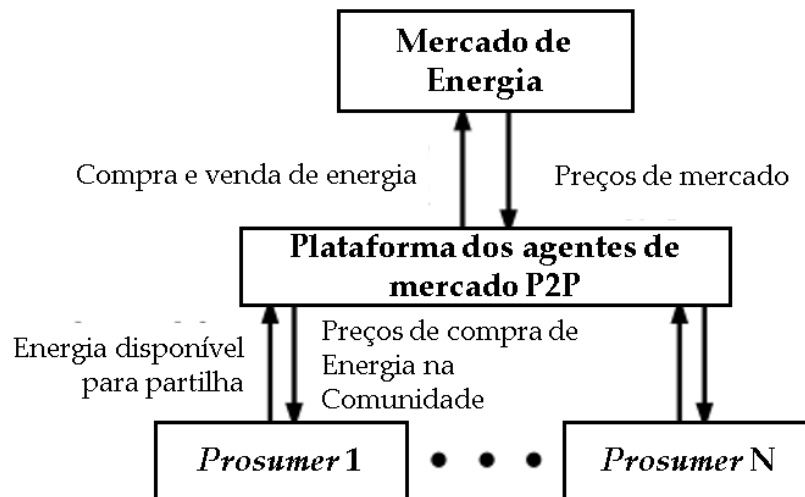


Figura 2.9 - Diagrama de blocos da plataforma para um mercado de energia P2P (Adaptado de [34]).

É possível encontrar na literatura outros estudos que abordam a gestão de trocas energéticas entre membros de uma CER com a implementação de mercados P2P, tais como os estudos desenvolvidos por Nguyen *et al.* [35], Pouttu *et al.* [36] e Zhou *et al.* [37]. Existem outros estudos em que o foco principal é a otimização de um dos parâmetros das comunidades, por exemplo a otimização do armazenamento de energia, desenvolvido por Tushar *et al.* [38], ou a otimização das receitas obtidos na CER, desenvolvido por Edstan *et al.* [39].

2.1.3. Exemplos de CER Existentes

Existem diversas CER desenvolvidas em todo o mundo, sendo algumas delas distintas em alguns pontos, quer na forma organizacional, quer nas atividades desenvolvidas, quer nos serviços e vantagens prestados aos seus membros, bem como em alguns objetivos. Assim sendo, de seguida são dados exemplos de algumas CER.

A **Brooklyn Microgrid (BMG)**² é um exemplo de uma CER estabelecida em Nova Iorque, composta por moradores e empresários da cidade que apoiam a produção local de energia, sobretudo energia solar. A CER BMG permite aos seus membros que sejam proprietários de sistemas solares (*"prosumers"*), vendam o excesso de energia produzida a outros membros da CER que a desejem comprar. Os membros da comunidade têm acesso ao mercado de energia através de uma aplicação para telemóvel com o mesmo nome da comunidade, onde os prosumers vendem o seu excesso de energia solar para o mercado e os consumidores compram a energia solar disponível através de leilão. Esta aplicação movel estabelece um mercado P2P. A compra da energia solar local resulta num apoio à economia local e numa redução de gases

² <https://www.brooklyn.energy/>

com efeito de estufa, pois é reduzido o consumo de energia produzida por fontes não renováveis, que contribuem com um aumento das emissões de CO₂, por exemplo, energia produzida em centrais termoelétricas.

A **LochemEnergie**³ é uma cooperativa energética localizada em Lochem, nos Países Baixos, que tem como principais objetivos o desenvolvimento sustentável através da produção local de ER, o fortalecimento da economia local com o reinvestimento local das receitas da cooperativa, o fortalecimento do sentido de comunidade social para um aumento da qualidade de vida dos habitantes de Lochem; e a redução da fatura de energia elétrica, de forma que as despesas com energia, das famílias, diminuam. Esta cooperativa é composta por 900 membros, tem mais de 300 clientes, já realizou a instalação de 145 instalações fotovoltaicas em residências dos membros da comunidade e instalou 1000 painéis fotovoltaicos coletivos, através do projeto IPIN. A cooperativa tem diversos projetos a decorrer em simultâneo, sendo o mais conhecido o projeto ECCO⁴, onde os fundos financeiros do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional são investidos na comunidade com o objetivo de aumentar a produção de energia renovável local. Para além da produção de ER, a cooperativa dispõe de uma plataforma de *carsharing* (*The Mobility Factory*) com carros elétricos [40]. Os membros da LochemEnergie não podem transferir nem vender/comprar energia entre si, podem apenas efetuar autoconsumo e consultar os seus consumos e produção de forma a obterem uma poupança na fatura energética. Ou seja, os seus membros têm acesso à instalação de sistemas solares nas suas residências e têm acesso a um *smart meter* que oferece um sistema inteligente de gestão de energia. Este sistema fornece informações atualizadas sobre o consumo e produção de energia na residência, bem como taxas de consumo. A Universidade de Twente está envolvida neste projeto para desenvolver modelos de monitorização do consumo de energia e fazer previsões e simulações da produção de energia. Esta informação será dada às residências de forma direta com o objetivo de economizar energia e reduzir as tarifas de energia. A Greenchoce, que é o comercializador de energia associado à cooperativa líquida a produção de energia com o consumo da residência, isto significa que o valor monetário que o utilizador recebe pela eletricidade produzida é igual ao valor pago pela eletricidade consumida, desde que não seja gerada mais energia que a consumida. Caso isso aconteça o consumidor recebe uma tarifa baixa pela energia líquida devolvida à rede.

O projeto **Community S**⁵ foi o "*primeiro projeto em Portugal a demonstrar em ambiente real e em condições reais de mercado o conceito de partilha de energia entre pares*" em CER. Este projeto teve uma duração de dois anos, de 2016 a 2018, e desenvolvido em parceria pela Virtual Power Solutions (VPS)⁶, Energia Simples⁷ e o Instituto Superior de Engenharia do Porto

³ <https://www.lochemenergie.net/je-eigen-energie>

⁴ <https://www.lochemenergie.net/producten/ecco-project>

⁵ <http://community-s.vps.energy/>

⁶ <https://www.vps.energy/>

⁷ <https://www.energiasimples.pt/>

(ISEP), em Alfândega da Fé e Penela. Cada uma das duas CER é constituída por quatro edifícios públicos com sistemas fotovoltaicos, os *prosumers* e cerca de quarenta munícipes, que são os consumidores. Os principais objetivos são a partilha de energia entre pares, ou seja, a implementação de um mercado P2P, onde os "*prosumers (autoconsumidores) partilham/comercializam o seu excedente de geração distribuída com outros utilizadores (Conceito de Economia Colaborativa)*", bem como a gestão coordenada e inteligente dos recursos de produção distribuída de eletricidade, associada à exploração eficiente das capacidades de flexibilidade das cargas. Para atingir estes objetivos as soluções tecnológicas utilizadas são: sistemas fotovoltaicos para autoconsumo e sistemas de armazenamento distribuído; utilização de uma plataforma inteligente de gestão otimizada e simulação da comunidade; utilização de ferramentas de monitorização e controlo dos recursos energéticos em edifícios públicos e residências. A plataforma e as ferramentas utilizadas foram desenvolvidas pela VPS e o seu funcionamento pode ser consultado em [41]. As grandes motivações para a criação destas CER foram: a redução dos custos energéticos para os seus membros; uma maior integração de FER na rede elétrica, contribuindo para alcançar os objetivos a que Portugal se propôs para 2030; surgimento de novos atores no mercado de energia, ou seja, o surgimento de *prosumers*, agregadores e entidades gestoras de CER; tornar os consumidores de energia mais proativos e participativos na comunidade; Criação de novas TICs para conectar e gerir todos os recursos energéticos da comunidade [42].

2.2. Plataformas para Gestão de Comunidades

O presente subcapítulo tem como objetivo apresentar algumas plataformas desenvolvidas até ao momento que têm como funcionalidade a gestão de CERs. As plataformas apresentadas destacam-se entre si devido às tecnologias utilizadas, implementação de diferentes modelos de mercado, gestão unicamente de membros da CER, gestão de trocas energéticas na comunidade entre membros ou entre o comercializador energético e consulta de informações de consumo/produção do edifício, bem como simulações e previsões de consumo/produção na comunidade e no edifício.

A plataforma **Exergy**⁸ foi desenvolvida pela empresa LO3 Energy⁹ e é utilizada na CER BMG [43] mencionada anteriormente. A Exergy foi desenvolvida através da tecnologia *blockchain*, que permite a criação de mercados P2P de energia elétrica produzida através de FER, operando sobre as infraestruturas elétricas já existentes. O funcionamento desta tecnologia é abordado por Ahram *et al.* [44]. Os membros da comunidade interagem entre si através de uma aplicação para telemóvel (Pando¹⁰), onde se registam como consumidores ou *prosumers*, e por onde acedem ao mercado, colocando ofertas ou licitações. Os *prosumers* podem

⁸ <https://exergy.energy/>

⁹ <https://lo3energy.com/>

¹⁰ <https://lo3energy.com/pando/>

transacionar a sua energia excedente de forma autónoma, em tempo real com os consumidores, após a sua solicitação. Os veículos elétricos ou estações de carregamento também podem vender energia à micro-rede. A comunidade interage com um único comercializador de energia, a Con Edison¹¹, que é também operador da rede de distribuição. Este tem acesso aos dados dos consumidores e das transações, podendo gerir o uso de energia e o balanço das cargas na rede. A geração da energia, o seu armazenamento e a sua transação são feitos localmente na comunidade, criando assim comunidades mais eficientes e sustentáveis. Na comunidade os *prosumers* devem instalar dispositivos designados por TAGe G2 (*TransActive Grid Element Generation 2*), que são ligados aos seus medidores de energia inteligentes ou medidores de energia convencionais, como ilustrado na Figura 2.10. Estes dispositivos alojam o *blockchain* local e comunicam a energia excedente disponível e o seu custo, especificado pelo *prosumer* [45].



Figura 2.10 - Esquema de organização da comunidade e localização dos TAGe (Adaptado de [37]).

A empresa **Engie**¹², nos Países Baixos, desenvolveu uma plataforma que permite a gestão de uma CER, onde a energia fornecida aos consumidores é armazenada e produzida localmente de forma sustentável (solar/eólica) e complementada pela ER produzida pela própria

¹¹ <https://www.coned.com/en>

¹² <https://innovation.engie.com/en/innovation-trophies-2018/energy-community/9781>

empresa. A Engie é também responsável pela gestão da CER. Como tal este é o único comercializador que interage com a plataforma. As regras organizacionais da comunidade são estipuladas pela empresa, mas não são conhecidas [25]. Esta plataforma implementa um mercado comunitário, onde é feita toda a gestão diária da energia da comunidade bem como dos seus ativos distribuídos, instalações fotovoltaicas, baterias dos residentes e veículos elétricos. Providencia ainda um algoritmo de otimização dos diagramas de carga (produção, consumo e armazenamento) e uma interface para atuação remota sobre as baterias da comunidade. A distribuição de receitas implementada pela plataforma não é conhecida [46].

A empresa Hive Power¹³ desenvolveu a plataforma **Hive Manager**¹⁴ que utiliza tecnologia *blockchain*, permitindo aos seus usuários vender e comprar eletricidade entre si com segurança e com baixos custos de transação de energia. Esta implementa um mercado P2P comunitário. Cada comunidade de energia é designada por *Hive*, representada na Figura 2.11, que adota um mercado de energia distribuído regulamentado através de contratos inteligentes de compra e venda de energia entre os consumidores. A comunidade é composta por *Workers* que atuam como interface entre o *prosumer* e a rede elétrica, e por um sistema centralizado, designado por *Queen* que faz a gestão e faturação dos *Workers*. Os *Workers* são *smart meters*, com tecnologia *blockchain*, que medem a produção e o consumo de energia dos utilizadores. Estes permitem também a participação e interação no mercado local através de uma *User App*. O *Worker* fornece um serviço de previsão de consumo e produção de energia do *prosumer* e um sistema de licitação de energia interagindo com a *Hive* [47]. Cada *Worker* pertence unicamente a uma *Hive*, sendo exclusivo desta. Cada *Hive* tem um administrador que faz a sua gestão que comunica com a *Queen* através da *Admin App*, tendo acesso ao contrato inteligente designado por *Beekeeper*. Um *Token* ERC20 designado por *Hive Token* (HVT) fornece o acesso a todo o ecossistema da comunidade. Esta plataforma permite apenas a interação com um único comercializador de energia e é obrigatória a instalação de um *smart meter* proprietário que corre sobre a plataforma de *blockchain Ethereum*. A empresa retém uma taxa sobre cada transação de energia ou sobre a prestação de serviços de previsão [47].

¹³ <https://hivepower.tech/the-hive-platform/>

¹⁴ <https://www.hivemanager.app/>

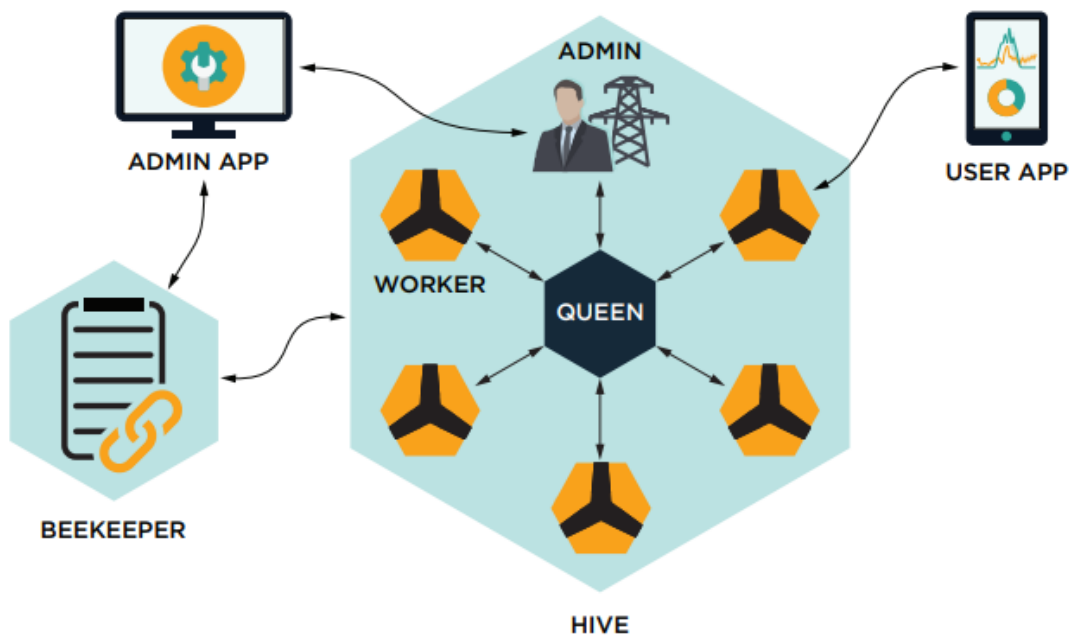


Figura 2.11 - Conceito de *Hive* [47].

Em Portugal a empresa CSide¹⁵ lançou uma plataforma designada por **Energy Ring**¹⁶ que tem como funcionalidades a gestão de projetos de autoconsumo de CER, autoconsumo coletivo ou individual, e a comercialização de excedentes de energia renovável produzidos, disponibilizando ferramentas específicas para agregadores ou facilitadores de mercado. É possível também, através da plataforma, fazer a gestão das comunidades e a monitorização da produção, consumo e armazenamento de energia [48]. Para as comunidades de energia a plataforma oferece suporte na criação da CER, desde a fase de planeamento até à gestão do projeto, sendo possível elaborar um plano de autoconsumo para auxiliar o cálculo do investimento inicial e retorno financeiro esperado. A plataforma permite a gestão e inscrição dos participantes da comunidade, onde cada membro tem a possibilidade de acompanhar e monitorizar a produção solar e o retorno do investimento efetuado. Não está disponível informação sobre o tipo de mercado implementado nem a forma como é feita a transferência de eletricidade entre os membros das comunidades.

Grande parte dos projetos desenvolvidos na área da gestão de CER implementam micro-redes e preveem a interação apenas com um único comercializador de energia. Para além das plataformas apresentadas anteriormente existem outras, tais como a **Powerpeers**¹⁷ da empresa

¹⁵ <http://cside.pt/pt/>

¹⁶ <https://www.energyring.pt/pt/>

¹⁷ <https://www.powerpeers.nl/>

Vattenfall¹⁸, a **SonnenCommunity**¹⁹ da empresa SonnenBatterie²⁰, ou a **SunContract**²¹, com funcionamento semelhante às apresentadas. O seu funcionamento e comparação entre elas pode ser consultado em [49].

2.3. Regulamento de Autoconsumo de Energia Elétrica

A Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos portuguesa, a ERSE, no Regulamento de Autoconsumo de Energia Elétrica (Regulamento nº373/2021) [16], que aprova o regulamento do autoconsumo de energia elétrica, definiu as regras a aplicar em instalações de consumo (IC) participante em autoconsumo, instalações de produção de eletricidade para autoconsumo (IPr) e instalações de armazenamento participantes em autoconsumo (IA) que estejam associadas a uma CER que proceda à atividade de autoconsumo nos termos do Decreto-Lei nº162/2019, de 25 de outubro [8]. O regulamento identifica os sujeitos intervenientes no autoconsumo de energia renovável, define regras de relacionamento comercial, regras aplicáveis à mediação, leitura e disponibilização de dados e regras na aplicação de tarifas e preços [16].

Com o regime de autoconsumo regulamentado surgem dois novos atores no setor elétrico, nomeadamente, a Entidade Gestora do Autoconsumo Coletivo (EGAC) e a Comunidade de Energia Renovável (CER), como abordado anteriormente, onde a CER deve designar a EGAC, podendo ser a própria CER a exercer essa função. As instalações participantes na CER (UPAC e IA) podem adotar comportamentos híbridos, ora recebendo energia da rede, ora injetando energia para a rede. A IA é equiparada a uma IC ou IPr consoante o comportamento dominante do armazenamento em cada período quarto-horário (consumo ou disponibilização de energia) [16].

A EGAC é a entidade responsável pelo relacionamento com o operador de rede de distribuição (ORD) para efeitos de pagamentos de tarifas de acesso à rede relativas ao autoconsumo através da rede pública. Estas tarifas são compostas pelos preços de potência em horas de ponta, definidos em Euros por kW, por mês, e pelos preços de energia ativa, definidos em Euros por kWh. A EGAC é responsável também por comunicar ao ORD, através do Portal do Autoconsumo e das CER, os coeficientes de partilha da energia no autoconsumo a utilizar. Estes coeficientes podem ser fixos ou proporcionais ao consumo que incidem sobre a energia injetada na rede por IPr, IA ou IC com armazenamento e UPAC integrados. No caso dos coeficientes proporcionais ao consumo, o total da energia disponível para partilha é distribuído pelas instalações de consumo (e de armazenamento quando aplicável) em proporção aos consumos registados em cada período de 15 minutos. O relacionamento com o agregador dos

¹⁸ <https://group.vattenfall.com/>

¹⁹ <https://sonnen.com.au/community/>

²⁰ <https://sonnen.de/stromspeicher/>

²¹ <https://suncontract.org/>

excedentes de produção para venda em mercado é da responsabilidade da EGAC e a sua valorização é feita de acordo com o que for livremente negociado entre as partes. O excedente do autoconsumo da CER pode ser transacionado através de agregador, facilitador do mercado, diretamente em mercado organizado ou através de contrato bilateral (mercado P2P) [16].

O ORD é responsável pela recolha e tratamento dos dados associados ao autoconsumo, pelo cálculo de energia a partilhar pelas IC ou IA pertencentes à CER e pelas faturas que sejam aplicados no âmbito da legislação e da regulamentação. É de salientar que o tratamento de dados só é possível após a execução de um contrato ou do consentimento dos seus titulares [16].

2.4. Discussão

Está a ocorrer uma mudança de paradigma no setor energético com o aumento da produção de energia renovável e uma maior descentralização da produção na rede elétrica. Isto leva ao surgimento de novos agentes neste setor, tais como entidades gestoras de comunidades e *prosumers*, surgindo também novas oportunidades de negócio e de estudo científico ao nível da gestão de energia dentro de comunidades de energia, bem como a gestão entre comunidades com e sem ligação à rede principal de distribuição. Estes tópicos têm margem para evolução e melhoria, tendo sido a gestão de energia entre comunidades ainda pouco explorada e desenvolvida, mas de extrema importância para ser possível alcançar uma maior eficiência energética e garantir uma maior autonomia dos consumidores, levando a um sistema elétrico totalmente descentralizado e, no limite, sem emissões de CO₂.

Posto isto, a criação de CER tem vindo a aumentar, surgindo com diversas topologias de partilha de energia e modelos de negócio. Apesar disso, os objetivos a serem alcançados são semelhantes, pois todas promovem a produção de energia através de fontes renováveis; têm a preocupação de sensibilizar as comunidades locais para as questões climáticas e melhoria da qualidade de vida; procuram investir no desenvolvimento local e obter uma redução na fatura de energia dos seus membros.

A partir da revisão da literatura é possível concluir que, para implementar um modelo descentralizado de energia, é necessário aplicar um mercado de energia diferente do mercado tradicional, onde a energia é produzida em grande escala com localizações específicas e chegando aos consumidores passivos por meio de empresas comercializadoras de energia. Este novo modelo de mercado são os mercados P2P, totalmente pensados para modelos descentralizados de energia, onde os participantes podem efetuar trocas de energia diretamente entre si. Existem três topologias de mercados P2P: os mercados exclusivamente P2P, os mercados comunitários e os P2P híbridos. O seu funcionamento detalhado foi descrito anteriormente, sendo portanto necessário implementar um destes mercados para gerir a partilha de energia dentro das CER, bem como a sua exportação e importação de energia.

A gestão da energia dentro de uma CER pode ser feita de diversas formas, dependendo do seu modelo organizacional e de negócio. Após a análise de uma série de exemplos de CER existentes é possível concluir que grande parte se insere num dos casos descritos em seguida:

- Caso 1: CER em que os seus membros são unicamente consumidores (ICs) e investem em instalações de produção renovável (IPrs) coletivas para geração de energia para autoconsumo coletivo. A energia produzida pela(s) IPr(s) é partilhada pelos membros da comunidade, tendo em consideração a metodologia de partilha de energia acordada entre os mesmos. Assim os membros da CER usufruem de uma redução na fatura energética, pois importam da rede unicamente a energia necessária para suprir as necessidades de consumo que não foram atendidas pela energia produzida pela(s) IPr(s). Este cenário está descrito no decreto de lei 162/2019 [8];
- Caso 2: CER em que os únicos *prosumers* são edifícios públicos, como tal o investimento para instalação dos sistemas de geração local de energia é feito pela autarquia. Neste caso, todos os edifícios que são membros da CER são consumidores (IC) que compram a energia excedente produzida por estes edifícios a um preço mais reduzido que o praticado pelos comercializadores tradicionais. A principal vantagem desta CER é que os consumidores não necessitam de fazer um investimento inicial, pois este já foi feito pelos edifícios públicos. Apenas compram energia a um preço mais vantajoso e com denominação controlada da sua origem. Neste exemplo é mais difícil existir uma autonomia da CER, sendo necessário recorrer à energia proveniente da rede de distribuição tradicional. No entanto, os seus membros conseguem uma poupança na fatura da eletricidade;
- Caso 3: CER em que existem três tipos de membros: os *prosumers*, que possuem apenas sistemas locais de geração de energia, os *prosumers* que possuem sistemas locais de geração de energia e de armazenamento, e os que são unicamente consumidores. Neste caso existem trocas energéticas entre membros, com a rede de distribuição principal (caso necessário) ou com CER vizinhas, caso haja. Este caso é um dos cenários descritos no decreto de lei 162/2019 [8];
- Caso 4: Cada membro da CER pode possuir um ativo ou nenhum. Ou seja, cada edifício pode possuir unicamente sistemas de geração, unicamente sistemas de armazenamento, os dois ou nenhum. Neste caso, a gestão da energia é feita como um todo, como se não existissem proprietários. Por exemplo, um edifício que possui painéis solares pode armazenar a sua energia excedente nas baterias de uma edifício vizinha sem custos adicionais.

Devido à existência de diferentes tipos e CERs é natural que existam diferentes plataformas para gestão das mesmas com diferentes objetivos e propósitos. Os dois grupos principais de plataformas de gestão de comunidades são os seguintes:

- Plataformas que efetuam unicamente a gestão dos membros da comunidade, sendo possível aos mesmos fazer a sua inscrição e ter acesso a alguns serviços prestados pela CER. Numa grande maioria são serviços de consulta de consumos, produção e armazenamento de energia, estatísticas dos mesmos, aconselhamento de horários para consumo de energia e previsões de consumo e produção do edifício;
- Plataformas que fazem a gestão e a comercialização das trocas de energia dentro da CER, e em alguns casos com o exterior da mesma. Estas podem ter algumas variantes, entre elas devido ao mercado P2P, caso implementado, e ao modelo de negócio adotado;
- Plataformas mais completas que são um conjunto das duas descritas anteriormente.

Dentro dos diferentes tipos de plataformas existem também as plataformas de utilizadores e as plataformas de administradores/gestores de comunidades.

Posto isto é possível concluir que existe a falta de uma plataforma que permita fazer a gestão de diversas CER como um todo, ou seja, uma única plataforma para um mercado híbrido, por exemplo. Não existe também no mercado uma plataforma que implemente diversos tipos de mercado P2P de energia, tendo em conta o objetivo de cada CER. Este tipo de plataforma seria adaptável a qualquer cenário, pois grande parte das plataformas existentes têm pouca adaptabilidade a diferentes cenários. Verificou-se também que as plataformas existentes apenas comunicam com um único comercializador de energia e, como tal, os seus utilizadores não têm liberdade de escolha no comercializador de energia e também não efetuam trocas de energia com CER vizinhas.

Plataforma Proposta

O presente capítulo é dedicado à descrição da plataforma desenvolvida, onde é proposta uma interface para a mesma e é feita uma descrição detalhada de todas as suas funcionalidades e propósitos.

A plataforma para gestão de CER foi desenvolvida com o principal objetivo de gerir uma comunidade de energia renovável, interagindo com a sua entidade gestora e com seus membros, processando dados disponibilizados pelos mesmos e apresentando informações relevantes aos membros da comunidade. As interações entre comunidade, plataforma e utilizadores está representada na Figura 3.1, onde a CER pode ser formada por instalações de consumo (IC) unicamente consumidoras, por ICs com produção local de energia (UPAC), de origem renovável (e.g., solar fotovoltaica) e por Instalações de Produção (IPr) coletivas, normalmente ligadas diretamente à rede de distribuição, sendo que todos estes elementos estão ligados entre si fisicamente pela rede de distribuição de energia elétrica, através da qual são feitas as trocas de energia e, virtualmente, pela plataforma de gestão da comunidade. Cada IC e IPr envia os seus dados de consumo e produção para a plataforma, sendo estes também disponibilizados aos respetivos membros e entidade gestora. Para além da disponibilização de diversos diagramas de carga com diferentes escalas temporais e gestão de membros, a plataforma permite ao gestor selecionar o tipo de comunidade, tendo em conta os membros que participam, e o tipo de consumo que pretendem executar, de forma que seja o mais vantajoso possível para a partilha de energia. Os diferentes tipos de CER suportados pela plataforma serão abordados posteriormente no presente documento.

A partilha de determinada quantidade de energia na CER é feita de forma virtual através da plataforma, com recurso aos coeficientes de partilha, influenciando a faturação das habitações. A forma de cálculo dos coeficientes é escolhida pela entidade gestora da comunidade, e o cálculo da faturação é diretamente influenciado pelo tipo de comunidade e consumo, pelos coeficientes de partilha escolhidos e pelas tarifas de exportação de energia e de transação de energia na CER, sendo estas definidas pela entidade gestora e acordadas entre seus membros. A entidade gestora da comunidade pode utilizar a plataforma como meio de simulação para encontrar a solução mais vantajosa para os membros, alterando o método de cál-

culo dos coeficientes de partilha, tipo de consumo dentro da CER e valor das tarifas de distribuição de energia e de exportação. O valor destas tarifas dependerá do modelo de negócio adotado pela CER, podendo existir ou não. Externamente à CER, a entidade gestora é responsável por estabelecer o contacto com o mercado de energia e por informar o ORD dos valores dos coeficientes de partilha a utilizar, sendo estes calculados através da plataforma.

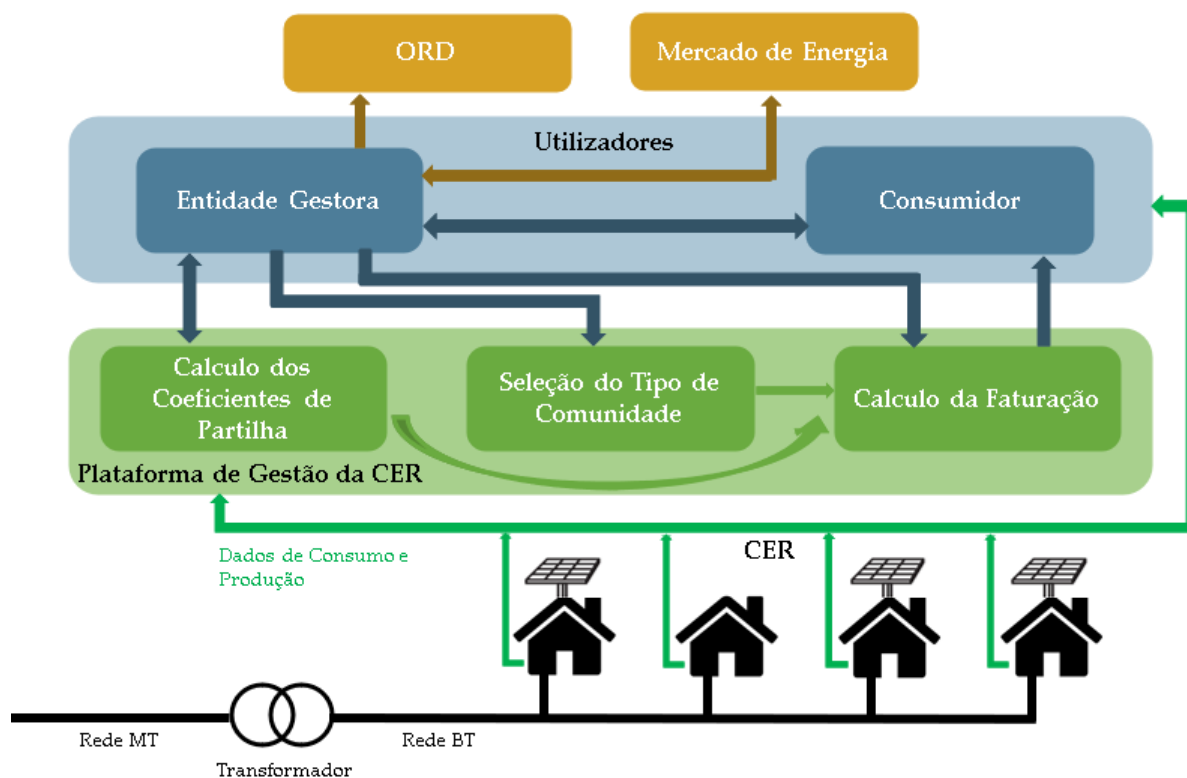


Figura 3.1 - Esquemático das interações entre a CER, plataforma de gestão da CER, utilizadores e entidades exteriores.

Através da Figura 3.2 é possível observar um resumo de todos os dados de entrada e de saída da plataforma. É necessário o consentimento de cada membro da comunidade para o acesso aos seus dados, para o correto funcionamento da plataforma, de forma a cumprir as políticas de proteção de dados, o regulamento destas pode ser consultado na GDPR (*General Data Protection Regulation*) [50]. Estes dados são o nome do membro, o Código de Ponto de Entrega (CPE), os diagramas de carga respetivos ao consumo e produção (caso a edifício possua sistema local de geração de energia) do edifício num período quarto horário (de 15 em 15 minutos), investimento do membro na CER, caso aplicável no modelo da mesma, e ciclo horário de contrato com o valor de tarifas associado. Estes dados podem ser introduzidos na plataforma pelo próprio membro ou pela entidade gestora da comunidade. Após processar todos estes dados, a plataforma permite a visualização dos membros da CER, com toda a sua informação associada (consumo, produção, investimento na CER, potência importada, coeficientes de partilha, tarifas de contrato e poupança pela associação à CER), os diagramas de

carga da produção de todas as IPr(s) coletivas existentes, as tarifas de exportação e de transação de energia na comunidade e diagramas de carga totais da CER do consumo, produção, potência importada e exportada. Existindo assim uma visão geral da comunidade como uma unidade.

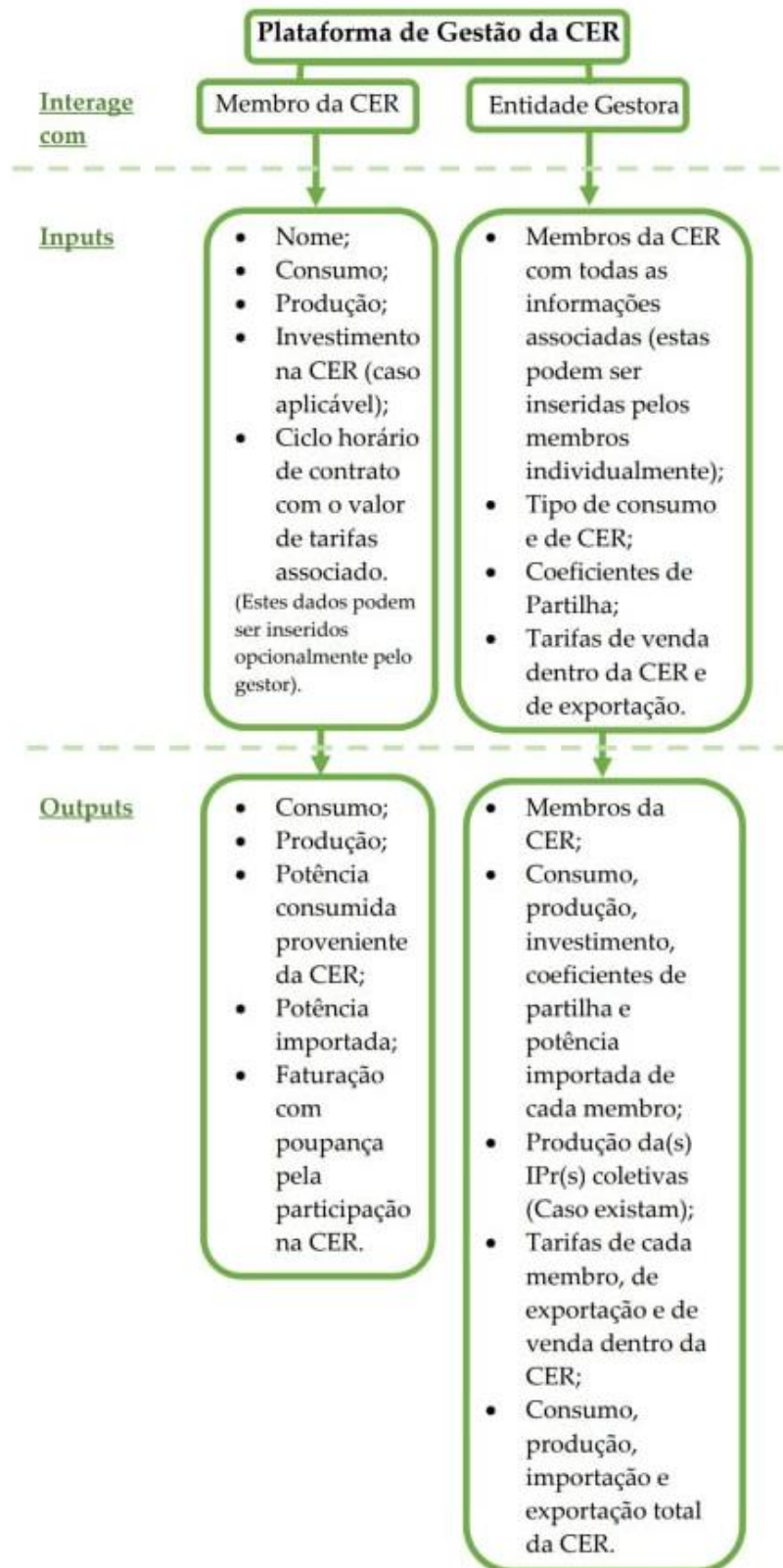


Figura 3.2 - Esquemático de entradas e saídas da plataforma de gestão de CER.

3.1. Estrutura de dados

A estrutura de dados da plataforma desenvolvida apresenta os dados indicados na Tabela 3.1 com a respetiva descrição, sendo estes os dados disponíveis para visualização na plataforma.

Tabela 3.1 - Estrutura de dados da plataforma de gestão de CERs.

Estrutura	Dado	Descrição
Gestor	comunidade	Indica o tipo de comunidade, tendo um valor inteiro entre 0 e 5.
	P_consumo	Peso do consumo no cálculo dos coeficientes de partilha. Valor entre 0 e 1.
	P_producao	Peso da produção no cálculo dos coeficientes de partilha. Valor entre 0 e 1.
	P_investimento	Peso do investimento no cálculo dos coeficientes de partilha. Valor entre 0 e 1.
	T_pv	Valor da tarifa para exportação em €/kWh.
	T_ptc	Valor da tarifa para venda de energia dentro da comunidade, em €/kWh.
Membro	nome	Nome do membro da CER.
	CPE	Código de ponto de entrega da IC
	consumo	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes ao consumo total da IC.
	producao	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes à produção total do edifício.
	consumo_efetivo	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes ao consumo do edifício após autoconsumo individual.
	producao_efetiva	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes à produção não consumida pelo edifício.
	P_atribuida	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes à potência atribuída ao edifício após partilha.
	P_imporada	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes à potência importada pelo edifício.
	P_exportada	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes à potência exportada pelo edifício.
	investimento	Valor do investimento em euros.

	coeficiente	Se os coeficientes forem fixos a variável tem um valor compreendido entre 0 e 1. Caso sejam dinâmicos a variável tem a forma de vetor com todos os coeficientes. O somatório dos coeficientes de todos os membros é unitário.
	tipo_tarifa	Indica o tipo de tarifa através de um código, à semelhança da variável comunidade.
	T_fixo	Tarifa fixa em euros por dia.
	Dados das tarifas tendo em conta o seu tipo. O seu valor é em €/kWh.	
	faturacao_inicio	Vetor com 12 posições com a faturação do edifício de cada mês se não estivesse em comunidade.
	faturacao	Vetor com 12 posições com a faturação do edifício de cada mês em comunidade.
IPR	CPE	Código de ponto de entrega da IPr.
	producao	Vetor com os valores de potência em kW correspondentes à produção total da IPr.

3.2. Tipo de Comunidade e Consumo

A plataforma desenvolvida opera com cinco topologias diferentes de comunidades de energia renovável, sendo que os principais pontos de distinção o tipo de consumo pretendido para a comunidade e a existência de IPrs coletivas e/ou UPACs individuais. Como tal, os cinco tipos de comunidades são os seguintes:

1. **Comunidade apenas com IPr(s) coletiva(s)**, onde a energia produzida pela(s) IPr(s) é distribuída pelos membros da comunidade segundo os seus coeficientes de partilha. É de notar que todas os edifícios da CER são unicamente consumidores;
2. **Comunidade com IPr(s) coletiva(s) e UPAC(s) individuais(s) com prioridade no autoconsumo individual**, onde a energia disponível para partilha corresponde à produzida pela(s) IPr(s) juntamente com o excedente de energia de cada edifício, após feito o autoconsumo individual;
3. **Comunidade com IPr(s) coletivas(s) e UPAC(S) individuais(s) com autoconsumo coletivo**, onde a energia partilhada é toda a energia produzida na CER e é partilhada de acordo com os coeficientes de partilha;
4. **Comunidade com UPAC(s) individuais(s) com prioridade no autoconsumo individual**, onde a energia partilhada corresponde ao excedente de todas as habitações após efetuarem o autoconsumo individual;
5. **Comunidade com UPAC(s) individuais(s) com autoconsumo coletivo**, onde a energia partilhada é a soma de toda a produção das UPACs da comunidade.

O fluxograma correspondente à função da plataforma responsável pela definição do tipo de comunidade está representado na Figura 3.3, onde são feitas três perguntas ao gestor da comunidade. A variável OP1 indica se a comunidade possui IPR(s) coletiva(s), a variável OP2 indica se a comunidade possui UPAC(s) individuais e a variável OP3 indica o tipo de consumo na comunidade, podendo este ser com prioridade no autoconsumo individual (OP3=1) ou autoconsumo coletivo (OP3=2). O código do tipo da comunidade é gravado na estrutura *gestor.comunidade*, sendo o código respectivo a numeração apresentada anteriormente.

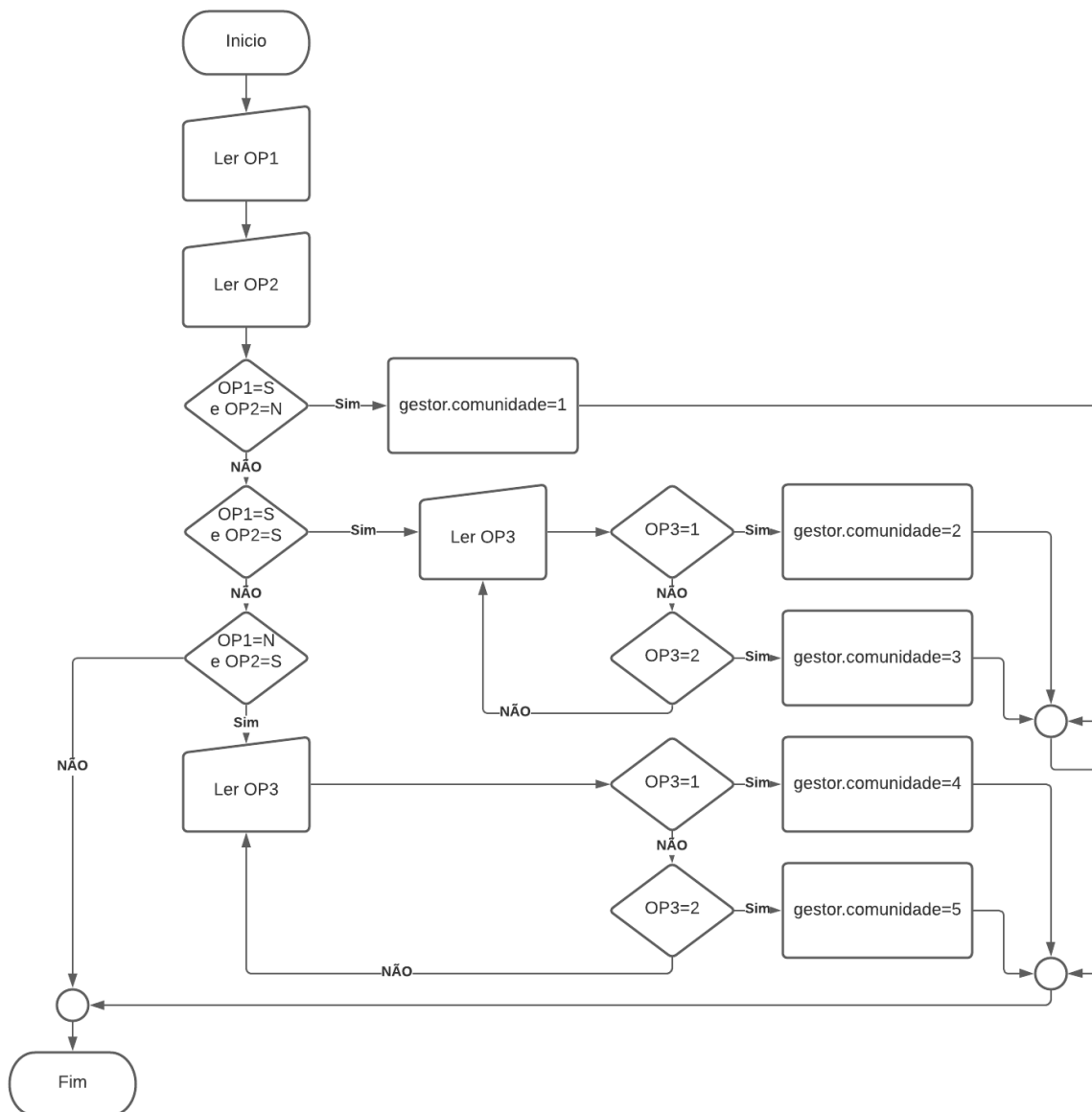


Figura 3.3 - Fluxograma correspondente à seleção do tipo de comunidade.

3.3. Coeficientes de Partilha de Energia

Os coeficientes de partilha de energia são os responsáveis por indicar a percentagem de energia que é atribuída a cada membro da comunidade, como tal a soma de todos os coeficientes de todos os membros tem de ser igual a 100% ou um, caso o cálculo seja efetuado sem percentagem (como na plataforma desenvolvida). No entanto existem diversas metodologias de cálculo dos coeficientes, podendo estes ser fixos ou dinâmicos. A plataforma proposta apresenta quatro topologias diferentes para o cálculo dos mesmos, sendo estas descritas em seguida.

3.3.1. Coeficientes Fixos

Os coeficientes fixos não variam ao longo do tempo, sendo atribuído um coeficiente com um valor entre 0 e 1 a cada membro da CER que representa a percentagem de energia que cada membro irá receber da energia total disponível para partilha. O valor do coeficiente de cada membro é atribuído pela entidade gestora e inserido na plataforma, sendo que esta apenas verifica se a soma de todos os coeficientes é igual a 1 para que não existam perdas (soma <1) ou faltas (soma >1) de energia *à priori*.

Como estes coeficientes são fixos, não alteram consoante as necessidades de consumo do edifício, como tal não são os mais eficientes na distribuição de energia na comunidade, uma vez que mesmo que a edifício não apresente necessidades de consumo receberá sempre uma percentagem da energia a partilhar, sendo esta energia desperdiçada. Este problema é solucionado com os coeficientes dinâmicos proporcionais ao consumo, que são descritos adiante.

3.3.2. Coeficientes Fixos Proporcionais ao Consumo

Os coeficientes fixos proporcionais ao consumo são calculados para cada membro *i* através da seguinte fórmula:

$$C_i = \frac{Total_C_i}{\sum_{j=1}^N Total_C_j} \quad (1)$$

Onde

- C_i é o coeficiente de partilha do membro *i*;
- $Total_C_i$ é o total da soma de todos os consumos do edifício do membro *i*;
- N é o número total de membros da comunidade.

Estes coeficientes são calculados através da proporção do total de energia consumida por cada membro e o total de energia consumida na comunidade num determinado horizonte temporal. Permitindo assim partilhar mais energia para os maiores consumidores dentro da

comunidade por forma a minimizar as trocas com a rede. No entanto continuam a existir perdas de energia uma vez que os coeficientes são fixos, pelas mesmas razões dos coeficientes anteriormente descritos.

A entidade gestora não tem qualquer influencia nestes coeficientes uma vez que são calculados com base nos consumos das habitações. Assim estes coeficientes podem tornar-se pouco democráticos na distribuição de energia pois esta é unicamente distribuída tendo em conta uma única variável, ignorando outras possivelmente importantes, como a produção ou o investimento de cada membro. Por exemplo, no caso das topologias de comunidade com prioridade no autoconsumo coletivo estes coeficientes podem inferir alguma injustiça na partilha de energia a nível económico, uma vez que um edifício com elevado consumo e nenhuma produção irá obter uma maior poupança na fatura energética sem efetuar um investimento prévio em instalações de produção, isto em comparação com habitações com menor consumo mas com produção. Nestes casos seria importante que o cálculo dos coeficientes dependesse também da produção do edifício para que a partilha seja mais justa.

3.3.3. Coeficientes Dinâmicos Proporcionais ao Consumo

Os coeficientes dinâmicos proporcionais ao consumo são calculados a cada 15 minutos conforme o tempo de amostragem dos valores de potência de consumo dos edifícios. Estes são calculados através da seguinte fórmula:

$$Cd_i(n) = \frac{EC_i(n)}{\sum_{j=1}^N EC_j(n)} \quad (2)$$

Onde

- n período quarto-horário considerado para o cálculo do coeficiente;
- Cd_i é o coeficiente de partilha dinâmico do membro i ;
- EC_i é a energia consumida pelo edifício do membro i , será zero se o membro não necessitar de energia;
- N é o número total de membros da comunidade.

Como estes coeficientes são dinâmicos apenas é atribuída energia às habitações que apresentam necessidade de consumo no intervalo de tempo considerado, aumentando assim a eficiência da distribuição de energia na comunidade. No entanto, à semelhança dos coeficientes anteriormente descritos, o seu cálculo depende unicamente de uma variável, persistindo assim os problemas anteriormente descritos associados.

3.3.4. Coeficientes Dinâmicos com Pesos

Os coeficientes dinâmicos com pesos são calculados em cada 15 minutos através da fórmula seguinte:

$$CDP_i(n) = \text{Peso}_c \times \frac{EC_i(n)}{\sum_{i=1}^N EC_i(n)} + \text{Peso}_p \times \frac{EP_i(n)}{\sum_{i=1}^N EP_i(n)} + \text{Peso}_{inv} \times \frac{Inv_i(n)}{\sum_{i=1}^N Inv_i(n)} \quad (3)$$

Onde

- n período quarto-horário considerado para o cálculo do coeficiente;
- CDP_i é o coeficiente de partilha dinâmico com pesos do membro i ;
- EC_i é a energia consumida pelo edifício do membro i ;
- EP_i é a energia gerada localmente pelo membro i ;
- Inv_i é o valor investido pelo membro i na CER;
- Peso_c é o valor do peso atribuído pela entidade gestora ao consumo para o cálculo do coeficiente;
- Peso_p é o valor do peso atribuído pela entidade gestora à produção para o cálculo do coeficiente;
- Peso_{inv} é o valor do peso atribuído pela entidade gestora ao investimento para o cálculo do coeficiente;
- N é o número total de membros da comunidade.

A entidade gestora é responsável por definir o valor dos pesos para o cálculo dos coeficientes de partilha, sendo a soma destes igual a um, de acordo com a vontade dos membros da CER. A plataforma desenvolvida ao efetuar o cálculo deste coeficiente aplica a fórmula apresentada unicamente se o edifício apresentar valores de consumo no instante do cálculo, caso contrário é atribuído o valor de zero ao coeficiente, pois a edifício não necessita de energia proveniente da partilha. Este método de calculo irá mitigar os problemas anteriormente descritos, tornando a partilha de energia mais justa e eficiente.

3.4. Custo da Energia

O cálculo do custo de energia varia consoante o tipo de contrato do edifício. Sendo a fórmula apresentada uma forma simplificada para o seu cálculo, de modo que seja possível efetuar simulações através da plataforma desenvolvida. O valor real do custo da energia poderá ser ligeiramente diferente do calculado pela plataforma, pois o responsável pela faturação da energia importada pela IC é a comercializadora de energia com a qual o edifício apresenta contrato. A plataforma proposta considera dois tipos de contrato, o ciclo simples e o ciclo bi-horario. No ciclo simples a tarifa de energia é constante em qualquer hora do dia, enquanto que no ciclo bi-horario existem dois valores de tarifas, a tarifa de vazio que é aplicada entre as 8h e as 22h e a tarifa fora do vazio que é a considerada no restante intervalo de tempo. O custo da energia é calculado pela plataforma através da fórmula seguinte:

$$custo = T_{fixo} \times dias + \sum_{h=1}^{dias \times 24 \times 4} E_{imp_h} \times Tarifa_h \quad (4)$$

Onde

- **custo** é o valor do custo da energia em euros;
- **T_{fixo}** é o valor da tarifa fixa em euros por dia;
- **dias** corresponde ao número de dias considerados para o cálculo do custo;
- **E_{imp}** corresponde à energia importada pelo edifício no período h de 15 minutos.
- **Tarifa** corresponde ao valor da tarifa em vigor no horário do cálculo do custo.

A plataforma proposta efetua dois cálculos distintos de faturações:

- **Cálculo do custo da energia da IC fora da comunidade**, onde é considerado o autoconsumo individual caso esta possua geração de energia. A faturação tem o valor da fórmula apresentada anteriormente do custo da energia;
- **Cálculo do custo da energia da IC em comunidade** que irá depender do tipo de CER considerado. É possível observar a metodologia de calculo para os diferentes tipos de comunidade através da Tabela 3.2, onde:
 - **E_{atribuidaM}** corresponde à energia em kWh atribuída à edifício do membro M da CER;
 - **E_{disponivel}** corresponde à energia em kWh disponível para partilha na CER;
 - **Coeficiente_M** corresponde ao valor do coeficiente de partilha atribuído ao membro M da CER;
 - **Receita** corresponde ao valor em euros da venda do excedente de energia da CER no mercado de energia;
 - **T_{pv}** corresponde ao valor da tarifa de venda do excedente de energia da CER em euros por kWh;
 - **E_{exportadaM}** corresponde à energia em kWh não consumida após partilha (exportada) por cada membro M;
 - **M** número de código correspondente a cada membro da CER.

Em comunidade, a entidade gestora é responsável por entrar em contacto com a(s) comercializadora(s) de energia dos membros da CER para faturação e pagamento da energia importada, uma vez que as comercializadoras não têm acesso ao fluxo energético dentro na comunidade, uma vez que este é tratado virtualmente. Assim para que a plataforma funcione num contexto real e não apenas de simulação é necessário que a fórmula (4) seja aprovada pelas comercializadoras que fornecem os membros da comunidade, podendo esta fórmula ser substituída por outra que se adegue mais à realidade da comunidade.

Tabela 3.2 - Metodologia do cálculo da faturação consoante o tipo de CER.

		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
1º	Cálculo da potência disponível para partilha;	Soma da produção das IPrs da CER.	Soma da produção das IPrs e dos excedentes de energia de cada edifício após o autoconsumo individual.	Soma da produção das IPrs e das habitações da CER.	Soma do excedente de energia de cada edifício da CER após autoconsumo individual.	Soma da produção das habitações da CER.
2º	Atribuição energia partilhada a cada membro;	$E_{atribuidaM} = E_{disponivel} \times coeficiente_M$ (5)				
3º	Cálculo da potência importada, exportada e custo da energia;	A potência importada e exportada por cada membro é calculada segundo o fluxograma representado na Figura 3.4. De seguida é efetuado o cálculo do custo da energia através da fórmula apresentada anteriormente.				
4º	Venda de energia no mercado;	$Receita = T_{pv} \times \sum_{M=1}^{n^o \text{ membros}} E_{exportadaM}$ (6)				
5º	Distribuição de receitas pelos membros da CER;	A receita é distribuída pelos membros da CER tendo em conta o seu investimento na mesma. Este valor é descontado no valor do custo de energia.	A receita é distribuída pelos membros da CER tendo em conta o seu investimento na mesma e a produção de cada membro. Este valor é descontado no valor do custo de energia.		A receita é distribuída pelos membros da CER tendo em conta a produção de cada membro. Este valor é descontado no valor do custo de energia.	
6º	Faturação dentro da CER.	/	Fluxograma representado na Figura 3.5.	/	Fluxograma representado na Figura 3.5.	/

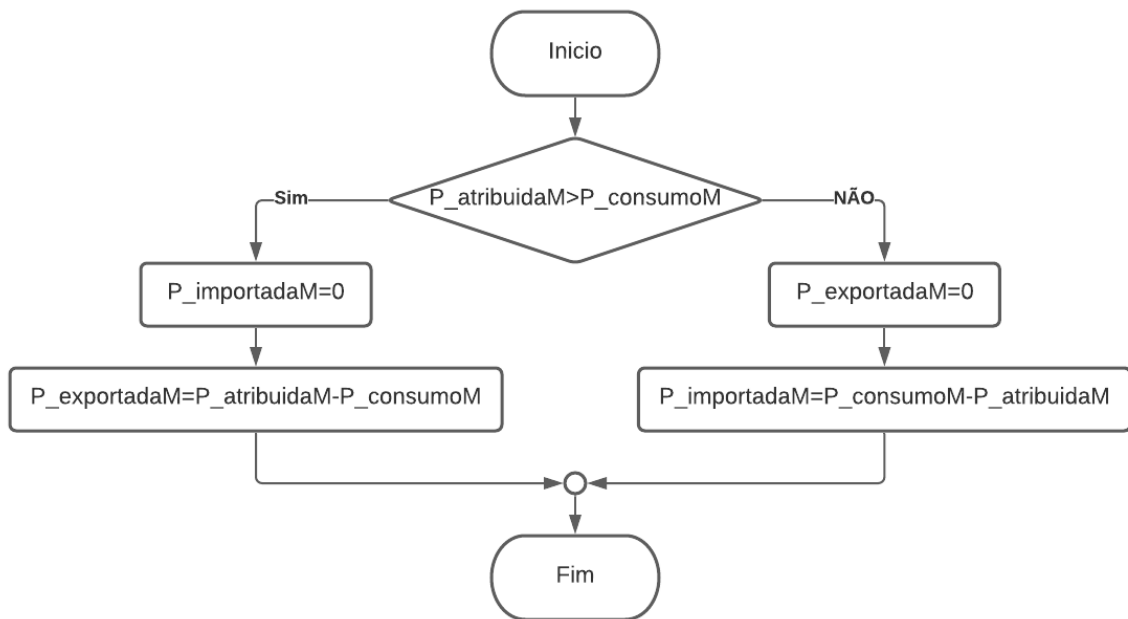


Figura 3.4 - Fluxograma do cálculo da potência importada e exportada por cada membro.

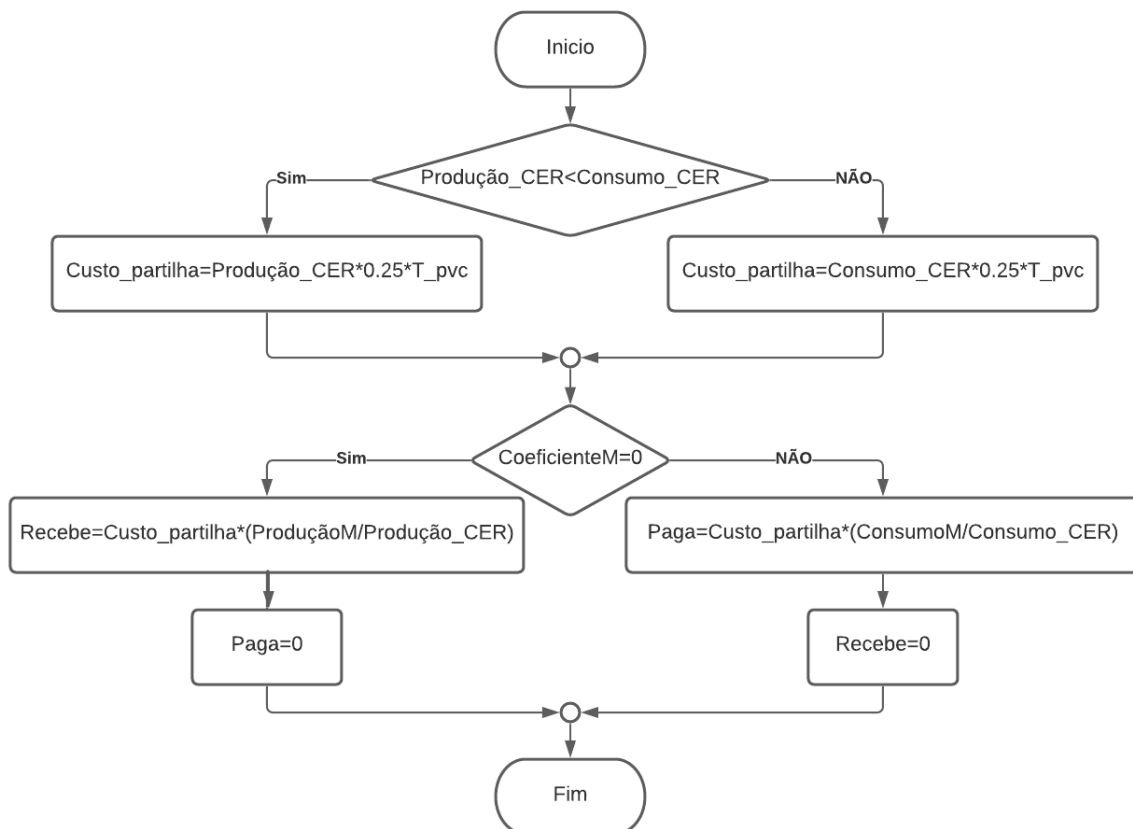


Figura 3.5 - Fluxograma do cálculo da faturação da distribuição da energia dentro da CER.

Através da observação do fluxograma da Figura 3.5 é possível verificar que a faturação da energia partilhada dentro da CER só é feita no caso em que os coeficientes de partilha são

dinâmicos, pois é possível averiguar quais os edifícios que contribuíram para a energia disponível para partilha e quais as habitações que consumiram essa energia. No caso dos coeficientes fixo, como a energia é distribuída por todas as habitações independentemente das necessidades de consumo, este cálculo não se adequa.

Por fim o cálculo da faturação é realizado para cada tipo de comunidade segundo as fórmulas seguintes:

- **Tipo 1**

$$fatura\tilde{c}\tilde{a}oM = custo - lucro \times \frac{InvM}{InvCER} \quad (7)$$

- **Tipo 2**

$$fatura\tilde{c}\tilde{a}oM = custo - lucro \times 0.5 \times \left[\frac{InvM}{InvCER} + \frac{Produ\tilde{c}\tilde{a}oM}{Produ\tilde{c}\tilde{a}oCER} \right] - Recebe + Paga \quad (8)$$

- **Tipo 3**

$$fatura\tilde{c}\tilde{a}oM = custo - lucro \times 0.5 \times \left[\frac{InvM}{InvCER} + \frac{Produ\tilde{c}\tilde{a}oM}{Produ\tilde{c}\tilde{a}oCER} \right] \quad (9)$$

- **Tipo 4**

$$fatura\tilde{c}\tilde{a}oM = custo - lucro \times \frac{Produ\tilde{c}\tilde{a}oM}{Produ\tilde{c}\tilde{a}oCER} - Recebe + Paga \quad (10)$$

- **Tipo 5**

$$fatura\tilde{c}\tilde{a}oM = custo - lucro \times \frac{Produ\tilde{c}\tilde{a}oM}{Produ\tilde{c}\tilde{a}oCER} \quad (11)$$

Onde

- **fatura\tilde{c}\tilde{a}oM** representa o valor da fatura energética do membro M em euros;
- **custo** representa o custo da energia em euros calculado através da fórmula apresentada anteriormente;
- **Receita** representa o valor em euros da energia excedente da CER vendida no mercado de energia;
- **InvM** representa o valor investido na CER pelo membro M, em euros;
- **InvCER** representa o valor total de investimento feito na CER por todos os membros da mesma;
- **Produ\tilde{c}\tilde{a}oM** representa o total de potência produzida disponível para partilha pelo membro M, em kW;
- **Produ\tilde{c}\tilde{a}oCER** representa o total de potência produzida por todos os membros da CER disponível para partilha, em kW;
- **Recebe** representa o valor em euros que o membro M recebe pela sua energia produzida;

- **Paga** representa o valor em euros que o membro M paga pelo consumo de energia proveniente da CER.

3.5. Interface Gráfica

Nesta secção é apresentada a interface gráfica proposta para a plataforma juntamente com os diferentes menus da mesma consoante o seu utilizador. A interface foi desenvolvida com recurso à ferramenta informática *Balsamiq Wireframes*²² tendo um formato de aplicação móvel. Como a plataforma interage com dois tipos de utilizadores distintos estes irão ter funcionalidades e menus distintos, como tal é necessário fazer a sua distinção ao entrar na plataforma, como representado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - *Login* na plataforma com diferenciação no utilizador.

3.5.1. Menu da Entidade Gestora

O menu principal para a entidade gestora da CER está representado na Figura 3.7(a), tendo cinco funcionalidades principais, nomeadamente: adicionar membro, eliminar membro, programar comunidade, ver dados da comunidade e sair da plataforma. Cada uma destas funcionalidades apresenta um menu próprio que será apresentado em seguida.

²² <https://balsamiq.com/>

A opção "Adicionar Membro", representada na Figura 3.7(b), tem como propósito recolher os dados necessários do membro a adicionar. Esta funcionalidade pode ser acedida através do menu da entidade gestora ou então pelo membro da CER antes de efetuar o seu login na plataforma, permitindo assim tanto à entidade gestora quanto ao consumidor efetuar a inscrição de um novo membro na CER. A inscrição feita pelo consumidor necessita posteriormente da aprovação da entidade gestora para integrar a comunidade. Esta funcionalidade pede a inserção do nome do membro, da potência consumida pelo edifício, em kW, com uma amostragem quarto horaria, da potência produzida pelo edifício, em kW, (caso esta possua sistema local de geração de energia) com a mesma amostragem do consumo, o valor do investimento em euros do membro feito na CER e o ciclo horário de contrato, podendo este assumir diversas formas. Na situação apresentada na Figura 3.8(b) foram consideradas as opções de ciclo horário de contrato "simples", "bi" ou "tri" horário. A tarifa fixa, em euros por dia, é inserida independentemente do ciclo escolhido. No caso do ciclo simples é necessário inserir a tarifa simples, em euros por kWh, se for bi-horário são inseridas as tarifas de vazio e de fora do vazio, ambas em euros por kWh e se for tri-horario são inseridas as tarifas de ponta, cheia e vazio, todas em euros por kWh, estes valores estão previamente registados na plataforma.

A opção "Eliminar Membro", representada na Figura 3.7(c), permite ao gestor procurar o membro a eliminar através do seu nome, procedendo assim à sua eliminação da CER.

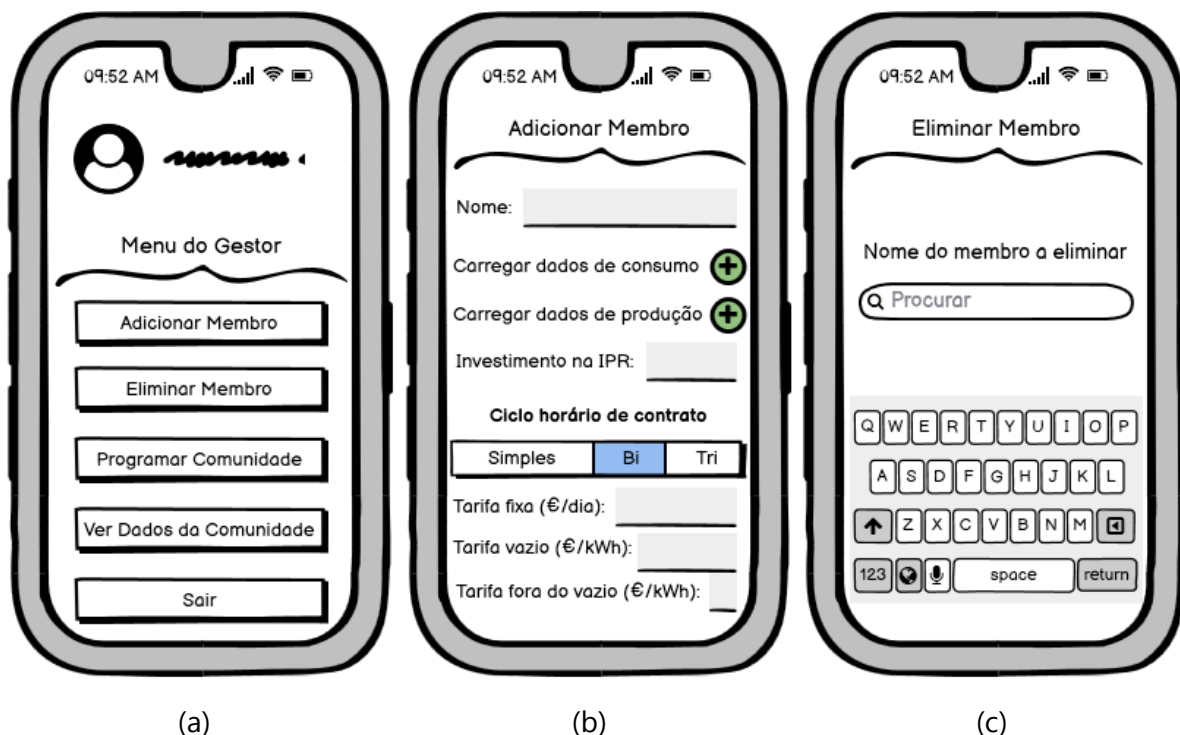


Figura 3.7 - Menu principal do gestor da CER (a); Opção "Adicionar Membro" (b); Opção "Eliminar Membro" (c).

A opção "Programar Comunidade" possui um menu próprio, representado na Figura 3.8(a), com três funcionalidades, sendo elas:

- Definir o **tipo de comunidade**, representada na Figura 3.8(b), onde a entidade gestora indica se a CER possui IPr(s) coletivas(s), se os membros da comunidade possuem UPAC(s) individuais e a prioridade do consumo na comunidade. Posto isto é atribuído à comunidade o seu tipo, tal como descrito posteriormente no presente documento;
- Definir o tipo de **coeficientes de partilha**, representado na Figura 3.8(c), onde é possível seleccionar o seu método de cálculo, podendo ser coeficientes fixos, fixos proporcionais ao consumo, dinâmicos proporcionais ao consumo ou dinâmicos com pesos. Estes métodos de cálculo estão descritos na secção 3.3. No caso dos coeficientes fixos e dos coeficientes dinâmicos com pesos é necessário a introdução dos respetivos coeficientes e pesos por parte da entidade gestora, como representado à na Figura 3.9(a) e (b). O aviso da soma dos valores introduzidos tem de ser igual a um para um correto funcionamento da plataforma está representado na Figura 3.9(c);
- Na opção **tarifas de venda**, representada na Figura 3.10(a), é permitido à entidade gestora introduzir a tarifa de venda do excedente da comunidade acordada com um comercializador ou mediador de mercado, em euros por kWh, e definir o valor da tarifa a aplicar para transação de energia dentro da comunidade, em euros por kWh. O valor desta tarifa é acordado entre todos os membros da CER.

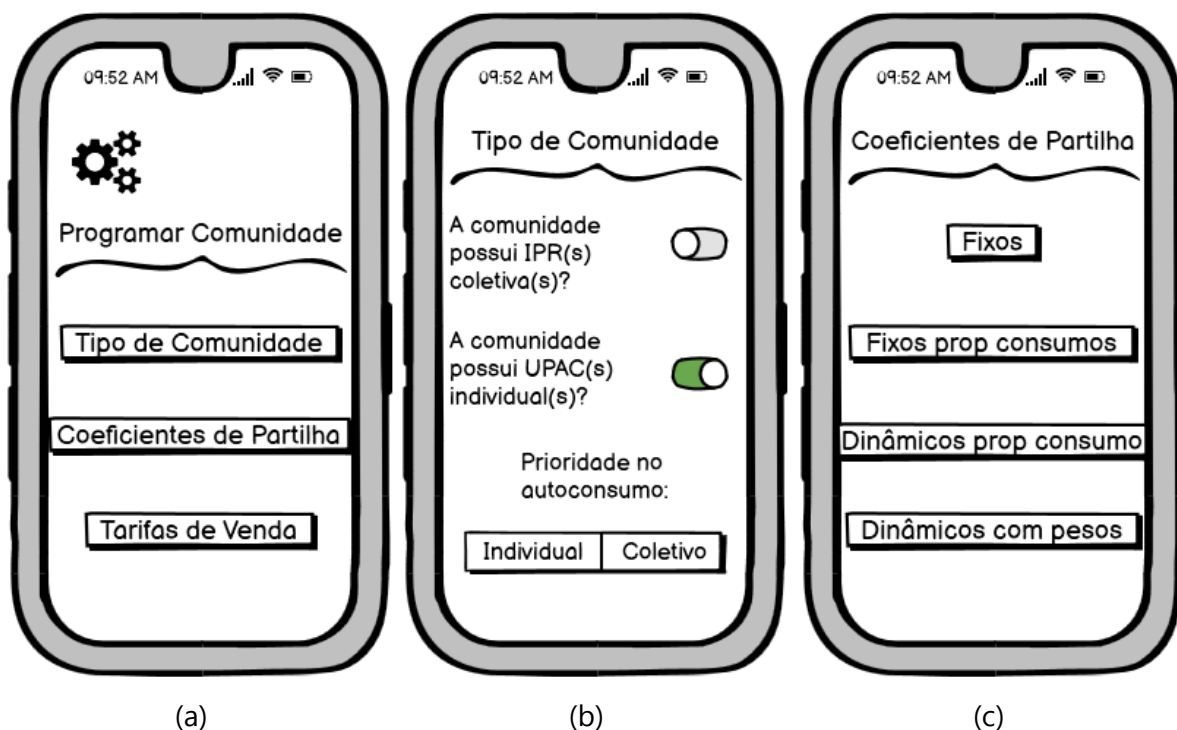
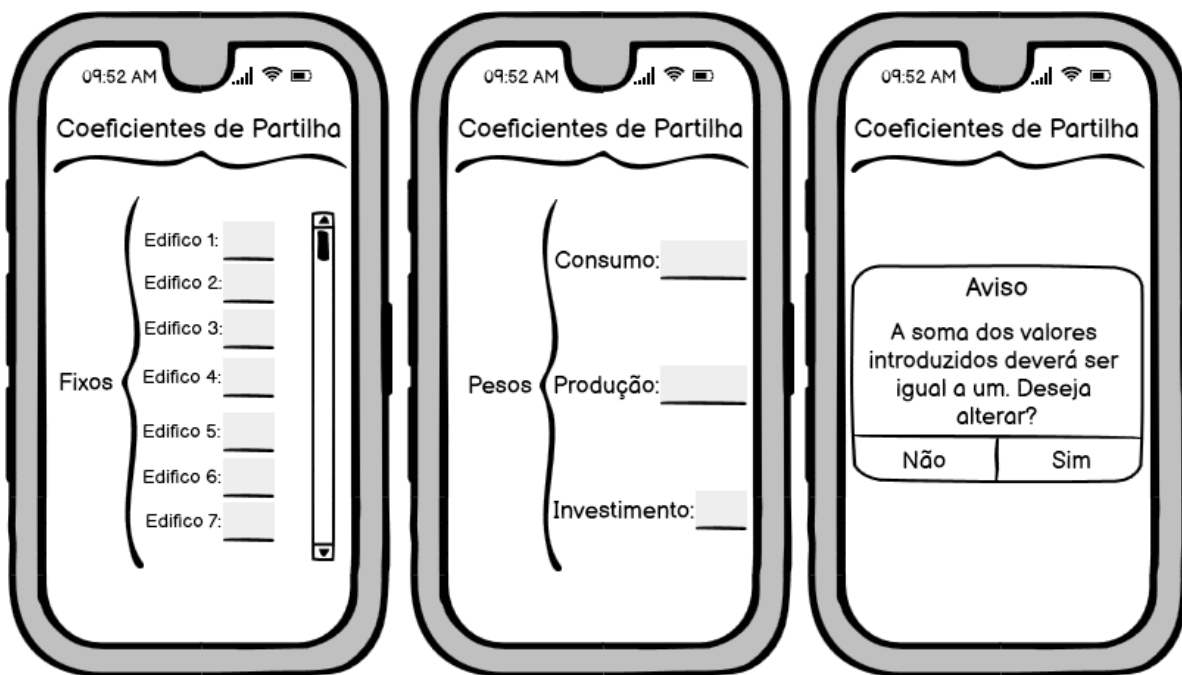


Figura 3.8 - Menu da opção Programar Comunidade (a); Opções para definir o Tipo de Comunidade (b); Menu para escolha do método de cálculo dos Coeficientes de Partilha (c).



(a)

(b)

(c)

Figura 3.9 - Opção para inserir o valor dos coeficientes fixos (a); Opção para inserir o valor dos pesos para o cálculo dos coeficientes dinâmicos com pesos (b); Aviso de que a soma dos valores introduzidos anteriormente terá de ser igual a um (c).



(a)

(b)

(c)

Figura 3.10 - Opção para introdução das Tarifas de Venda (a); Menu correspondente à opção Ver Dados da Comunidade (b) e (c).

A opção "Ver Dados da Comunidade" possui um menu, representado na Figura 3.10(b) e(c) para seleção dos dados a observar. Esta opção permite visualizar:

- Os nomes dos **membros** participantes na CER, como Figura 3.11(a);
- Os diagramas de carga correspondentes ao **consumo** de cada membro, podendo os diagramas ser diários, mensais ou anuais, como representado na Figura 3.11(b), Figura 3.11(c) e Figura 3.12(a);
- Os diagramas de carga correspondentes à **produção** de cada membro, podendo os diagramas ser diários, mensais ou anuais, como representado na Figura 3.12(b);
- O **investimento** de cada membro na CER, como representado na Figura 3.12(c);
- Os diagramas de carga correspondentes à **produção de cada IPr**, podendo os diagramas ser diários, mensais ou anuais, tal como os diagramas do consumo e produção de cada membro;

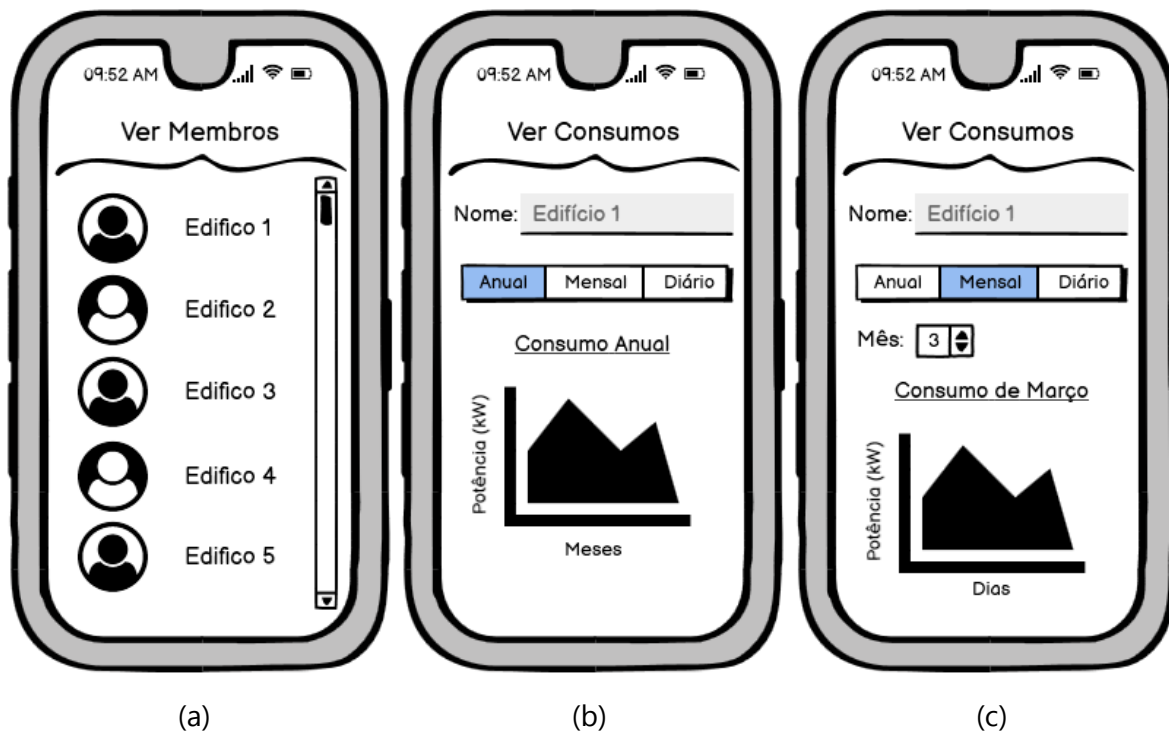
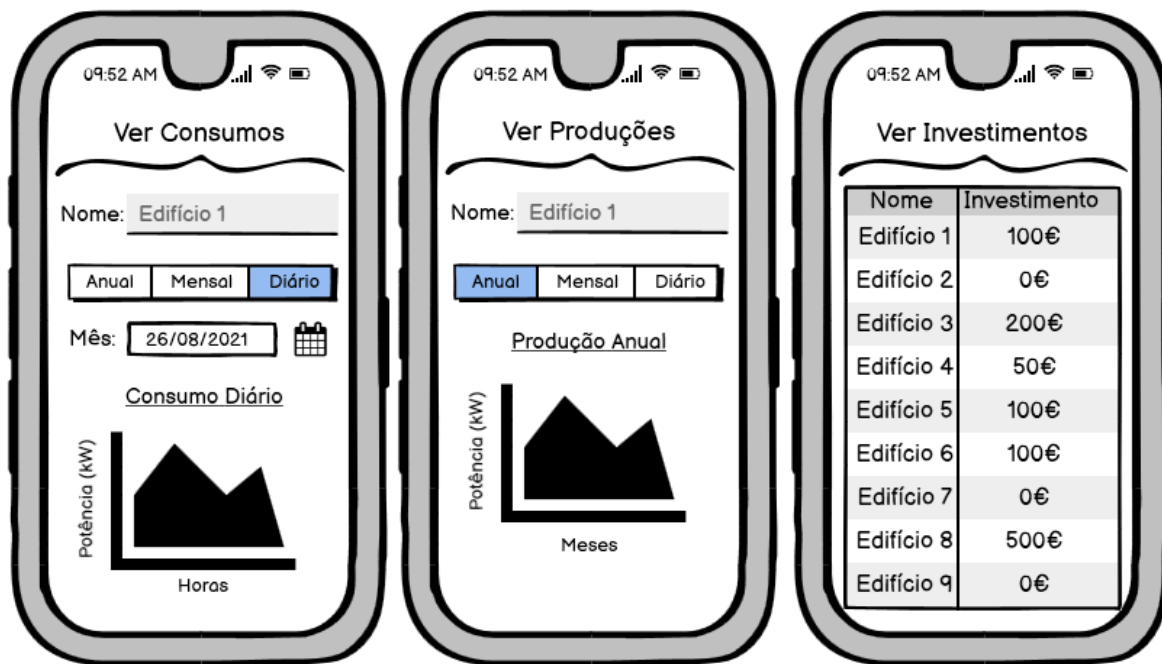


Figura 3.11 - Lista de membros participantes na CER (a); Diagrama de carga anula (b); diagrama de carga mensal (c).



(a) (b) (c)
 Figura 3.12 - Diagrama de carga diário (a); Diagrama de carga anual (b); Lista de investimentos de todos os membros na CER (c).

- Os **coeficientes de partilha** de cada membro. Se estes forem dinâmicos são apresentados em um gráfico com os coeficientes ao longo de um ano, mês ou dia, como representado na Figura 3.13(a). Caso sejam fixos são apresentados em lista, tal como representado na Figura 3.13(b);
- As **tarifas** de cada membro e as tarifas da comunidade, tal como representado na figura 3.13(c) e na figura 3.14(a), respetivamente;
- A **faturação** de cada membro com o valor da fatura energética caso não esteja em comunidade, com o valor em comunidade e com a poupança obtida por integrar a CER. É apresentado também a poupança anual, como representado na Figura 3.14(b);
- Os diagramas de carga correspondentes à **potência importada** da rede por cada membro, podendo os diagramas ser diários, mensais ou anuais, à semelhança dos diagramas de carga correspondentes ao consumo;
- A **comunidade como um todo** com a observação dos diagramas de carga correspondentes ao total do consumo, produção, potência importada e exportada da CER. Estes diagramas podem ser anuais, mensais ou diários, como representado na Figura 3.14(c).



Figura 3.13 - Opção de ver os coeficientes de partilha quando estes são dinâmicos (a); Opção de ver os coeficientes de partilha quando estes são fixos (b); Visualizar as tarifas de cada membro (c).



Figura 3.14 - Visualizar as tarifas referentes à comunidade (a); Visualização das faturas energéticas e poupanças associadas de cada membro (b); Menu correspondente à opção de ver a comunidade como um todo (c).

3.5.2. Menu do Consumidor

O menu principal do consumidor está representado na Figura 3.15(a), tendo seis funcionalidades principais: "Ver Consumo", "Ver Produção", "Ver Potência Atribuída", "Ver Potência Importada", "Ver Faturação" e sair da plataforma.

A opção ver consumo possibilita ao consumidor ver o consumo do seu edifício num período de tempo anual, mensal ou diário, como foi descrito no menu da entidade gestora da comunidade, assim como a opção de ver produção, a interface é igual.

A opção ver potência atribuída, representada na Figura 3.15(b), possibilita ao consumidor ver a percentagem da potência que lhe é atribuída tendo em conta toda a potência disponível para partilha. Pode visualizar esta informação numa escala temporal anual, mensal ou diária.

A opção ver potência importada, representada na Figura 3.15(c), possibilita ao utilizador observar de toda a potência consumida a que foi importada da rede elétrica e a que foi consumida proveniente da comunidade, numa escala temporal anual, mensal ou diária.

A opção ver faturação permite ao consumidor observar a sua faturação de todos os meses estando na CER e caso não esteja em comunidade, sendo feito também o cálculo de poupança com a integração na comunidade. A interface gráfica é semelhante à da entidade gestora da comunidade.

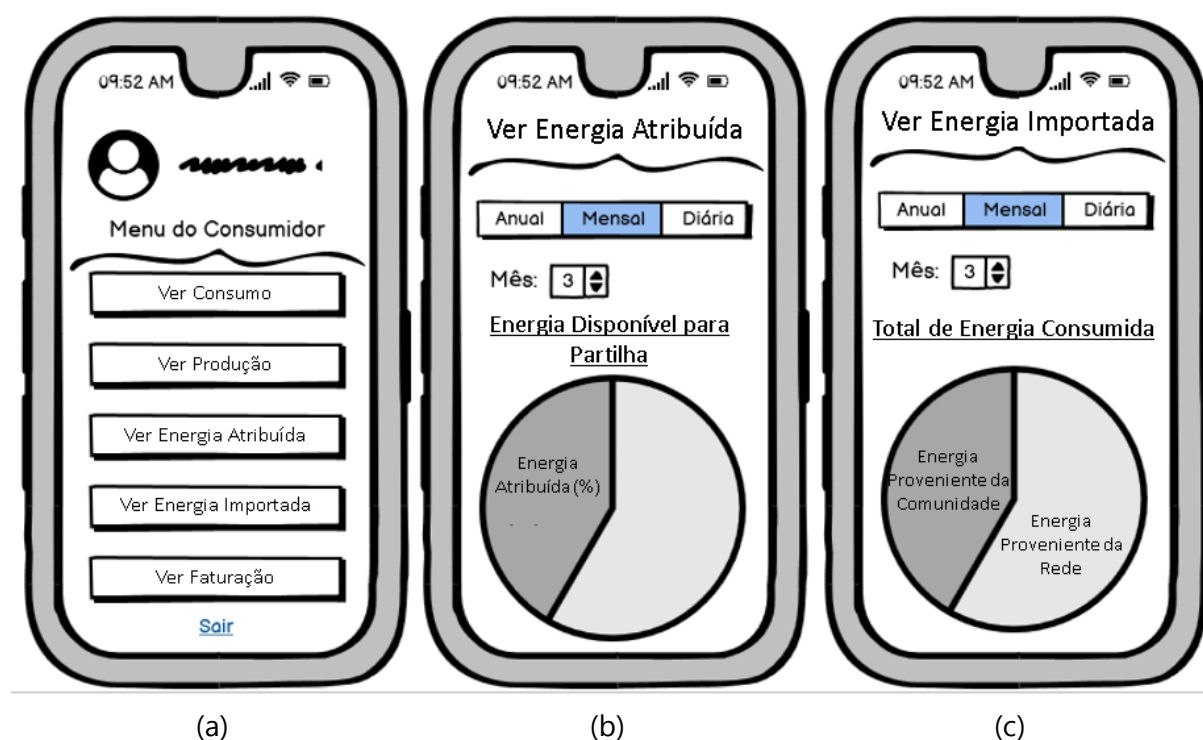


Figura 3.15 - Menu principal do consumidor (a); Opção ver potência atribuída (b); Opção ver potência importada (c).

Resultados e Análise

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos através da utilização da plataforma para gestão de CER, desenvolvida com recurso à ferramenta informática MATLAB™, para um caso de estudo com diferentes cenários. Primeiramente é feita a descrição do caso de estudo e respetivos cenários, de seguida são apresentados os resultados obtidos e por fim é feita a discussão dos resultados.

4.1. Caso de Estudo

O presente caso de estudo assenta num bairro composto por 33 edifícios de edifício unifilares alimentados em baixa tensão pelo mesmo transformador, como representado na Figura 4.1, em que cada edifício possui geração de energia renovável (geração fotovoltaica).

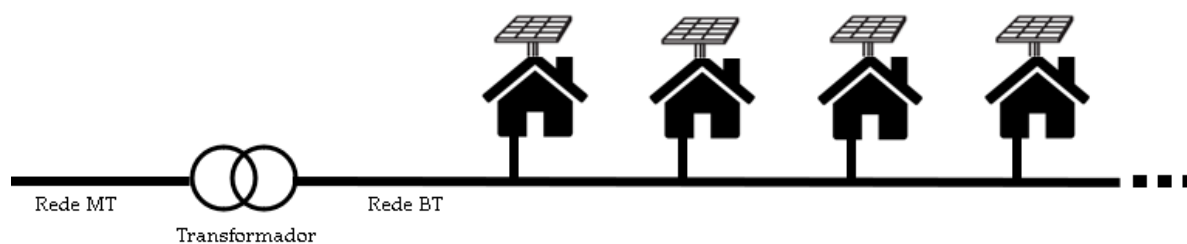


Figura 4.1 - Representação do bairro habitacional considerado para o caso de estudo.

Os diagramas de carga correspondentes ao consumo e produção de cada edifício têm um período de duração de um ano e uma amostragem de 15 minutos. São considerados dados de consumo com e sem otimização. A otimização dos consumos foi realizada recorrendo a um algoritmo genético, como descrito em [51]. Este algoritmo atua em cargas controláveis (e.g., máquinas de lavar roupa, secar roupa, lavar loiça), deslocando o seu funcionamento para os intervalos de tempo que permitem maximizar o autoconsumo individual da habitação, ou o autoconsumo coletivo da comunidade, fazendo assim uso da flexibilidade energética para

estas duas otimizações. A metodologia de cálculo dos consumos e produções de cada edifício está descrita em [51]. Os valores de consumo e produção obtidos de [51] têm uma amostragem de 1 minuto, tendo sido estes tratados, efetuando a média de todos os valores registados durante 15 minutos, para possuírem um novo valor de amostragem (15 minutos), de forma a serem compatíveis com a plataforma desenvolvida.

São estudados seis cenários, descritos a seguir, onde são analisados os seguintes indicadores, que permitem analisar a qualidade dos cenários a nível económico e a carga de pico da rede de distribuição de energia elétrica:

- Faturação mensal de cada edifício considerando um contrato de fornecimento de energia com tarifário simples, com os valores de tarifas representados na Tabela 4.1, calculada com recurso à plataforma desenvolvida;
- Valor da potência de pico registado mensalmente no nó do transformador, sendo este o valor máximo da diferença entre a potência consumida e produzida em módulo por todos os edifícios.

Tabela 4.1 - Tarifas transitória de venda a clientes finais em baixa tensão normal (BTN) até 20,7 kVA [52].

Potência Contratada (kVA)	Tarifa fixa (€/dia)	Tarifa Simples (€/kWh)
5,75	0,2827	0,1523
6,9	0,3357	
10,35	0,4948	

Os cenários considerados são:

- **Cenário 1:** os 33 edifícios do bairro são habitações consumidoras, não possuem geração de energia renovável;
- **Cenário 2:** cada um dos 33 edifícios possui geração de energia de origem renovável, efetuando autoconsumo individual. O excedente de energia de cada edifício é injetado na rede sem qualquer receita para a edifício;
- **Cenário 3:** os 33 edifícios com geração de energia participam numa CER onde é praticado o autoconsumo coletivo. Os coeficientes de partilha de energia adotados são os coeficientes dinâmicos proporcionais ao consumo. O excedente energético da CER é cedido à rede, sem custos associados;
- **Cenário 4:** os 33 edifícios com geração de energia e otimização nos consumos a nível coletivo, onde a flexibilidade energética é utilizada para aumentar o autoconsumo coletivo da comunidade. Estes edifícios participam numa CER onde é praticado o autoconsumo coletivo. Os coeficientes de partilha de energia adotados são os coeficientes dinâmicos proporcionais ao consumo. O excedente energético da CER é cedido à rede, sem custos associados;
- **Cenário 5:** os 33 edifícios com geração de energia participam numa CER onde é praticado o autoconsumo individual com partilha do excedente de energia de

cada edifício pelos restantes membros. Os coeficientes de partilha de energia adotados são os coeficientes dinâmicos proporcionais ao consumo. O excedente energético da CER é cedido à rede, sem remuneração pelo mesmo, e sem custo associados a trocas energéticas dentro da comunidade;

- **Cenário 6:** os 33 edifícios com geração de energia e otimização do consumo a nível individual, onde a flexibilidade energética é utilizada para aumentar o autoconsumo individual de cada membro. Estes edifícios participam numa CER onde é praticado o autoconsumo individual com partilha do excedente de energia de cada edifício pelos restantes membros. Os coeficientes de partilha de energia adotados são os coeficientes dinâmicos proporcionais ao consumo. O excedente energético da CER é cedido à rede, sem custos associados e não é considerada a faturação dentro da comunidade.

4.2. Resultados

No presente subcapítulo são apresentados todos os resultados obtidos através da plataforma desenvolvida, referentes aos seis cenários de estudo.

4.2.1. Cenário 1

O cenário 1 é um cenário base, ilustrando a realidade antes do início da transição energética, que será utilizado como base de comparação com os restantes cenários. Como neste caso as habitações são unicamente consumidoras, o fluxo de potência ocorre unicamente num sentido, da rede para as habitações, estando as potências de pico registadas no nó do transformador em cada mês representadas na Figura 4.2. A potência de pico anual corresponde à máxima potência de pico registada no ano, cujo valor é 42,93 kW, alcançado no mês de junho.

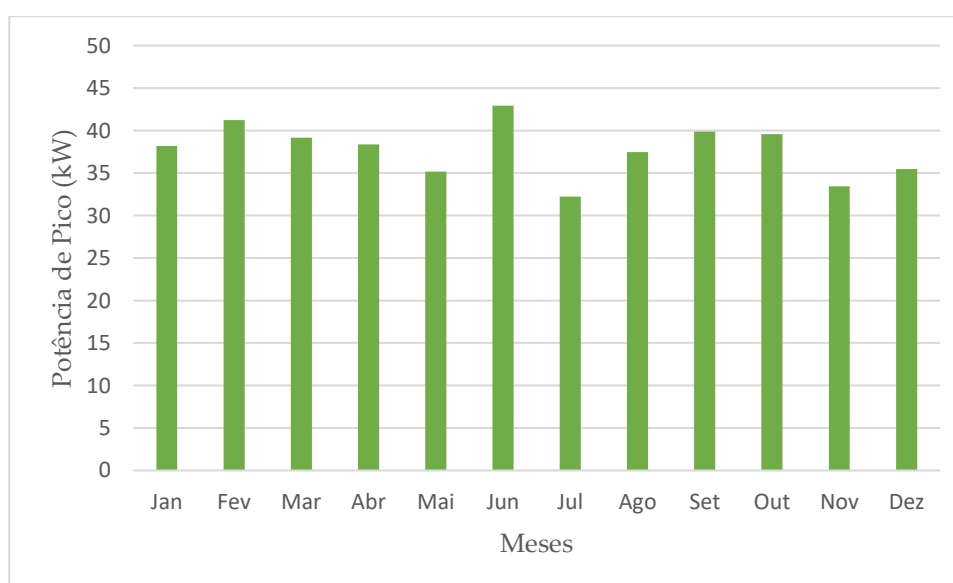


Figura 4.2 - Potências de pico em kW no nó do transformador, de todos os meses ao longo de um ano, para o cenário 1.

Através da plataforma desenvolvida foram registados os dados representados na Tabela 4.2 referentes ao custo anual de energia de cada edifício. O custo de energia é calculado tendo em conta o procedimento apresentado na secção 3.4, e considerando que todos os edifícios têm um contrato tarifário simples. Neste cenário não existe partilha de energia nem uma CER formada. Dessa forma, os parâmetros da plataforma correspondentes não foram preenchidos.

Tabela 4.2 - Custo anual de energia, em euros, de cada edifício correspondente ao cenário 1.

Custo Anual da Energia (€)		Custo Anual da Energia (€)	
Edifício 1	506,48	Edifício 18	503,73
Edifício 2	503,30	Edifício 19	626,11
Edifício 3	503,10	Edifício 20	707,51
Edifício 4	567,27	Edifício 21	639,18
Edifício 5	611,76	Edifício 22	620,85
Edifício 6	611,26	Edifício 23	661,22
Edifício 7	580,99	Edifício 24	632,78
Edifício 8	701,66	Edifício 25	700,34
Edifício 9	613,30	Edifício 26	585,69
Edifício 10	508,51	Edifício 27	661,13
Edifício 11	582,97	Edifício 28	723,07
Edifício 12	594,86	Edifício 29	625,53
Edifício 13	587,66	Edifício 30	634,89
Edifício 14	509,46	Edifício 31	692,76
Edifício 15	601,70	Edifício 32	633,26
Edifício 16	634,20	Edifício 33	712,25
Edifício 17	721,48	Total	20.300,27

4.2.2. Cenário 2

No cenário 2 todos os edifícios possuem geração de energia de origem renovável e efetuam autoconsumo individual, apresentando excedente de energia em alguns instantes, que é exportado para a rede de distribuição. Nesta situação o fluxo de energia na rede de distribuição aumenta e ocorre em dois sentidos, devido à elevada produção de energia que provoca excedentes de energia após o autoconsumo dos edifícios, provocando um aumento dos valores de potência de pico registada ao longo do ano, estes valores estão representados na Figura 4.3. A potência de pico anual corresponde a 57,06 kW, um valor superior ao registado no cenário 1.

Os valores do custo anual de energia de cada edifício, apresentados na Tabela 4.3, foram obtidos através da plataforma desenvolvida tendo em consideração que não existe partilha de energia entre os edifícios (coeficientes de partilha iguais a zero), a energia injetada na

rede não é remunerada (tarifa de venda de energia igual a zero), não sendo obtidas receitas com a venda de energia, e por fim, para simular o autoconsumo individual é selecionado o tipo 4 de CER, mesmo sem existir uma CER formada.

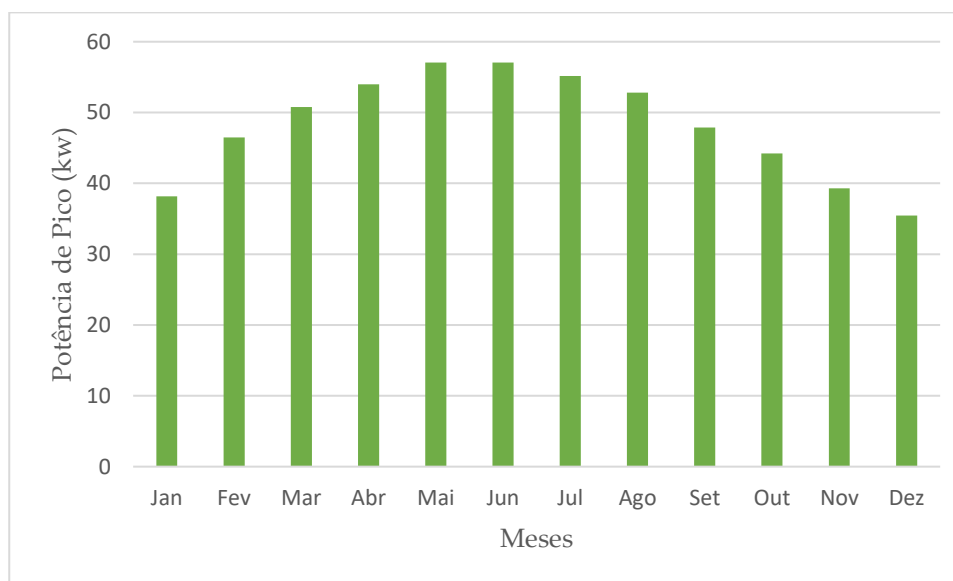


Figura 4.3 - Potências de pico em kW no nó do transformador, de todos os meses ao longo de um ano, para o cenário 2.

Tabela 4.3 - Custo anual de energia, em euros, de cada edifício correspondente ao cenário 2.

Custo Anual da Energia (€)		Custo Anual da Energia (€)	
Edifício 1	426,91	Edifício 18	427,56
Edifício 2	427,46	Edifício 19	507,56
Edifício 3	422,64	Edifício 20	550,11
Edifício 4	467,64	Edifício 21	508,78
Edifício 5	497,44	Edifício 22	503,25
Edifício 6	495,32	Edifício 23	529,18
Edifício 7	476,71	Edifício 24	509,88
Edifício 8	547,98	Edifício 25	545,11
Edifício 9	494,78	Edifício 26	476,95
Edifício 10	430,52	Edifício 27	529,18
Edifício 11	477,89	Edifício 28	560,96
Edifício 12	482,50	Edifício 29	503,49
Edifício 13	477,09	Edifício 30	515,01
Edifício 14	429,66	Edifício 31	540,99
Edifício 15	491,38	Edifício 32	511,09
Edifício 16	510,14	Edifício 33	552,91
Edifício 17	557,12	Total	16.385,22

No presente cenário e em comparação com o anterior, é observada uma poupança de 3.915,05€ no total anual do custo de energia. Esta poupança ocorre devido ao autoconsumo individual, pois cada edifício necessita de importar uma menor quantidade de energia da rede devido ao consumo da energia produzida no edifício.

4.2.3. Cenário 3

No cenário 3 os dados de consumo e de produção de cada edifício são os mesmos do cenário 2, como tal os valores registados de potência de pico são iguais aos registados no cenário anterior. Para simular o presente cenário na plataforma desenvolvida é selecionado o tipo 5 de CER, pois o autoconsumo é coletivo na comunidade formada pelos 33 edifícios. Os coeficientes de partilha de energia são dinâmicos e proporcionais ao consumo, e o excedente de energia dos membros da CER é exportado para a rede sem obtenção de receita. Os valores dos custos anuais de energia de todos os edifícios estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Custo anual de energia, em euros, de cada edifício correspondente ao cenário 3.

Custo Anual da Energia (€)		Custo Anual da Energia (€)	
Edifício 1	368,05	Edifício 18	375,24
Edifício 2	375,61	Edifício 19	451,09
Edifício 3	370,99	Edifício 20	491,48
Edifício 4	412,92	Edifício 21	453,53
Edifício 5	444,10	Edifício 22	447,30
Edifício 6	440,97	Edifício 23	476,04
Edifício 7	420,67	Edifício 24	455,83
Edifício 8	488,10	Edifício 25	487,30
Edifício 9	436,85	Edifício 26	420,16
Edifício 10	377,34	Edifício 27	475,39
Edifício 11	418,95	Edifício 28	503,01
Edifício 12	418,87	Edifício 29	447,72
Edifício 13	412,52	Edifício 30	459,89
Edifício 14	375,46	Edifício 31	480,91
Edifício 15	439,70	Edifício 32	455,09
Edifício 16	453,19	Edifício 33	492,01
Edifício 17	497,97	CER (Total)	14.524,27

Comparando este cenário com o anterior é possível verificar uma redução no custo total anual da energia importada da rede pela CER. Esta redução de custo ocorre uma vez que os

33 edifícios se encontram em comunidade a partilhar energia entre si, o que faz com que só ocorra importação de energia da rede após que toda a energia produzida na CER seja consumida. A CER só exporta energia para a rede quando todas as necessidades de consumos de todas as ICs são suprimidas, otimizado o consumo de energia produzida na comunidade. No cenário tal não se verifica, uma vez que os edifícios não formam uma CER. Ou seja, após o autoconsumo individual, a energia excedente produzida, por determinado edifício, é exportada para a rede, mesmo que outros edifícios vizinhos apresentem necessidades de consumo, fazendo com que a energia importada e exportada para a rede seja superior, comparado com o cenário 3.

Através da plataforma é possível visualizar os diagramas de carga da potência importada e exportada pela CER. As Figuras 4.4 e 4.5 mostram os diagramas de carga da potência importada e da potência exportada para o dia 22 de junho, dia do ano com mais horas de sol, e para o dia 22 de dezembro, dia com menos horas de sol, respetivamente.

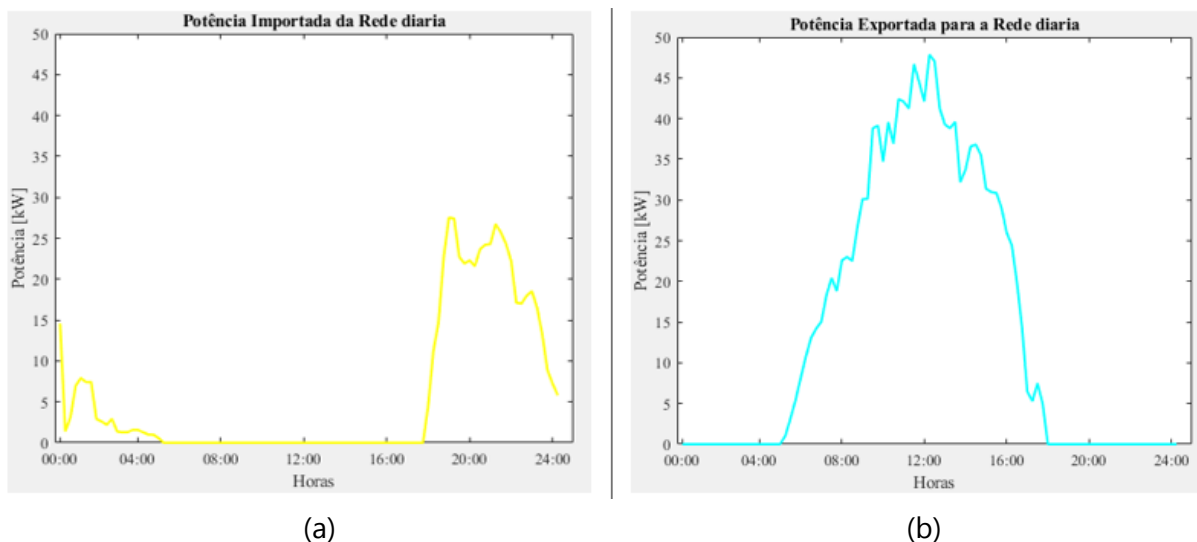


Figura 4.4 - Diagramas de carga do dia 22 de junho: Potência importada (a) potência exportada (b)

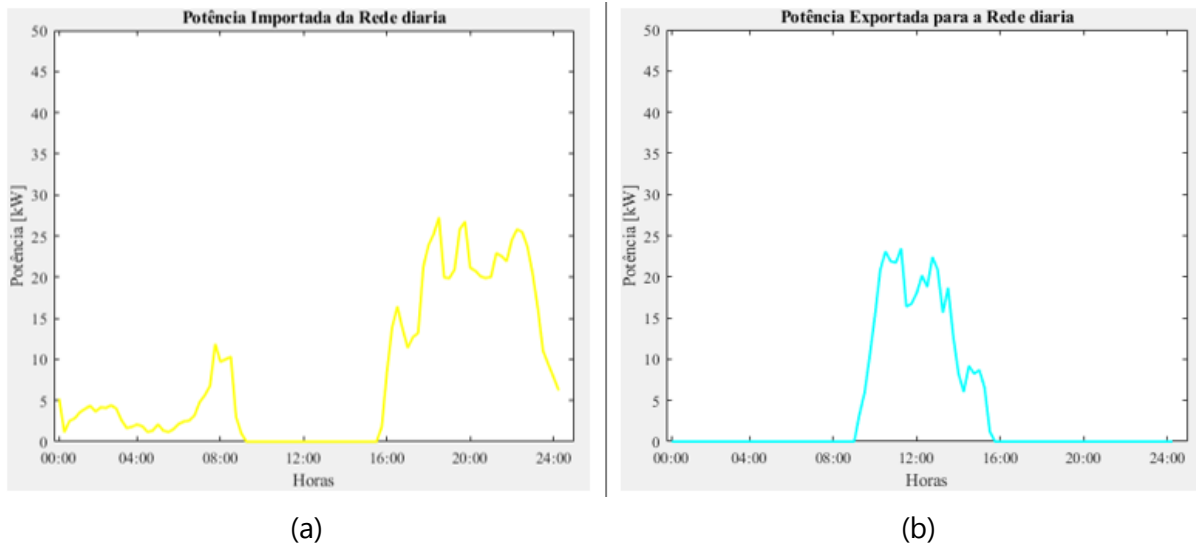


Figura 4.5 - Diagramas de carga do dia 22 de dezembro: Potência importada (a) potência exportada (b)

É possível verificar pela observação dos diagramas de carga que a CER não efetua importações e exportações no mesmo período de tempo, isto significa que apenas ocorre importação na CER quando toda a energia produzida foi consumida pela mesma, e só ocorre exportação quando todas as necessidades de consumo foram suprimidas. É importada uma maior quantidade de energia em dezembro, pois existe uma menor produção de energia através dos sistemas fotovoltaicos dos edifícios. A exportação de energia ocorre nos períodos de tempo em que existe uma maior geração de energia, tendo o pico de exportação ao meio-dia sensivelmente.

4.2.4. Cenário 4

No presente cenário os edifícios sofrem uma otimização no seu consumo através de cargas controláveis. A otimização é feita a nível coletivo da CER de forma que as cargas de todos os edifícios sejam deslocadas tendo em conta a produção de toda a CER, ou seja, o consumo da CER aumenta de uma forma distribuída no período de maior geração de energia, e nos períodos sem geração o consumo diminui conseqüentemente, como é possível observar na Figura 4.6, que apresenta o diagrama de carga do consumo total da CER correspondente ao cenário 2 e o diagrama de carga do consumo correspondente ao cenário 4 obtidos através da plataforma desenvolvida.

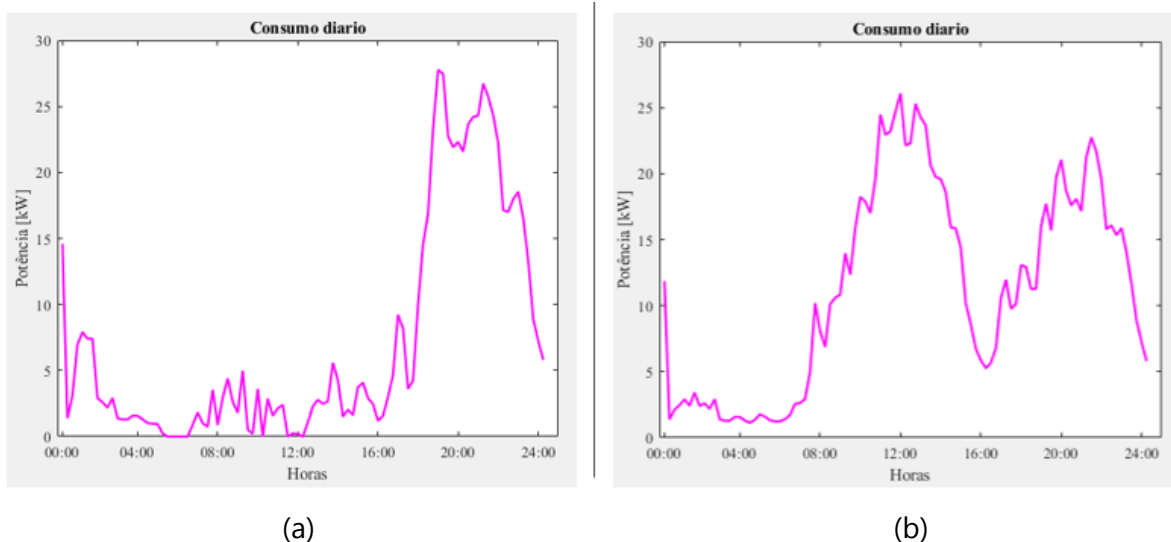


Figura 4.6 - Diagramas de carga do consumo total da CER do dia 22 de junho: cenário 2 (a) e cenário 4 (b)

Com a otimização dos consumos dos edifícios, no presente cenário, surge uma alteração dos valores de potência de pico no nó do transformador. Os valores registados estão representados na Figura 4.7, onde a potência de pico anual corresponde a 51,56 kW, um valor inferior ao registado nos cenários 2 e 3. Ou seja, este cenário do ponto de vista da rede é mais vantajoso que os anteriores.

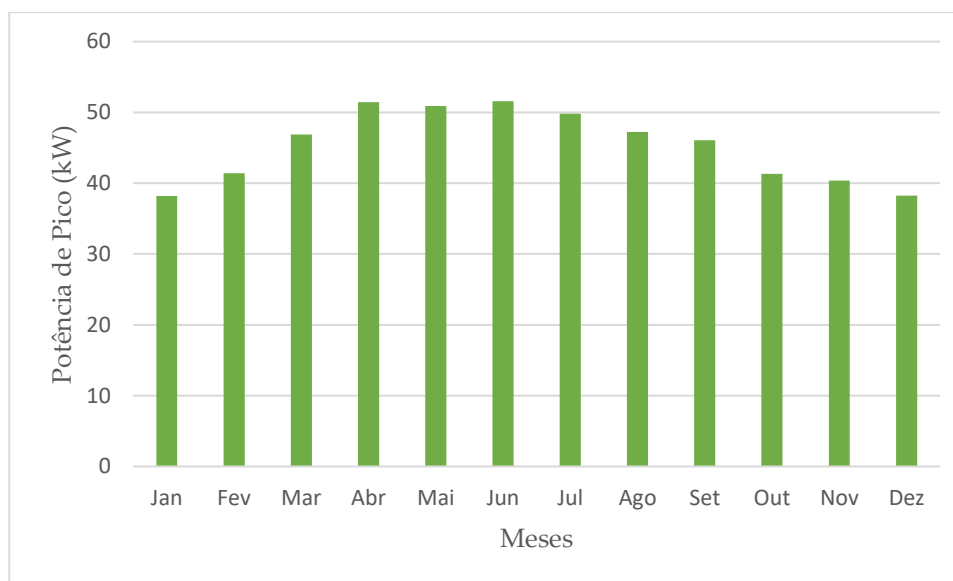


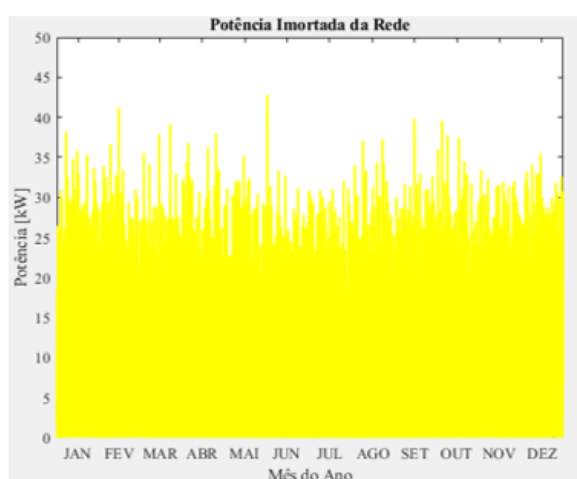
Figura 4.7 - Potências de pico em kW no nó do transformador, de todos os meses ao longo de um ano, para o cenário 4.

Para simular o presente cenário na plataforma desenvolvida, à semelhança do cenário 3, é seleccionado o tipo 5 de CER, os coeficientes de partilha de energia são dinâmicos e proporcionais ao consumo e o excedente de energia da CER é cedido à rede. Os valores dos custos anuais de energia de todos os edifícios estão representados na Tabela 4.5.

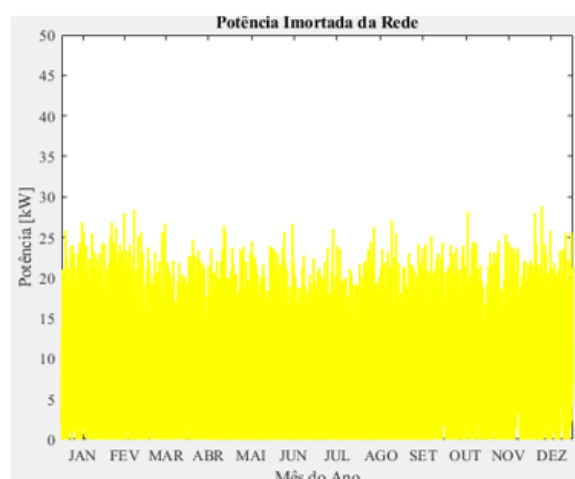
Tabela 4.5 - Custo anual de energia, em euros, de cada edifício correspondente ao cenário 4.

Custo Anual da Energia (€)		Custo Anual da Energia (€)	
Edifício 1	316,66	Edifício 18	318,36
Edifício 2	319,16	Edifício 19	396,07
Edifício 3	319,24	Edifício 20	435,95
Edifício 4	357,73	Edifício 21	394,81
Edifício 5	384,90	Edifício 22	390,65
Edifício 6	386,44	Edifício 23	414,17
Edifício 7	365,77	Edifício 24	399,44
Edifício 8	431,23	Edifício 25	428,37
Edifício 9	387,09	Edifício 26	368,32
Edifício 10	322,20	Edifício 27	410,39
Edifício 11	365,03	Edifício 28	440,62
Edifício 12	369,69	Edifício 29	392,93
Edifício 13	364,92	Edifício 30	396,89
Edifício 14	322,22	Edifício 31	424,51
Edifício 15	384,06	Edifício 32	397,95
Edifício 16	398,45	Edifício 33	436,43
Edifício 17	433,62	CER (Total)	12.674,28

O custo total anual da energia registado no presente cenário é mais reduzido que o registado anteriormente, como tal a energia importada pela CER no cenário 4 é inferior à importada nos restantes cenários, devido à otimização do consumo nos edifícios, tal como é possível observar através dos diagramas de cargas representados na Figura 4.8 obtidos através da plataforma desenvolvida.



(a)



(b)

Figura 4.8 - Diagramas de carga anuais correspondentes à potência importada pela CER: cenário 3 (a) e cenário 4 (b)

4.2.5. Cenário 5

No cenário 5 os dados de consumo e de produção de cada edifício são os mesmo do cenário 2, como tal os valores registados de potência de pico são iguais aos registados no cenário 2. Para simular o presente cenário na plataforma desenvolvida é selecionado o tipo 4 de CER, pois na comunidade formada pelos 33 edifícios existe a prioridade no autoconsumo individual, sendo o excedente de energia partilhado pelos membros da CER que apresentam necessidade de consumo. Os coeficientes de partilha de energia são dinâmicos e proporcionais ao consumo e a sua soma é igual a zero quando não existem necessidades de consumo na CER, após autoconsumo individual, como representado na Figura 4.9, sendo o excedente de energia exportado para a rede sem custos associados. Os valores dos custos anuais de energia de todos os edifícios sem faturação da energia dentro da CER estão representados na Tabela 4.6.

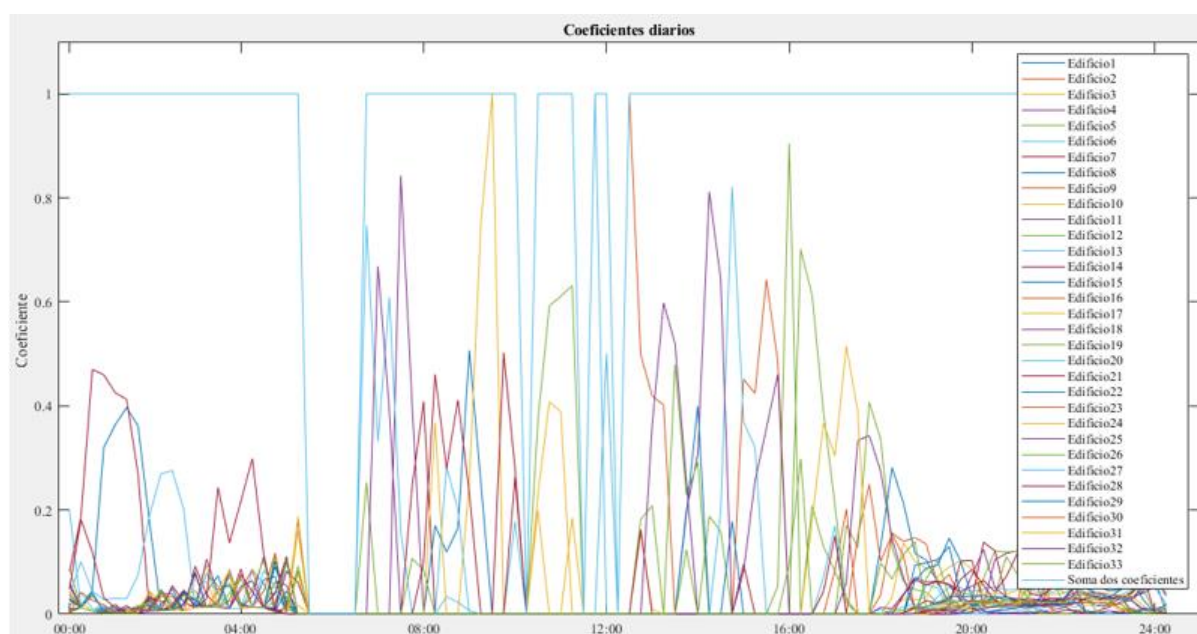


Figura 4.9 - Coeficientes dinâmicos correspondentes ao dia 22 de junho, para o cenário 5.

Tabela 4.6 - Custo anual de energia, em euros, de cada edifício correspondente ao cenário 5.

	Custo Anual da Energia (€)		Custo Anual da Energia (€)
Edifício 1	368,67	Edifício 18	375,77
Edifício 2	376,44	Edifício 19	450,90
Edifício 3	371,65	Edifício 20	491,07
Edifício 4	413,00	Edifício 21	453,02
Edifício 5	443,87	Edifício 22	447,28
Edifício 6	440,35	Edifício 23	475,90
Edifício 7	421,18	Edifício 24	455,21
Edifício 8	488,02	Edifício 25	487,02
Edifício 9	436,52	Edifício 26	420,66
Edifício 10	377,65	Edifício 27	475,49
Edifício 11	419,82	Edifício 28	502,40
Edifício 12	419,05	Edifício 29	447,46
Edifício 13	412,82	Edifício 30	460,26
Edifício 14	375,71	Edifício 31	480,17
Edifício 15	439,69	Edifício 32	454,65
Edifício 16	452,82	Edifício 33	492,03
Edifício 17	497,70	CER (Total)	14.524,27

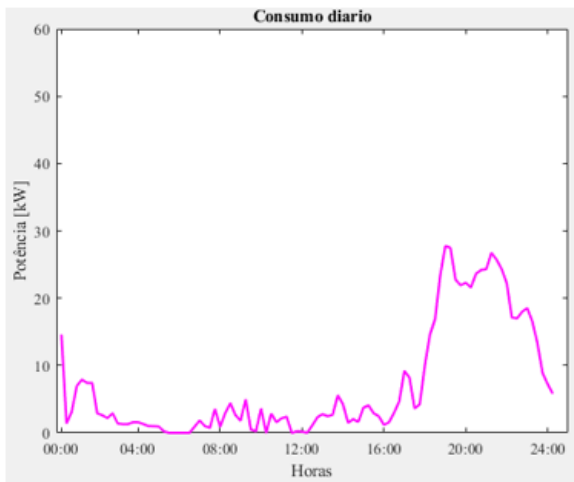
O custo anual de energia total da CER é igual ao cenário 3, isto significa que a energia importada e exportada pela CER para a rede elétrica é a mesma nos dois cenários, apenas com a variante de distribuição de energia de comunidade. Ou seja, a nível da CER os dois cenários trazem os mesmos benefícios, no entanto, como a distribuição da energia na comunidade é diferentes nos dois cenários, existem membros que beneficiam com o cenário 3 (edifícios com elevado consumo e baixa produção) e outros com o cenário 5. A diferença de custos anuais de energia entre os dois cenários, para cada edifício, está representada na Tabela 4.7. A vermelhos estão assinalados os edifícios que beneficiam com o cenário 3 e a verde os que beneficiam com o cenário 5. É possível verificar que a diferença dos custos anuais é na ordem dos centimos, sendo portanto, uma diferença bastante reduzida, quando comparada com o custo anual de energia de cada edifício.

Tabela 4.7 - Diferença de custos anuais de energia entre o cenário 3 e o cenário 5, em euros.

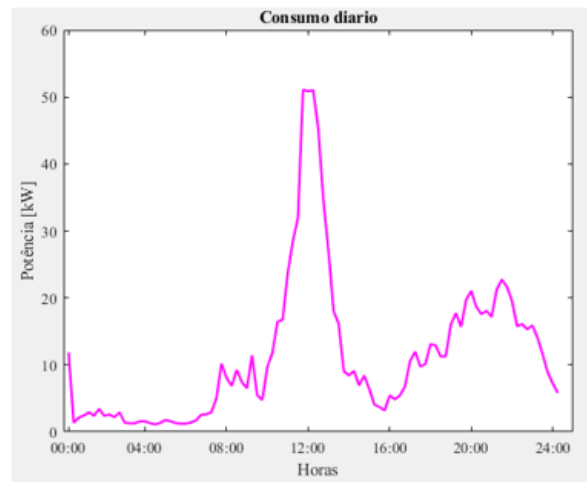
Custo Cenário 3 - Cenário 5 (€)		Custo Cenário 3 - Cenário 5 (€)	
Edifício 1	-0,62	Edifício 18	-0,53
Edifício 2	-0,84	Edifício 19	0,19
Edifício 3	-0,66	Edifício 20	0,41
Edifício 4	-0,08	Edifício 21	0,50
Edifício 5	0,23	Edifício 22	0,02
Edifício 6	0,62	Edifício 23	0,14
Edifício 7	-0,51	Edifício 24	0,62
Edifício 8	0,08	Edifício 25	0,28
Edifício 9	0,33	Edifício 26	-0,50
Edifício 10	-0,31	Edifício 27	-0,10
Edifício 11	-0,87	Edifício 28	0,61
Edifício 12	-0,17	Edifício 29	0,26
Edifício 13	-0,30	Edifício 30	-0,37
Edifício 14	-0,24	Edifício 31	0,73
Edifício 15	0,01	Edifício 32	0,44
Edifício 16	0,37	Edifício 33	-0,02
Edifício 17	0,27	CER (Total)	0

4.2.6. Cenário 6

No presente cenário os edifícios sofrem uma otimização no seu consumo através de cargas controláveis. A otimização do consumo de cada edifício é feita a nível individual, deslocando as cargas para o período de maior geração do edifício. Como tal surge um pico de consumo ao meio-dia e uma redução ao fim do dia, como é possível observar pelos diagramas de carga da Figura 4.10. Este pico de consumo é refletido nos valores obtidos da potência de pico no nó do transformador representados na Figura 4.11, onde a potência de pico anual corresponde a 54,80 kW, sendo um valor superior ao obtido no cenário 4 onde ocorre também otimização do consumo dos edifícios, mas a nível coletivo.



(a)



(b)

Figura 4.10 - Diagramas de carga do consumo total da CER do dia 22 de junho: cenário 2 (a) e cenário 6 (b)

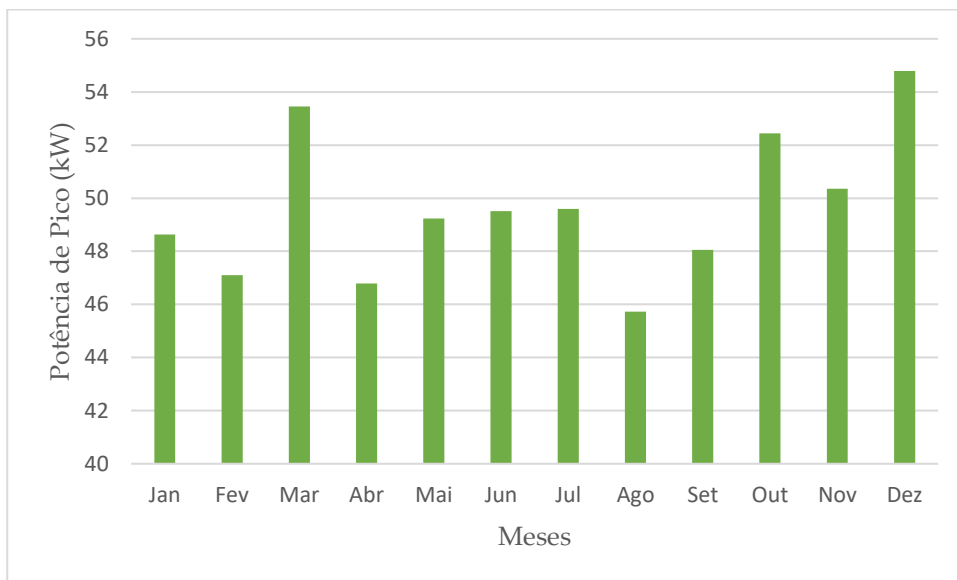


Figura 4.11 - Potências de pico em kW no nó do transformador, de todos os meses ao longo de um ano, para o cenário 6.

A plataforma desenvolvida foi programada de igual forma ao cenário 5 para obtenção dos valores dos custos anuais de energia para cada edifício representados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Custo anual de energia, em euros, de cada edifício correspondente ao cenário 6.

Custo Anual da Energia (€)		Custo Anual da Energia (€)	
Edifício 1	334,09	Edifício 18	337,22
Edifício 2	337,00	Edifício 19	407,44
Edifício 3	336,63	Edifício 20	445,28
Edifício 4	372,94	Edifício 21	406,77
Edifício 5	398,82	Edifício 22	403,15
Edifício 6	397,93	Edifício 23	427,16
Edifício 7	379,24	Edifício 24	412,45
Edifício 8	442,24	Edifício 25	439,47
Edifício 9	399,66	Edifício 26	382,95
Edifício 10	342,01	Edifício 27	426,69
Edifício 11	380,85	Edifício 28	449,26
Edifício 12	385,13	Edifício 29	403,13
Edifício 13	378,96	Edifício 30	409,76
Edifício 14	342,35	Edifício 31	434,76
Edifício 15	397,80	Edifício 32	410,83
Edifício 16	412,51	Edifício 33	448,74
Edifício 17	442,83	CER (Total)	13.126,06

O valor do custo total anual da energia é inferior aos cenários que não apresentam otimização no consumo dos edifícios, mas é superior ao cenário 4 que apresenta otimização. Isto acontece porque o pico de consumo provocado pela otimização do presente cenário é superior à geração, como tal a CER necessita de importar energia, ao contrário do que se verifica no cenário 4 em alguns instantes, como é possível averiguar pela observação da Figura 4.12. Este fenómeno é mais acentuado nos meses de inverno, pois a geração de energia é menor.

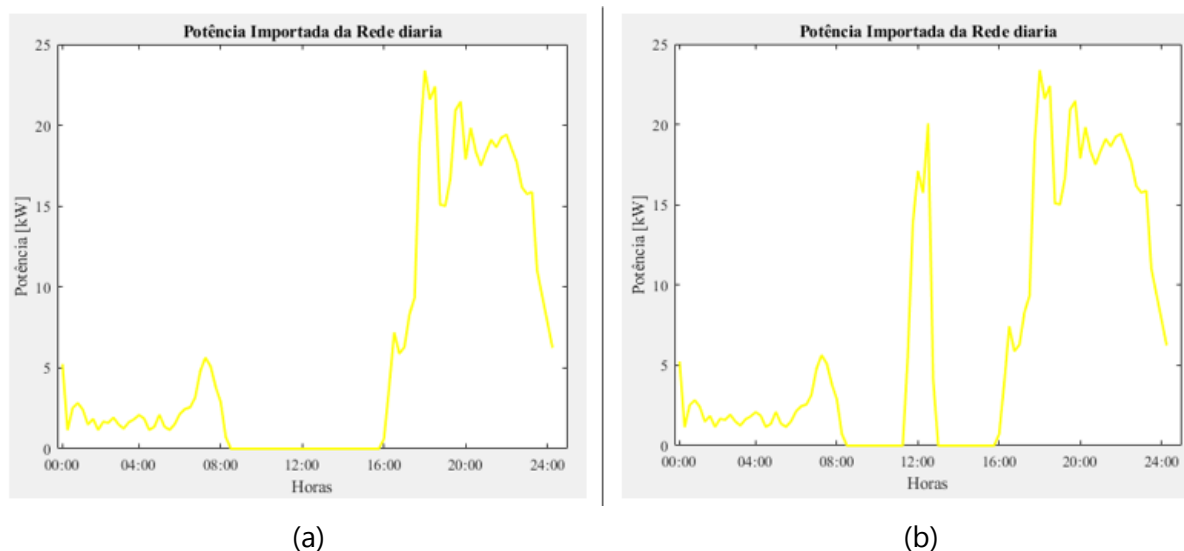


Figura 4.12 - Diagramas de carga da potência total importada pela CER no dia 22 de dezembro: cenário 4 (a) e cenário 6 (b)

4.3. Discussão

No presente subcapítulo é feita a discussão e comparação de todos os resultados obtidos nos seis cenários considerados. Através da Figura 1.13, e em forma de resumo, é possível observar as potências de pico registadas no nó do transformador ao longo de um ano. Na Tabela 4.9 estão registadas as potências de pico anuais de cada cenário. É importante relembrar que os valores obtidos para os cenários 2, 3 e 5 são os mesmos, pois os valores de consumo e de produção dos edifícios são iguais.

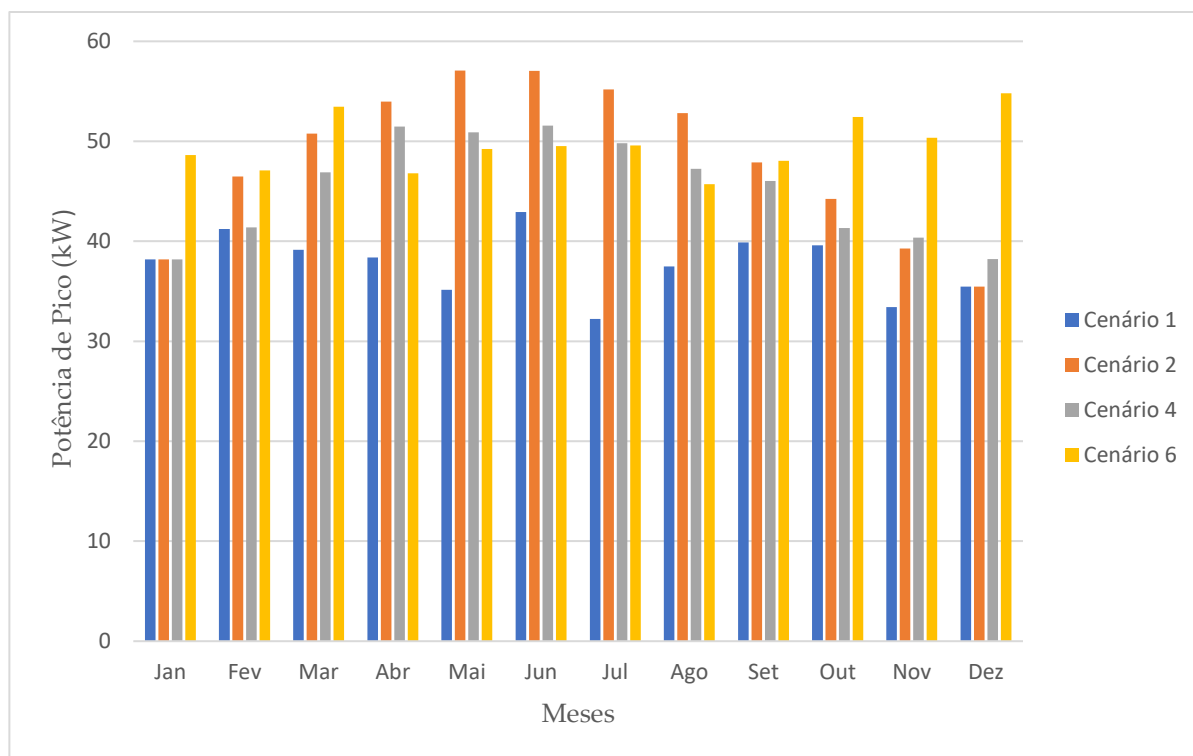


Figura 4.13 - Potências de pico em kW registadas ao longo de um ano em todos os cenários de estudo.

Tabela 4.9 - Potências de pico em kW anuais de todos os cenários em estudo.

	Cenário 1	Cenário 2, 3 e 5	Cenário 4	Cenário 6
Potência de Pico Anual (kW)	42,93	57,06	51,56	54,8

Pela observação dos dados acima é possível concluir que o cenário que apresenta um menor valor de potência de pico ao longo do ano é o cenário 1, no entanto este cenário não é o mais interessante para o estudo realizado, uma vez que os edifícios não possuem geração de energia.

Observando agora os resultados de potências de pico dos cenários com geração de energia, é possível verificar um aumento do seu valor devido à injeção de energia na rede. O cenário 2 apresenta o valor mais elevado de potência de pico anual devido aos meses de

verão, onde existe uma maior geração de energia, o comportamento do valor da potência de pico é proporcional à geração de energia elétrica nos edifícios. O cenário 4, com exceção do cenário 1, é o cenário que apresenta um menor valor de potência de pico registada anualmente, sendo o comportamento do valor da potência de pico proporcional à geração de energia, mas de forma menos acentuada que no cenário 2. No cenário 6, o valor da potência de pico tem um comportamento inverso ao máximo da geração de energia, uma vez que são registados valores de potência superiores nos meses de inverno, em comparação aos meses de verão. Isto deve-se à deslocação de uma grande quantidade de cargas de consumo para o período de maior geração de energia, consequência da otimização individual do consumo nos edifícios, criando um pico de consumo superior à geração, principalmente nos meses de inverno.

Posto tudo isto, é possível concluir que o cenário com geração de energia que mais beneficia a rede elétrica é o cenário 4, onde a otimização dos consumos é feita em comunidade, permitindo uma diminuição da potência de pico anual e na maioria dos meses, à exceção do mês de novembro, dezembro e janeiro, comparativamente ao cenário 2.

Em relação à análise dos cenários do ponto de vista económico, para o consumidor, é possível observar na Tabela 4.10 os custos anuais totais de energia dos 33 edifícios.

Tabela 4.10 - Custos totais anuais da energia para os cenários do caso de estudo.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Custo total anual da energia (€)	20.300,27	16.385,22	14.524,27	12.674,28	14.524,27	13.126,06

O cenário que apresenta o custo mais elevado de energia é o cenário 1, pois toda a energia consumida pelos edifícios é importada da rede, apresentando o custo máximo de consumo. Os restantes cenários, como possuem geração de energia, apresentam custos mais reduzidos, uma vez que a energia importada da rede é inferior, devido ao autoconsumo efetuado por cada edifício.

Observando os restantes cenários sem otimização de consumo é possível concluir que o cenário que apresenta o custo mais elevado é o cenário 2, evidenciando as vantagens da formação de uma CER e da partilha de energia entre os seus membros. Os cenários 3 e 5 apresentam custos do total anual de energia iguais, pois a quantidade de energia importada da rede pela CER é a mesma nos dois cenários. Assim a diferença encontrada entre ambos os cenários é a nível dos membros da comunidade, alguns tiram mais benefícios com o cenário 3 e outros com o cenário 5, como explicado no Capítulo 4.2.5.

Os cenários com otimização dos consumos são os que apresentam melhores resultados, especialmente o cenário 4, que é o que apresenta o custo mais reduzido de todos, existindo

assim um maior aproveitamento da energia gerada na CER. A subida do valor do custo do cenário 5 para o 6 foi explicada na apresentação dos resultados no cenário 6, Capítulo 4.2.6.

Posto tudo isto, é possível concluir que o cenário 4 é o cenário ótimo, pois é o cenário que apresenta resultados mais vantajosos tanto do ponto de vista da rede elétrica como do ponto de vista do consumidor e de comunidade. É de salientar que, se for alterado o método de cálculo dos coeficientes de partilha, o contrato tarifário dos edifícios, as tarifas de exportação de energia e de comercialização de energia dentro da comunidade, os resultados obtidos para os custos de energia seriam diferentes, assim como as conclusões retiradas no presente estudo referentes a este tópico.

Considerações Finais

O presente capítulo tem como objetivo fazer uma revisão geral do trabalho desenvolvido, focando nas contribuições originais da plataforma desenvolvida e dando a sugestão de trabalhos futuros a serem desenvolvidos a partir deste trabalho.

5.1. Revisão geral

O desenvolvimento do presente trabalho foi motivado pelo processo atual de transição energética e pelo lançamento do Decreto-Lei 162/2019 [8], que estabelece metas para a descarbonização dos processos industriais e possibilita a criação de novos agentes no mercado energético, nomeadamente as Comunidades de Energia Renovável (CER) e sua respetiva entidade gestora. Com a formação de CER e a possibilidade de gerir a energia partilhada dentro das mesmas, surge a plataforma desenvolvida como uma possível proposta para a gestão de comunidades.

A plataforma desenvolvida permite a gestão de diversas topologias de CER, onde a partilha de energia é feita com base em coeficientes de partilha de energia, que podem ser calculados de diversas maneiras. Permite também o cálculo da faturação de energia consumida, produzida e exportada de cada membro da comunidade, tendo em consideração o seu tipo de contrato de fornecimento de energia, tarifas de partilha de energia consideradas entre os membros da CER e a venda do excedente de energia da comunidade a uma entidade externa, com distribuição das receitas entre os membros da comunidade. Estas características tornam o produto desenvolvido adaptável e versátil a diferentes realidades de implantação de comunidades.

Com o estudo desenvolvido com base na plataforma proposta apresentado no capítulo 4, onde é simulada uma comunidade composta por 33 edifícios de edifício, é possível concluir que o cenário de estudo 4, onde é praticado o autoconsumo coletivo na CER e os edifícios possuem otimização coletiva dos consumos, apresenta as maiores vantagens tanto a nível económico para a comunidade como a nível da rede elétrica com os valores obtido de potên-

cia de pico no nó do transformador de ligação à comunidade. Para este estudo foram considerados coeficientes de partilha dinâmicos proporcionais ao consumo das ICs e que a energia excedente da CER é injetada na rede elétrica sem obtenção de receitas.

5.2. Contribuições Originais

O trabalho desenvolvido oferece várias contribuições originais para a comunidade científicas, tais como:

- O conceito da plataforma proposta para gestão de CER com adaptabilidade à topologia de comunidade e versatilidade para efetuar estudos para definição do valor de tarifas e coeficientes que trazem mais vantagens para os membros da mesma;
- A interface proposta para a plataforma, tanto a nível do menu disponível para a entidade gestora da comunidade como para o consumidor, podendo este último visualizar toda a informação relevante do seu edifício e da comunidade em que se insere;
- A categorização das topologias de CER mais frequentes;
- A faturação da energia dos edifícios em comunidade, tendo em consideração a topologia da mesma;
- Distribuição das receitas na CER e da partilha da energia entre os membros da comunidade;
- O estudo desenvolvido, onde é feita uma comparação de seis cenários possíveis tanto a nível económico para a CER como a nível da rede elétrica.

5.3. Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido pertence a uma área de investigação recente e em ascensão, como tal existem vários trabalhos futuros a realizar nesta área. Tendo como ponto de partida a plataforma desenvolvida é possível desenvolver os seguintes trabalhos:

- Melhoria das funcionalidades na plataforma proposta e inserção de novas funcionalidades;
- Adaptar a plataforma para funcionamento em formato de aplicação móvel ou website;
- Integração na plataforma de algoritmos de otimização de carga e descarga de dispositivos de armazenamento;
- Incluir nova topologias de comunidade e novos métodos de cálculo de coeficientes de partilha de energia na CER;
- Incluir as tarifas de acesso à rede na plataforma;
- Efetuar diversos estudos com base na plataforma desenvolvida, tais como:

- Estudo de comparação entre as diferentes metodologias de cálculo de coeficientes de partilha;
 - Estudo económico na comunidade com variação dos valores das tarifas de exportação de energia e de transação de energia na CER, de modo a encontrar a gama de valores que oferecem mais vantagens para a comunidade.
- Adaptar a plataforma para receber dados de consumo e produção em tempo real.

6. Bibliografia

- [1] Comissão Europeia, "Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho europeu, ao conselho, ao comité económico e social europeu, ao comité das regiões e ao banco europeu de investimento," *Um Planeta Limpo para Todos. Estratégia a longo prazo da UE para uma economia próspera, moderna, competitiva e com impacto neutro no clima*, p. 2, 28 Novembro 2018.
- [2] Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, "Acordo de Paris," em *Jornal Oficial da União Europeia*, 2015.
- [3] República Portuguesa, "National Energy Climate Plan 2021-2030 (Plano Nacional Integrado Energia e Clima - PNEC)," pp. 1-11, 2018.
- [4] Comissão Europeia, "Um quadro para as políticas de clima e de energia em 2030," *Livro Verde*, 2013.
- [5] European Commission, "Clean mobility: implementing the paris agreement," *Europe on the Move*, 2017.
- [6] European Commission, "Clean Energy For All Europeans," *Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee, the committee of the regions and the european investment bank*, 2016.
- [7] Comissão Europeia, "Comunicação da Comissão," *Pacto Ecológico Europeu*, 11 Dezembro 2019.
- [8] Presidência do Conselho de Ministros, "Decreto-Lei 162/2019," pp. 45-62, Outubro 2019.

- [9] M. Ramires, "Conferencia Comunidades de Energia," em *I Conferencia Internacional de Comunidades de Energia*, Lisboa, 2019.
- [10] Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), "Energias Renováveis e Sustentabilidade, Comunidades de Energia," [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/comunidades-de-energia/>. [Acedido em 10 Janeiro 2021].
- [11] Comunidades de Energia, "I Conferência Internacional Comunidades de Energia," [Online]. Available: <https://www.comunidadesenergia.pt/primeira-conferencia-internacional-comunidades-de-energia/>. [Acedido em 16 Janeiro 2021].
- [12] Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), "Energias Renováveis e Distentabilidade, Comunidades de Energia, Comunidades de Energia Renovável em Portugal," [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/comunidades-de-energia/comunidades-de-energia-renovavel-em-portugal/>. [Acedido em 17 Janeiro 2021].
- [13] Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), "Energias Renováveis e Sustentabilidade, Comunidades de Energia, O que é uma comunidade de energia?," [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/comunidades-de-energia/o-que-e-uma-comunidade-de-energia/>. [Acedido em 16 Janeiro 2021].
- [14] Parlamento Europeu, "Diretiva (UE) 2018/2001 do parlamento europeu e do conselho," *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 82-209, 11 dezembro 2018.
- [15] Parlamento Europeu, "Diretiva (UE) 2019/944 do parlamento europeu e do conselho," *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 125-199, 5 junho 2019.
- [16] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, "Regulamento n.º 373/2021," *Aprova o Regulamento do Auto consumo de Energia Elétrica e revoga o Regulamento n.º 266/2020, de 20 de março*, pp. 85-110, 5 maio 2021.

- [17] S. J. Klein e S. Coffey, "Building a sustainable energy future, one community at a time," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 60, pp. 867-880, 2016. DOI: [10.1016/j.rser.2016.01.129](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.129)
- [18] Delab - Energy Efficiency and Green Power, "Comunidades de Energias Renovaveis CER," [Online]. Available: <https://delab.pt/servicos/energias-renovaveis/comunidades-energia-renovavel/>. [Acedido em 8 Fevereiro 2021].
- [19] B. Huybrechts e S. Mertens, "The relevance of the cooperative model in the field of renewable energy," *Annals of Public and Cooperative Economics*, Vol 85, issue 2, pp. 193-212, Junho 2014. DOI: [10.1111/apce.12038](https://doi.org/10.1111/apce.12038)
- [20] Ö. Yildiz, "Financing renewable energy infrastructures via financial citizen participation: The case of Germany," *Renewable Energy*, Vol 68, issue C, pp. 677-685, 2014. DOI: [10.1016/j.renene.2014.02.038](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.038)
- [21] P. Küller, N. Dorsch e A. Korsakas, "Energy Co-Operatives Business Models: Intermediate Result from eight Case Studies in southern Germany," *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 2015. DOI: [10.1109/IYCE.2015.7180782](https://doi.org/10.1109/IYCE.2015.7180782)
- [22] E. Viardot, "The role of cooperatives in overcoming the barriers to adoption of renewable energy," *Energy Policy*, Vol 63, pp. 756-764, Dezembro 2013.
- [23] G. Walker, "What are the barriers and incentives for community-owned means of energy production and use?," *Energy Policy*, Vol 36, issue 12, pp. 4401-4405, 2008.
- [24] T. Sousa, T. Soares, P. Pinson, F. Moret, T. Baroche e E. Sorin, "Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review," *Preprint submitted to Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 10 Janeiro 2019.
- [25] Sia Partners, "Peer-to-peer (P2P) energy : A threat or an opportunity for traditional suppliers?," 2020. [Online]. Available: <https://www.sia-partners.com/en/news-and-publications/from-our-experts/peer-peer-p2p-energy-threat-or-opportunity-traditional>. [Acedido em 2021 Janeiro 28].

- [26] Y. Parag e B. K. Sovacool, "Electricity market design for the prosumer era," *Nature Energy*, p. 16032, 21 Março 2016.
- [27] E. Sorin, L. Bobo e P. Pinson, "Consensus-based Approach to Peer-to-Peer Electricity Markets with Product Differentiation," *Appl Energy*, Abril 2018.
- [28] F. Moret e P. Pinson, "Energy Collectives: A Community and Fairness Based Approach to Future Electricity Markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 34, Issue 5, pp. 3994-4004, Fevereiro 2018.
- [29] C. Long, J. Wu, C. Zhang, M. Cheng e A. Al-Wakeel, "Feasibility of peer-to-peer energy trading in low voltage electrical distribution networks," *Energy Procedia*, Vol 105, p. 2227 – 2232, 2017. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.632](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.632)
- [30] T. Liu, X. Tan, B. Sun, Y. Wu, X. Guan e D. H. Tsang, "Energy Management of Cooperative Microgrids with P2P Energy Sharing in Distribution Networks," *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2015.
- [31] M. N. Akter, . M. A. Mahmud e M. T. Amanullah, "A Hierarchical Transactive Energy Management System for Microgrids," *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, julho 2016. DOI: [10.1109/PESGM.2016.7741099](https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741099)
- [32] M. N. Akter e M. A. Mahmud, "Analysis of Different Scenarios for Residential Energy Management under Existing Retail Market Structure," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT Asia)*, 2015. DOI: [10.1109/ISGT-Asia.2015.7387182](https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2015.7387182)
- [33] Y. Guo, . M. Pan, Y. Fang e P. P. Khargonekar, "Decentralized Coordination of Energy Utilization for Residential Households in the Smart Grid," *IEEE Transactions on smart grid*, VOL. 4, NO. 3, pp. 1341-1350, Setembro 2013.
- [34] T. Morstyn e . M. D. McCulloch, "Multi-Class Energy Management for Peer-to-Peer Energy Trading Driven by Prosumer Preferences," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018. DOI: [10.1109/TPWRS.2018.2834472](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2834472)

- [35] S. Nguyen, W. Peng, . P. Sokolowski, D. Alahakoon e X. Yu, "Optimizing rooftop photovoltaic distributed generation with battery storage for peer-to-peer energy trading," *Applied Energy, Vol 228*, pp. 2567-2580, 15 Outubro 2018. DOI: [10.1016/j.apenergy.2018.07.042](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.042)
- [36] A. Pouttu, J. Haapola, P. Ahokangas, Y. Xu, M. Kopsakangas-Savolainen, E. Porras, J. Matamoros e e. al., "P2P model for distributed energy trading, grid control and ICT for local smart grids.," In: 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)., pp. 1-6, 2017. DOI: [10.1109/EuCNC.2017.7980652](https://doi.org/10.1109/EuCNC.2017.7980652)
- [37] S. Zhou, . F. Zou, Z. Wu, . W. Gu, Q. Hong e C. Booth, "A smart community energy management scheme considering user dominated demand side response and P2P trading," *Electrical Power and Energy Systems, Vol 114*, p. 105378, 2020. DOI: [10.1016/j.ijepes.2019.105378](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105378)
- [38] W. Tushar, B. Chai, . C. Yuen, S. Huang, D. B. Smith, V. Poor e Z. Yang, "Energy Storage Sharing in Smart Grid: A Modified Auction Based Approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 24 Dezembro 2015. DOI: [10.1109/TSG.2015.2512267](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2512267)
- [39] E. Fernandez, M. Hossain, . K. Mahmud, M. S. H. Nizami e . M. Kashif, "A Bi-level optimization-based community energy management system for optimal energy sharing and trading among peers," *Journal of Cleaner Production, Vol 279*, p. 123254, 10 Janeiro 2021.
- [40] T. Tekelenburg, "LochemEnergie beacon ECCO," em *I Conferencia Internacional de Comuniades de Energia* , Lisboa, 2019.
- [41] VPS, "Gestão de Energia Mundial," [Online]. Available: <https://www.vps.energy/>. [Acedido em 11 Fevereiro 2021].
- [42] L. Klein, "Comunidades de energia renovável com Partilha de energia entre pares," em *I Conferência Internaciona de Comunidades de Energia Renovavel*, Lisboa, 2019.
- [43] Brooklyn Microgrid, "Brooklyn Microgrid," [Online]. Available: <https://www.brooklyn.energy/>. [Acedido em 27 Janeiro 2021].

- [44] T. Ahram, A. Sargolzaei, S. Sargolzaei, J. Daniels e B. Amaba, "Blockchain technology innovations," *2017 IEEE Technology & Engineering Management*, Junho 2017.
- [45] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini e C. Weinhardt, "Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid," *Appl. Energy*, vol.210, pp. 870-880, 2018. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.06.054](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054)
- [46] European Association for Storage of Energy (EASE), "ENGIE Peer2Peer (P2P) Energy Communities," 2018. [Online]. Available: <https://ease-storage.eu/news/engie-peer2peer-p2p-energy-communities/>. [Acedido em 28 Janeiro 2021].
- [47] D. Erivola, V. Medici, L. Nespoli, G. Corbellini e D. Strepparava, "Whitepaper 1.3," *Hive Power*, 16 Abril 2018.
- [48] S. Riveiro, "aicep Portugal Global, Tecnológica CSide vai lançar aplicação para partilha de energia," 14 Janeiro 2020. [Online]. Available: <http://portugalglobal.pt/PT/PortugalNews/Paginas/NewDetail.aspx?newId=%7BBA15B4AF-A0F0-483F-83A1-CF320989D4F4%7D>. [Acedido em 30 Janeiro 2021].
- [49] C. Zhang, J. Wu, C. Long e M. Cheng, "Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects," *Energy Procedia*, Vol 105, p. 2563 – 2568, 2017. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.737](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.737)
- [50] Intersoft Consulting, "General Data Protection Regulation (GDPR)," [Online]. Available: <https://gdpr-info.eu/>. [Acedido em 22 novembro 2021].
- [51] R. Lopes, "Extending nearly Zero-Energy Buildings Load Matching Improvement to Community-Level," *Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores*, pp. 57-71, Dezembro 2017.
- [52] SU Eletricidade, "Tarifas baixa tensão normal," [Online]. Available: <https://sueletricidade.pt/pt-pt/page/601/tarifas-baixa-tensao-normal>. [Acedido em 07 Outubro 2021].



2021

Ana Rita Grilo Godinho

Desenvolvimento de plataforma para gestão de Comunidades de
Energia Renovável