

ESTRUTURA DE INTERNET DAS COISAS PARA A PARTICIPAÇÃO ATIVA E SEGURA DOS CONSUMIDORES NA COMUNIDADE DE ENERGIA

RÚBEN DIOGO MACEDO BARRETO

julho de 2023

ESTRUTURA DE INTERNET DAS COISAS PARA A PARTICIPAÇÃO ATIVA E SEGURA DOS CONSUMIDORES NA COMUNIDADE DE ENERGIA

Rúben Diogo Macedo Barreto



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2022/2023

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
TEDSEE - Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de
Energia

Candidato: Rúben Diogo Macedo Barreto Nº 1160552, 1160552@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Doutora Zita Vale, zav@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Doutor Luís Gomes; lfg@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2022/2023

Agradecimentos

Não posso deixar de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Zita Vale, e ao meu coorientador, Doutor Luis Gomes, pela oportunidade que me deram e pela disponibilidade demonstrada durante a execução desta dissertação. Agradeço ainda ao Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD) que me possibilitou os meios para a execução da dissertação.

Resumo

Desde o Acordo de Paris, diversas estratégias e metas climáticas ambiciosas foram estabelecidas a nível mundial e europeu, de forma a cumprir o objetivo de longo prazo da neutralidade carbónica. Tal, provocou uma pressão a nível global para que se fossem tomadas medidas que contribuíssem para a descarbonização em todos os setores. No entanto, verifica-se que as emissões de CO₂ continuam a aumentar, sendo o setor de energia um dos principais responsáveis.

Atualmente, no setor de energia, verifica-se a emergência das comunidades de energia e do uso de dispositivos de internet das coisas, visto que estes possibilitam novas oportunidades para integrar, monitorizar, controlar e otimizar o consumo de energia, possibilitando uma melhor eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de energia. Contudo, o problema da ausência de confiança digital em sistemas de energia, nomeadamente no que toca à partilha de dados e informação, pode comprometer a sinergia entre o consumidor e os sistemas de gestão de energia.

Esta dissertação tem como objetivo conceber, implementar, testar e validar um modelo de *demand response* que permita gerir eficazmente a participação dos membros de uma comunidade de energia, tendo em consideração a privacidade e a segurança dos dados dos utilizadores finais. Para tal, é considerado o uso de dispositivos de internet das coisas, tendo em conta a segurança e a privacidade dos respetivos dados dos consumidores finais. De uma forma geral, o modelo proposto é capaz de (i) identificar os períodos temporais em que seja benéfica a utilização de *demand response* para nivelar o consumo e a geração na comunidade de energia, com o auxílio de algoritmos de previsão, (ii) avaliar e classificar os candidatos, através de quatro métricas baseadas em algoritmos não supervisionados, para determinar quais serão selecionados a participar no evento, (iii) monitorizar, em tempo real, o respetivo evento e (iv) avaliar o impacto económico e ambiental que o evento causou na comunidade de energia. De modo a respeitar a privacidade e a equidade dos utilizadores finais, consideram-se três tipos de participação com diferentes níveis de privacidade e um mecanismo de equidade que é implementado durante a classificação dos candidatos.

De modo a testar e validar a aplicabilidade e a eficiência do modelo proposto, foram considerados cinco casos de estudo que permitem analisar o desempenho do modelo consoante as métricas aplicadas, os tipos de participação disponíveis, a falta de compromisso dos candidatos para o evento e o mecanismo de equidade. Os resultados obtidos demonstraram a capacidade do modelo proposto ser implementado em diferentes contextos, tendo a capacidade de melhorar a sustentabilidade da comunidade de energia.

Palavras-Chave

Comunidades de Energia, *Demand Response*, Internet das Coisas, Privacidade dos Dados, Utilizador Final.

Abstract

Since the Paris Agreement, several ambitious climate strategies and targets have been set at global and European levels in order to meet the long-term goal of carbon neutrality. This has led to global pressure for action to contribute to decarbonisation in all sectors. However, CO₂ emissions continue to increase, with the energy sector being one of the main contributors.

The energy sector is currently experiencing the emergence of energy communities and the use of internet of things devices, as these provide new opportunities to integrate, monitor, control and optimise energy consumption, enabling improved efficiency and sustainability of energy systems. However, the problem of the absence of digital trust in energy systems, namely regarding data and information sharing, can compromise the synergy between the consumer and the energy management systems.

This dissertation aims to conceive, implement, test and validate a demand response model that effectively manages the participation of the members of an energy community, considering the privacy and security of the end users' data. To this end, the use of internet of things devices is considered, considering the security and privacy of the respective end-user data. In general, the proposed model can (i) identify the time periods when it is beneficial to use demand response to level consumption and generation in the energy community, with the help of prediction algorithms, (ii) evaluate and classify the candidates through four metrics based on unsupervised algorithms, to determine which ones will be selected to participate in the event, (iii) monitor, in real-time, the respective event and (iv) evaluate the economic and environmental impact that the event caused in the energy community. In order to respect the privacy and fairness of end-users, three types of participation are considered with different levels of privacy and an equity mechanism is implemented during the ranking of candidates.

In order to test and validate the applicability and efficiency of the proposed model, five case studies were considered to analyse the model's performance according to the metrics applied, the types of participation available, the lack of commitment of the candidates to the event and the equity mechanism. The results obtained demonstrated the ability of the proposed model to be implemented in different contexts, having the ability to improve the sustainability of the energy community.

Keywords

Data Privacy, Demand Response, End-user, Energy Community, Internet of Things, Smart Home.

Índice

RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS E SIGLAS	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	3
1.3.CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS.....	3
1.4.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	6
2. ESTADO DE ARTE	7
2.1.REDES INTELIGENTES DE ENERGIA	8
2.2.COMUNIDADES DE ENERGIA	9
2.3.MICRORREDE	11
2.4.EDIFÍCIOS INTELIGENTES	13
2.4.1. <i>Edifícios Verdes</i>	13
2.4.2. <i>Edifícios de Energia Zero</i>	14
2.4.3. <i>Casas Inteligentes</i>	14
2.5.INTERNET DAS COISAS	15
2.5.1. <i>Camadas de Processamento</i>	16
2.5.2. <i>IoT em aplicações de Redes Inteligentes de Energia</i>	17
2.5.3. <i>IoT em Edifícios Inteligentes</i>	19
2.6.PARTICIPAÇÃO DOS UTILIZADORES FINAIS	19
2.6.1. <i>Gestão da Procura no Lado do Utilizador</i>	20
2.6.2. <i>Resposta dos Consumidores</i>	21
2.6.3. <i>Energia Transitiva</i>	24
2.7.SUSTENTABILIDADE, SEGURANÇA E EQUIDADE.....	27
2.8.CONCLUSÕES	30
3. SOLUÇÃO PROPOSTA.....	31
3.1.CRIAÇÃO DE UMA COMUNIDADE DE ENERGIA	31
3.1.1. <i>Arquitetura do AGC</i>	32
3.1.2. <i>Implementação do AGC</i>	34

3.2.MODELO DE DR PARA UMA COMUNIDADE DE ENERGIA	35
3.2.1. <i>Previsão dos Dados da Comunidade para o Dia Seguinte</i>	37
3.2.2. <i>Identificação de Oportunidades de Eventos de DR</i>	39
3.2.3. <i>Classificação dos Candidatos</i>	40
3.2.4. <i>Convidar os Participantes para o Evento de DR</i>	43
3.2.5. <i>Monitorização em tempo real do Evento de DR</i>	43
3.2.6. <i>Avaliação do Evento de DR e Distribuição de Benefícios</i>	44
3.3.TIPOS DE PARTICIPAÇÃO	46
3.4.CONCLUSÕES	47
4. CASOS DE ESTUDO	49
4.1.DESCRICÃO DA COMUNIDADE DE ENERGIA GERADA	50
4.2.CE 1 – IMPACTO DAS MÉTRICAS NO EVENTO DE DR.....	52
4.2.1. <i>Resultados</i>	52
4.2.2. <i>Discussão</i>	54
4.3.CE 2 – PARTICIPAÇÃO COM FLEXIBILIDADE AGREGADA.....	55
4.3.1. <i>Resultados</i>	56
4.3.2. <i>Discussão</i>	57
4.4.CE 3 – PARTICIPAÇÃO COM FLEXIBILIDADE DE DISPOSITIVOS DE IOT	58
4.4.1. <i>Resultados</i>	58
4.4.2. <i>Discussão</i>	59
4.5.CE 4 – PARTICIPAÇÃO COM FLEXIBILIDADE DE DESLOCAMENTO OU REDUÇÃO	60
4.5.1. <i>Resultados</i>	61
4.5.2. <i>Discussão</i>	62
4.6.CE 5 – EVENTO DE DR EM GRANDE ESCALA	63
4.6.1. <i>Resultados</i>	64
4.6.2. <i>Discussão</i>	66
4.7.CONCLUSÕES.....	67
5. CONCLUSÕES.....	71
5.1.CONCLUSÕES FINAIS	71
5.2.TRABALHO FUTURO	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Arquitetura Edge-Fog-Cloud. Adaptado de (Cao et al., 2019).</i>	16
<i>Figura 2. Integração da IoT em sistemas de SG (Pramudhita et al., 2018).</i>	18
<i>Figura 3. Técnicas de DSM (Lampropoulos et al., 2020).</i>	20
<i>Figura 4. Tipos de programas de DR. Adaptado de (Falsafi et al., 2014).</i>	22
<i>Figura 5. Exemplo de um sistema de TE. Adaptado de (Knight, 2016).</i>	25
<i>Figura 6. Matriz de gestão de energia adaptada de (Kok & Widergren, 2016).</i>	26
<i>Figura 7. Emissões Globais de CO₂, por sector, entre 2019 e 2022. Adaptado de (IEA, 2023).</i>	28
<i>Figura 8. Processo de criação de uma Comunidade de Energia.</i>	32
<i>Figura 9. Pseudocódigo do AGC.</i>	33
<i>Figura 10. Exemplo de uma Comunidade gerada pelo AGC.</i>	34
<i>Figura 11. Modelo geral de gestão de energia de uma comunidade de energia.</i>	36
<i>Figura 12. Arquitetura de implementação do projeto TIOCPs.</i>	37
<i>Figura 13. Exemplo de uma previsão dos dados da comunidade com os possíveis eventos de DR.</i>	38
<i>Figura 14. Exemplo da estrutura da rede neuronal convolucional.</i>	38
<i>Figura 15. Exemplo de uma métrica baseada no algoritmo de agrupamento K-means.</i>	41
<i>Figura 16. Perfis típicos de consumo e geração da comunidade.</i>	51
<i>Figura 17. Monitorização do evento de DR do cenário M_12, às 11:00 – CE 1.</i>	53
<i>Figura 18. Monitorização do evento de DR do cenário M_34, às 11:00 – CE 1.</i>	53
<i>Figura 19. Monitorização do evento de DR do cenário TdP₁₀₀, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 2.</i>	56
<i>Figura 20. Monitorização do evento de DR do cenário TdP₅₀, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 2.</i>	56
<i>Figura 21. Monitorização do evento de DR do cenário TdF₁₀₀, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 3.</i>	58
<i>Figura 22. Monitorização do evento de DR do cenário TdF₇₅, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 3.</i>	59
<i>Figura 23. Monitorização do evento de DR do cenário TdF₂₅, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 3.</i>	59
<i>Figura 24. Monitorização do evento de DR do cenário ME_D3, no dia 27 de Abril às 12:00 – CE 4.</i>	62
<i>Figura 25. Previsão do dia seguinte dos recursos da comunidade – CE 5.</i>	65
<i>Figura 26. Monitorização do evento de DR, às 00:00 – CE 5.</i>	66
<i>Figura 27. Balanço da energia da comunidade após o evento de DR, às 00:00 – CE 5.</i>	66

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1. Principais diferenças entre CER e CCE (Frieden et al., 2019).</i>	10
<i>Tabela 2. Diferentes tipos de participação.</i>	46
<i>Tabela 3. Diferentes casos de estudo considerados para testar e validar a solução proposta.</i>	49
<i>Tabela 4. Informação sobre os equipamentos considerados.</i>	50
<i>Tabela 5. Dados sobre os membros da comunidade de energia.</i>	51
<i>Tabela 6. Top-10 classificados para cada uma das combinações das métricas – CE 1.</i>	52
<i>Tabela 7. Resumo do eventos de DR para cada um dos casos – CE 1.</i>	54
<i>Tabela 8. Avaliação dos cenários considerados – CE 2.</i>	57
<i>Tabela 9. Avaliação dos cenários considerados – CE 3.</i>	59
<i>Tabela 10. Primeiros 15 candidatos classificados para cada evento de DR planeado – CE4.</i>	61
<i>Tabela 11. Avaliação dos 3 eventos de DR planeados – CE 4.</i>	62
<i>Tabela 12. Informação dos VEs considerados – CE 5.</i>	64
<i>Tabela 13. Primeiros 10 candidatos classificados – CE 5.</i>	65
<i>Tabela 14. Avaliação do evento de DR – CE 5.</i>	66
<i>Tabela 15. Comparação entre os CE considerados.</i>	68

Acrónimos e Siglas

AGC	– Algoritmo de Geração de Comunidades
BA	– Balanço Agregado
BaU	– <i>Business-as-Usual</i>
C_ID	– ID do Candidato
CCE	– Comunidade de Cidadãos para a Energia
CE	– Caso de Estudo
CER	– Comunidade de Energia Renovável
CNN	– Rede Neuronal Convolucional
DoR	– Deslocamento ou Redução
DR	– Resposta dos Consumidores
DR_D1	– Cenário sem o Mecanismo de Equidade no Dia 1
DR_D2	– Cenário sem o Mecanismo de Equidade no Dia 2
DR_D3	– Cenário sem o Mecanismo de Equidade no Dia 3
DSM	– Gestão da Procura no Lado do Utilizador
EpE	– Equipamento por Equipamento
FT	– Flexibilidade Total
GECAD	– Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento
I	– Independente
IoT	– Internet das Coisas

M_12	– Cenário com as Métricas 1 e 2
M_1234	– Cenário com Todas as Métricas
M_34	– Cenário com as Métricas 3 e 4
ME	– Mecanismo de Equidade
ME_D1	– Cenário com o Mecanismo de Equidade no Dia 1
ME_D2	– Cenário com o Mecanismo de Equidade no Dia 2
ME_D3	– Cenário com o Mecanismo de Equidade no Dia 3
MLL	– Máquina de Lavar Loiça
MLR	– Máquina de Lavar Roupa
MLSR	– Máquina de Lavar e Secar Roupa
MME	– Multiplicador do Mecanismo de Equidade
MSR	– Máquina de Secar Roupa
PF	– Pontuação Final
PM	– Pontuação Total das quatro Métricas
RETINA	– <i>REal-Time support Infrastructure and Energy management for Intelligent carbon-Neutral smArt cities</i>
RGPD	– Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados
S	– Sustentabilidade
SG	– Rede Inteligente de Energia
TdF	– Taxa de Flexibilidade
TdF₂₅	– Cenário com a Taxa de Flexibilidade a 25 %
TdF₅₀	– Cenário com a Taxa de Flexibilidade a 50 %

TdF₇₅	–	Cenário com a Taxa de Flexibilidade a 75 %
TdF₁₀₀	–	Cenário com a Taxa de Flexibilidade a 100 %
TdP	–	Taxa de Participação
TdP₂₅	–	Cenário com a Taxa de Participação a 25 %
TdP₅₀	–	Cenário com a Taxa de Participação a 50 %
TdP₇₅	–	Cenário com a Taxa de Participação a 75 %
TdP₁₀₀	–	Cenário com a Taxa de Participação a 100 %
TE	–	Energia Transitiva
TIoCPS	–	<i>Trustworthy and smart Communities of Cyber-Physical Systems</i>
VE	–	Veículos Elétrico

1. INTRODUÇÃO

Esta secção serve para revelar a contextualização onde o projeto se insere, tal como se destacam os objetivos de maior relevância que se pretendem atingir com este trabalho de dissertação. Da mesma forma, nesta secção também se demonstra as contribuições científicas efetuadas durante a elaboração deste trabalho de dissertação e as diferentes etapas impostas pelo projeto através da organização deste documento.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente, de modo a ir em conta com o objetivos de longo prazo estabelecido e implementado no Acordo de Paris, várias nações dão prioridade em reduzir as emissões de CO₂ (Ortega-Ruiz et al., 2022). Todavia, nos últimos anos pode-se verificar que as emissões de CO₂ globais têm vindo a aumentar em diferentes setores, sendo um dos principais responsáveis o setor da energia (IEA, 2023). Desta forma, de modo a cumprir as metas de redução de emissões de CO₂, é necessário tomar medidas preventivas.

No âmbito do setor de energia, uma tecnologia que permite contribuir para a redução de emissões de CO₂ e que tem vindo a ganhar proeminência nestes últimos anos, são as Redes Inteligentes de Energia (SG) (Faria et al., 2019). Estas, ao contrário das redes de energia convencionais, permitem a comunicação bidirecional e possibilitam o desenvolvimento e implementação de diversas soluções capazes de controlar os recursos energéticos, de forma mais eficiente e sustentável (Colak et al., 2020). Uma destas soluções fornecidas pela SG são as comunidades de energia, onde estas possibilitam que uma comunidade se torne sustentável e

descentralizada e permitem que os utilizadores finais consigam colaborar entre si e participem ativamente em modelos de gestão da energia (de São José et al., 2021).

Neste contexto, para que os utilizadores finais consigam participar devidamente nas comunidades de energia, é preciso considerar o conceito de Resposta dos Consumidores (DR)¹ (Honarmand et al., 2021). De uma forma geral, a DR representa as modificações dos padrões de consumo que os utilizadores finais efetuam em resposta às variações do preços da eletricidade ou a incentivos (US Department of Energy, 2006). Deste modo, é possível verificar que a consideração da DR é essencial no contexto das comunidades de energia, uma vez que permite, por um lado, empoderar os utilizadores finais nas comunidades de energia e, por outro lado, contribuir para a gestão eficiente dos recursos energéticos das comunidades de energia (Gjorgievski et al., 2021). Com a participação ativa em eventos/programas de DR, os utilizadores finais podem desempenhar um novo papel, capaz de contribuir significativamente para a descarbonização do setor de energia, culminando num futuro alimentado por energia limpa (Parrish et al., 2020).

Neste seguimento, um outro conceito que têm vindo a crescer significativamente nos últimos anos, é a Internet das Coisas² (IoT), especialmente no contexto dos dispositivos de IoT, devido à sua aplicabilidade, podendo ser usado em qualquer lugar e qualquer hora (Zaidan et al., 2018). Estes dispositivos, estando instalados nas casas dos utilizadores finais, são capazes de recolher, processar e retransmitir dados, por meio de um canal de comunicação, como também permitem controlar remotamente diversos equipamentos (Wurm et al., 2016). Desta forma, os dispositivos de IoT podem, de uma certa forma, participar diretamente em eventos de Energia Transitiva³ (TE) e de DR, possibilitando fornecer benefícios económicos e energéticos aos respetivos utilizadores finais (Hafeez et al., 2020; Q. Yang & Wang, 2020). Todavia, estes dispositivos de IoT podem pôr em risco a privacidade e a segurança dos dados dos utilizadores finais, sendo assim necessário considerar algumas restrições para proteger a propriedade dos respetivos dados (Hameed & Alomary, 2019). Assim, de modo a fazer com que os utilizadores finais se sintam seguros, é preciso cumprir o Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (RGPD) (UE 2016/679) (Parlamento Europeu e do Conselho, 2016).

Desta forma, a motivação desta dissertação surgiu do problema da ausência de confiança digital em sistemas de energia, nomeadamente na partilha de dados e informações. De modo a colmatar este problema, este trabalho de dissertação irá conceber, implementar, testar e validar um modelo de DR que permita gerir eficazmente a participação dos membros de uma comunidade de energia, considerando o uso de dispositivos de IoT e a segurança e a privacidade dos respetivos dados dos utilizadores finais.

¹ Do anglo-saxónico *demand response*.

² Do anglo-saxónico *internet of things*.

³ Do anglo-saxónico *transactive energy*.

É também importante realçar, que este trabalho de dissertação para além de considerar o RGPD, também considera a aplicação de outras diretivas, nomeadamente a Diretiva (EU) 2018/2001 (Parlamento Europeu e do Conselho, 2018) e a Diretiva (EU) 2019/944 (Parlamento Europeu e do Conselho, 2019), onde estas realçam, de uma certa forma, a importância das comunidades de energia.

1.2. OBJETIVOS

Este projeto visa conceber, implementar, testar e validar um modelo de DR que permita gerir eficazmente a participação dos membros de uma comunidade de energia, tendo em consideração a privacidade e a segurança dos dados dos utilizadores finais. Este objetivo foi dividido nos subobjetivos seguintes:

- **Objetivo 1:** Pesquisar o estado da arte, nomeadamente sobre edifícios inteligentes, comunidade de energia, TE, DR e arquiteturas de IoT;
- **Objetivo 2:** Desenvolver modelos de previsão de consumo, geração e flexibilidade da procura para identificar períodos temporais em que seja benéfica a utilização de DR para nivelar o consumo e a geração na comunidade de energia;
- **Objetivo 3:** Desenvolver um modelo de DR que utiliza métricas que refletem o comportamento dos membros da comunidade de energia, as quais são baseadas em algoritmos de aprendizagem não supervisionada;
- **Objetivo 4:** Definir e conceber vários tipos de participação dos membros da comunidade, considerando diferentes níveis de privacidade, para que os membros da comunidade possam ter várias opções para a sua participação;
- **Objetivo 5:** Desenvolver um mecanismo que promove a equidade nas oportunidades de participação dos membros da comunidade de energia na DR ao longo do tempo;
- **Objetivo 6:** Testar e validar os modelos concebidos e desenvolvidos no âmbito desta dissertação e mecanismos utilizando dados reais para a construção de caso de estudo e cenários.

1.3. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

O trabalho realizado para elaborar esta dissertação foi realizado em colaboração com o Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD). Esta dissertação contribuiu para dois projetos:

- *REal-Time support Infrastructure and Energy management for Intelligent carbon-Neutral smArt cities (RETINA⁴);*
- *Trustworthy and Smart Communities of Cyber-Physical Systems (TIOCPs⁵).*

No que diz respeito ao projeto RETINA, esta dissertação contribuiu para desenvolvimentos e respetivos entregáveis do projeto. No caso do projeto TIOCPs, este projeto serviu de contexto para a elaboração desta dissertação, onde diversas contribuições foram realizadas nomeadamente, a elaboração de artigos científicos de revista, artigos científicos e apresentações em conferência, capítulos de livro e entregáveis, como também na participação das revisões anuais do projeto TIOCPs, tendo a 1ª revisão decorrido online e a 2ª presencialmente no ISEP. De uma forma geral, o objetivo do projeto TIOCPs consiste em criar uma base técnica para um ecossistema e uma sociedade de informação mais inteligente, interoperável e sustentável dos sistemas ciberfísicos industriais. O TIOCPs é um projeto ITEA (18008 TIOCPs⁶), que, por sua vez, é um aglomerado de investigação e desenvolvimento da EUREKA⁷ focada na inovação de software e na digitalização da indústria. Este projeto é internacional onde quinze entidades de quatro países – Bélgica, Finlândia, Portugal e Turquia – cooperam entre si de modo a cumprir os objetivos propostos para o respetivo projeto.

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação deu origem a 11 publicações científicas, sendo 5 em revistas indexadas no SCIE (*Science Citation Index Expanded*) e 1 em revistas indexadas no ESCI (*Emerging Sources Citation Index*), 3 em conferências e 2 em capítulos de livro:

- **(Revista, IF: 5.2) Barreto, R., Faria, P., & Vale, Z. (2020).** Determination of the typical load profile of industry tasks using fuzzy C-Means. *Energy Reports*, 6(8), 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.094>. O autor da dissertação implementou e validou o modelo de agregação de perfis de consumo de tarefas industriais, assim como procedeu à execução do caso de estudo, escrita e apresentação do artigo. Este trabalho contribui para os trabalhos desenvolvidos nos Objetivos 3;
- **(Revista, IF: 5.2) Ramos, C., Barreto, R., Mota, B., Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2020).** Scheduling of a textile production line integrating PV generation using a genetic algorithm. *Energy Reports*, 6(8), 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.093>. O autor da dissertação implementou e validou o modelo de otimização de uma linha de produção têxtil, assim como procedeu à execução do caso de estudo, escrita e apresentação do artigo. Este trabalho contribui para os trabalhos desenvolvidos nos Objetivos 1, nomeadamente para a perceção dos perfis típicos de consumo e do uso de renováveis para criar ambientes sustentáveis;

⁴ <http://www.gecad.isep.ipp.pt/RETINA/>

⁵ <https://tiocps.pt/>

⁶ <https://itea4.org/project/tiocps.html>

⁷ <https://www.eurekanetwork.org>

- **(Revista, IF: 2.9)** Teixeira, N., **Barreto, R.**, Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2022). A Trustworthy Building Energy Management System to Enable Direct IoT Devices' Participation in Demand Response Programs. *Electronics*, 11(6), 897. <https://doi.org/10.3390/electronics11060897>. O autor da dissertação concebeu, implementou e validou o modelo de DR para comunidades de energia, considerando a privacidade dos dados dos dispositivos de IoT. Da mesma forma, o autor também procedeu à execução do caso de estudo e escrita do artigo. Este trabalho contribui para os trabalhos desenvolvidos nos Objetivos 2 e 3;
- **(Revista, IF: 3.2)** **Barreto, R.**, Gonçalves, C., Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2022). Evaluation Metrics to Assess the Most Suitable Energy Community End-Users to Participate in Demand Response. *Energies*, 15(7), 2380. <https://doi.org/10.3390/en15072380>. O autor da dissertação concebeu, implementou e validou o modelo de DR para comunidades de energia que considera a privacidade dos dados dos respetivos membros da comunidade. Da mesma forma, o autor também procedeu à execução do caso de estudo e escrita do artigo. Este trabalho contribui para os trabalhos desenvolvidos nos Objetivo 2 e 3;
- **(Revista, IF: 2.9)** **Barreto, R.**, Faria, P., & Vale, Z. (2022). Electric Mobility: An Overview of the Main Aspects Related to the Smart Grid. *Electronics*, 11(9), 1311. <https://doi.org/10.3390/electronics11091311>. O autor da dissertação investigou o estado de arte no contexto da mobilidade elétrica e das SGs, assim como procedeu à escrita do artigo de revisão. Este trabalho contribui para o trabalho desenvolvido no Objetivo 1;
- **(Revista, IF: 1.2)** Gonçalves, C., **Barreto, R.**, Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2022). Dataset of an energy community's generation and consumption with appliance allocation. *Data in Brief*, 45, 108590. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108590>. O autor da dissertação auxiliou no concebimento e desenvolvimento do modelo de criação de comunidades de energia. Este trabalho contribui para o trabalho desenvolvido no Objetivo 6, nomeadamente na criação de cenários de teste e validação;
- **(Conferência)** **Barreto, R.**, Faria, P., & Vale, Z. (2021). Demand Response Programs Management in an Energy Community with Diversity of Appliances. *E3S Web of Conferences*, 239, 00023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123900023>. O autor da dissertação concebeu, implementou e validou o modelo de DR para uma comunidade de energia. Da mesma forma, o autor procedeu à execução do caso de estudo e escrita do artigo. Este trabalho contribui para o trabalho desenvolvido no Objetivo 3;
- **(Conferência)** Gonçalves, C., **Barreto, R.**, Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2022). Energy Community Consumption and Generation Dataset with Appliance Allocation. *IFAC-PapersOnLine*, 55(9), 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.050>. O autor da dissertação auxiliou no concebimento e desenvolvimento do modelo de criação de comunidades de energia. Este trabalho contribui para o trabalho desenvolvido no Objetivo 6, nomeadamente na criação de cenários de teste e validação;

- **(Conferência) Barreto, R.,** Gomes, L. & Vale, Z. (2023). Demand Response-based Model for an Energy Community Considering Members and Electric Vehicles Participation. 23rd International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC23). O autor da dissertação concebeu, implementou e validou um modelo de DR para comunidades de energia, considerando a participação de veículos elétricos e edifícios da comunidade. Da mesma forma, o autor também procedeu à execução do caso de estudo, escrita e apresentação do artigo. Este trabalho foi apresentado na conferência, estando a decorrer o processo de publicação no *IEEEExplore*, e contribui para o trabalho desenvolvido nos Objetivos 2 e 3;
- **(Capítulo de livro) Barreto, R.,** Pinto, T., & Vale, Z. (2022). Socio-demographic, Economic, and Behavioral Analysis of Electric Vehicles. In Intelligent Data Mining and Analysis in Power and Energy Systems (pp. 187–200). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119834052.ch9>. O autor da dissertação investigou o estado de arte sobre a integração dos veículo elétricos nas SGs, assim como procedeu à execução do caso de estudo e escrita do artigo. Este trabalho contribui para o trabalho desenvolvido no Objetivo 1;
- **(Capítulo de livro) Barreto, R.,** Goncalves, C., Maciel ,F., Gomes, L. & Vale, Z. (2023) Households Participation in Energy Communities with Large Integration of Renewables. Sustainable Energy Planning and Smart Grids, Elsevier. O autor da dissertação concebeu, implementou e validou o modelo de DR para uma comunidade de energia, considerando a privacidade dos dados dos participantes. Da mesma forma, o autor procedeu à execução do caso de estudo e escrita do artigo. Este trabalho foi aceite para publicação, estando em fase de *proof*, e contribui para o trabalho desenvolvido no Objetivo 1.

Por fim, é de realçar que todos os trabalhos científicos resultantes nesta dissertação continham uma um estado de arte sobre as diferentes temáticas abordadas, contribuindo desta forma para a concretização do trabalho desenvolvido no Objetivo 1.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta dissertação está dividida em cinco secções. A Secção 1 destaca os principais objetivos e motivações para a realização desta dissertação. A Secção 2 apresenta a base teórica da dissertação, onde detalha diversos temas associados à mesma, como as SGs, as comunidades de energia, os programas de DR, a TE, a IoT e a participação ativa dos utilizadores finais. Na Secção 3 é explicado o algoritmo de criação de comunidade de energia e o modelo de DR criado para uma comunidade de energia, incluindo a explicação dos diferentes tipos de participação que os utilizadores finais podem optar por escolher. A Secção 4 descreve o caso de estudo usado nesta dissertação, onde, por um lado, destaca os dados da comunidade de energia considerados e, por outro lado, destaca os casos de estudo criados para testar a totalidade da solução proposta na secção anterior, apresentando e discutindo os resultados obtidos em cada um deles. Por fim, a Secção 5 apresenta as principais conclusões obtidas desta dissertação e também destaca possíveis trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

Esta secção apresenta a análise do estado de arte elaborada, onde são realçadas as possíveis tecnologias e conceitos que apoiam a elaboração deste trabalho de dissertação. Deste modo, inicialmente, destaca-se a importância que as Rede Inteligentes de Energia⁸ (SG), as comunidades de energia e as microrredes têm na implementação de tecnologias que possibilitam controlar eficientemente os recursos energéticos. Neste contexto, é também realçado os diferentes tipos de edifícios inteligentes que existem, onde estes podem contribuir para que os utilizadores finais alcancem a eficiência energética. Posteriormente, no âmbito das SGs e dos edifícios inteligentes, é também discutido o conceito Internet das Coisas (IoT), onde este, através da computação *edge*, *fog*, e *cloud*, permite a transmissão de dados a alta velocidade e em tempo real entre diferentes entidades da rede elétrica, bem como entre diferentes dispositivos. No contexto das SGs, também se destaca a participação dos utilizadores finais, visto que estes podem proporcionar uma flexibilidade do lado da procura, através de tecnologias como a Gestão da Procura no Lado do Utilizador⁹ (DSM), a Resposta dos Consumidores (DR) e a Energia Transitiva (TE), permitindo assim lidar com diferentes problemas como por exemplo, a rápida integração de fontes renováveis, facilitando o bom funcionamento dos sistemas elétricos. Por fim, também se realça a importância da sustentabilidade das comunidades para a neutralidade carbónica, como também a importância da segurança e da

⁸ Do anglo-saxónico *smart grid*.

⁹ Do anglo-saxónico *demand-side management*.

privacidade dos dados dos utilizadores finais e da equidade entre estes, para que estes possam contribuir para a descarbonização.

2.1. REDES INTELIGENTES DE ENERGIA

Com os progressos tecnológicos no setor de energia, verifica-se que o desenvolvimento de soluções sustentáveis tem vindo a tornar-se cada vez mais proeminente, especialmente no contexto das SGs (Faria et al., 2019). O conceito de SG, segundo o Farhangi (2010), é definido como:

“A recolha de todas as tecnologias, conceitos, topologias e abordagens que permitem substituir as hierarquias de silo de geração, transmissão e distribuição por um ambiente de ponta a ponta, organicamente inteligente, totalmente integrado, onde os processos, objetivos e necessidades empresariais de todos os interessados são apoiados pelo troca eficiente de dados, serviços e transações.” (Farhangi, 2010)

Esta definição em português, foi livremente traduzida pelo autor a partir do texto original em língua inglesa ilustrado em seguida:

“The collection of all technologies, concepts, topologies, and approaches that allow the silo hierarchies of generation, transmission, and distribution to be replaced with an end-to-end, organically intelligent, fully integrated environment where the business processes, objectives, and needs of all stakeholders are supported by the efficient exchange of data, services, and transactions.” (Farhangi, 2010)

Pela definição apresentada, verifica-se que o conceito de SG abrange uma grande variedade de tecnologias e conceitos que podem ser aplicadas de forma a controlar eficientemente desde o processo de geração de energia até à distribuição e consumo da mesma pelos respetivos utilizadores finais. Desta forma, a SG pode ser considerada como um típico sistema ciberfísico (Fei et al., 2019).

De acordo com Yu e Xue, um sistema ciberfísico consiste num conjunto de sistemas complexos e multidisciplinares, que estão incorporados no mundo físico por meio de tecnologias computacionais (isto é, parte cibernética) (Yu & Xue, 2016). Um exemplo de um sistema ciberfísico, é um sistema de *Supervisory Control and Data Acquisition* que, quando implementado em redes de distribuição, pode permitir combater as flutuações de tensão e de frequência causadas pela constante mudança de carga na respetiva rede elétrica (F. Hu et al., 2016). No contexto da SG, esta, através de sensores, obtém os dados do meio físico ao cibernético, como por exemplo consumos e produções. Os respetivos dados são analisados e, posteriormente, aplica-se medidas de controlo, do cibernético ao físico, de forma a melhorar a eficiência da gestão energética da SG.

É também importante realçar, que as SGs possibilitam a interação e cooperação de diversos tipos de participantes como produtores, operadores de sistema e pequenas entidades como

consumidores e *prosumer(s)*¹⁰, sendo este último um participante que tem a capacidade de consumir e produzir energia, por meio de fontes renováveis (Colak et al., 2020). Isto demonstra, de uma certa forma, que as pequenas entidades podem desempenhar um novo papel nas redes elétricas, capaz de contribuir no balanço entre a procura e oferta de energia na rede (Moslehi & Kumar, 2010). Contudo, para estas pequenas entidades terem o seu devido impacto na rede elétrica, estas têm de cooperar entre si como uma comunidade (Etedadi Aliabadi et al., 2021). Neste contexto, uma das soluções da SG que pode auxiliar as pequenas entidades, é a comunidade de energia, visto que esta permite a colaboração e participação ativa das pequenas entidades em modelos de gestão da energia (de São José et al., 2021).

2.2. COMUNIDADES DE ENERGIA

De acordo com Caramizaru & Uihlein (2019), o termo comunidade de energia tem duas definições oficiais a nível da UE (Caramizaru & Uihlein, 2019). A primeira definição, que surgiu na Diretiva (UE) 2018/2001 Artigo 2 (16), designa a Comunidade de Energia Renovável (CER) como sendo uma entidade jurídica e autónoma que, tendo por base uma participação aberta e voluntária, tem como principal objetivo *“propiciar aos seus acionistas ou membros ou às localidades onde opera benefícios ambientais, económicos e sociais em vez de lucros financeiros”* (Parlamento Europeu e do Conselho, 2018). O controlo é da parte dos acionistas ou membros que são pequenas ou médias empresas ou pessoas singulares.

Quanto à segunda definição, que surgiu na Diretiva (EU) 2019/944 Artigo 2 (11), designa a Comunidade de Cidadãos para a Energia (CCE) como sendo uma entidade jurídica que tem o mesmo objetivo que a entidade anterior, contudo esta pode:

“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” (Parlamento Europeu e do Conselho, 2019).

A Tabela 1 ilustra as principais diferenças entre as entidades mencionadas anteriormente. Desta tabela, é possível verificar que CER pode ser vista como um subconjunto da CCE, onde esta última promove a descentralização da SG, envolvendo os consumidores a fazerem parte de uma comunidade que permitirá a alta integração de recursos energéticos distribuídos (Wuebben et al., 2020). Em suma, cada uma destas entidades são incorporadas como agentes de mercado do tipo não comercial que têm de respeitar certos critérios de modo a operam no mercado sem discriminação.

¹⁰ Deriva da combinação das palavras anglo-saxónicas *producer* e *consumer*.

Tabela 1. Principais diferenças entre CER e CCE (Frieden et al., 2019).

	Comunidade de Energia Renovável	Comunidade de Cidadãos para a Energia
Limitações Geográficas	O controlo efetivo está limitado aos membros da CER que vivem na proximidade.	Nenhuma limitação geográfica relacionada com atividades, controlo efetivo ou elegibilidade para a adesão a uma CCE.
Filiação	Baseia-se no controlo local, exclui as grandes empresas de aderir à comunidade de energia renovável.	Permite a participação de pequenas, médias e grandes empresas, contudo estas estão excluídas do controlo efetivo.
Fontes de Energia	Qualquer tipo de fonte de energia renovável.	Todos os tipos de fontes de eletricidade (renovável ou não renovável).
Objetivo Principal	Estimular o crescimento da comunidade local de forma a expandir a quota das energias renováveis a nível nacional.	Fazer com que a comunidade de cidadãos para a energia se torne num novo participante “não comercial” no mercado de energia, com capacidade de se envolver em todo o mercado da eletricidade.

Com as progressões tecnológicas, verifica-se que o consumidor pode desempenhar um papel crucial na rede elétrica, onde pode contribuir para a implementação da geração de eletricidade renovável e distribuída. Desta forma, de modo a possibilitar a participação dos consumidores e de aumentar a flexibilidade dos sistemas elétricos, é essencial desenvolver mercados de energia. Neste contexto, a Diretiva (EU) 2019/944, apresentada em 2019 pelo Parlamento Europeu e do Conselho, de modo a suportar os consumidores e as CCE, estabelece um conjunto de regras e direitos (Parlamento Europeu e do Conselho, 2019), que garantem:

- A autonomização e a proteção dos consumidores, como também a participação destes nos mercados de eletricidade, sendo que estes mercados têm de ser equitativos, flexíveis, integrados, transparentes e centrados no consumidor;
- Que os consumidores possam escolher livremente um fornecedor e aderir a uma CCE;
- Que os consumidores consigam um contrato de preço dinâmico ou um contrato de agregação independente;
- Que os consumidores possam solicitar a instalação de um contador inteligente nas suas habitações, como também possibilitem que estes possam produzir, vender e armazenar eletricidade;
- Que as CCEs consigam estarem ligadas às redes de distribuição e que estas não sejam tratadas de forma não discriminatória em termos de regulação ou de acesso a todos os mercados de eletricidade;
- Que as CCEs possam partilhar a própria geração energética com os seus membros.

Na literatura, existem diversos estudos que apresentam estratégias para comunidade de energia. Um exemplo de um modelo centrado no consumidor é o modelo apresentado por Faia et al., onde este propõe um modelo de otimização que visa gerir os recursos energéticos de uma comunidade de energia (Faia et al., 2021). Ao implementar transações de *peer-to-peer*, este modelo, por um lado, permite diminuir os custos globais da respetiva comunidade e, por outro lado, permite diminuir os custos de energia de cada consumidor. Cielo et al., também propuseram uma estratégia de otimização para comunidades de energia, de modo beneficiá-las ao nível socioeconómico e ambiental (Cielo et al., 2021). Neste estudo, utilizou-se um caso de estudo italiano, onde os resultados

demonstraram que a respetiva estratégia permitiu reduzir significativa na emissões de CO₂. Um outro exemplo é o estudo apresentado por Borrás et al., onde estes propuseram um modelo que permite verificar a viabilidade de uma comunidade de energia (Mansó Borràs et al., 2023). O modelo foi testado em diferentes casos de estudo, onde os resultados demonstraram que as comunidade de energia podem trazer benefícios económicos e ambientais. Outros estudos apresentados, por exemplo, por Grzanic et al. E Javadi et al., desenvolveram modelos de modo a empoderar os *prosumers* existentes nas comunidades de energia, onde em ambos os estudos os resultados demonstram a eficiência dos modelos (Grzanic et al., 2021; Javadi et al., 2022).

2.3. MICRORREDE

As microrredes são um dos componentes mais importantes das SGs que possibilitam fornecer a uma rede a sua independência, podendo melhorar a qualidade de energia e aumentar a eficiência energética da mesma (Gomes et al., 2020). Existem várias definições deste conceito, sendo que uma das mais conhecidas e aceites na atualidade, é a definição proposta pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos¹¹, onde este define a microrrede como sendo:

“Um grupo de cargas interligadas e recursos energéticos distribuídos dentro de limites elétricos claramente definidos que atua como uma única entidade controlável no que diz respeito à rede. Uma microrede pode ligar-se e desligar-se da rede para permitir o seu funcionamento tanto em modo de rede como em modo ilha.” (Ton & Smith, 2012)

Esta definição em português, foi livremente traduzida pelo autor a partir do seguinte texto original em língua inglesa:

“A group of interconnected loads and distributed energy resources within clearly defined electrical boundaries that acts as a single controllable entity with respect to the grid. A microgrid can connect and disconnect from the grid to enable it to operate in both grid-connected or island-mode.” (Ton & Smith, 2012)

Desta definição, verifica-se que as microrredes têm mais do que um modo de operação, o modo ligado à rede elétrica e o modo ilha¹². No primeiro modo, a microrrede encontra-se ligada à rede principal, permitindo melhorar a fiabilidade e a qualidade da mesma (Pradhan et al., 2017). O segundo modo, aplica-se nos casos onde ocorrem falhas na rede elétrica principal, onde a microrrede desconecta-se da mesma, possibilitando o controlo e o fornecimento de energia aos consumidores (Nwulu & Xia, 2017).

¹¹ <https://www.energy.gov/>

¹² Do anglo-saxónico *islande-mode*.

A microrrede pode ser categorizada consoante a fonte de alimentação, existindo atualmente três categorias, as microrredes de corrente alternada, de corrente contínua e híbridas (Guerrero et al., 2011; Hossain et al., 2019). As microrredes que se baseiam em corrente alternada, têm facilidade em conectar-se com a rede elétrica principal sem necessitar de quaisquer requisitos (Guerrero et al., 2011). Contudo neste tipo, verifica-se que a eficiência é prejudicada pelas várias conversões de energia necessárias para alimentar as respetivas cargas (Hossain et al., 2019). Quanto às microrredes que se baseiam em corrente contínua, são mais eficientes do que a categoria anterior devido ao facto de terem menos processos de conversão e por terem uma melhor proteção contra curto-circuito (L. Zhang et al., 2018). Por fim, a microrredes híbridas, estas aproveitam dos benefícios das categorias anteriores, contudo o grau de complexidade destas é muito elevado (Hossain et al., 2019).

Tendo em consideração ao que foi dito anteriormente, verifica-se que uma microrrede tem a capacidade de se responsabilizar pelo controlo dos recursos energéticos de uma dada localidade, fornecendo vários benefícios, como (Hossain et al., 2019; Marnay et al., 2015):

- Benefícios económicos: os membros da microrrede podem ser beneficiados economicamente consoante a sua cooperação (fornecimento de serviços de sistema à rede, alteração do consumo conforme lhes solicitado);
- Fiabilidade no fornecimento de energia: a microrrede assegura o fornecimento de energia de forma a atender os requisitos de cada um dos respetivos consumidores;
- Melhora a estabilidade da rede: a microrrede tem a capacidade de ser autónoma, onde deteta anomalias e age da melhor forma possível, de modo a proteger-se a si mesma e a rede elétrica a qual está conectada, melhorando assim a estabilidade;
- Melhora a integração das fontes de energia renovável: as fontes de energia renovável são, de uma certa forma, voláteis, visto que dependem das condições climáticas, o que pode causar impactos negativos à rede. Contudo o controlo centralizado fornecido pelas microrredes permite mitigar ou anular o impacto;
- Melhor gestão da energia: o controlo centralizado fornecido pela microrrede permite que os respetivos membros consigam gerir eficientemente os seus recursos energéticos consoante os preços do mercado.

Vários estudos orientados para as microrredes podem ser verificados na literatura, como por exemplo, o estudo de Mohseni et al., onde o modelo apresentado tem como principal objetivo otimizar o gestão dos recursos energéticos de uma microrrede (Mohseni et al., 2021). Em (Mehraban & Eslami, 2023), foi proposto um sistema de gestão de energia para controlar diversas microrredes interligadas, considerando as incertezas de todos os recursos energéticos das microrredes. Também existem estudos como os exemplos apresentados por Zhang et al. e Hu e Bhowmick que propõe estratégias de controlo da tensão das microrredes em modo ilha (J. Hu & Bhowmick, 2020; M. Zhang et al., 2020). Em (Dong et al., 2020), é proposto um modelo de negociação de energia baseado em sistemas multiagentes e programas de DR. Os resultados demonstraram a eficiência do modelo proposto, onde este modelo permite melhor os benefícios económicos dos membros da microrrede.

2.4. EDIFÍCIOS INTELIGENTES

Atualmente, no contexto das SGs e microrredes, verifica-se que existe alguma diversidade de edifícios que implementam sistemas inteligentes com o âmbito de promover o uso de energia de forma eficiente (Nguyen & Aiello, 2013). Estes edifícios, também denominados edifícios inteligentes, implementam diversas tecnologias que permitem reduzir os custos operacionais e energéticos e também as emissões de CO₂, tendo em consideração o conforto e bem-estar dos consumidores (Mariano-Hernández et al., 2021). Os edifícios verdes¹³, edifícios de energia zero¹⁴ e casas inteligentes são exemplos de edifícios que implementam sistemas inteligentes (Casini, 2016).

2.4.1. EDIFÍCIOS VERDES

Os edifícios verdes, em comparação com os restantes, desde a sua construção até à sua destruição são os que têm menor impacto ambiental, onde são usados produtos de alta qualidade para aumentar o rendimento do seu investimento (Ismael et al., 2019). Este tipo edifício, tendo em consideração os padrões da comunidade onde se insere, visa alcançar o conforto e bem-estar dos ocupantes como também o equilíbrio ambiental e a eficiência dos recursos disponibilizados (Cole, 2019).

Existem diversos estudos na literatura relacionados com edifícios verdes, como por exemplo o estudo apresentado por Jeyasheeli e Selva, onde neste é implementado um sistema que se baseia em fatores ambientais, como a temperatura e a intensidade de luz, que tem como âmbito aumentar a eficiência energética de um edifício verde (Jeyasheeli & Selva, 2017). A implementação deste sistema permitiu aumentar a eficiência energética do respetivo edifício até 82,77 % como também reduziu a emissão de CO₂. Um outro exemplo, é o estudo proposto por Rahman et al., que tem como âmbito avaliar o potencial de um hospital público obter poupanças energéticas, de modo a este hospital atingir o estatuto de edifício verde (Abd Rahman et al., 2021). Em (X. Zhang & Mohandes, 2020), foi proposta uma estrutura para gerir os riscos de segurança que representam um perigo para os trabalhadores da construção. Em (Alkaabi et al., 2020), é apresentada uma estratégia para testar a resiliência dos edifícios verdes em ocasiões de incerteza e o seu potencial em poupar energia. Tsvetkov et al. apresentam um modelo matemático para analisar a transferência de humidade e de calor entre as paredes de edifícios verdes (Tsvetkov et al., 2021). Também existem estudo no contexto dos edifícios verdes que se focam nas políticas ambientais, como é o caso do estudo apresentado por Yang et al., onde neste estudo apresenta um modelo de otimização para analisar os impactos que a colaboração entre a universidade, o governo e a indústria têm num ecossistema de inovação ecológica (Z. Yang et al., 2021).

¹³ Do anglo-saxónico *green buildings*.

¹⁴ Do anglo-saxónico *net zero-energy buildings*.

2.4.2. EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO

Os edifícios de energia zero representam os tipos de edifícios que têm um elevado desempenho energético, onde o balanço energético anual entre a energia consumida (proveniente da rede) e a energia renovável produzida é nula (Liang et al., 2019). A energia renovável produzida, que por exemplo pode provir de fontes eólica, solar ou geotérmica, é usada para autoconsumo ou é vendida à rede local ou a edifícios vizinhos (Irfan et al., 2019). Existem bastantes exemplos de aplicação de edifícios de energia zero, como por exemplo o estudo de Martinez et al., onde apresentaram uma simulação energética de um laboratório em El Salvador, onde este é capaz de produzir energia renovável e servir como posto de carregamento para um veículo elétrico de forma eficiente (Martinez et al., 2018). Hai et al., também apresentaram uma simulação de um edifício de energia zero que usufrui geração de hidrogénio e fotovoltaica e de baterias (Hai et al., 2023). Em (Mottaghizadeh et al., 2022), propuseram e avaliaram diferentes arquiteturas de sistema para que um edifício, que considera diferentes unidades de geração distribuída, alcance o estatuto de edifício de energia zero. Abdou et al., também apresentaram um estudo semelhante, onde avaliaram a possibilidade de reabilitar um edifício residencial existente de modo a atingir o estatuto de edifício de energia zero, em seis zonas climáticas diferentes (Abdou et al., 2021).

É de realçar que existe um outro conceito semelhante aos edifícios de energia zero, que são os edifícios com energia quase nula, onde este tipo de edifício apenas usa a energia renovável para satisfazer os seus consumos (Martirano et al., 2018). Existe alguns exemplo de aplicação deste tipo de edifício, como é o estudo de Liu et al., onde propuseram um sistema de energia distribuída para edifícios com energia quase nula, capaz de se otimizar consoante o ambiente, a economia e a rede no qual o edifício está integrado (Liu et al., 2022). Ascione et al., propuseram um modelo que permite avaliar o desempenho e a resiliência de edifícios com energia quase nula perante as alterações climáticas (Ascione et al., 2022).

2.4.3. CASAS INTELIGENTES

As casas inteligentes são vistas como sendo bastantes promissores para o século XXI (Casini, 2016), sendo capazes de implementar diversas tecnologias que se centram na automação e no controlo dos equipamentos elétricos dos edifícios, de modo a formar um sistemas de gestão de energia (Shakeri et al., 2018). No contexto dos casas inteligentes, o sistemas de gestão de energia possibilita gerir eficientemente os recursos energéticos, tendo em consideração o conforto e a segurança do consumidor (Gomes, Ramos, et al., 2019; Mariano-Hernández et al., 2021). Em (Mocrii et al., 2018), verifica-se duas definições sobre as casas inteligentes, onde a primeira se foca mais na casa e no consumidor enquanto a segunda se foca mais nos edifícios e no sistema elétrico. Em ambas as definições destacam a importância que os sistemas de comunicação têm neste contexto, onde, por um lado, permitem o acesso e o controlo remoto dos dispositivos e, por outro lado, também permite que a conexão entre os diversos dispositivos.

Na literatura verificam-se diversos estudos que abrangem as casas inteligentes, como por exemplo em (Khajeh et al., 2022), onde propuseram um modelo baseado em DR para estimar a flexibilidade disponível nas casas inteligentes, de modo a possibilitar que estas casas possam prestar

serviços à rede. Bahramara propôs um modelo de gestão de energia para casas inteligentes equipadas com painéis fotovoltaicos, considerando as respectivas restrições de flexibilidade das casas (Bahramara, 2021). Os resultados demonstraram que o modelo permite diminuir o custo de operação das casas inteligentes. Koltsaklis et al. também propuseram um modelo para gerir eficientemente os recursos energéticos das casas inteligentes (Koltsaklis et al., 2022). Contudo, estes, por sua vez, implementam diferentes algoritmos de aprendizagem não supervisionada. Um outro exemplo, é o estudo proposto por Totstado-Véliz et al., onde apresenta um modelo estocástico com otimização robusta para planejar os recursos energéticos das casas inteligentes para o dia (Tostado-Véliz et al., 2023). Os resultados demonstraram que este modelo permite reduzir custo energético até 86 %. Também se verificam estudos que tentam determinar quais os fatores que influenciam os consumidores a usar as tecnologias das casas inteligentes, como por exemplo (Pliatsikas & Economides, 2022). Por fim, também existem estudos orientados para o operadores de sistemas de distribuição e transmissão, como é o caso do estudo de Khajeh et al., onde propuseram um sistema que permite que as casas inteligentes possam fornecer serviços de flexibilidade de energia ativa e reativa aos respetivos operadores (Khajeh et al., 2023).

2.5. INTERNET DAS COISAS

O conceito de IoT, desde que surgiu em 1982 na Universidade de Carnegie Mellon até à atualidade, tem vindo a ser modelado conforme as progressões tecnológicas que ocorreram, onde quer a definição quer a visão deste conceito têm sofrido alterações (Ibarra-Esquer et al., 2017). Consoante o contexto, este conceito pode ter diferentes definições, onde *IEEE Internet Initiative* propôs duas definições que melhor descrevem a IoT quando este é aplicado em pequena e grande escala. No caso de aplicação em grande escala, a complexidade aumenta significativamente, devido à quantidade de elementos a serem controlados, onde estes podem pertencer a diferentes entidades com diferentes interesses (Minerva, 2015). Partindo apenas do caso da aplicação da IoT em pequena escala, como por exemplo, em edifícios inteligentes, a IoT pode ser definida como:

“Uma IoT é uma rede que liga “Coisas” identificáveis de forma única à Internet. As “Coisas” têm capacidades de deteção/atuação e de serem programáveis. Através da exploração da identificação e deteção, a informação sobre a “Coisa” pode ser recolhida e o estado da “Coisa” pode ser alterado de qualquer lugar, a qualquer momento, por qualquer coisa.” (Minerva, 2015)

Esta definição em português, foi livremente traduzida pelo autor a partir do seguinte texto original em língua inglesa:

“An IoT is a network that connects uniquely identifiable “Things” to the Internet. The “Things” have sensing/actuation and potential programmability capabilities. Through the exploitation of unique identification and sensing, information about the “Thing” can be collected and the state of the ‘Thing’ can be changed from anywhere, anytime, by anything.” (Minerva, 2015)

Consoante o problema em questão, as arquiteturas de IoT podem ser divididas em várias camadas, sendo o mais comum a arquitetura de IoT de três camadas (HaddadPajouh et al., 2019). De uma forma geral, a arquitetura de IoT de três camadas divide-se em:

- Camada de Aplicação: é a camada superior que se responsabiliza por fornecer vários serviços ao utilizador final, consoante a área de aplicação;
- Camada de Rede: é a camada intermédia que serve maioritariamente para transmitir os dados entre as restantes camadas;
- Camada de Percepção: é a camada inferior, que utiliza sensores para detetar e recolher os dados do meio ambiente.

Desta forma, a implementação de IoT em diversos domínios torna-se possível, podendo fornecer oportunidades em diversas áreas, como a do transporte, da saúde, do ambiente, da indústria, a casas inteligentes e entre muitas outras (Al-Fuqaha et al., 2015).

2.5.1. CAMADAS DE PROCESSAMENTO

Normalmente, os sistemas de IoT usam arquiteturas centralizadas, onde grande parte dos processos associados aos dados, como a aquisição, o processamento e a análise, são coordenados de forma centralizada, fazendo com que surjam problemas relativos à escalabilidade do sistema como também de latência dos respetivos dados. Assim, de modo a resolver os problemas mencionados anteriormente, é necessário implementar nos sistemas de IoT infraestruturas como a computação *edge*, *fog* e *cloud* (Tianfield, 2018). No contexto dos sistemas de IoT, estas infraestruturas, estando organizadas de forma hierárquica, formam uma arquitetura de três camadas, onde cada camada representa, de uma certa forma, um nível de decisão, como se pode ver na Figura 1.

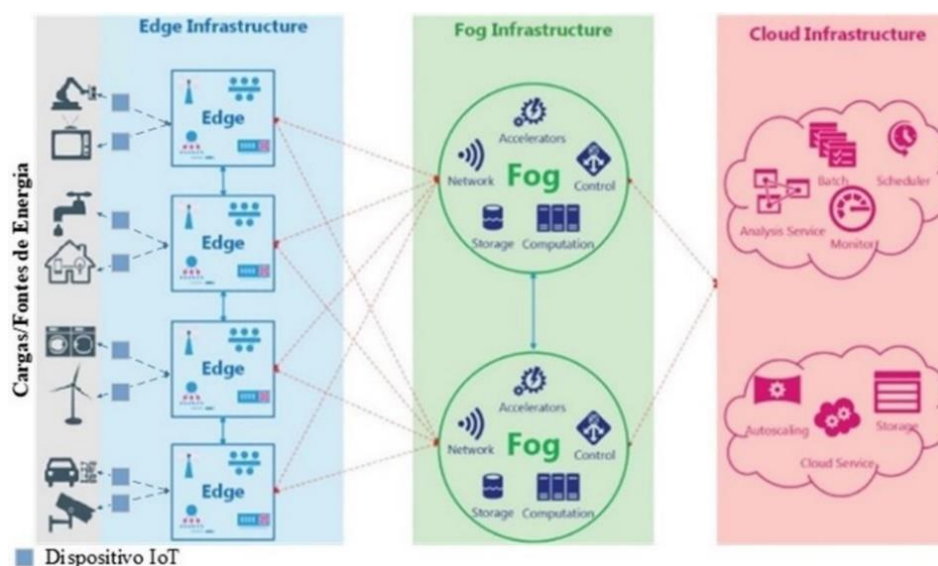


Figura 1. Arquitetura Edge-Fog-Cloud. Adaptado de (Cao et al., 2019).

No que respeita à camada inferior, computação *edge*, esta é a que se encontra mais próxima dos dispositivos de IoT. Esta camada permite, de uma forma mais limitada, que o processamento e armazenamento de dados seja feito junto dos dispositivos controlados, o que faz com que esta camada

seja a mais descentralizada (Yousefpour et al., 2019). Da mesma forma, esta camada permite lidar com problemas relacionados com a latência e a privacidade dos dados.

Quanto à camada intermédia, computação *fog*, esta estabelece a ligação entre os dispositivos e a camada superior, possibilitando que a computação, o armazenamento e a gestão de dados seja elaborado em nós da rede que se encontram mais próximos dos respetivos dispositivos de IoT. Desta forma, os dados ao serem tratados nesta camada permite que a transmissão destes para a camada superior seja mais rápida, diminuindo assim a latência da rede (Mocrii et al., 2018). Ao contrário da computação *edge*, a computação *fog* é uma camada mais centralizada e tem uma maior capacidade de processamento e armazenamento.

Por fim, a camada superior, a computação *cloud*, esta, segundo Mell e Grance (2011), pode ser definida como:

“Um modelo para permitir o acesso ubíquo, onnipresente, conveniente e a pedido a um conjunto partilhado de recursos informáticos configuráveis (por exemplo, redes, servidores, armazenamento, aplicações e serviços) que podem ser rapidamente fornecidos e libertados com um esforço mínimo de gestão ou interação do prestador de serviços.” (Mell & Grance, 2011)

Esta definição em português, foi livremente traduzida pelo autor a partir do seguinte texto original em língua inglesa:

“A model for enabling ubiquitous, convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources (e.g., networks, servers, storage, applications, and services) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction.” (Mell & Grance, 2011)

De uma forma geral, a computação *cloud*, é a camada que tem maior capacidade de armazenamento e processamento de dados, fazendo assim com que seja o nível mais avançado da arquitetura (Cao et al., 2019). No entanto, a computação *cloud* possui algumas desvantagens em relação ao tempo útil para envio de uma resposta para o processamento dos dados, sendo este relativamente demorado, e à distância que se encontra dos dispositivos de IoT que controla.

Assim, em suma, estas camadas, apesar de possuírem algumas semelhanças entre si, têm as suas respetivas características, limitações e requisitos e de camada em camada, o nível de armazenamento e processamento dos dados e a latência vão diminuindo (Al-Qamash et al., 2018).

2.5.2. IOT EM APLICAÇÕES DE REDES INTELIGENTES DE ENERGIA

A SG tem a capacidade de usar tecnologias de comunicação bidirecional para controlar um sistema elétrico de modo que este seja seguro e eficiente (Faria et al., 2019). Neste contexto, a implementação de IoT pode beneficiar a SG, através de dispositivos de IoT, estabelecendo ligações em tempo real, que possibilitam a conexão de diferentes equipamentos e utilizadores finais. Desta forma, a partilha de dados pelas diversas entidades da SG, como os operadores de sistemas de distribuição e transmissão, os edifícios (comerciais, industriais e residenciais) como também as

unidades de geração, pode ser realizada a alta velocidade, aumentando assim a eficiência da própria SG (Pramudhita et al., 2018). A Figura 2 ilustra um exemplo de uma SG que implementa IoT.

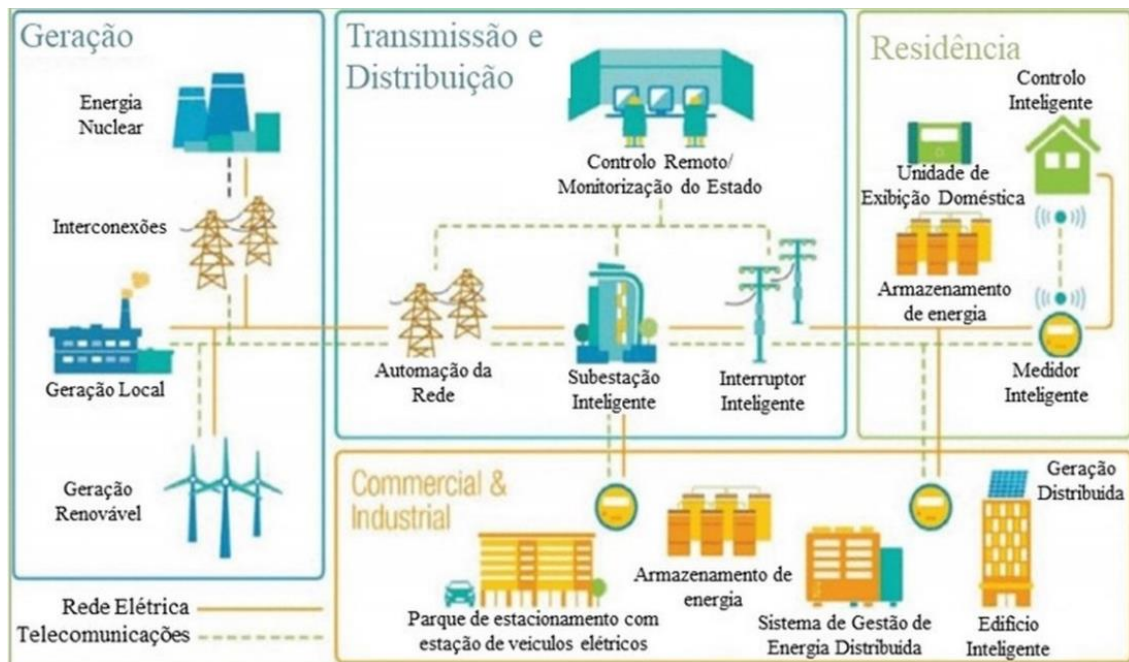


Figura 2. Integração da IoT em sistemas de SG (Pramudhita et al., 2018).

Como se pode ver na figura, diferentes aplicações de IoT podem ser implementadas nos diferentes subsistemas da SG, sendo estes subsistemas a geração, a transmissão, a distribuição e a utilização de energia (Saleem et al., 2019). No caso da geração de energia, a IoT pode ser usado para facilitar o controlo, a monitorização e a previsão da respetiva geração e consumo de energia. Na transmissão de energia, as linhas de transmissão, as subestações e as proteções das torres de transmissão podem ser monitorizadas e controladas pela IoT. Na distribuição de energia, a IoT pode contribuir na gestão dos equipamentos e operações como também na automatização distribuída. Por fim, na utilização de energia, esta pode usufruir da IoT para inúmeras aplicações, desde a recolha dos dados sobre os consumos energéticos dos aparelhos domésticos, até à monitorização, gestão e controlo eficiente dos recursos energéticos.

Um exemplo de aplicação de IoT nas SGs é o estudo proposto por Malekpour et al., onde propuseram uma arquitetura para controlar as variações de tensão e de potência reativa nas redes de distribuição, considerando a integração de geração distribuída (Malekpour et al., 2020). Existe outros estudo como (Xu et al., 2021), que propõe estratégias para controlar os recursos energéticos, com base em computação *edge*, de forma maximizar os benefícios dos utilizadores finais e minimizar os desperdícios. Em (Wang et al., 2023), propõe uma estratégia baseada em IoT para otimizar a gestão dos recursos da SG, considerando a incerteza de diversas unidades de geração distribuída. Outros estudos focam-se mais na comunicação das SGs, como por exemplo em (Srinivas et al., 2021), onde propuseram um esquema, baseado em assinaturas anónimas e em IoT, que permite estabelecer uma comunicação segura entre os operadores da SG que fornecem serviços e dispositivos de IoT. Em (Tom et al., 2020), de forma a melhorar o desempenho das SGs, propuseram um esquema que melhore o processo de comunicação entre os dispositivos de IoT e os servidores que armazenam e processam os dados. Também existe exemplos que implementam *blockchain* no contexto das SGs,

como é o estudo de Park et al., onde o esquema proposto permite preservar a privacidade dos dados emitidos por dispositivos de IoT que participam em programas de DR (Park et al., 2023).

2.5.3. IOT EM EDIFÍCIOS INTELIGENTES

Na atualidade, os edifícios inteligentes, ao usufruírem de dispositivos de IoT para gerir, controlar e interconectar os diferentes dispositivos domésticos, podem ser vistos como uma forma de aplicação da tecnologia IoT (Gomes et al., 2018; Salman et al., 2017). Os dispositivos de IoT possibilitam a implementação de tecnologias sem fios que se baseiam em *bluetooth*, sistema global para telemóveis, IoT e reconhecimento de voz, permitindo assim automatizar um sistema de um edifício inteligente (Hasan et al., 2018; Vaidya & Vishwakarma, 2018).

Focando mais nos edifícios inteligentes que usam dispositivos de IoT, podemos verificar na literatura diversos exemplos, como por exemplo o estudo apresentado por Stolojescu-Crisan et al., onde neste estudo propuseram duas soluções simples e económicas para promover a segurança das casas inteligentes, com base em dispositivos de IoT (Stolojescu-Crisan et al., 2022). Um exemplo semelhante é o estudo proposto em (Zielonka et al., 2021), onde estes desenvolveram um sistema, baseado em inteligência computacional, para gerir os recursos energéticos de casas inteligentes, considerando os dispositivos de IoT. Em (Cvitić et al., 2021), é proposto um modelo para casa inteligentes que permite classificar diversos tipos de dispositivos de IoT independentemente da sua função ou finalidade. Na literatura, também se verificam estudos que se focam em avaliar os impactos que a emergência dos dispositivos de IoT podem causar no bem estar dos indivíduos, como é o caso em (Sequeiros et al., 2022). Outros exemplos, como o estudo apresentado por Javed et al., propõe modelos para avaliar, de forma automatizada, a saúde cognitiva dos residentes de casas inteligentes, com o auxílio de algoritmos de aprendizagem supervisionada (Javed et al., 2021). Também existem exemplos que desenvolvem sistemas de gestão de TE, baseados em *blockchain*, como é estudo de Yang et al., onde o sistema proposto permite gerir, de forma eficiente e privada, os recursos energéticos das casas inteligentes através de dispositivos de IoT (Q. Yang & Wang, 2021).

2.6. PARTICIPAÇÃO DOS UTILIZADORES FINAIS

No setor elétrico, com as progressões tecnológicas da atualidade, verifica-se que uma das principais diferenças entre as SGs e as redes de energia convencionais, é a possibilidade de participação ativa dos utilizadores finais (Bourazeri & Pitt, 2018; Pitt et al., 2017), podendo estes serem consumidores, produtores ou ainda *prosumers*, de pequenas ou grandes dimensões (Colak et al., 2020). Esta participação ativa dos utilizadores finais possibilita fornecer uma certa flexibilidade no lado da procura, permitindo lidar com a rápida integração de fontes renováveis como também facilitar o bom funcionamento do sistema elétrico. Assim, de modo a que os utilizadores finais participem na SG, é necessário implementar tecnologias que promovem uma melhor gestão dos recursos energéticos, como por exemplo a DSM, a DR e a TE (Abrishambaf et al., 2019; Palensky & Dietrich, 2011).

2.6.1. GESTÃO DA PROCURA NO LADO DO UTILIZADOR

A DSM foi inicialmente introduzido em 1985, por Gellings, onde o principal objetivo da DSM é gerir eficientemente os recursos energéticos dos consumidores consoante a disponibilidade de eletricidade fornecida pela rede (Alasseri et al., 2017). Na atualidade, de modo a evitar ou atenuar os impactos negativos causados à rede elétrica, pela rápida integração de fontes de energia renováveis e pelo rápido crescimento de consumo, é necessário ter em consideração o conceito de DSM.

A DSM, incentiva os consumidores a gerir o consumo de forma a aproveitar melhor a geração das fontes de energia renovável disponíveis, impedindo assim que haja desperdícios ou sobrecargas na rede, e evitar os períodos onde se verificam a existência de picos de carga na rede (Muller, 2017). Este conceito, de modo a modelar o padrão de consumo dos consumidores usa as diferentes técnicas, ilustradas na Figura 3, sendo as mais conhecidas a técnica de eficiência energética e de deslocamento¹⁵ de carga, onde esta última é sobretudo aplicada através de programas de DR (Mariano-Hernández et al., 2021). A cooperação destas duas técnicas pode beneficiar os consumidores, fornecendo meios para que estes possam compreender e gerir melhor os seus recursos energéticos (Boreiko et al., 2017).

No que respeita à eficiência energética, esta é definida como uma estratégia de longo prazo que tem como foco reduzir permanentemente o consumo energético de um consumidor, através da substituição de equipamentos normais por equipamentos mais eficientes, que devem ser capazes de fornecer o mesmo nível de serviço, ou até melhor (Mahin et al., 2017). Quanto à DR, esta é uma estratégia de curto prazo que é crucial para o futuro das SGs (Vuelas et al., 2018).

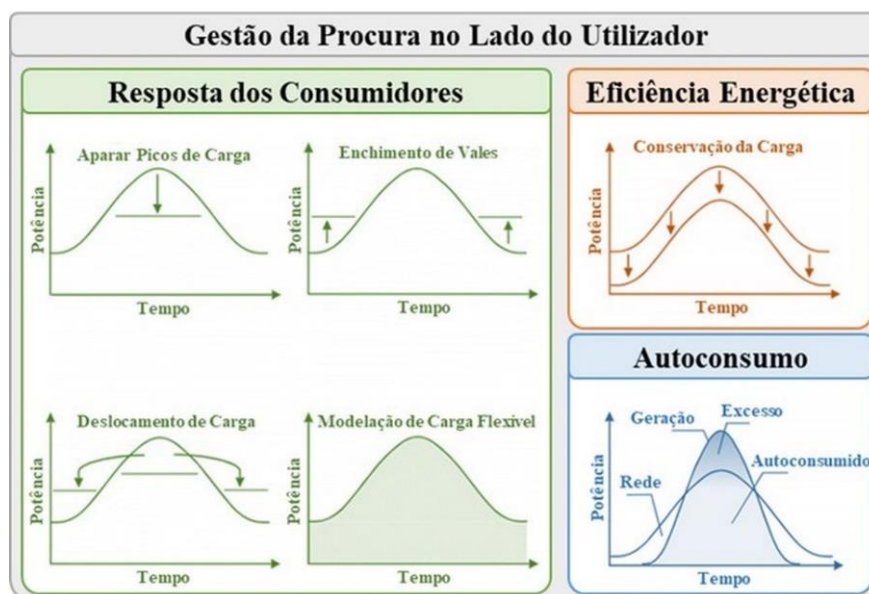


Figura 3. Técnicas de DSM (Lampropoulos et al., 2020).

¹⁵ Do anglo-saxónico *shifting*.

Na literatura, existem diversos exemplos de estudos orientados para a DSM. Um exemplo, é o estudo de Stavrakas et al., onde propuseram um modelo dinâmico de DSM para casas inteligentes que possibilita que edifícios residenciais possam aumentar o seu autoconsumo de modo a apoiar a rede sem comprometer o seu conforto (Stavrakas & Flamos, 2020). Laitsos et al., propuseram um modelo, baseado em meta-heurísticas, para planejar programas de DR baseado em incentivos (Laitsos et al., 2021). Gomes et al., apresentaram um estudo no âmbito das microrredes e da DSM, onde procuram gerir os recursos energéticos de utilizadores finais de pequenas e médias dimensões, tendo em conta as prioridades estabelecidas pelos mesmos (Gomes, Spínola, et al., 2019). Em (Smend et al., 2021), uma estratégia de DSM que permite detetar falhas em SGs que usam dispositivos de IoT para monitorizar unidades de geração distribuída e armazenamento de energia. Kolahan et al., propuseram um modelo descentralizado de DSM para casas inteligentes, baseado em *blockchain*, que possibilita minimizar o consumo e melhorar o conforto dos residentes (Kolahan et al., 2021). Ireshika et al., também propuseram um modelo de DSM descentralizado, contudo, este estudo foca-se nos veículos elétricos (Ireshika et al., 2022). Neste estudo, propuseram um algoritmo autónomo que planeia os carregamentos dos veículos elétricos de modo a minimizar os picos de carga das redes de distribuição.

2.6.2. RESPOSTA DOS CONSUMIDORES

A DR pode ser visto como um mecanismo que encoraja os consumidores a regular estrategicamente o seu padrão de consumo de eletricidade (Gheydi et al., 2016), podendo ser definida como:

“Alterações na utilização de energia efetuadas por recursos do lado da procura para provocar mudanças nos seus padrões normais de consumo de energia elétrica em resposta a mudanças de preço da eletricidade ao longo do tempo, ou a pagamentos de incentivo projetados para incitar uma diminuição do uso de eletricidade em períodos de elevados preços de mercado retalhista ou quando a estabilidade da rede está comprometida.” (Federal Energy Regulatory Commission, 2011)

Esta definição em português, foi livremente traduzida pelo autor a partir do seguinte texto original em língua inglesa:

“Changes in electric use by demand-side resources from their normal consumption patterns in response to changes in the price of electricity, or to incentive payments designed to induce lower electricity use at times of high wholesale market prices or when system reliability is jeopardized.” (Federal Energy Regulatory Commission, 2011)

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos, é possível verificar que existem dois tipos de programas de DR, os programas baseados em incentivos e os programas baseados em preços, onde, cada um destes é subdividido em diferentes subcategorias ilustradas na Figura 4 (US Department of Energy, 2006).

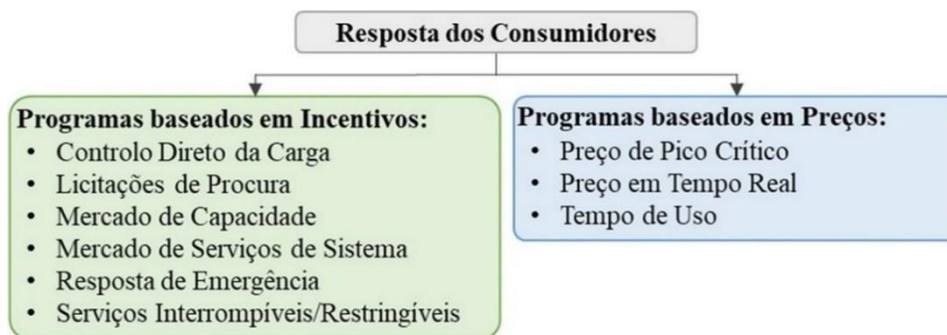


Figura 4. Tipos de programas de DR. Adaptado de (Falsafi et al., 2014).

No que respeita aos programas de DR com base em incentivos, estes fornecem incentivos monetários aos consumidores que reduzirem ou alterarem o seu respetivo consumo nos instantes solicitados (Faria & Vale, 2011). Normalmente, estes instantes podem representar momentos onde existe maior esforço do sistema elétrico, onde o operador da rede comunica com antecedência com o consumidor para efetuar a redução, sendo que este último é que toma a decisão final de efetuar, ou não, a redução. Este tipo de programa é dividido em:

- Controlo Direto da Carga¹⁶: programas que permitem ao operador da rede desligar ou ligar remotamente o conjunto específico de equipamentos, que foram estipulados no contrato efetuado com o consumidor;
- Serviços Interrompíveis/Restringíveis¹⁷: programas que fornecem um desconto ou uma conta de crédito aos clientes que concordem em reduzir o seu consumo em instantes onde ocorrem contingências do sistema. Estes programas são oferecidos a consumidores industriais ou comércio, onde estes, caso não realizem as reduções podem ser penalizados na forma de preços de eletricidade significativamente elevados;
- Resposta de Emergência¹⁸: programas que incentivam os consumidores a fazer reduções de consumo de forma voluntária em instantes onde a fiabilidade da rede está em causa;
- Mercado de Capacidade¹⁹: programas oferecidos a consumidores que têm a capacidade de efetuar reduções no consumo em situações de contingência. Estas reduções são pré-especificadas e o consumidor é recompensado caso efetue alguma redução. Contudo, neste programa, o consumidor é penalizado caso não responda ao pedido de redução;
- Licitações de Procura²⁰: programas que encorajam consumidores de grandes dimensões a propor um preço ao mercado grossista no qual estariam dispostos a reduzir o seu

¹⁶ Do anglo-saxónico *direct load control*.

¹⁷ Do anglo-saxónico *interruptible/curtailable services*.

¹⁸ Do anglo-saxónico *emergency response*.

¹⁹ Do anglo-saxónico *capacity market*.

²⁰ Do anglo-saxónico *demand bidding*.

consumo, ou propor uma quantidade de energia que estariam dispostos a reduzir por um dado preço. Nestes programas, caso o consumidor não efetue as reduções contratualizadas na oferta será penalizado;

- Mercado de Serviços de Sistema²¹: programa onde os consumidores licitam, no respetivo mercado, uma quantidade de energia a qual se dispõe a reduzir. Caso seja aceite pelo mercado, a quantidade de energia proposta pelo consumidor é vista como uma reserva a usar nos instantes de maior necessidade. Desta forma, o respetivo consumidor é recompensado nos casos onde a respetiva reserva está em *standby* e nos casos onde se usa a reserva, o consumidor é pago consoante o preço de energia do mercado e consoante a energia utilizada dessa reserva.

Quanto aos programas de DR com base em preços, estes usam variações de preço de modo a promover alterações no consumo energético dos consumidores (Shareef et al., 2018). Normalmente, estas variações de preço correspondem a um aumento do preço nos instantes onde existem picos de carga, sendo que o consumidor é que decide se altera ou não o consumo, de modo a não aumentar o seu custo de energia. Neste tipo de programa de DR existem três esquemas de preços:

- Tempo de Uso²²: este é o mais comum dos programas de DR com base em preços, onde consiste em dividir um respetivo dia em duas ou mais partes, associando a cada uma das partes um respetivo preço. Desta forma, os preços são mais elevados nas horas de pico de carga e mais baixos nas restantes horas, encorajando os consumidores a consumir menos durante as horas de pico. É de realçar, que estes preços são definidos consoante a hora do dia, o dia da semana e a estação do ano;
- Preço de Pico Crítico²³: este esquema, tem com base a estrutura do Tempo de Uso, contudo o preço associado às horas de pico, é um valor significativamente mais elevado do que o normal. Isto aplica-se em instantes onde a rede está num estado crítico ou quando o preço de energia no mercado grossista está muito elevado;
- Preço em Tempo Real²⁴: este esquema é o mais flexível, onde o preço da eletricidade varia de hora em hora, refletindo, de uma certa forma, o respetivo preço do mercado de eletricidade grossista. Os respetivos consumidores são notificados destas variações com um dia ou uma hora de antecedência.

Na literatura atual, verificam-se diversos estudos no contexto da DR, como por exemplo, o estudo apresentado por Jacobowitz et al., onde estes propuseram um modelo baseado em DR que usa um algoritmo de equidade²⁵ para apoiar os sistemas de distribuição durante uma emergência numa

²¹ Do anglo-saxónico *ancillary service market*.

²² Do anglo-saxónico *time-of-use*.

²³ Do anglo-saxónico *critical peak pricing*.

²⁴ Do anglo-saxónico *real-time pricing*.

²⁵ Do anglo-saxónico *fairness*.

área residencial (Jacubowicz et al., 2022). As respectivas simulações deste estudo demonstraram que o respetivo algoritmo de equidade é promissor e que poderia servir de base para novos progressos na área. Neste contexto, também há estudos que apresentam modelos, baseados em DR, para apoiar os agregadores responsáveis pelo planeamento de eventos de DR em áreas residenciais. Em (de Souza Dutra & Alguacil, 2023), é proposta uma estrutura de otimização com o objetivo de preservar a privacidade dos dados dos *prosumers* e a equidade da distribuição de incentivos. As simulações obtidas neste estudo demonstraram a eficiência da estrutura proposta em comparação com outros trabalhos do mesmo contexto. Da mesma forma, outros estudos, como (Jing et al., 2020), propuseram modelos de DR baseado em transações *peer-to-peer* para otimizar a equidade do comércio de energia entre *prosumers* comerciais e residenciais. O modelo deste estudo foi testado com uma comunidade com 2.000 *prosumers*, onde os resultados demonstraram que é possível reduzir o custo cerca 4,9 %, mantendo a equidade do comércio de energia.

2.6.3. ENERGIA TRANSITIVA

O conceito de TE, apesar de ser relativamente novo, tem vindo a ficar cada vez mais proeminente em modelos que procuram controlar o equilíbrio entre a oferta e a procura de energia, beneficiando economicamente os consumidores (Lezama et al., 2019). Na literatura é possível verificar a existência de diversas definições do conceito de TE, sendo que estas variam consoante o contexto onde se aplica. Uma das definições mais relevantes é a definição proposta por *GridWise Architecture Council* sendo a mais aceiteada por vários autores (Abrishambaf et al., 2019), onde define TE como:

“Um sistema de mecanismos económicos e de controlo que permite o equilíbrio dinâmico entre a oferta e a procura em toda a infraestrutura elétrica, usando valor como parâmetro operacional chave.” (GridWise, 2015)

Esta definição em português, foi livremente traduzida pelo autor a partir do seguinte texto original em língua inglesa:

“A system of economic and control mechanisms that allows the dynamic balance of supply and demand across the entire electrical infrastructure using value as a key operational parameter.” (GridWise, 2015)

Segundo (Zia et al., 2020), da definição anterior é possível constatar que “system” representa uma rede formada por vários elementos que seguem um conjunto de regras, onde cada elemento pode ter objetivos individuais e/ou sociais. O “dynamic balance of supply and demand”, refere-se à constante mudança da oferta e da procura, onde estes, caso não sejam controlados, podem resultar em impactos negativos à infraestrutura das redes elétricas. O “value”, caracteriza a recompensa que os participantes obtêm do mercado ao consumirem e comercializarem energia.

Desta forma, sistemas que se baseiam neste conceito implementam diversos métodos, como o de DR e mercados locais, que integram os consumidores. A Figura 5 demonstra um exemplo de um sistema de TE constituído por vários elementos, como consumidores, operadores de sistema,

produtores e reguladores. É de realçar que este sistema é estruturado em quatro camadas distintas, sendo estas a residencial, microrrede, local e regional.

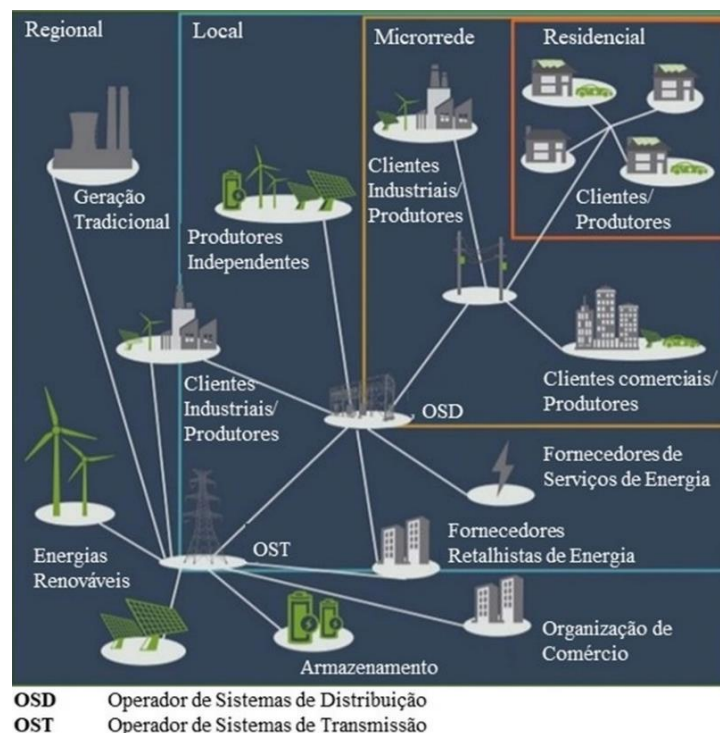


Figura 5. Exemplo de um sistema de TE. Adaptado de (Knight, 2016).

A primeira camada, a residencial, representa os consumidores que podem, ou não, produzir energia, onde estes ou vendem os excessos produzidos, caso os tenham, ou comprem energia a uma, ou várias, fontes. No que respeita à camada microrrede, esta representa o controlo e a gestão feita ao nível dos participantes, possibilitando o fornecimento de flexibilidade às camadas superiores. Quanto à camada local, esta contém novos serviços e oportunidades que podem ser fornecidos aos participantes que participam nos mercados de energia. Por fim, a camada regional, representa a interoperabilidade entre os mercados regionais e locais, onde o aumento deste possibilita que a coordenação dos recursos energéticos melhore a eficiência e a confiabilidade.

É de realçar que a eficiência destes sistemas depende fortemente de entidades como os operadores de sistemas de distribuição e transmissão, onde estes são posicionados entre duas camadas de forma a possibilitar a interoperabilidade entre os participantes do mercado (Abrishambaf et al., 2019). Na Figura 5, verifica-se ainda que o operador de sistemas de distribuição está no centro deste sistema, visto que este se responsabiliza pela conexão entre os agentes dos mercados retalhistas e grossistas, como também por controlar o balanço da procura e da oferta de energia ao nível da distribuição.

Tendo em conta a análise efetuada, é possível concluir que estes sistemas têm um grau de complexidade elevado, sendo necessário a existência de gestão energética eficiente a nível da distribuição. Segundo (Kok & Widergren, 2016), os sistemas que se baseiam em TE podem ser divididos em quatro quadrantes, como se pode observar na Figura 6, onde cada um destes possui as suas vantagens e desvantagens.

No que respeita ao Controlo Hierárquico, este consiste num sistema centralizado que usa programas típicos de DR que usam sinais emitidos pela rede elétrica para ligar ou desligar um ou vários dispositivos dos consumidores. Estes programas de DR são dos mais simples e eficazes a nível de controlo, contudo o conforto do consumidor não é considerado, interferindo com a autonomia energética do mesmo. Da mesma forma, este quadrante não permite que um consumidor alcance o seu potencial devido ao facto que os programas de DR tidos em consideração só permitem comutar o estado dos dispositivos.

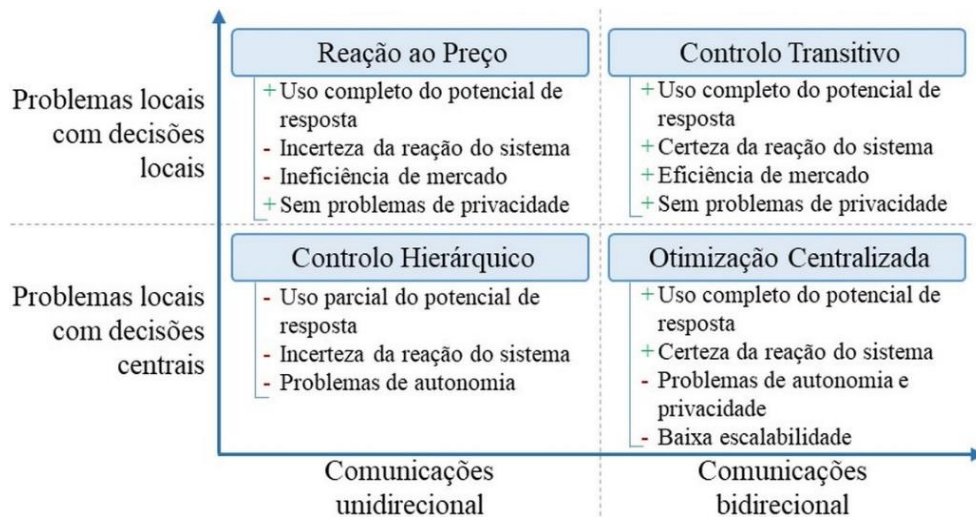


Figura 6. Matriz de gestão de energia adaptada de (Kok & Widergren, 2016).

Quanto ao quadrante Otimização Centralizada, esta também se baseia num sistema centralizado como o quadrante anterior, contudo usa comunicação bidirecional. Desta forma, o otimizador responsável por um sistema constituído por um conjunto de consumidores, consoante os dados que obtém e os objetivos previamente estabelecidos, tenta otimizar todos os recursos disponíveis. Este quadrante, adicionalmente à abordagem de Controlo Hierárquico, consegue usufruir de todo o potencial dos dispositivos dos consumidores, contudo o problema da autonomia ainda se mantém. É também notável que com a comunicação bidirecional surge, por um lado, um novo problema relacionado com a privacidade dos dados dos respetivos consumidores. Por outro lado, a comunicação de todos os dados dos consumidores para uma só central limita a escalabilidade desta abordagem, visto que o sistema central tem de atualizar cada vez que equipamento mude localmente.

A abordagem Reação ao Preço possibilita aos consumidores terem controlo e responsabilidade sobre os seus dispositivos, através de controladores inteligentes, onde estes, consoante a sinalização unilateral de preços que recebem e modelam o respetivo consumo. Desta forma, estes controladores têm de otimizar economicamente os recursos do consumidor, onde aumentam o consumo quando recebem sinais a indicar que os preços estão baixos ou diminuem o consumo quando os preços sinalizados são elevados. Assim, tendo em conta ao que foi descrito, esta abordagem é relativamente simples de ser aplicada como também possibilita a manutenção da privacidade dos dados, pois o controlo é efetuado localmente, não existindo a necessidade de transmitir dados.

Por fim, o último quadrante, Controlo Transitivo, usa um sistema de comunicação bidirecional que se baseia em preços e em quantidades de energia, permitindo oferecer todos os benefícios dos restantes quadrantes. Esta abordagem possibilita a comunicação, a interação e a negociação entre os consumidores e os restantes participantes da SG, tais como operadores de redes de distribuição.

2.7. SUSTENTABILIDADE, SEGURANÇA E EQUIDADE

Desde que o Acordo de Paris entrou em vigor em 2016, diversos países cooperaram entre si de modo concretizar o objetivo de longo prazo de “*manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e em envidar esforços para limitar o aumento a 1.5 °C*” (United Nations, 2016). De modo a atingir o respetivo objetivo, a UE, estabeleceu diversas estratégias e metas climáticas, sendo as mais relevantes a estrutura climática e energética para 2030²⁶ (Comissão Europeia, 2014), prévia ao Acordo de Paris, e a estratégia de longo prazo de 2050²⁷ (Comissão Europeia, 2018).

No que respeita à primeira estratégia, prevista para 2030, esta tem como principais metas, até 2030, de pelo menos, melhorar em 32,5 % a eficiência energética do consumo, alcançar 32 % de quota de energia renováveis e reduzir em 40 % as emissões de CO₂, em comparação com os níveis de referência de 1990. No caso da segunda estratégia, prevista para 2050, esta tem como meta estabelecer uma economia com zero emissões de CO₂ até 2050, sendo que esta meta está diretamente relacionada com o objetivo do Pacto Ecológico Europeu apresentado pela Comissão Europeia, em 2019 (Comissão Europeia, 2019). Com esta pacto, a primeira Lei Europeia do Clima foi proposta pela Comissão Europeia, em 2020, entrando em vigor, em 2021 (European Climate Law, 2021). De uma forma geral, esta lei, por um lado, reforça a importância da meta de atingir a neutralidade carbónica até 2050, estabelecendo-a como juridicamente vinculativa, de modo a que todas as políticas da UE possam contribuir para a concretização desta meta estratégica (Parlamento Europeu e do Conselho, 2020). Por outro lado, esta lei possibilita aumentar a ambição da meta estratégica de reduzir as emissões de CO₂ até 2030, de 40 % para 55 %.

Considerando a análise efetuada anteriormente, pode-se verificar a proeminência dada às alterações climáticas, especialmente causadas pela emissão de CO₂. Neste contexto, atualmente tem-se vindo a verificar, a nível global, a elaboração e execução de medidas em diferentes setores de modo a combater este problema. Contudo, segundo a Agência Internacional da Energia²⁸, desde 2019 a 2022, as emissões globais de CO₂ da maioria dos setores tem vindo a aumentar (IEA, 2023), sendo o setor de energia elétrica responsável pela maior parte das emissões, como se pode observar na Figura 7.

²⁶ Do anglo-saxónico 2030 climate & energy framework.

²⁷ Do anglo-saxónico 2050 long-term strategy.

²⁸ <https://www.iea.org/>

Na Figura 7, por um lado, pode-se verificar que as emissões de CO₂ diminuíram em todos os setores durante o ano de 2020, refletindo o começo da pandemia de SARS-CoV-2. Por outro lado, também se pode verificar que, durante o respetivo período mencionado, o único setor a diminuir as emissões de CO₂ foi o setor de transporte, sendo que isto acontece devido ao aumento das vendas globais dos veículos elétricos (IEA, 2021). Desta forma, é necessário tomar medidas de modo a impedir que este aumento continue.

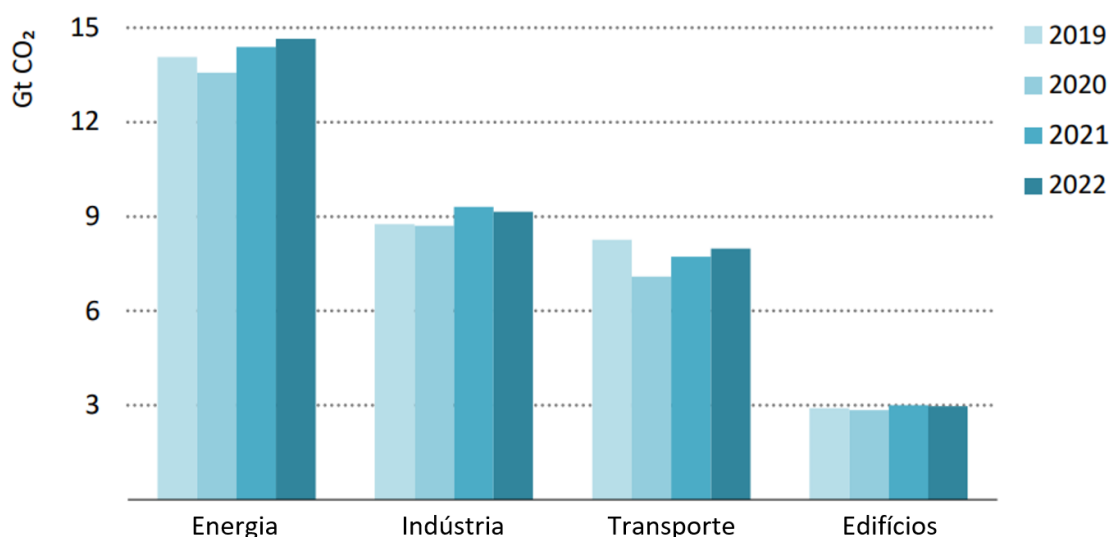


Figura 7. Emissões Globais de CO₂, por sector, entre 2019 e 2022. Adaptado de (IEA, 2023).

No contexto do setor de energia, uma das possíveis formas de reduzir as emissões de CO₂, é a implementação de SGs, visto que estas permitem o desenvolvimento e implementação de soluções que controlam os recursos energéticos, de forma eficiente e sustentável (Faria et al., 2019). Uma dessas soluções, é a comunidade de energia, apresentada na Secção 2.2, onde esta, de uma forma geral, possibilita que uma comunidade se torne descentralizada e sustentável, permitindo a colaboração e a participação ativa de entidades mais pequenas, como os consumidores e os *prosumers*, em modelos de gestão de energia (de São José et al., 2021). Contudo, a eficiência destes modelos de gestão de energia, depende da partilha e acesso aos dados dos consumidores. Assim, de modo a cumprir com o Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (RGPD), é necessário proteger e respeitar a privacidade e manter a segurança dos dados dos consumidores (Parlamento Europeu e do Conselho, 2016). Por fim, um outro aspeto que é preciso ter em consideração nos modelos de energia, é a equidade, visto que pode influenciar na disposição dos consumidores a querer participar no balanço da comunidade (Guo et al., 2022). Segundo o dicionário de Cambridge e da Porto Editora, a equidade é definida como:

"a qualidade de tratar as pessoas igualmente ou de uma forma que seja correta ou razoável" (Cambridge, n.d.)

"qualidade do que é justo, imparcial e respeitador da igualdade de direitos de cada um" (Porto Editora, n.d.)

A primeira definição em português, foi livremente traduzida pelo autor a partir do seguinte texto original em língua inglesa:

“the quality of treating people equally or in a way that is right or reasonable”
(Cambridge, n.d.)

Desta forma, a integração da equidade em modelos de gestão de energia é crucial, visto que permite considerar as diferentes características e limitações dos consumidores, fazendo com que estes tenham mais oportunidades de contribuir para o equilíbrio dos recursos energéticos da comunidade (Li et al., 2021).

Em suma, de modo a ir em conta com o objetivo do Acordo de Paris, é preciso atuar devidamente nos diferentes setores, em particular, no setor de energia, pois este é um dos principais responsáveis pela emissão de CO₂. Neste contexto, uma possível maneira para combater este problema, seria a integração do conceito das comunidades de energia. Estas comunidades, com o auxílio de modelos de gestão de energia, por um lado, têm a capacidade de se tornar descentralizadas e sustentáveis e, por outro lado, permitem que os respetivos membros da comunidade colaborem para o balanço dos recursos energéticos da mesma, contribuindo, conseqüentemente, para a redução das emissões de CO₂. Todavia, a eficiência dos modelos de gestão de energia depende fortemente da participação dos membros da comunidade, sendo importante respeitar a privacidade dos seus dados como também manter a equidade na respetiva comunidade. É também importante realçar que, a contribuição para a reduzir as emissões de CO₂, vai em conta com algumas metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas²⁹, nomeadamente as metas dos objetivos:

- 7 – “Energias Renováveis e Acessíveis”:
 - Meta 7.1 – “Até 2030, assegurar o acesso universal a serviços de energia modernos, fiáveis e a preços acessíveis”;
 - Meta 7.2 – “Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global”;
 - Meta 7.3 – “Até 2030, duplicar a taxa global de melhoria da eficiência energética”;
 - Meta 7.a – “Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso às tecnologias e investigação sobre energias limpas, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa”.
- 11 – “Cidades e Comunidade Sustentáveis”:
 - Meta 11.6 – “Até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita nas cidades, incluindo prestar especial atenção à qualidade do ar, à gestão de resíduos municipais e de outros resíduos”.

²⁹ <https://ods.pt/ods/>

2.8. CONCLUSÕES

Neste capítulo é relatado o estudo prévio de diferentes conceitos e tecnologias que podem suportar a elaboração deste trabalho de dissertação. Com este estudo, por um lado, é possível verificar que, na atualidade, o consumidor pode vir a desempenhar um papel crucial na rede elétrica, possibilitando o aumento da flexibilidade disponível na rede. Por outro lado, também é possível verificar que, com a cooperação entre as tecnologias de IoT e SG, podem surgir novas oportunidades, especialmente no contexto dos edifícios inteligentes. Os edifícios inteligentes, com o auxílio de sistemas de gestão de energia, possibilitam gerir eficientemente os recursos energéticos, tendo em consideração o conforto e a segurança do consumidor. Neste contexto, os dispositivos de IoT são cruciais, visto que possibilitam efetuar a respetiva monitorização e controlo dos dados de equipamentos domésticos. Além disso, estes dispositivos podem participar diretamente em eventos de TE e de DR, podendo fornecer benefícios económicos e energéticos aos consumidores. Contudo, de modo que os consumidores participem ativamente nos respetivos eventos, é preciso, por um lado, cumprir o RGPD, considerando a privacidade e a segurança dos dados dos consumidores, e, por outro lado, considerar as suas características e limitações de forma que estes tenham oportunidades para contribuir no evento.

3. SOLUÇÃO PROPOSTA

Esta secção apresenta o algoritmo de criação de comunidade de energia e o modelo de Resposta dos Consumidores (DR), criado para uma comunidade de energia. Inicialmente, explica-se o processo usado para a criação da comunidade de energia que será considerada no caso de estudo e posteriormente serão detalhadas as diferentes etapas do respetivo modelo de gestão de energia baseado em programas de DR. Por fim, descreve-se os diferentes tipos de participação que os membros da comunidade podem optar por escolher para participar nos programas e respetivos eventos de DR.

O modelo de DR proposto, tem como principal objetivo planejar eventos de DR de modo a gerir eficientemente os recursos energéticos de uma comunidade de energia, através da participação ativa dos membros da comunidade. Os membros da comunidade, consoante o tipo de participação, podem contribuir para os eventos de DR com a própria flexibilidade, mantendo a privacidade dos seus dados partilhados. No contexto deste trabalho de dissertação, considera-se que a flexibilidade dos membros da comunidade é aplicada por meio de reduções ou deslocamento do consumo.

3.1. CRIAÇÃO DE UMA COMUNIDADE DE ENERGIA

De forma a permitir o teste e validação do modelo de DR proposto nesta dissertação, assim como as suas diversas configurações, foi inicialmente idealizado e implementado um algoritmo de geração de comunidades baseado em dados reais de consumo que permite a desagregação por equipamentos (isto é, dispositivos internet das coisas (IoT)). Relativamente ao processo de criação de uma comunidade de energia, este consiste em gerar uma comunidade de energia, consoante os dados de entrada fornecidos ao Algoritmo de Geração de Comunidades (AGC), como se pode ver através da Figura 8. De forma sucinta, o AGC tenta alocar as diversas cargas disponíveis para cada

perfil de consumo fornecido tendo em conta os modos de alocação e aos intervalos de funcionamento das cargas e a capacidade do perfil de consumo do respetivo edifício. Desta forma, o AGC, partindo do número de perfis de consumo de edifícios disponíveis, permite gerar uma comunidade com N consumidores. No contexto deste trabalho, considera-se que os modos de alocação das cargas podem ser obrigatórios (isto é, cargas que precisam de estar constantemente ligadas numa casa, como por exemplo, um frigorífico) ou aleatórias (isto é, carga que podem ou não existir numa habitação, como por exemplo, uma máquina de lavar loiça). Relativamente aos intervalos de funcionamento, considera-se que cada carga pode ser alocada, por dia, em um ou mais intervalos que têm identificadores numéricos, como: 1 (de manhã), 2 (à tarde) e 3 (à noite).

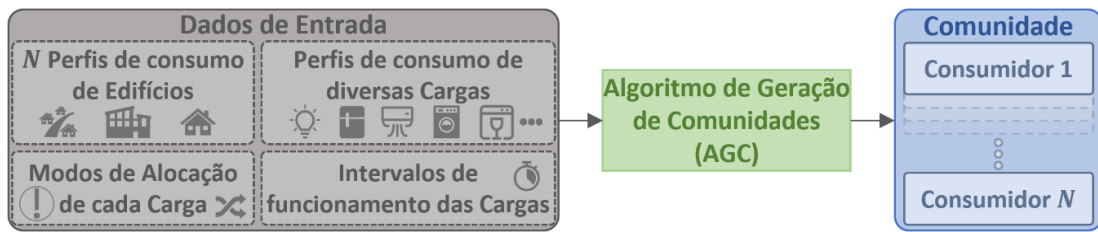


Figura 8. Processo de criação de uma Comunidade de Energia.

3.1.1. ARQUITETURA DO AGC

De modo a facilitar a compreensão do AGC, é apresentada a arquitetura ilustrada na Figura 9, realçando as diferentes etapas que decorrem durante a execução do algoritmo. No contexto deste trabalho, considera-se que os respetivos perfis de consumo de edifícios disponíveis têm o mesmo número de dias e de períodos de leitura dos dados, como por exemplo, perfis de um ano com períodos de 15 minutos, ao fim de um ano, perfaz 35.040 períodos. Desta forma, como se pode ver na Figura 9, o AGC, considerando os respetivos dados de entrada, começa por criar uma matriz auxiliar para guardar os dados do novo consumidor x , M_{NC} , onde a esta matriz é atribuído um respetivo perfil de consumo de um edifício.

Para cada dia pertencente ao número de dias que os perfis de consumo do edifício têm, representado por N_D , verifica-se quais as cargas disponíveis é que vão ser alocadas ao novo consumidor x . Para tal, primeiro verifica-se se o modo de alocação da carga y é “Aleatório”, caso seja, então efetua-se um aleatório de modo a verificar se a respetiva carga y será, ou não, alocada, onde deste aleatório resulta uma variável, *Sortear*, com um valor lógico. De seguida, verifica-se se o modo de alocação da carga y é “Obrigatório” ou se a variável *Sortear* é verdadeiro. No caso de se não verificar esta condição, significa que a carga y não será alocada e passa-se para a próxima carga disponível. Caso contrário, continua-se com o processo de alocar um perfil de consumo da carga y , onde para tal primeiro sorteia-se que intervalos esta carga pode ser alocada, através da função *SortearIntervalosFuncionamento()*, onde esta função devolve um vetor, *Intervalos*, com o(s) identificador(es) dos(s) intervalo(s) de funcionamento. Posteriormente, com as funções *ContarPerfisDaCarga()* e *SortearOrdemPerfisCarga()*, obtém-se, respetivamente, o número total de perfis de consumo disponíveis na carga y , $N_{PerfisDaCarga}$, e uma matriz com os perfis de consumo disponíveis da carga y ordenados de forma aleatória, *PerfisOrdemSorteada*.

Algoritmo de Geração de Comunidades (AGC):

Denotações:

Edifícios: Matriz de 2D com os Perfis de Consumo de Edifícios → [Perfis, Períodos]
Cargas: Matriz de 3D com os Perfis de Consumo de cada Carga disponível → [Carga, Perfis, Períodos]
InterFunc: Matriz de 3D com os Intervalos de Funcionamento de cada Carga → [Carga, Intervalos, Períodos]
Modos: Matriz de 2D com os Modos de Alocação das Cargas (Aleatório, Obrigatório) → [Carga, Modo]
N_PE: Número de Perfis de Consumo de Edifícios disponíveis
N_C: Número de Cargas disponíveis
N_D: Número de Dias que os Perfis de Consumo de Edifícios têm

```
1:Procedimento AGC(Edifícios, Cargas, InterFunc, Modos, N_PE, N_C, N_D)
2:   var ct, d, i, x, y: Inteiro
3:   Para x de 1 até N_PE faça
4:     M_NC[x] = NovoConsumidor(Edifícios[x]) //Matriz que guarda os dados do Novo Consumidor x
5:     Para d de 1 até N_D faça
6:       y = 1
7:       Enquanto (y ≤ N_C) faça
8:         Se (Modos[y] == "Aleatório") então
9:           //Sortear se a Carga y vai ser alocada no Consumidor
10:          Sortear = SortearAlocacaoCarga(Cargas[y])
11:        FimSe
12:        Se (Modos[y] == "Obrigatória" OU Sortear == Verdadeiro) então
13:          //Sortear Intervalos de Funcionamento da Carga y
14:          Intervalos = SortearIntervalosFuncionamento(InterFunc[y])
15:          N_PerfisDaCarga = ContarPerfisDaCarga(Cargas[y])
16:          //Sortear a ordem de seleção dos perfis de Carga y
17:          PerfisOrdemSorteada = SortearOrdemPerfisCarga(Cargas[y])
18:          ct = 1, i = 1
19:          Enquanto (i ≤ tamanho(Intervalos) E ct ≤ N_PerfisDaCarga) faça
20:            Perfil = PerfisOrdemSorteada[ct]
21:            //Verificar se é possível alocar o Perfil da Carga y
22:            Se (VerificarAlocacaoPerfil(M_NC[x][d], Perfil, Intervalos[i] ≥ 1) então
23:              M_NC[x][d] = AlocarPerfil(M_NC[x][d], Perfil, Intervalos[i])
24:              //Atualizar o Consumo disponível do Consumidor
25:              M_NC[x][d] = AtualizarDadosConsumidor(M_NC[x][d])
26:              i = i + 1, ct = 1
27:            Senão
28:              ct = ct + 1 //Passar para o próximo perfil da Carga
29:            FimSe
30:          FimEnquanto
31:        FimSe
32:        y = y + 1 //Passar para a próxima Carga
33:      FimEnquanto
34:    FimPara
35:    Comunidade = GuardarConsumidor(M_NC[x][d])
36:  FimPara
37:  Devolver Comunidade
38:FimProcedimento
```

Figura 9. Pseudocódigo do AGC.

Assim, considerando o tamanho do vetor *Intervalos* e o *N_PerfisDaCarga*, averigua-se a possibilidade de alocação do perfil de consumo da carga *y* no consumidor *x* durante o respetivo intervalo do dia *d*, através da função *VerificarAlocacaoPerfil()*. Esta função, considerando a duração do *Perfil*, isto é, o número de períodos, verifica em que instantes este pode ser alocado dentro do respetivo intervalo. Por exemplo, considerando períodos de 1 hora, num intervalo de funcionamento da manhã, entre as 08:00 e as 12:00, verifica-se se um *Perfil* com duração de 1 hora, pode ser alocado nos instantes entre as: 08:00 e as 09:00, 09:00 e as 10:00, 10:00 e as 11:00 e 11:00 e as 12:00.

Após a esta verificação, a respetiva função ou devolve, de forma aleatória, um dos instantes, caso haja mais do que um, ou devolve simplesmente o único instante encontrado. Desta forma, caso se verifique que haja um instante para alocar o *Perfil*, primeiro, é feito, através das funções *AlocarPerfil()* e *AtualizarDadosConsumidor()*, a alocação do Perfil durante o respetivo intervalo e a atualização do consumo disponível do consumidor, respetivamente, e de seguida, passa-se ou para o próximo intervalo, caso haja, ou para a próxima carga y . No entanto, se não for possível alocar, passa-se para o próximo perfil de consumo da carga y . É de realçar que é possível que uma carga não seja alocada devido ao facto de todos os seus perfis de consumo excederem o consumo disponível do consumidor em causa. Desta forma, após ter sido feito a alocação dos perfis de consumo das cargas disponíveis durante os respetivos intervalos do dia d no consumidor x , finaliza-se o processo de criação de um consumidor, guardando os dados do respetivo novo consumidor numa matriz *Comunidade*, através da função *GuardarConsumidor()*. No fim do AGC, a matriz *Comunidade* terá os dados da nova comunidade criada com N_{PE} consumidores.

3.1.2. IMPLEMENTAÇÃO DO AGC

Inicialmente, o AGC foi desenvolvido na linguagem de programação R, onde considerava-se como dados de entrada 96 perfis de consumo de edifícios residências e apenas 6 tipos de cargas: Aquecedor Elétrico, Frigorífico, Máquina de Lavar Loiça (MLL), Máquina de Lavar Roupa (MLR), Máquina de Secar Roupa (MSR) e Máquina de Lavar e Secar Roupa (MLSR). A Figura 10 ilustra um exemplo de uma comunidade de energia gerada pelo AGC, com os respetivos dados mencionados. Neste contexto, a “Carga Rígida” corresponde ao resto do consumo disponível ao qual não foi alocado nenhuma carga.

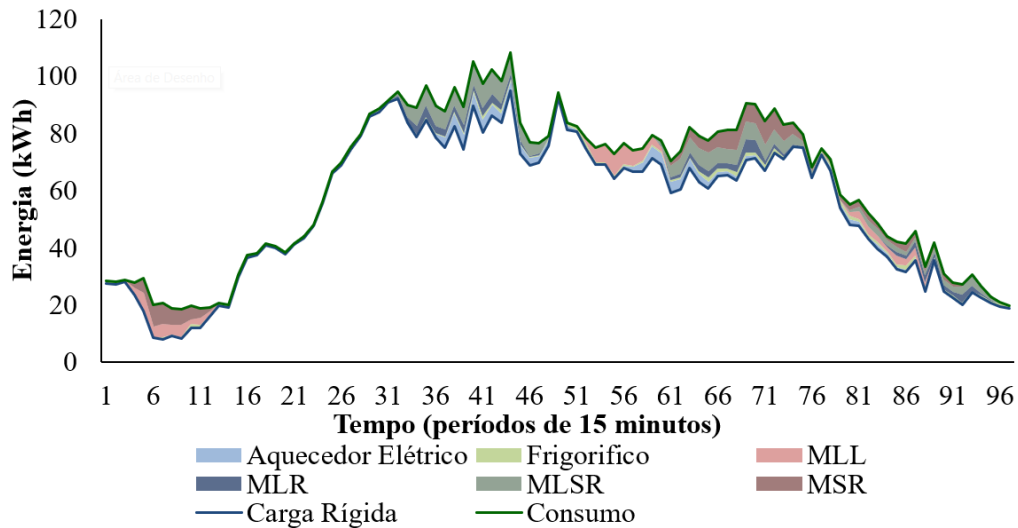


Figura 10. Exemplo de uma Comunidade gerada pelo AGC.

Ao longo do trabalho de dissertação, o AGC foi convertido para Python como também foi alterado e melhorado em certos aspetos de modo que as comunidades de energia geradas fossem mais realistas e equilibradas. As melhorias são: i) a consideração das diferentes potências contratadas dos edifícios, ii) a adição de novos perfis de consumo das cargas existentes como também de novas cargas e iii) a integração de geração fotovoltaica. Estas melhorias, de uma certa forma, permitem que a

geração de comunidades seja mais diversificada, contribuindo para a geração de comunidades para diferentes cenários. É de salientar que o AGC, versão de Python que teve por base a versão em R desenvolvida pelo autor desta dissertação, foi apresentado e publicado num artigo de revista (Goncalves et al., 2022b) com base em dados reais de consumo de edifícios e geração fotovoltaica durante o período de um ano (Goncalves et al., 2022a).

3.2. MODELO DE DR PARA UMA COMUNIDADE DE ENERGIA

O principal foco desta dissertação foi a conceção, implementação, teste e validação de um modelo de gestão de energia de uma comunidade de energia, sendo este baseado na aplicação de programas de DR dentro da comunidade, permitindo aos membros da comunidade participarem ativamente no balanço energético e sustentabilidade da comunidade. A Figura 11 ilustra o diagrama do modelo de gestão de energia proposto, onde é visível as suas seis etapas, que serão descritas nesta secção. De uma forma geral, este modelo começa por efetuar a previsão para o dia seguinte dos recursos energéticos da comunidade em questão. De seguida, pela análise das previsões obtidas, verifica-se se existem oportunidades para atuar eventos de DR, isto é, períodos onde se precisa reduzir o consumo da comunidade com a flexibilidade dos membros da comunidade para se atingir um equilíbrio entre o consumo e a geração da comunidade. De seguida o modelo procede com a classificação dos membros da comunidade que pretendem participar e o convite aos mesmos. Durante o evento de DR, o modelo proposto possui ainda um mecanismo de monitorização e correção para prevenir eventuais erros causados pela previsão dos dados.

A classificação dos membros da comunidade baseia-se em algoritmos de agrupamento³⁰ e considera como dados de entrada os dados históricos dos membros da comunidade e a respetiva flexibilidade proposta na comunicação prévia ao evento de DR, ou seja, na previsão de flexibilidade. Com a classificação dos membros da comunidade, determina-se quais são os membros da comunidades que devem ser considerados como participantes principais e como participantes de reserva. De seguida, envia-se os respetivos convites para o evento de DR aos membros da comunidade.

O modelo proposto baseia-se numa arquitetura de IoT que considera duas entidades que cooperam entre si, sendo estas, o gestor da comunidade e os membros da comunidade. Ambas as entidades são capazes de processar dados, sendo o gestor da comunidade o que possui o maior nível de processamento, visto que é responsável pelo planeamento dos eventos de DR. No caso dos membros da comunidade, a estes é-lhes prestado serviços como algoritmos de previsão. É de também realçar que neste modelo considera-se que estas entidades estabelecem um acordo entre si, onde é especificado: se o membro da comunidade deve fornecer uma parte ou toda a flexibilidade disponível para o evento de DR; qual é o tipo de participação utilizado pelo membro da comunidade; se o

³⁰ Do anglo-saxónico *clustering*.

membro da comunidade é obrigado, ou não, a participar no evento de DR quando é convidado; e que aparelhos podem ser controlados e monitorizados.

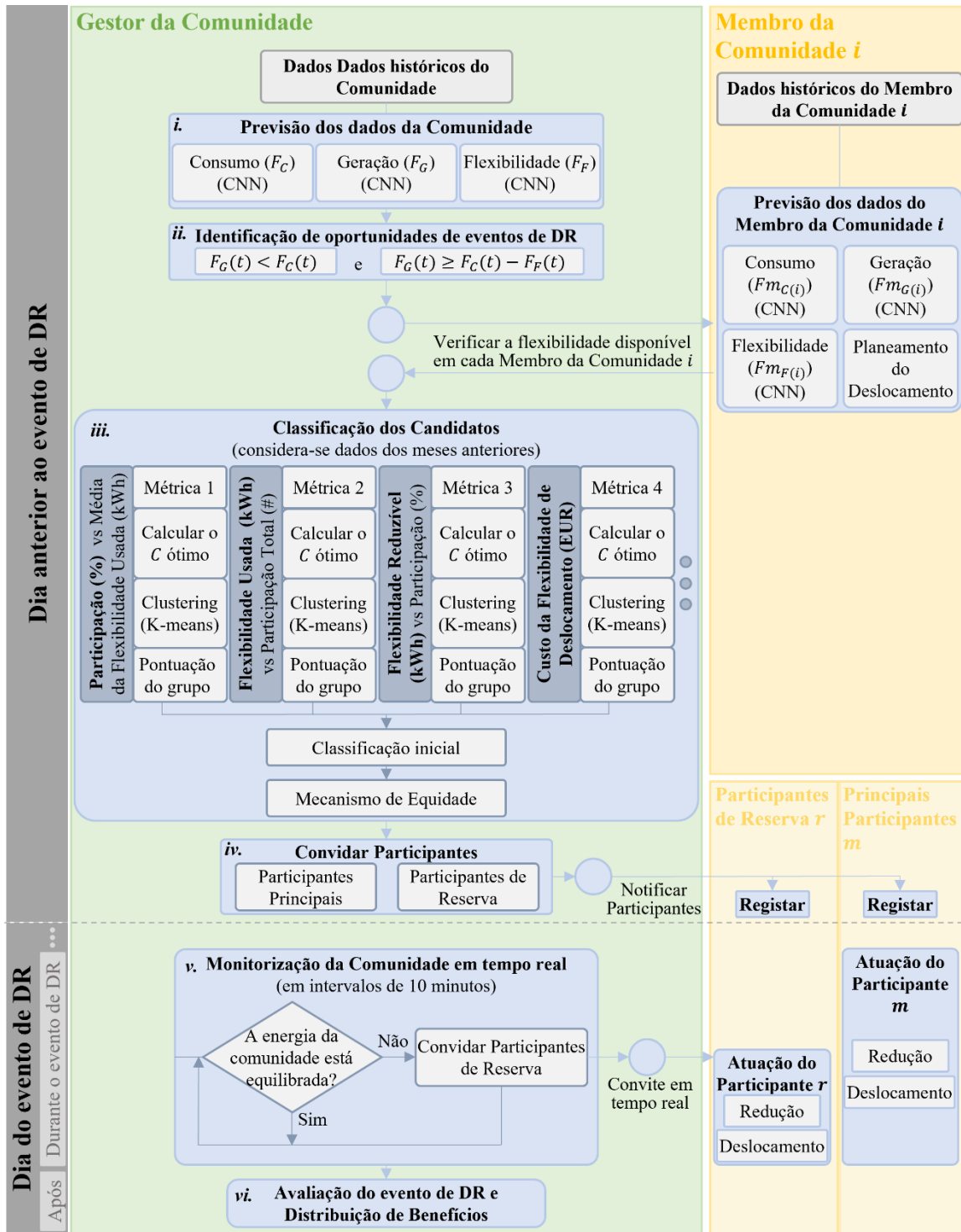


Figura 11. Modelo geral de gestão de energia de uma comunidade de energia.

A arquitetura de IoT que serve de base para a implementação deste modelo foi proposta no projeto de ITEA TIOCPs e pode ser vista na Figura 12, onde se encontram representados os vários módulos de integração de IoTs, serviços de partilha de dados e entidades que compõem o sistema. O modelo proposto de gestão de energia assenta nesta arquitetura e foi também incorporado na

arquitetura final do projeto, estando a ser integrada no piloto Português para um teste e avaliação junto de consumidores reais.

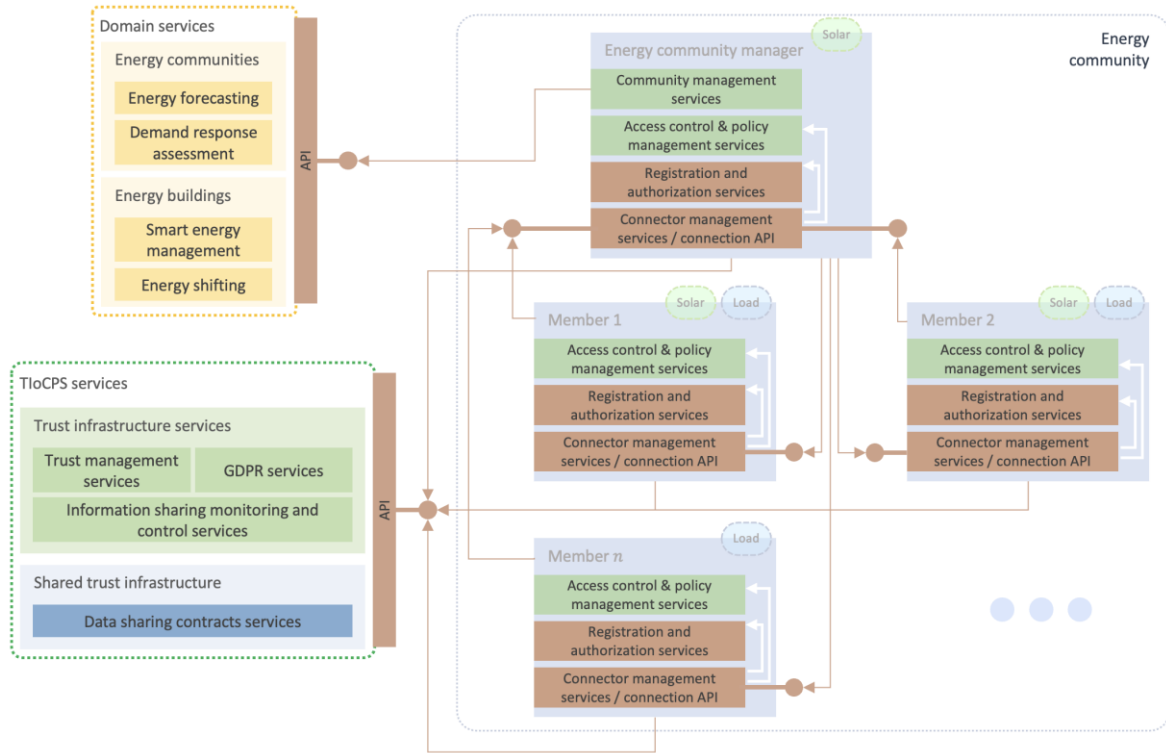


Figura 12. Arquitetura de implementação do projeto TloCPS.

3.2.1. PREVISÃO DOS DADOS DA COMUNIDADE PARA O DIA SEGUINTE

A primeira etapa do modelo consiste em efetuar a previsão para o dia seguinte dos recursos energéticos da comunidade. Na literatura, verifica-se que é benéfico a implementação de algoritmos de previsão, visto que estes podem auxiliar outros modelos a aumentar a sua eficiência, como por exemplo, nos modelos de gestão de energia (B. Teixeira et al., 2021) ou de aplicação de DR (Ponocko & Milanovic, 2018). Deste modo, para esta dissertação foram concebidos modelos de previsão para o dia seguinte de forma a prever o consumo, a geração fotovoltaica e a flexibilidade da comunidade de energia. Estes modelos de previsão para o dia seguinte foram concebidos com o intuito de serem usados como ferramentas auxiliares para o modelo de gestão da comunidade, permitindo uma gestão futura. Tendo em conta ao que foi dito, os modelos de previsão concebidos baseiam-se em redes neuronais convolucionais³¹ (CNN) e foram afinados utilizando diferentes ensaios. A Figura 13 ilustra um exemplo da previsão para o dia seguinte do consumo (F_C), da geração fotovoltaica (F_G) e da flexibilidade (F_F) da comunidade.

³¹ Do anglo-saxónico *convolutional neural networks*.

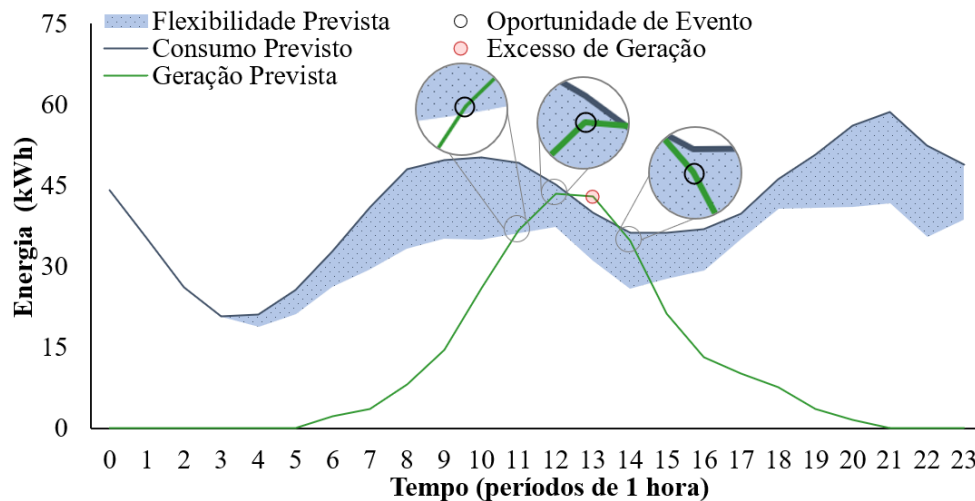


Figura 13. Exemplo de uma previsão dos dados da comunidade com os possíveis eventos de DR.

Para preparar os modelos de CNN, é usado uma base de dados que contém 1 ano de registos históricos dos recursos energéticos da comunidade. Esta base de dados inclui os registos em períodos de 1 hora (ou seja, 8.760 registos) do consumo, da geração e da flexibilidade da comunidade. No caso dos registos de consumo e flexibilidade, apenas são considerados os registos dos dias úteis, isto é, 6.288 registos. Cada um dos modelos CNN concebidos foi treinado com a base de dados dividida em 70 % para treino, 20 % para validação e 10 % para avaliação.

No que respeita aos modelos de CNN, estes possuem três camadas, a de entrada, a oculta e a de saída. Para os modelos de CNN relacionados com o consumo e a flexibilidade, nestes são consideradas 17 entradas na camada de entrada: os dados históricos (por exemplo, o consumo de um ano), 11 variáveis que representam os dados históricos desfasados ($[t+1, \dots, t+7]$ e $[t+25, \dots, t+28]$), uma variável para indicar o dia da semana, e quatro variáveis relacionadas com o data dos dados históricos, para representar os dias ao longo do ano, em duas dimensões. No caso do modelo relacionado com a geração fotovoltaica, este considera os mesmos tipos de dados de entrada que os modelos anteriores, exceto a variável que indica o dia da semana. A Figura 14 ilustra um exemplo da estrutura da CNN concebida para prever o consumo e a flexibilidade da comunidade.

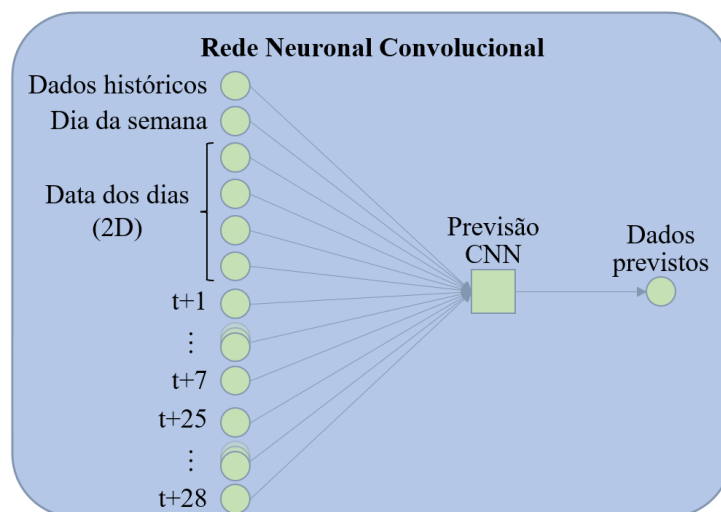


Figura 14. Exemplo da estrutura da rede neuronal convolucional.

Relativamente à camada oculta das CNN, estas são compostas por 256 neurónios e são configuradas através de uma função de ativação linear retificada. Quanto à camada de saída, esta tem um neurónio que representam as 24 horas previstas. Por fim, é de realçar que as CNNs foram treinadas com lotes³² de 32 amostras e o número de épocas³³ foi de 30.

3.2.2. IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE EVENTOS DE DR

Após obter a previsão para o dia seguinte dos recursos energéticos da comunidade, o modelo proposto analisa-os de modo a verificar se existem oportunidades de eventos de DR. No contexto desta dissertação, as oportunidades de eventos de DR correspondem a instantes onde as equações (1) e (2) são verificadas. Ou seja, quando existe um período t onde se verifica que a geração da comunidade não é suficiente para satisfazer o consumo da mesma, e a flexibilidade disponível na comunidade permite a redução do consumo para um valor igual ou inferior ao valor da geração.

$$F_G(t) < F_C(t) \quad (1)$$

$$F_C(t) - F_F(t) \leq F_G(t) \quad (2)$$

Assim, quando estas equações são verificadas num dado período t , é identificado um possível evento de DR, onde é preciso efetuar uma redução com um valor calculado pela equação (3), como se pode ver:

$$Red(t) = F_C(t) - F_G(t) \quad (3)$$

Desta forma, nos casos onde se verifiquem que há eventos de DR, pretende-se convidar os membros da comunidade a participar nestes eventos, de forma a nivelar os recursos energéticos. O exemplo de previsão dos dados da comunidade de energia ilustrado na Figura 13, também permite identificar as possíveis períodos onde pode ocorrer eventos de DR, sendo estes designados como “Oportunidade de Evento”, como também indica períodos com excesso de geração fotovoltaica.

Ao identificarem-se possíveis eventos de DR, o modelo proposto comunica com os membros da comunidade para verificarem quanta flexibilidade podem fornecer durante os respetivos eventos. Os membros de comunidade ao serem contactados, inicialmente, efetuam as previsões para o dia seguinte dos seus recursos energéticos, de modo a averiguar se podem, ou não, participar no possível evento de DR e, posteriormente, respondem com a flexibilidade passível de ser usada durante o evento. Desta forma, o modelo proposto, é capaz de identificar quais são os possíveis candidatos que podem participar no evento de DR, como também identificar a quantidade e o tipo de flexibilidade que os mesmos podem fornecer.

³² Do anglo-saxónico *batches*.

³³ Do anglo-saxónico *epochs*.

3.2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS CANDIDATOS

O próximo passo do modelo proposto consiste em classificar os candidatos de modo a definir a ordem pela qual se vai convidar os mesmos a participar no evento de DR. Esta classificação baseia-se em algoritmos de aprendizagem não supervisionados³⁴. Esta classificação considera como dados de entrada a flexibilidade indicada pelos candidatos na comunicação com o gestor da comunidade, explicada na Secção 3.2.2, e os dados históricos dos mesmos dos últimos dois meses. Os dados históricos dos candidatos que se tem em consideração são a flexibilidade usada nos eventos de DR passados, a percentagem de participação, o número total de participações em eventos de DR, e o número total de vezes que o candidato foi chamado a participar. Desta forma, com esta variedade de dados é possível criar M métricas que permitem avaliar os candidatos tendo em conta várias variáveis de avaliação. No contexto deste trabalho, cada métrica m consiste em avaliar dois tipos de dados dos candidatos, através da aplicação de um algoritmo de agrupamento *K-means*. Em cada métrica m , dos dois tipos de dados considerados, define-se um deles como parâmetro de avaliação, onde este terá maior relevância na pontuação resultante da métrica.

Para este trabalho de dissertação são consideradas quatro métricas ($M = 4$) para avaliar os candidatos. As duas primeiras métricas permitem avaliar os dados históricos dos candidato, enquanto as duas últimas avaliam as flexibilidade que os candidatos indicaram durante a comunicação com o gestor da comunidade. É de realçar que a métrica 3 é orientada para a flexibilidade por reduções, enquanto a métrica 4 é orientada para a flexibilidade por deslocamento. As métricas são as seguintes:

- **Métrica 1:** considera a percentagem de participação do candidato versus a média da flexibilidade usada pelo candidato nos eventos passados, em que o parâmetro de avaliação é a percentagem de participação do membro da comunidade;
- **Métrica 2:** considera o número total de participações do candidato versus a média da flexibilidade usada pelo candidato nos eventos passados, em que o parâmetro de avaliação, neste caso, é a flexibilidade usada;
- **Métrica 3:** considera a flexibilidade por redução anunciada pelo candidato na comunicação (explicada na Secção 3.2.2) versus a percentagem de participação do candidato, em que a respetiva flexibilidade obtida é o parâmetro de avaliação;
- **Métrica 4:** considera o custo da distribuição da flexibilidade por deslocamento fornecida pelo candidato. Este custo é calculado através de uma tarifa portuguesa tetra-horária com os quatro períodos subsequentes: pico, cheia, super vazio, e vazio normal. Esta métrica penaliza a flexibilidade que é deslocada para períodos de pico.

Como cada métrica m baseia-se no algoritmo de agrupamento *K-means*, primeiro é preciso determinar o número ideal de C grupos³⁵, onde isto pode ser determinado com o método coeficiente

³⁴ Do anglo-saxónico *unsupervised learning algorithms*.

³⁵ Do anglo-saxónico *clusters*.

de Silhueta³⁶. Posteriormente, aplica-se a métrica m , onde desta resultam C grupos, sendo que cada um destes possui um centroide de duas coordenadas do tipo (x, y) . A Figura 15 ilustra um exemplo de um resultado da métrica 1, onde 4 grupos foram criados. As respectivas áreas dos grupos foram criadas por questões ilustrativas de modo a realçar melhor os elementos de cada um dos grupos, não sendo então uma medição real.

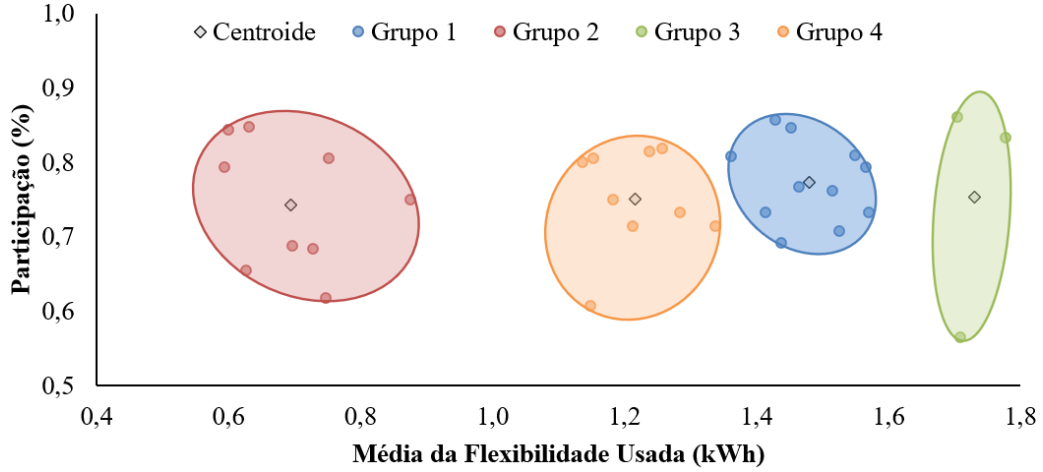


Figura 15. Exemplo de uma métrica baseada no algoritmo de agrupamento K-means.

Após obter estes C grupos por métrica m , calcula-se as respectivas pontuações de cada um deles. Tal é feito tendo em conta o parâmetro de avaliação mencionado anteriormente. Este parâmetro de avaliação corresponde à coordenada do centroide à qual se dará maior importância. Desta forma, após escolher-se o parâmetro de avaliação, é possível calcular a pontuação de cada grupo c da métrica m , através de um sistema de pontos. De uma forma geral, por métrica m , estes sistema de pontos faz com que o melhor grupo dos C grupos tenha a pontuação mais alta, onde no contexto deste trabalho são 20 pontos. Os restantes grupos têm uma pontuação consoante a sua relevância perante o melhor grupo.

É de salientar que cada grupo c tem P elementos (candidatos), onde estes têm a mesma pontuação do grupo que está integrado. Desta forma, se um elemento p pertencer aos melhores grupos de cada métrica m , a sua pontuação será igual a $20 * M$ pontos. A equação (4) demonstra o primeiro cálculo efetuado no sistema de pontos mencionado, onde esta equação permite calcular a distribuição de cada grupo c de uma métrica m .

$$Dist_Grupo_{m,c,p} = \frac{Vep_c}{\sum_{j=1}^c Vep_j} \quad \forall m, c, p \quad (4)$$

³⁶ Do anglo-saxónico *silhouette coeficiente*.

, onde o Vep_c corresponde ao valor do parâmetro de avaliação do grupo c , isto é, à coordenada do centroide do respetivo grupo. A distribuição de cada grupo c é calculado através da divisão do seu Vep_c pelo somatório de todos os valores dos parâmetros de avaliação dos C grupos ($j = \{1, 2, \dots, C\}$).

Posteriormente, com as distribuições calculadas, determina-se a pontuação de cada grupo c através da equação (5). Para se aplicar esta equação, primeiro ordena-se os C grupos de forma descendente, através das distribuições. Assim, com esta equação, o melhor grupo de cada métrica m ($c = 1$) terá 20 pontos. A pontuação de cada grupo c é calculado através da seguinte equação:

$$P_Grupo_{m,c,p} = \left(Dist_Grupo_{m,c,p} + \sum_{j=c+1}^C Dist_Grupo_{m,j,p} \right) * 20 \quad \forall m, c, p \quad (5)$$

Esta equação demonstra que a pontuação do melhor grupo de cada métrica m ($c = 1$) é igual à soma entre a própria distribuição e a distribuição dos restantes grupo, multiplicado por 20. Esta lógica também se aplica aos restantes grupos, exceto ao último grupo ($c = C$), onde a pontuação deste seria simplesmente a sua distribuição multiplicada por 20. No caso do segundo melhor grupo ($c = 2$), os restantes grupos seriam $j = \{3, \dots, C\}$.

Com as pontuações dos C grupos de cada métrica m , é possível calcular a pontuação total de cada um dos candidatos (PT_p), onde isto é feito através da equação (6). Esta equação, tendo em conta as M métricas usadas, soma os pontos de cada grupo c no qual o utilizador final p está integrado, como se pode ver de seguida:

$$PT_p = \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C P_Grupo_{m,c,p} \quad \forall p \quad (6)$$

Após obter-se a classificação inicial dos candidato, isto é, a pontuação total calculada a partir das respetivas M métricas, aplica-se o Mecanismo de Equidade (ME), através das equações (7) e (8). De uma forma geral, este mecanismo permite melhorar a pontuação de todos os candidatos, especialmente daqueles que participam poucas vezes nos eventos de DR por não terem sido convidados para o mesmo, devido às suas baixas classificações nas métricas. Desta forma, este mecanismo permite dar mais oportunidades a estes candidatos a participarem. Nesta dissertação, considera-se que há um número mínimo de participações em eventos de DR que todos os candidatos devem participar por mês, definido por $Pmes$. O $Cpart_p$ corresponde ao número de vezes que um candidato p já participou durante o mês, o Dia corresponde ao dia do mês em que o evento de DR está a decorrer, e o DM corresponde ao número total de dias do mês em que o evento de DR está a decorrer. Assim, conforme representado na equação (7), este ME só é aplicado nos candidatos que ainda não participaram as $Pmes$ vezes.

$$Cpart_p < Pmes \quad \forall p \quad (7)$$

$$PF_p = PT_p * \left(1 + PE * \left(\frac{Pmes - Cpart_p}{Pmes} + \frac{Dia}{DM} \right) \right) \quad \forall p \quad (8)$$

Como se pode ver na equação (8), este mecanismo permite que as pontuações dos candidatos aumentem, no máximo, de acordo com o peso do ME, calculado pelo *PE*. O *PE* é definido pelo gestor da comunidade após este analisar a classificação dos candidatos. Desta forma, o valor deste peso varia consoante o respetivo evento de DR, permitindo com que os candidatos com pontuações baixas tenham mais oportunidades. Este mecanismo está dividido em dois componentes: i) o componente relativo ao número de participações em eventos de DR dos candidatos e ii) o componente associado ao número de dias que faltam até ao final do mês. Desta forma, este mecanismo aumenta a pontuação do candidato p , consoante o número de dias que falta para o fim do mês e o número de vezes que falta para o candidato p participar as P_{mes} vezes.

3.2.4. CONVIDAR OS PARTICIPANTES PARA O EVENTO DE DR

Após a classificação dos candidatos, o modelo proposto pode definir a ordem pelo qual vai convidar os candidatos a participar no evento de DR. Para tal, o gestor da comunidade define dois tipos de participantes, os principais e os de reserva. No que respeita aos participantes principais, estes são definidos tendo em conta o valor de energia que é preciso reduzir, calculado com o uso da equação (3). Assim, os primeiros classificados capazes de fornecer flexibilidade que iguale ou exceda o mesmo valor de energia necessária para o balancear a comunidade são designados como participantes principais. Estes participantes participam ao longo de todo o evento de DR. É importante realçar que a identificação dos participantes principais é realizada de acordo com as flexibilidades prevista pelos candidatos, a classificação obtida e a energia necessária a reduzir durante o evento de DR. Quanto aos restantes participantes, estes ficam como reserva, onde são considerados durante a monitorização em tempo real do evento de DR. Deste modo, ao dividirmos os participantes em principais e de reserva, evita-se diminuir o consumo da comunidade de forma excessiva, permitindo um melhor balanço entre o consumo e a geração da comunidade, e convidar desnecessariamente participantes a mais.

Após o modelo proposto definir quais são os participantes principais e de reserva, são enviados os respetivos convites aos participantes. No contexto desta dissertação, considera-se que existem dois tipos de convites: i) convites feitos sempre após o modelo proposto estabelecer quais são os participantes principais e de reserva, onde este convite serve para notificar antecipadamente o respetivo evento de DR, e para avisar o membro da comunidade se é um participante principal ou de reserva, e ii) convites enviados aos participantes de reserva durante a monitorização em tempo real do evento de DR. Este segundo tipo de convite existe para as situações onde as contribuições dos participantes principais são insuficientes, sendo preciso o recurso dos participantes de reserva. Por outras palavras, este tipo de convite possibilita que outros membros da comunidade possam contribuir para o equilíbrio do consumo e da geração da comunidade.

3.2.5. MONITORIZAÇÃO EM TEMPO REAL DO EVENTO DE DR

No contexto desta dissertação, considera-se que os eventos de DR são monitorizados em tempo real por um mecanismo integrante do modelo proposto. Por defeito, esta monitorização é feita de 10 em 10 minutos, servindo para averiguar como o evento de DR está a decorrer. Caso se verifique que

as reduções feitas pelos participantes principais são insuficientes para equilibrar o consumo e geração da comunidade, aplica-se uma, ou mais, correções. Estas correções são planeadas com base nas flexibilidades previstas pelos candidatos obtidas no dia anterior ao evento de DR, a classificação obtida (mencionada na Secção 3.2.3) e a energia necessária a reduzir registada durante a monitorização.

Uma correção consiste em convidar X participantes de reserva em tempo real para apoiar o evento de DR. Estes X participantes de reserva têm de fornecer, no total, um valor de flexibilidade, no mínimo, igual à energia necessária a reduzir. Caso se verifique que a correção aplicada não foi bem sucedida, aplica-se uma nova correção que segue o mesmo procedimento da anterior. Contudo, para esta nova correção, são considerados outros X novos participantes de reserva, de acordo com a classificação. Neste trabalho, considera-se que um evento de DR é bem sucedido, quando se verifica que no fim do evento, o balanço de energia da comunidade (que pode ou não incluir correções) é um valor igual ou próximo de zero.

3.2.6. AVALIAÇÃO DO EVENTO DE DR E DISTRIBUIÇÃO DE BENEFÍCIOS

Após o evento de DR, é feita uma avaliação do mesmo para verificar qual foi o seu impacto na comunidade. Esta avaliação consiste em verificar o custo e a quantidade de energia transacionada entre a comunidade e a rede elétrica, as emissões de CO₂ e a taxa de sustentabilidade³⁷. Da mesma forma, após o evento, efetua-se a distribuição dos benefícios económicos pelos membros da comunidade de energia considerando as equações (9) à (12).

$$DB(x)_{g,p} = L_g * Cont(x)_{g,p} \quad \forall g, p \quad (9)$$

$$\sum_{p=1}^P Cont(x)_{g,p} = 1 \quad \forall g, p \quad (10)$$

$$0 \leq Cont(x)_{g,p} \leq 1 \quad \forall g, p \quad (11)$$

$$Cont(x)_{g,p} = \begin{cases} \frac{(Exc_{g,p} + Eff_{g,p} + Flx_{g,p} - Pen_{g,p})}{3}, & x = 1 \\ \frac{(Eff_{g,p} + Flx_{g,p} - Pen_{g,p})}{2}, & x = 0 \end{cases} \quad \forall g, p \quad (12)$$

A equação (9) permite calcular os benefícios económicos que cada membro da comunidade de energia p obteve, considerando as reduções de custo (L_g) que a respetiva comunidade de energia obteve com os eventos de DR decorridos ao longo do mês g e as contribuições de cada membro da comunidade de energia p ($Cont(x)_p$). Com as equações (10) e (11), verifica-se, respetivamente, que

³⁷ Do anglo-saxónico *sustainability rate*.

o somatório de todas as contribuições dos membros da comunidade é igual a 1 e que o valor das contribuições calculadas de um membro da comunidade p está compreendido entre 0 e 1.

No contexto deste trabalho, considera-se que existem dois tipos de membros da comunidade, os consumidores ($x = 0$) e os *prosumers* ($x = 1$), onde, para cada um destes, existe uma fórmula específica para calcular as suas contribuições, como se pode ver na equação (12). Estas contribuições são calculadas consoante os parâmetros representados pelas equações (13) à (17).

$$Pen_{g,p} = 1 - \frac{NV_P_{g,p}}{NV_C_{g,p}} \quad \forall \quad g, p \quad (13)$$

$$Exc_{g,p} = \frac{\sum_{e=1}^E G_Membro_{e,g,p}}{\sum_{e=1}^E G_Comunidade_{e,g}} \quad \forall \quad e, g, p \quad (14)$$

$$Flx_{g,p} = \frac{\sum_{e=1}^E F_Membro_{e,g,p}}{\sum_{e=1}^E F_Comunidade_{e,g}} \quad \forall \quad e, g, p \quad (15)$$

$$Esf_{g,p} = \frac{Avg_Esf_{g,p}}{\sum_{p=1}^P Avg_Esf_{g,p}} \quad \forall \quad g, p \quad (16)$$

$$Avg_Esf_{g,p} = \frac{\sum_{e=1}^E TaxaEsf_{e,g,p}}{NV_P_{g,p}} \quad \forall \quad e, g, p \quad (17)$$

De uma forma geral, a equação (13) permite calcular as penalizações do membro da comunidade p ($Pen_{g,p}$), considerando o número de vezes em que um membro da comunidade p participou ($NV_P_{g,p}$) e o número de vezes que ele convidado ($NV_C_{g,p}$) ao longo do mês g . A equação (14) serve para beneficiar os membros (*prosumers*) que contribuíram nos eventos de DR com os seus excessos de geração. Esta equação considera todos os excessos de geração fornecidos pelo membro da comunidade p ($G_Membro_{e,g,p}$) em todos os E eventos de DR durante o mês g e todos os excessos de geração da comunidade ($G_Comunidade_{e,g}$) de todos os E eventos de DR durante o mês g . A equação (15), tem como finalidade beneficiar os membros consoante a flexibilidade fornecida durante os E eventos de DR ocorridos no mês g . Esta equação considera a flexibilidade fornecida pelo membro da comunidade p ($F_Membro_{e,p,g}$) e toda a flexibilidade da comunidade ($F_Comunidade_{e,g}$). A equação (16) beneficia os membros consoante o seu esforço, dividindo a média da taxa de esforço de um membro da comunidade p ($Avg_Esf_{g,p}$) pelo somatório das médias de taxa de esforço de todos os membros da comunidade. A respetiva média da taxa de esforço de um membro da comunidade p é calculada através da equação (17), onde esta equação divide o somatório das taxas de esforço de um membro da comunidade p registadas após os E eventos de DR ($TaxaEsf_{e,g,p}$) pelo número de vezes que um membro da comunidade p participou ($NV_P_{g,p}$).

É de realçar que o peso de todos os parâmetros da equação (12) é determinado sem incluir o parâmetro das penalizações. Logo, no caso dos consumidores, o peso dos parâmetros é 0,50, enquanto no caso dos *prosumers*, o peso dos parâmetros é 0,33.

3.3. TIPOS DE PARTICIPAÇÃO

Tendo em conta o modelo proposto apresentado, é possível verificar que este modelo, através das participações dos membros da comunidade, permite planejar eventos de DR de forma a gerir eficientemente os recursos energéticos da comunidade. Sendo que este planeamento de eventos de DR, para ser corretamente concretizado, exige que haja uma partilha de dados entre o gestor da comunidade e os membros da comunidade. Contudo esta partilha de dados tem de respeitar a privacidade e a segurança dos dados dos membros da comunidade, de forma a cumprir o Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (RGPD), Europeu e Português.

Desta forma, no âmbito do RGPD, este modelo foi desenvolvido de modo a considerar três tipos de participação no qual os membros da comunidade podem optar por escolher. Os três tipos de participação considerados para o modelo de DR proposto são o Agregado, o Deslocamento ou Redução (DoR) e o Equipamento por Equipamento (EpE), onde cada um destes fornece um diferente grau de confidencialidade aos membros da comunidade. Destes três tipos de participação, os dois primeiros são mais orientados para os membros da comunidade, enquanto o terceiro é orientado para a participação direta de dispositivos de IoT instalados nas casas, isto é, os equipamentos. As principais características e requisitos gerais dos três tipos de participação estão ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2. Diferentes tipos de participação.

	Principais Características	Requisitos Gerais
Agregado	- Alta confidencialidade; - Os utilizadores finais só podem fornecer flexibilidade por redução; - Não permite tirar partido do excesso de geração fotovoltaica.	Não é preciso saber quais são os dispositivos de IoT que podem fornecer flexibilidade, nem o tipo de flexibilidade que fornecem.
DoR	- Menos confidencial do que o modelo Agregado; - Cada utilizador final pode fornecer flexibilidade por deslocamento ou redução; - Permite tirar partido dos excedentes da geração fotovoltaicos (através da flexibilidade de deslocamento).	- Não é preciso saber quais são os dispositivos de IoT que podem fornecer flexibilidade; - É preciso saber que tipo de flexibilidade o utilizador final fornece (se é apenas um ou ambos).
EpE	- Baixa confidencialidade; - Cada dispositivo de IoT pode fornecer flexibilidade por deslocamento ou redução (apenas um deles em cada evento); - Permite tirar partido do excesso de geração fotovoltaica (através da flexibilidade de deslocamento).	- É preciso saber quais são os dispositivos de IoT que podem fornecer flexibilidade e o tipo de flexibilidade que fornecem; - É necessário identificar que IoT's pertencem a cada consumidor, tendo a divulgação de cargas existentes.

De uma forma geral, dos três tipos de participação, o Agregado, apresentado em (Barreto et al., 2022), é aquele que oferece mais confidencialidade aos membros da comunidade, visto que neste tipo de participação não se sabe quais dispositivos de IoT o membro da comunidade possui, nem se tem acesso discriminado ao tipo de flexibilidade e consumo. Neste caso, a flexibilidade fornecida pelo membro da comunidade corresponde à flexibilidade agregada da respetiva casa, onde esta flexibilidade só pode ser aplicada por meio de reduções. No segundo tipo de participação, o DoR, também não é necessário a divulgação de quais são os dispositivos de IoT existentes na casa do

membro da comunidade. No entanto, em comparação com o tipo de participação anterior, este permite que um membro da comunidade possa fornecer a flexibilidade agregada da casa por meio de deslocamento ou redução. Desta forma, a confidencialidade do DoR acaba por ser inferior à do Agregado. Quanto ao último tipo de participação, o EpE, apresentado em (N. Teixeira et al., 2022), é apresentado como sendo o mais flexível dos três, mas também o menos confidencial, visto que neste tipo de participação é possível saber-se a flexibilidade de cada dispositivo de IoT existentes na casa do membro da comunidade.

3.4. CONCLUSÕES

Nesta secção foi descrito em detalhe a solução proposta nesta dissertação, onde, inicialmente, explica-se o processo de criação de uma comunidade de energia. Posteriormente, o modelo de DR para uma comunidade de energia desenvolvido é apresentado. Neste modelo de DR, com as duas primeiras etapas é possível identificar oportunidades de eventos de DR. Na primeira etapa é descrito os modelos de CNN desenvolvidos para prever para o dia seguinte os recursos energéticos da comunidade, onde estes modelos foram desenvolvidos para servirem como ferramentas auxiliares para o modelo de gestão proposto. Na segunda etapa, é explicado como se identifica os respetivos possíveis eventos de DR, com base nas previsões obtidas na etapa anterior, e também é explicado como se identifica os possíveis participantes. De seguida, na terceira etapa realiza-se a classificação dos possíveis participantes, onde esta se baseia em algoritmos de agrupamento, como *K-means*. Esta classificação, usando os dados históricos dos participantes e a sua respetiva flexibilidade prevista para o evento de DR, permite assim obter a ordem pelo qual se irá convidar os participantes para contribuir no evento. Na quarta etapa, com base na classificação, é definido quais são os participantes principais e os de reserva. Por fim, com as duas últimas etapas deste modelo, é feito a respetiva monitorização e avaliação do evento de DR planeados. Na quinta etapa, é feito a monitorização em tempo real do respetivo evento, de modo a averiguar se as contribuições dos participantes estão a causar o efeito positivo no balanço energético da comunidade. Na sexta e última etapa, por um lado, avalia-se o evento de DR com diferentes parâmetros, como o custo e a quantidade energia comprada/vendida à rede, as emissões de CO₂ e a taxa de sustentabilidade, de modo a verificar o seu impacto na comunidade. Por outro lado, também se efetua a distribuição dos benefícios pelos participantes do evento. Por último, nesta secção também é descrito os três diferentes tipos de participação no qual os membros de comunidade podem optar por escolher.

A solução proposta tem em conta a análise do estado da arte e pretende abranger os tópicos mais promissores das comunidades de energia e participação ativa dos membros da comunidade, não descurando questões de equidade, privacidade e segurança. Os diversos tipos de participação que o modelo de DR proposto permite, possibilita aos membros da comunidade um controlo maior sobre os seus dados, assegurando a sua decisão quando aos dados partilhados, cumprindo com o RGPD. O mecanismo de equidade também é defendido como sendo uma inovação significativa desta dissertação, permitindo um ambiente de colaboração, cooperação e equitativo entre os diversos membros da comunidade de energia.

4. CASOS DE ESTUDO

Esta secção descreve a comunidade de energia e os Casos de Estudo (CE) considerados nesta dissertação para testar, analisar e validar o modelo de DR apresentado na Secção 3. A Tabela 3 ilustra os cinco CE realizados, indicando, para cada CE, o tipo de participação considerado, as respetivas métricas usadas na classificação dos candidatos, descritas na Secção 3.2.3, e se é implementado ou não o Mecanismo de Equidade (ME).

Tabela 3. Diferentes casos de estudo considerados para testar e validar a solução proposta.

Caso de Estudo	Tipo de Participação	Métricas				Mecanismo de Equidade
		1	2	3	4	
1.1	DoR	X	X	N/A	N/A	N/A
1.2	DoR	N/A	N/A	X	X	N/A
1.3	DoR	X	X	X	X	N/A
2	Agregado	X	X	X	N/A	X
3	EpE	X	X	X	X	X
4	DoR	X	X	X	X	X
5	DoR	X	X	X	X	N/A

N/A – Não Aplicável

Como se pode ver na Tabela 3, o CE 1 está segmentado em três casos. Desta forma, com este CE pretende-se realçar o impacto que as respetivas Métricas 1 e 2, que avaliam os dados históricos, e as Métricas 3 e 4, responsáveis por avaliar a flexibilidade prevista para o futuro evento de DR, têm no evento de DR, em comparação com o caso em que se usa todas as métricas. Posteriormente, com os CE 2, 3 e 4 pretende-se demonstrar e analisar o desempenho que cada tipo de participação, apresentado na Secção 3.3, tem quando considerado juntamente com o ME num evento de DR. De modo a verificar a eficiência do ME, no CE 4 considera-se três eventos de DR em diferentes dias da mesma semana. Por fim, neste trabalho de dissertação considera-se o CE 5 para ilustrar a implementação do modelo proposto numa comunidade de maior escala, onde se considera uma frota

de Veículos Elétricos (VE) para auxiliar o respetivo evento de DR. Por fim, através da Secção 4.7, comparam-se os demais CEs apresentados neste trabalho de dissertação.

É de realçar que com os CEs 2 e 3, pretende-se analisar o impacto que a participação dos membros da comunidade de energia têm no modelo apresentada nesta dissertação. Para isso, nos CEs 2 e 3 consideram-se, respetivamente, que a Taxa de Participação (TdP) e a Taxa de Flexibilidade (TdF) dos membros da comunidade de energia variam entre 25 %, 50 %, 75 % e 100 %. A respetiva TdP, considerada no CE 2, representa a probabilidade de um dado candidato participar após ter sido convidado para o evento, enquanto a TdF, considerada no CE 3, representa a porção da flexibilidade dispensada pelo mesmo durante o evento de DR. Em ambos os CEs, a respetiva taxa igual a 100 % representa o compromisso total dos respetivos membros da comunidade no evento de DR. Desta forma, com estes dois CEs pretende-se verificar o desempenho do modelo proposto perante a falta de compromisso por parte dos membros da comunidade.

4.1. DESCRIÇÃO DA COMUNIDADE DE ENERGIA GERADA

Relativamente à comunidade de energia considerada para testar o modelo proposto, esta foi gerada pelo algoritmo de geração de comunidades apresentado na Secção 3.1, com base em dados reais de consumo de edifícios e de geração fotovoltaica (Goncalves et al., 2022a). No contexto desta dissertação, considera-se, como dados de entrada, 50 perfis de consumo de edifícios, sendo um destes correspondente a um edifício público, e 12 perfis de geração fotovoltaica de um ano. Além disso, foram considerados diversos perfis de consumo de 10 equipamentos ilustrados na Tabela 4, onde é indicado, por equipamento, o tipo de flexibilidade que fornece, os respetivos intervalos de funcionamento (da manhã, da tarde e da noite), o modo de alocação e o pico máximo verificado nos respetivos perfis. Neste contexto, considera-se que existem equipamentos que podem fornecer flexibilidade por deslocamento ou redução e outros que não fornecem flexibilidade. Além disso, considera-se que o edifício público contém todos os equipamentos, exceto a Máquina de Lavar a Louça (MLL), a Máquina de Lavar a Roupas (MLR) e a Máquina de Secar a Roupas (MSR).

Tabela 4. Informação sobre os equipamentos considerados.

Equipamentos	Tipo de Flexibilidade	Modo de Alocação	Pico Máx. (kW)	Possíveis Intervalos de Funcionamento (horas)		
				Manhã	Tarde	Noite
Ar Condicionado	D	A	1,10	[00:00-08:00[	[08:00-16:00[	[16:00-00:00[
Chaleira	N/A	A	3,00	[06:00-09:00[	[12:00-14:00[	[19:00-21:00[
Cilindro	D	A	1,70	[00:00-08:00[	[08:00-16:00[	[16:00-00:00[
Frigorífico	D	O	0,14	[00:00-08:00[	[08:00-16:00[	[16:00-00:00[
Luzes	R	A	0,44	[06:00-09:00[	[13:00-18:00[	[18:00-00:00[
MLL	D	A	2,92	[00:00-08:00[	[08:00-16:00[	[16:00-00:00[
MLR	D	A	2,54	[00:00-08:00[	[08:00-16:00[	[16:00-00:00[
MSR	D	A	4,30	[00:00-08:00[	[08:00-16:00[	[16:00-00:00[
Microondas	N/A	A	3,35	[06:00-09:00[	[12:00-14:00[	[19:00-21:00[
Televisão	N/A	A	0,33	[06:00-09:00[	[12:00-14:00[	[19:00-21:00[

A – Aleatório; D – Deslocamento; N/A – Não Aplicável; O – Obrigatório; R – Redução;

Assim, considerando estes dados, é possível gerar uma comunidade de energia com um perfil típico de consumo e geração fotovoltaica ilustrado na Figura 16. Nesta figura encontram-se realçados

os consumos dos equipamentos considerados, como também a distribuição do consumo da comunidade que é flexível e rígido, através das áreas “Carga Flexível” e “Carga Rígida”, respetivamente. No contexto desta dissertação, o consumo rígido, representado por “Carga Rígida”, corresponde ao consumo no qual não se podem aplicar alterações, por meio de reduções ou deslocamento de consumo, onde se encontram os consumos dos equipamentos que não podem fornecer flexibilidade, tais como a “Chaleira”, o “Microondas” e a “Televisão”. Nesta dissertação, a comunidade de energia gerada é considerada apenas nos primeiros quatro CE, sendo que no quinto CE, a respetiva comunidade considerada está descrita na Secção 4.6. É de realçar que os custos energéticos da comunidade de energia destacados em cada um dos CE, baseiam-se numa tarifa dinâmica baseada no mercado MIBEL (Mercado Ibérico de Eletricidade). Nos CEs em que existem excessos de geração, considera-se que a energia é vendida a metade do preço da respetiva tarifa usada.

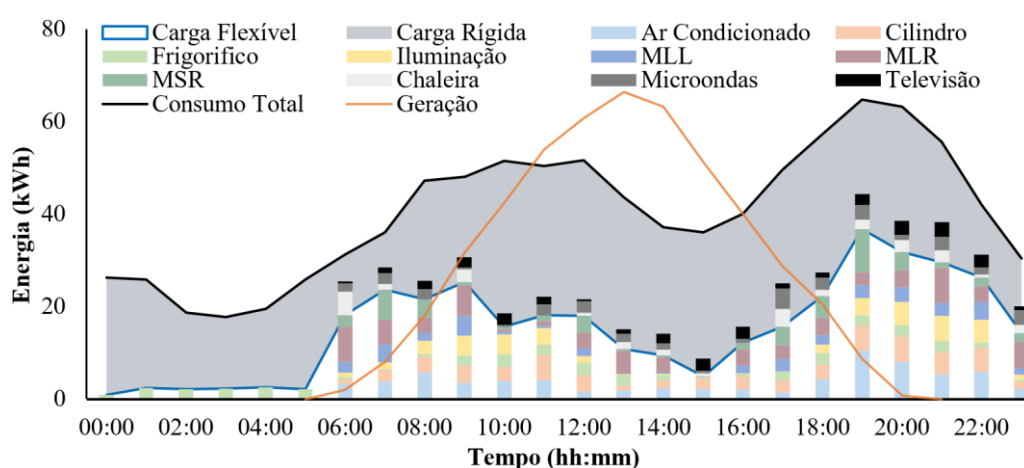


Figura 16. Perfis típicos de consumo e geração da comunidade.

A Tabela 5 realça algumas informações sobre os membros da comunidade de energia gerada, nomeadamente as potências contratadas predominantes nos edifícios da comunidade. A Tabela 5 também indica a quantidade de edifícios por potência contratada, a quantidade de edifícios com geração fotovoltaica e o respetivo pico de geração fotovoltaica.

Tabela 5. Dados sobre os membros da comunidade de energia.

Potência Contratada (kVA)	(#) Edifícios	(#) Edifícios com Geração Fotovoltaica	Pico de Geração Fotovoltaica (kW)
3,45	18	4	2,8 – 3,0
6,90	12	2	3,0 – 3,2
10,35	19	5	5,0 – 7,0
17,25	1	1	8,4

No contexto deste trabalho de dissertação, de modo a avaliar o impacto dos eventos de DR planeados, considera-se diferentes cenários para se efetuar comparações. Cada um destes cenários permite analisar a respetiva comunidade para um dado evento de DR de diferentes perspetivas. Os respetivos cenários considerados são:

- *Business-as-Usual* (BaU): corresponde ao cenário base, onde não se implementa o evento de DR. Neste cenário, considera-se o conceito de comunidade de energia, onde os

membros da comunidade podem partilhar os excessos de geração fotovoltaica com os demais membros;

- Independente (I): corresponde ao cenário onde cada membro da comunidade está por sua conta, isto é, não se considera o conceito de comunidade de energia. Da mesma forma, neste cenário não se implementa o evento de DR;
- Flexibilidade Total (FT): corresponde ao cenário em que se utiliza toda a flexibilidade disponibilizada pelos candidatos durante o evento de DR.

4.2. CE 1 – IMPACTO DAS MÉTRICAS NO EVENTO DE DR

No que respeita ao CE 1, este serve para analisar o impacto que as combinações das Métricas 1 e 2, métricas que avaliam os dados históricos, e Métricas 3 e 4, métricas que avaliam a flexibilidade prevista para o futuro evento de DR, têm no planeamento do evento de DR, em relação ao caso em que se consideram todas as métricas. Neste CE, não se simula os respetivos cenários mencionados na secção anterior. Desta forma, considerando a respetiva classificação dos candidatos obtida com todas as métricas, cria-se uma classificação consoante as combinações das métricas.

O evento de DR considerado para este CE, decorre no dia 13 de junho às 11:00, onde a redução prevista, durante a análise da previsão dos recursos de energia da comunidade, é de 5,15 kWh. Durante o planeamento deste evento de DR, verificou-se que todos os membros da comunidade podem contribuir para o evento com flexibilidade, ou seja, neste evento existem 50 possíveis candidatos. É importante de realçar que neste CE, consideram-se que todos os candidatos convidados participam no respetivo evento.

4.2.1. RESULTADOS

A Tabela 6 ilustra a classificação dos primeiros 10 classificados, obtida para o evento de DR às 11:00, quando se considera um cenário com todas as métricas (M_1234) e os cenários com as respetivas combinações da Métricas 1 e 2 (M_12) e Métricas 3 e 4 (M_34). A Tabela 6 mostra, o ID do candidato (C_ID) e a respetiva pontuação total. Da mesma forma, esta tabela, realça, respetivamente, a verde e a azul, os participantes em comum entre os cenários M_12 e M_1234 e entre os cenários M_12 e M_1234.

Tabela 6. Top-10 classificados para cada uma das combinações das métricas – CE 1.

Classificação	Métrica 1 e 2 (M_12)		Métrica 3 e 4 (M_34)		Todas as Métricas (M_1234)	
	C_ID	Total	C_ID	Total	C_ID	Total
1	C34	40,00	C14	40,00	C14	63,37
2	C13	35,86	C27	39,84	C34	59,84
3	C36	35,75	C31	36,35	C31	59,72
4	C37	35,75	C42	30,91	C42	58,32
5	C22	35,75	C38	29,64	C27	58,31
6	C20	35,75	C16	29,64	C38	57,15
7	C25	35,75	C19	27,26	C13	55,86
8	C40	31,61	C30	23,26	C36	55,75
9	C18	31,61	C33	23,26	C22	55,75
10	C28	31,61	C01	22,02	C20	55,75

A Figura 17 e a Figura 18 ilustram, respectivamente, a monitorização realizada durante o evento de DR às 11:00, baseada na classificação obtida nos cenários M_12 e M_34. Cada gráfico, através do eixo da esquerda, ilustra a “Geração” e o “Consumo” da comunidade, onde a este consumo já foi removido a flexibilidade dos participantes principais ao longo do evento de DR. Além disso, cada gráfico, através do eixo da direita, ilustra o Balanço Agregado (BA), que representa a agregação do balanço (Consumo – Geração) da comunidade, e as Correções 1 e 2 aplicadas durante o evento, onde estas representam as correções mencionadas na Secção 3.2.5.

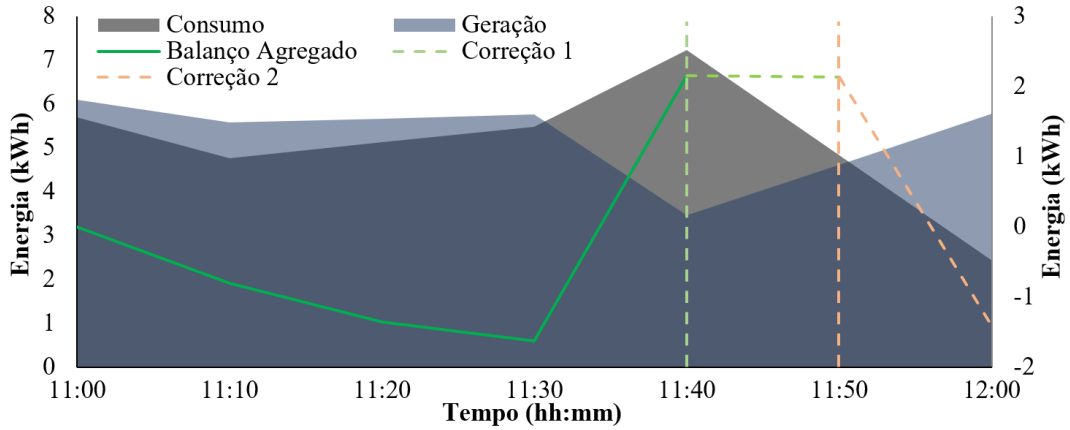


Figura 17. Monitorização do evento de DR do cenário M_12, às 11:00 – CE 1.

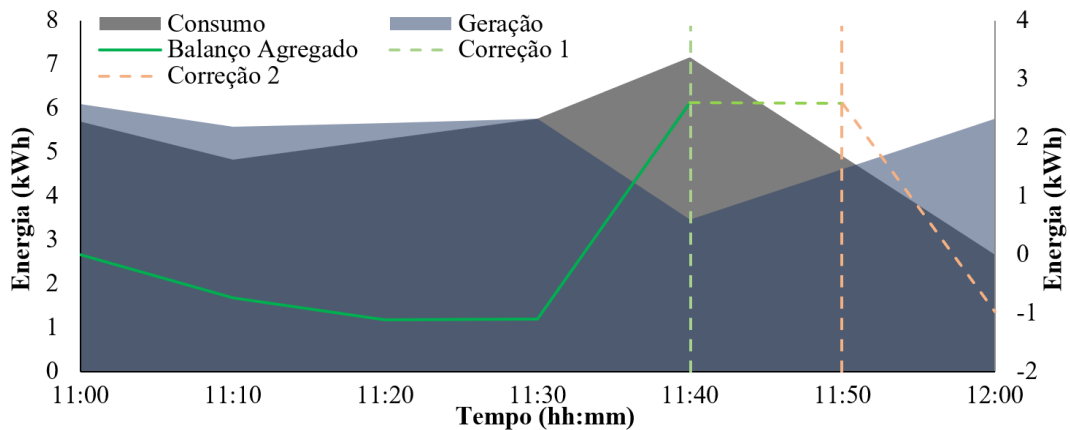


Figura 18. Monitorização do evento de DR do cenário M_34, às 11:00 – CE 1.

No contexto desta dissertação, uma correção só é aplicada nos instantes em que o BA da comunidade é superior a zero. Desta forma, quando se verifica que é necessária uma correção, esta é aplicada desde o instante observado até ao fim do evento de DR. Portanto, a Correção 1 corresponde ao BA da comunidade menos a flexibilidade dos X1 novos participantes de reserva, e a Correção 2 representa a Correção 1 menos a flexibilidade de outros X2 novos participantes de reserva. Por outras palavras, estas correções correspondem ao BA da comunidade menos a flexibilidade total dos X participantes de reserva chamados a participar. Além disso, é importante mencionar que, no momento do evento de DR, a flexibilidade proporcionada pelos participantes (principais e de reserva) diverge da flexibilidade prevista. Esta divergência nos valores ocorre devido a erros de previsão e possíveis recusas na participação (que não ocorrem neste CE).

No fim do evento de DR, obteve-se os dados apresentados na Tabela 7, que, de uma certa forma, resumem o evento de DR considerado para cada um dos casos. o número de participantes principais convidados para o evento, o número de participantes de reserva convidados para a Correção 1 e Correção 2 durante o evento, o respetivo número de participantes convidados e o balanço energético final obtido após o evento.

Tabela 7. Resumo do eventos de DR para cada um dos casos– CE 1.

Cenário	Participantes (#)			Total de participantes (#)	Balanço (kWh)
	Principais	Correção 1	Correção 2		
M_12	23	5	8	36	-1,423
M_34	10	20	17	47	-0,976
M_1234	17	7	14	38	-0,186

4.2.2. DISCUSSÃO

Considerando o conteúdo da Tabela 6, podemos verificar que as respetivas classificações obtidas nos cenários M_12 e M_34, são completamente diferentes, onde não têm candidatos em comum. Contudo, no caso em que se considera todas as métricas, os 10 primeiros classificados estão presentes em ambas as classificações das combinações, como se pode ver realçado a verde e azul na respetiva tabela.

Analisando a Figura 17 e a Figura 18, verifica-se que as monitorizações são muito semelhantes, onde a principal diferença entre estes dois casos é o valor do balanço energético final obtido através da Correção 2. Da mesma forma também se verifica que a redução prevista difere da redução real visto que foi necessário efetuar correções. Como se pode constatar nestas figuras, em ambos os casos, nos primeiros 30 minutos do evento, o BA é negativo, onde isto ocorre devido às contribuições que os participantes principais fizeram com a sua respetiva flexibilidade em cada caso, diminuindo o consumo da comunidade de forma que ficasse abaixo do nível da geração. Da mesma forma, também se verifica que o BA do cenário M_34, é inferior ao cenário M_12. Uma possível explicação para este fenómeno seria que os participantes principais do cenário M_34 fornecem mais flexibilidade, de forma continua, ao longo do evento de DR. Após os primeiros 30 minutos, verifica-se que a geração atinge o seu valor mais baixo durante esta hora, enquanto o consumo atinge o seu valor mais alto. Desta forma, o BA subiu drasticamente, atingindo um valor positivo em ambos os casos, fazendo com que fosse necessário efetuar correções. Desta forma, em ambos os casos, nos intervalos 11:40 e 11:50, foram implementadas duas correções, de modo a mitigar os respetivos picos atingidos no BA. No fim de ambos os eventos, é possível verificar que estes foram bem sucedidos onde os valores das Correções 2 foram negativos.

Numa primeira análise, considerando os dados da Tabela 7 e da Figura 17 e da Figura 18, pode-se verificar que os 10 participantes principais do cenário M_34 quase reduziram o consumo da comunidade como os 23 participantes principais do cenário M_12. Isto demonstra, de uma certa forma, a eficácia das Métricas 3 e 4 em avaliar a flexibilidade os candidatos, onde o foco destas métricas reside em selecionar os candidatos com mais flexibilidade como participantes principais, de modo a se reduzir o valor necessário. Contrariamente, verifica-se que, no cenário M_12, o foco destas consiste em aumentar participação ativa dos membros da comunidade, onde foram convidados

participantes principais a mais para contribuir ao longo do evento, fazendo com que, consequentemente, este caso obtivesse o balanço energético final mais baixo entre os demais casos. Da mesma forma, através da Tabela 7, pode-se verificar que o cenário M_34, foi o que convidou mais participantes na totalidade, devido às suas duas correções. Isto deve-se ao facto de que nestas correções foram convidados os participantes de reserva (com classificações mais baixas) para atuar nas correções, tendo estes participantes uma menor flexibilidade disponível. Por fim, ainda na Tabela 7, verifica-se que o cenário M_1234 corresponde ao melhor resultado, visto que o balanço final foi o mais próximo de zero, o que indica que o número de participantes convidados foi o mais adequado para efetuar o balanço entre o consumo e a geração da comunidade durante o respetivo evento.

Assim, com este CE é possível concluir que a combinação das quatro métricas propostas nesta dissertação possibilita um planeamento mais eficiente de um evento de DR, em comparação com os casos em que só se consideram duas métricas. Da mesma forma, também se verifica neste CE que, considerando apenas as Métricas 1 e 2, é possível aumentar a participação ativa dos membros da comunidade, enquanto se considerarmos apenas as Métricas 3 e 4, o foco reside em selecionar os candidatos com maior flexibilidade.

4.3. CE 2 – PARTICIPAÇÃO COM FLEXIBILIDADE AGREGADA

O CE 2 serve para analisar o desempenho do modelo proposto quando se considera que os membros da comunidade optam pelo tipo de participação Agregado, apresentado na Secção 3.3. Neste CE, considera-se que o evento de DR ocorre no dia 22 de abril, às 14:00, onde a redução prevista para este evento é de 3,64 kWh. No fim do planeamento deste evento de DR, constatou-se que só havia 32 candidatos disponíveis a participar no respetivo evento, sendo que destes, apenas os 6 primeiros candidatos foram convidados como participantes principais.

Neste CE, de modo a analisar melhor o impacto que os candidatos têm nos eventos de DR, consideram-se quatro cenários em que a TdP dos candidatos tem um valor de 100 %, 75 %, 50 % ou 25 %, sendo estes cenários nomeados como TdP₁₀₀, TdP₇₅, TdP₅₀ e TdP₂₅. No contexto deste CE, esta TdP representa a probabilidade dos candidatos participarem no evento de DR para qual eles foram convidados. Assim, quando se considera o cenário TdP₁₀₀, significa que todos os candidatos irão participar caso sejam convidados para o evento. Neste CE, considera-se o cenário TdP₁₀₀ como base para se efetuar comparações com os demais cenários, onde se verificou que foram convidados cerca de seis participantes principais que podem fornecer 3,85 kWh. Contrariamente, quando se considera que a TdP é inferior a 100 %, isto implica aplicar um aleatório, consoante o valor da TdP, de modo a verificar se um candidato irá, ou não, participar no evento de DR após ter sido convidado. Desta forma, ao considerarmos esta taxa, é possível avaliarmos a importância que o compromisso dos candidatos tem para a correta atuação dos eventos de DR planeados.

Este CE também se baseia num trabalho científico já publicado, onde a mesma comunidade de energia e o tipo de participação, EpE, foram considerados. Contudo, os eventos de DR considerados para testar o modelo são em dias diferentes. O respetivo trabalho é:

- **(Revista, IF: 3.2) Barreto, R., Gonçalves, C., Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2022).**
Evaluation Metrics to Assess the Most Suitable Energy Community End-Users to

4.3.1. RESULTADOS

A Figura 19 e a Figura 20 realçam, respetivamente, as monitorizações obtidas no evento de DR quando se considera que os membros da comunidade optam pelo tipo de participação Agregado e com a TdP igual a 100 % e a 50 %. As descrições destas figuras são similares às da Figura 17 e da Figura 18 apresentadas na Secção 4.2.1.

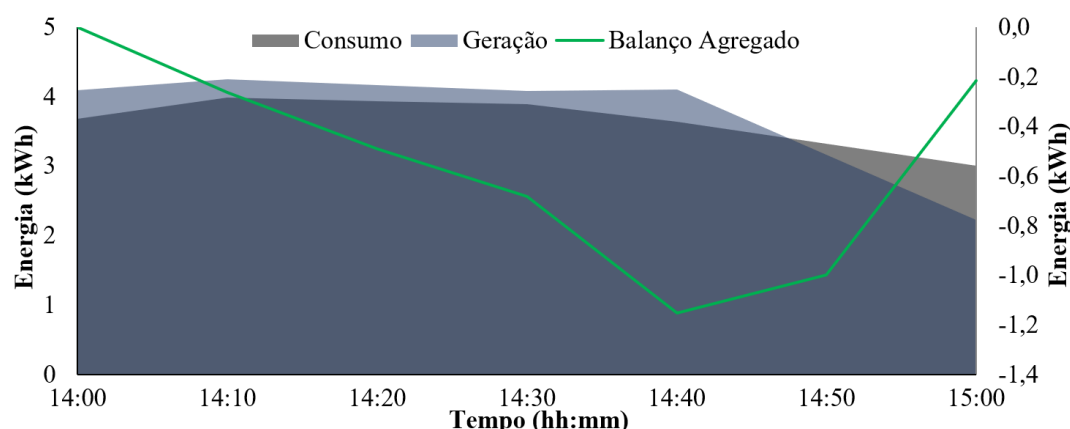


Figura 19. Monitorização do evento de DR do cenário TdP₁₀₀, no dia 22 de Abril às 14:00– CE 2.

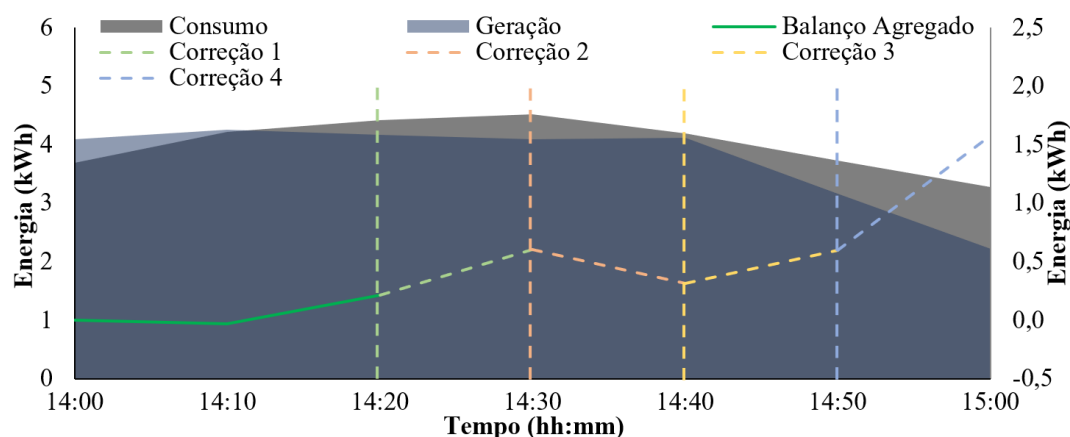


Figura 20. Monitorização do evento de DR do cenário TdP₅₀, no dia 22 de Abril às 14:00– CE 2.

A Tabela 8 demonstra os resultados obtidos ao longo de cada um dos cenários considerados neste CE após o evento de DR, destacando para cada um deles a quantidade total de participantes principais e de reserva que participaram, a quantidade de correções implementadas, o balanço e o custo energético da comunidade, a taxa de redução (isto é, a percentagem da energia reduzida consoante a meta a atingir no respetivo evento de DR), as emissões de CO₂ e a Sustentabilidade (S) da comunidade. É de notar que os valores negativos no consumo e custo de energia da comunidade correspondem aos excessos de geração e à energia vendida à rede, respetivamente. Além disso, os valores de energia da comunidade ilustrados na Tabela 8 são os dados reais recolhidos durante o

evento, que diferem dos valores de energia da comunidade previstos. É de realçar que, após o evento de DR, verificou-se que a redução prevista para este evento deferiu da redução real cerca de 5,36 %.

Tabela 8. Avaliação dos cenários considerados – CE 2.

Cenário	Participantes (#)		Correções (#)	Energia		Taxa de Redução (%)	Emissões de CO ₂ (g)	S (%)
	Principais	Reserva		Balanço (kWh)	Custo (EUR)			
TdP ₂₅	2	1	1	1,223	0,14	68,19	391,41	92,15
TdP ₅₀	3	4	4	1,575	0,17	59,04	460,14	91,18
TdP ₇₅	4	0	0	0,550	0,10	85,70	354,70	92,76
TdP ₁₀₀	6	0	0	-0,216	0,04	100,00	227,90	94,89

4.3.2. DISCUSSÃO

Como se pode ver na Figura 19, durante grande parte do evento de DR o consumo da geração permaneceu abaixo da geração. Isto deve-se às reduções efetuadas pelos participantes principais convidados para este evento. No entanto, após as 14:50, o valor do BA aumenta significativamente, devido ao consumo da comunidade ter excedido a geração disponível nesse instante. Contudo, no fim do evento o BA da comunidade atingiu o valor de -0,22 kWh, demonstrando o sucesso do respetivo evento.

No que respeita à monitorização do cenário TdP₅₀, ilustrada na Figura 20, neste caso, comparando com o cenário TdP₁₀₀ da Figura 19, já se pode verificar o impacto que a falta de compromisso dos participantes tem no evento, onde, desde a verificação das 14:10 até ao fim do evento, o consumo da comunidade é superior à geração. Desta forma, de modo a reduzir o BA da comunidade, a partir das 14:20 foram implementadas quatro correções. Contudo, no fim do evento, o balanço energético da comunidade foi de aproximadamente 1,5 kWh.

Analizando a Tabela 8, é possível verificar que a falta de compromisso por parte dos participantes nos eventos traz consequências negativas para o balanço da comunidade de energia, uma vez que o consumo e o custo de energia da comunidade aumentam à medida que a TdP diminui. Apenas o cenário TdP₂₅ é que obteve melhores resultados do que o cenário TdP₅₀. Isto deve-se ao facto de que os dois participantes principais do cenário TdP₂₅, forneciam mais flexibilidade do que os três participantes principais do cenário TdP₅₀. É importante realçar que no cenário TdP₁₀₀ pode-se verificar que, apesar do balanço energético ser negativo (excesso de geração), o custo é positivo e a sustentabilidade é inferior a 100 %. Isto porque, ao longo da monitorização do evento de DR, houve instantes onde o consumo da comunidade de energia foi superior à geração, fazendo com que haja custos associados e com que a S não fosse 100 %.

Atendendo que a TdP representa, de uma certa forma, a imprevisibilidade da participação dos participantes, pode-se concluir que para este CE o modelo de gestão de energia foi consideravelmente capaz, permitindo reduzir, no mínimo, 59 % do valor necessário, mesmo nos casos em que se considera a TdP baixa (maior falta de compromisso). Este CE demonstra ainda a necessidade da inclusão de métricas que classifiquem o histórico de participação dos participantes, tentando privilegiar os participantes que executaram, com sucesso, a participação de convites passados.

4.4. CE 3 – PARTICIPAÇÃO COM FLEXIBILIDADE DE DISPOSITIVOS DE IOT

No que respeita ao CE 3, este considera o mesmo evento de DR destacado no CE anterior, mas em vez de considerar os membros da comunidade como participantes, considera os equipamentos disponíveis que se encontram nas casas dos respetivos membros. Desta forma, este CE pretende analisar o impacto que o tipo de participação EpE tem no evento de DR. Neste CE, verificou-se que, após o planeamento do evento de DR, existem 42 equipamentos disponíveis que podem contribuir para o evento. Neste CE, tal como no anterior, também se analisa o impacto que os candidatos têm no evento de DR, contudo considera-se a TdF dos candidatos em vez da TdP. De uma forma geral, esta taxa representa a porção da flexibilidade dispensada pelos participantes durante o evento de DR, onde neste CE considera-se quatro cenários em que a TdF varia entre 100 %, 75 %, 50 % e 25 %, nomeados TdF₁₀₀, TdF₇₅, TdF₅₀ e TdF₂₅, sendo o TdF₁₀₀ o cenário base. No TdF₁₀₀, verificou-se que foram convidados cerca de 30 participantes principais para contribuir no evento de DR, onde estes fornecem cerca de 3,56 kWh de flexibilidade, ficando 0,08 kWh de consumo como residual.

Este CE baseia-se num trabalho científico já publicado, no qual se considera a mesma comunidade de energia e o tipo de participação, Agregado. No entanto, os eventos de DR são em dias diferentes. O respetivo trabalho é:

- **(Revista, IF: 2.9)** Teixeira, N., Barreto, R., Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2022). A Trustworthy Building Energy Management System to Enable Direct IoT Devices' Participation in Demand Response Programs. *Electronics*, 11(6), 897. <https://doi.org/10.3390/electronics11060897>;

4.4.1. RESULTADOS

A Figura 21, a Figura 22 e a Figura 23 demonstram as monitorizações obtidas no evento de DR em causa, para os cenários TdF₁₀₀, TdF₇₅ e TdF₂₅, respetivamente. As descrições destas figuras são similares às da Figura 17 e da Figura 18 apresentadas na Secção 4.2.1. A Tabela 9 demonstra os resultados obtidos neste CE, realçando o mesmo tipo de informação providenciada pela Tabela 8.

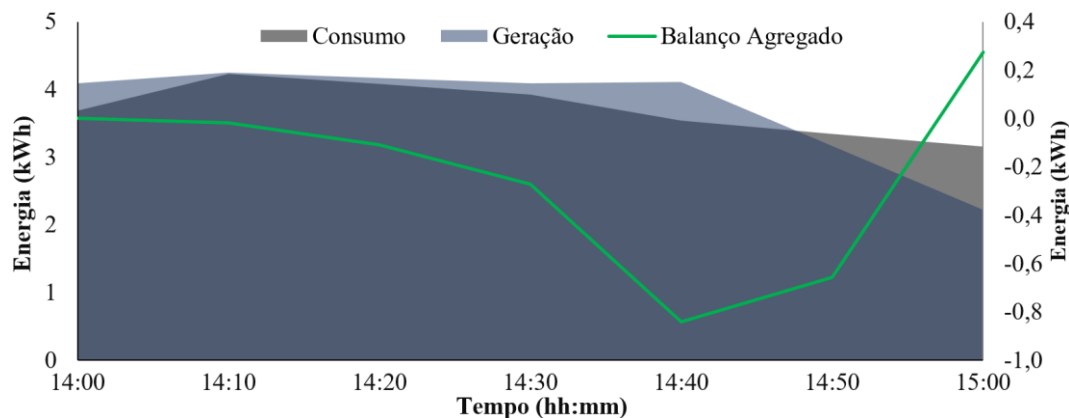


Figura 21. Monitorização do evento de DR do cenário TdF₁₀₀, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 3.

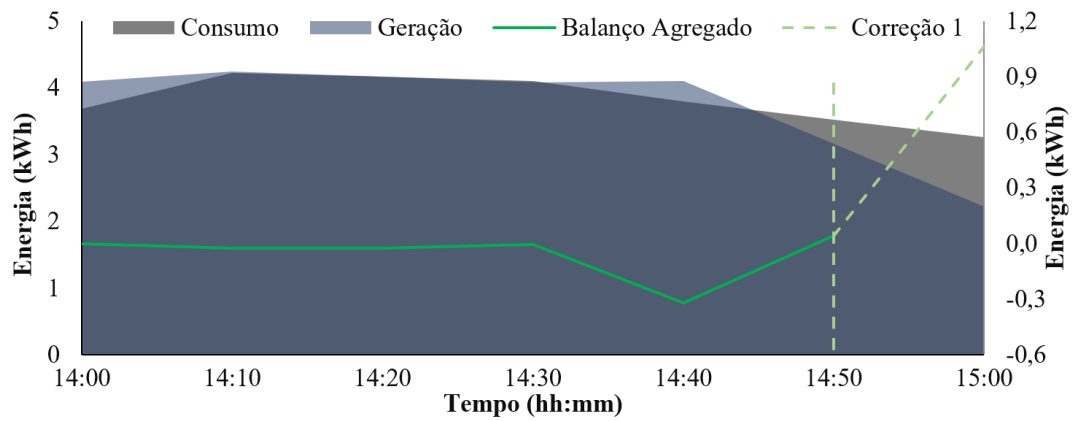


Figura 22. Monitorização do evento de DR do cenário TdF₇₅, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 3.

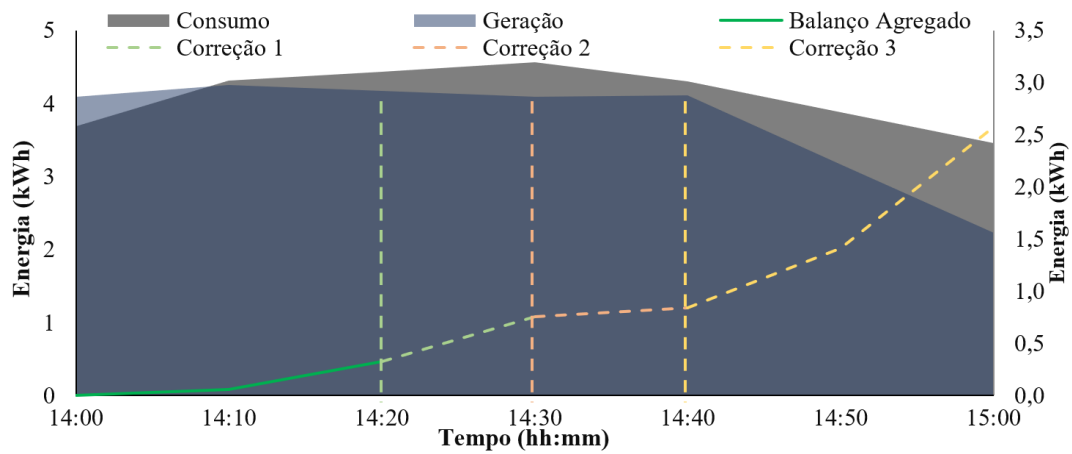


Figura 23. Monitorização do evento de DR do cenário TdF₂₅, no dia 22 de Abril às 14:00 – CE 3.

Tabela 9. Avaliação dos cenários considerados – CE 3.

Cenários	Participantes (#)		Correções (#)	Energia		Taxa de Redução (%)	Emissões de CO ₂ (g)	S (%)
	Principais	Reserva		Balanço (kWh)	Custo (EUR)			
TdF ₂₅	36	6	3	2,578	0,26	32,95	626,88	88,57
TdF ₅₀	35	5	3	1,447	0,16	62,37	421,49	91,67
TdF ₇₅	30	1	1	1,063	0,12	72,35	341,18	92,97
TdF ₁₀₀	30	0	0	0,274	0,07	92,87	271,48	94,17

4.4.2. DISCUSSÃO

Com a Figura 21, podemos verificar que durante o evento de DR, o BA da comunidade teve um valor negativo, atingindo às 14:40 o seu valor mínimo. No entanto, a partir das 14:40, a geração da comunidade diminui bastante em comparação com o consumo, fazendo com que o BA da comunidade fosse aumentando de tal modo que, no fim do evento, o valor do BA é de 0,274 kWh.

Analizando a Figura 22, que ilustra monitorização cenário TdF₇₅, pode-se verificar que durante os primeiros 40 minutos do evento a geração e o consumo da comunidade estavam nivelados de tal modo que o BA da comunidade era aproximadamente zero. Contudo, a partir das 14:40, a geração diminui fazendo com que, consequentemente, o BA da comunidade subisse, atingindo, aproximadamente, 0,1 kWh às 14:50. Desta forma, a Correção 1 foi aplicada, envolvendo um

participante de reserva, onde este pouco efeito teve no balanço, visto o consumo ser superior à geração e tendo o valor da Correção 1, ao fim do evento, atingido um valor aproximado de 1 kWh.

Como se pode ver na Figura 23, ao considerar o cenário TdF₂₅, o balanço energético da comunidade tende a aumentar até ao fim do evento, independentemente de se implementar ou não correções. Neste cenário, foram implementadas três correções às 14:20, 14:30 e 14:40, onde, considerando a informação da Tabela 9 que menciona apenas a existência de 42 possíveis candidatos, estas correções convidaram todos participantes de reserva. No fim deste evento o balanço energético da comunidade atingiu, aproximadamente, 2,5 kWh.

Analisando a Tabela 9, é possível verificar que a diminuição da TdF impacta o desempenho do modelo de gestão de energia de tal forma que a redução efetuada durante o evento pode variar, aproximadamente, entre 90 % a 30 %. Comparando os cenários TdF₇₅ e TdF₅₀, verifica-se que o balanço final destes cenários é relativamente próximo, onde a diferença entre estes é aproximadamente de 0,4 kWh, representando uma diferença de 36,1 %. Isto acontece porque no cenário TdF₅₀, foram convidados mais 9 participantes de reserva do que o cenário TdF₇₅, permitindo que estes ficassem próximos. Comparando o cenário TdF₇₅ com o cenário TdF₁₀₀, podemos verificar que houve uma redução de, aproximadamente, 75 % e 40 % no balanço e no custo, respetivamente. Esta disparidade entre a redução no balanço e custo, pode ser explicada com o auxílio das Figura 21 e Figura 22. Olhando para as respetivas figuras, podemos verificar que, durante os primeiros 40 minutos, no cenário TdF₁₀₀ houve mais excessos de geração vendidos à rede do que no cenário TdF₇₅. Após as 14:40, em ambos os cenários o BA aumentou significativamente, fazendo com que fosse necessário comprar energia à rede. Esta energia comprada à rede, foi aproximadamente o mesmo valor em ambos os cenários. Contudo, como no cenário TdF₁₀₀ se vendeu mais energia, o custo final acaba por ser mais baixo do que no cenário TdF₇₅. Desta forma, considerando o que foi dito previamente, pode-se entender o porquê do valor do balanço (isto é, o BA) do cenário TdF₁₀₀ diferir bastante do cenário TdF₇₅, enquanto o custo, em ambos os cenários, é próximo.

Neste CE, apesar de se considerar que os participantes participam sempre quando convidados, podemos verificar que a diminuição da TdF pode prejudicar significativamente o evento de DR, fazendo com que a variação da taxa de redução seja elevada, onde neste CE foi, aproximadamente, de 60 %. Desta forma, ao compararmos este CE com o anterior, através da Tabela 8 e da Tabela 9, pode-se concluir que o desempenho do modelo de gestão de energia diminui mais facilmente com a variação da TdF do que a variação da TdP.

4.5. CE 4 – PARTICIPAÇÃO COM FLEXIBILIDADE DE DESLOCAMENTO OU REDUÇÃO

O CE 4 serve para analisar o impacto do tipo de participação DoR, apresentado na Secção 3.3. Da mesma forma, com este CE também se testa e analisa o ME, considerando três eventos de DR ocorridos em dias diferentes. Neste CE, considera-se o evento de DR apresentado nas duas secções anteriores (isto é, o evento no dia 22 de abril, às 14:00), denominado por ME_D1, mais os eventos de DR que ocorrem nos dias consequentes, de 26 e 27 de abril, às 11:00 e 12:00, denominados,

respetivamente, por ME_D2 e ME_D3. As reduções previstas para estes dois últimos eventos de DR planeados são, em kWh, de 2,56 e 5,95, respetivamente.

Neste CE, estes três eventos de DR são considerados como os cenários base. Da mesma forma, neste CE, considera-se que cada membro da comunidade tem de participar, no mínimo, em três eventos de DR durante o respetivo mês, isto é, $P_{mes} = 3$ e que o PE é igual a 0,50. Neste CE, de modo a comparar com os resultados obtidos com a implementação do ME, também se consideram três cenários onde não se aplica o respetivo mecanismo nos dias considerados, denominados DR_D1, DR_D2 e DR_D3. Adicionalmente, neste CE também se simula os cenários destacados na Secção 4.1, de BaU, I e FT. É de realçar que este CE serviu de base para criar um trabalho científico que ainda não foi publicado, contudo este trabalho será para ser submetido no *IEEE Transactions on Smart Grid*.

4.5.1. RESULTADOS

De forma a realçar como o ME funciona, é apresentada a Tabela 10, onde podem ser consultados os 15 melhores candidatos para cada evento de DR planeado, obtidos pela combinação do processo de classificação com o ME descritos na Secção 3.2.3. A Tabela 10 mostra, por candidato, a pontuação total das quatro métricas (PM), o multiplicador do ME (MME) e a pontuação final (PF) obtida pelo mecanismo. As cores realçadas nesta tabela (azul, verde e vermelho), realçam os candidatos em comum entre os três cenários, que foram convidados a participar nos respetivos.

A Figura 24 demonstra a monitorização em tempo real do cenário ME_D3. A Tabela 11 mostra os resultados obtidos para cada um dos cenários considerados em cada um dos três dias deste CE. Esta tabela tem a mesma descrição que as tabelas das secções anteriores. É de realçar que nos cenários I, ilustrados nesta tabela, o balanço energético não é aplicável, visto que nestes cenários considera-se que não existe o conceito de comunidade, logo não há distribuição dos excessos de geração pelos demais membros da comunidade.

Tabela 10. Primeiros 15 candidatos classificados para cada evento de DR planeado – CE4.

MD_D1				MD_D2				MD_D3			
C_ID	PM	MME	PF	C_ID	PM	MME	PF	C_ID	PM	MME	PF
C10	60,00	1,87	112,20	C10	74,13	1,77	131,21	C14	58,28	1,78	103,74
C01	59,57	1,87	111,40	C07	59,20	1,93	114,26	C10	58,07	1,62	94,07
C31	52,42	1,87	98,03	C34	55,47	1,93	107,06	C31	50,31	1,78	89,55
C12	55,00	1,70	93,50	C43	48,54	1,93	93,68	C02	50,31	1,78	89,55
C15	55,00	1,70	93,5	C48	45,34	1,93	87,51	C06	50,31	1,78	89,55
C16	49,69	1,70	84,47	C22	48,57	1,77	85,97	C13	53,88	1,62	87,29
C19	41,79	1,87	78,15	C40	44,07	1,93	85,06	C03	42,19	1,95	82,27
C30	49,91	1,53	76,36	C13	53,04	1,60	84,86	C15	48,38	1,62	78,38
C13	49,69	1,53	76,03	C23	51,83	1,60	82,93	C43	42,91	1,78	76,38
C06	44,52	1,70	75,68	C03	42,80	1,93	82,60	C40	37,99	1,95	74,08
C02	44,52	1,70	75,68	C02	46,55	1,77	82,39	C08	73,88	1,00	73,88
C14	43,45	1,70	73,87	C17	45,95	1,77	81,33	C26	40,78	1,78	72,59
C34	33,14	1,87	61,97	C20	49,57	1,60	79,31	C22	44,70	1,62	72,41
C23	39,92	1,53	61,08	C31	44,83	1,77	79,35	C47	36,72	1,95	71,60
C08	60,00	1,00	60,00	C15	48,94	1,60	78,30	C29	36,06	1,95	70,32

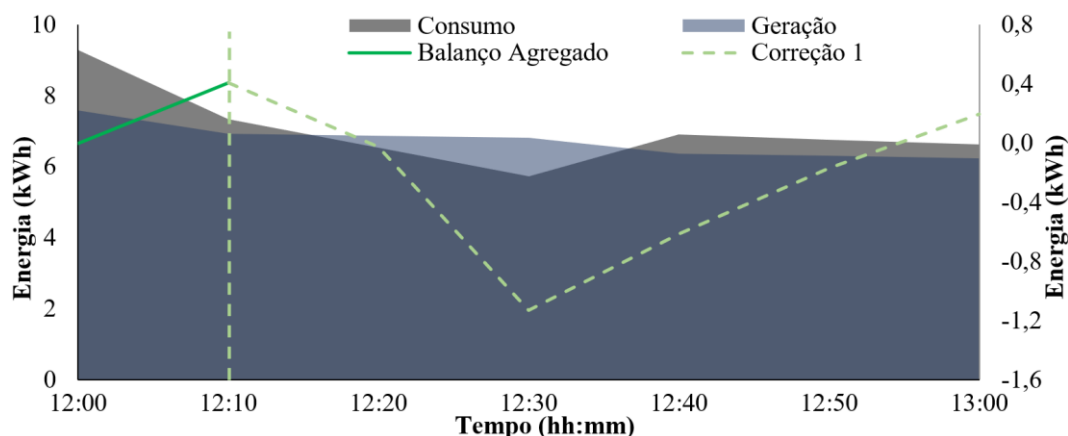


Figura 24. Monitorização do evento de DR do cenário ME_D3, no dia 27 de Abril às 12:00– CE 4.

Tabela 11. Avaliação dos 3 eventos de DR planeados – CE 4.

Dia	Cenário	Participantes (#)		Energia		Taxa de Redução (%)	Emissões de CO ₂ (g)	S (%)
		Principais	Reserva	Balanço (kWh)	Custo (EUR)			
22 de Abril	BaU	N/A	N/A	3,845	0,39	N/A	935,93	84,27
	I	N/A	N/A	N/A	1,08	N/A	4298,66	N/A
	DR_D1	7	0	0,129	0,07	96,64	296,98	93,67
	ME_D1	7	0	-0,004	0,06	100,00	290,24	93,78
	FT	32	N/A	-4,032	-0,17	100,00	148,55	96,41
26 de Abril	BaU	N/A	N/A	2,478	0,49	N/A	1669,23	87,47
	I	N/A	N/A	N/A	1,78	N/A	7604,57	N/A
	DR_D2	8	0	-0,631	0,20	100,00	1080,68	91,10
	ME_D2	6	0	-0,118	0,25	100,00	1176,87	90,45
	FT	50	N/A	-15,422	-0,81	100,00	0,00	100,00
27 de Abril	BaU	N/A	N/A	6,346	0,68	N/A	1590,72	86,54
	I	N/A	N/A	N/A	1,90	N/A	7236,90	N/A
	DR_D3	17	5	-0,169	0,08	100,00	426,11	95,79
	ME_D3	19	4	0,197	0,10	96,90	422,70	95,80
	FT	50	-	-10,059	-0,53	100,00	0,00	100,00

N/A – Não Aplicável;

4.5.2. DISCUSSÃO

Na Tabela 10, ao comparar o PM com o PF, verifica-se que o ME melhorou a classificação de alguns candidatos, como é o caso dos candidatos C15 e do C31, do cenário MD_2 para MD_3. Considerando as informações da Tabela 11, pode-se verificar que nos cenários ME_D1, ME_D2 e ME_D3, a quantidade de participantes, em cada dia, é 7, 6 e 23, respetivamente. A este respeito, através da Tabela 10, verifica-se que os candidatos selecionados como participantes principais mudaram de um evento de DR para outro, exceto o candidato C10 que participou nos três eventos. Isto acontece devido a este candidato ter boas pontuações nas quatro métricas e bons MMEs em cada evento. No cenário ME_D3, verifica-se que alguns candidatos já participaram em pelo menos um dos eventos anteriores, nomeadamente, o C15, C22, C31 e C43. Por exemplo, o C15 participou no primeiro evento de DR, fazendo com que o seu MME fosse mais baixo no segundo evento em comparação com o seu MME no primeiro evento. Já no terceiro evento, o seu FMM voltou a aumentar, uma vez que o respetivo evento ocorreu perto do final do mês, possibilitando ao C15

participar no evento, visto que o seu P_{mes} era inferior a 3. No final dos três eventos de DR, verificou-se que apenas alguns participantes foram convidados para dois eventos, excluindo o C10.

Examinando a Figura 24, verifica-se que, às 14:10, o BA atinge um valor positivo de, aproximadamente, 0,41 kWh. Desta forma, foi necessário implementar a Correção 1 que envolveu a participação de quatro participantes de reserva. Com a Correção 1, o balanço energético da comunidade diminui até às 14:30, atingindo o seu valor mínimo. A partir deste instante, o BA foi aumentando até ao fim do evento, atingindo, aproximadamente, 0,20 kWh. Neste CE, o balanço energético da comunidade não foi completamente nivelado, devido ao facto de que a redução prevista no dia anterior diferir, aproximadamente, em 6,24 % da redução real. Todavia, através da Tabela 11, verifica-se que, com este evento de DR, foi possível efetuar uma redução de 96,90 % do valor pretendido e aumentar a sustentabilidade em quase 10 %.

Analisando a Tabela 11, pode-se verificar diversas comparações entre os cenários de cada dia. Por exemplo, comparando os cenários BaU e I, verifica-se que, para cada dia, a aplicabilidade do conceito de comunidade de energia em uma só hora permite, por um lado, uma redução no custo de 0,69 EUR, 1,29 EUR e 1,22 EUR, respetivamente. Por outro lado, também permite reduzir significativamente as emissões de CO₂, para cada dia, cerca 3.362,73 g, 5.935,34 g e 5.646,18 g, respetivamente. Em relação aos cenários BaU e FT, pode-se verificar a redução máxima dos custos de energia como também das emissões de CO₂ que se podem obter em cada um dos eventos de DR. No que respeita ao custo energético da comunidade, as reduções são, respetivamente, de 0,56 EUR, 1,30 EUR e 1,21 EUR, para cada um dos dias. Quanto às reduções de CO₂, com estes eventos verifica-se que no primeiro evento as emissões reduziram aproximadamente 85 %, enquanto nos restantes dois dias as reduções foram de 100 %. Olhando para os cenários em que se implementa os eventos de DR com e sem o ME para cada dia, podemos verificar que estes tiveram desempenhos muito semelhantes. Os respetivos eventos de DR em cada um dos cenários foram um sucesso, excluindo nos cenários DR_D1 e ME_D3. Nestes casos, o valor do balanço energético foi um pouco superior a zero devido à redução prevista diferir da redução real, tal como já foi mencionado anteriormente. No entanto, as reduções efetuadas nestes eventos reduziram, respetivamente, cerca de 96,64 % e 96,60 % do valor necessário. Deste modo, com estes cenários prova-se a utilidade do ME, onde a implementação deste, por um lado, não interfere com o sucesso do evento de DR e, por outro lado, possibilita que outros membros da comunidade participem, provando assim a utilidade do respetivo ME. Nesta tabela, também se verifica que existem alguns cenários, como ME_D1, ME_D2, DR_D2 e DR_D3, que apesar do balanço energético ser negativo (excesso de geração), o custo é positivo e a sustentabilidade é inferior a 100 %. Isto, tal como já foi mencionado na Secção 4.3.2, isto acontece visto que, ao longo da monitorização do evento de DR, houve uns instantes onde o consumo da comunidade de energia foi superior à geração.

4.6. CE 5 – EVENTO DE DR EM GRANDE ESCALA

O CE 5 serve para ilustrar o desempenho do modelo proposto quando aplicado numa comunidade de maior escala. Os dados considerados neste CE baseiam-se numa comunidade de energia com 250 residências, onde cada uma destas possui dois VEs (Goncalves et al., 2023). Além disso, esta comunidade usufrui da geração fotovoltaica proveniente de 200 edifícios. No contexto

desta CE, considera-se que cada VE é uma identidade independente, onde é tratada separadamente do respetivo edifício residencial associado. Desta forma, a respetiva comunidade possui à sua disposição 750 entidades que podem contribuir para os eventos de DR. A Tabela 12 apresenta as principais informações sobre estes dois tipos de VEs, indicando, por cada tipo, a quantidade, a capacidade das baterias correspondentes, a taxa de carregamento médio desde 10 % a 80 % e a sua eficiência de carregamento. Sendo que cada residência possui um VE do tipo 1 e um VE do tipo 2.

Tabela 12. Informação dos VEs considerados – CE 5.

Tipo de VE	Quantidade (#)	Capacidade (kWh)	Carregamento Médio (kW)	Eficiência (%)
VE 1	250	26,8 – 55,7	27,7 – 75,2	81 – 97
VE 2	250	63,0 – 85,6	90,5 – 121	91 – 99

No contexto deste CE, o objetivo consiste em minimizar os picos de consumo que ocorreram durante a madrugada (entre as 00:00 e as 06:00), onde, para tal, se considera a flexibilidade das residências e dos VEs para efetuar o balanço dos recursos energéticos da comunidade. No caso das residências, estas podem fornecer flexibilidade por meio de reduções, onde reduzem o seu respetivo consumo durante o evento de DR. No caso dos VEs, estes fornecem flexibilidade por meio de deslocamento, onde deslocam o seu consumo durante o período do evento de DR para períodos em que há um excesso de geração, caso estes existam. Adicionalmente, para este CE, foram simulados os cenários BaU e FT. Este CE é baseado num trabalho científico já aceite e apresentado, sendo este trabalho:

- **(Conferência, aceite e apresentado) Barreto, R.,** Gomes, L. & Vale, Z. (2023). Demand Response-based Model for an Energy Community Considering Members and Electric Vehicles Participation. 23rd International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC23);

4.6.1. RESULTADOS

A Figura 25 ilustra a previsão dos recursos energéticos da respetiva comunidade, onde são realçados os períodos com excesso de geração fotovoltaica que vão das 11:00 às 14:00 horas. Da mesma forma, são também demonstrados os perfis típicos de consumo, de geração e de flexibilidade por deslocamento e redução da comunidade. Neste caso, pode-se verificar que a flexibilidade por deslocamento existe maioritariamente durante a madrugada, onde isto está associado aos carregamentos dos VEs que decorrem com maior frequência nesses instantes.

Pela análise desta previsão, verifica-se que à 00:00 existe um pico de carga, com um valor igual a 342 kWh, onde se pretende minimizá-lo até a um dado limite, utilizando a flexibilidade da comunidade. Neste CE, o respetivo limite mencionado, é estabelecido considerando a média do consumo previsto da comunidade entre a 00:00 e as 06:00, onde neste caso, este limite é de 234 kWh. Deste modo, para atingir este limite, é necessário reduzir 108 kWh do consumo da comunidade.

Neste CE, verificou-se, através da classificação apresentada na Secção 3.2.3, que existem 559 possíveis candidatos com flexibilidade para o evento de DR à 00:00, onde a pontuação dos primeiros dez classificados é ilustrada na Tabela 13. Esta tabela destaca a pontuação dos candidatos em cada

métrica e na totalidade. Pela análise dos dados, verifica-se que os primeiros dez candidatos são apenas VE, como é demonstrado pelas iniciais dos IDs dos candidatos e uma vez que não há pontuação na métrica 3, sendo que esta métrica apenas avalia a flexibilidade aplicada por reduções.

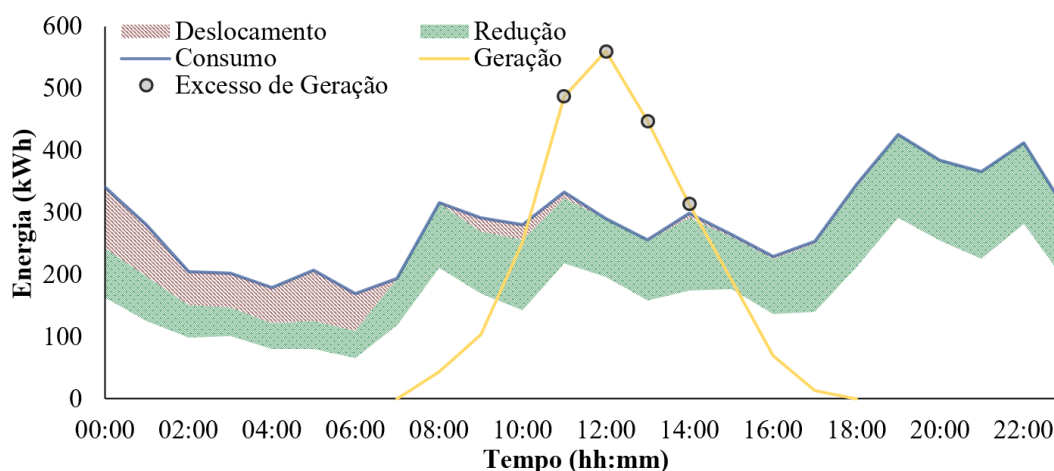


Figura 25. Previsão do dia seguinte dos recursos da comunidade – CE 5.

Tabela 13. Primeiros 10 candidatos classificados – CE 5.

Candidato	Métrica 1	Métrica 2	Métrica 3	Métrica 4	Total
VE541	17,40	20,00	0,00	20,00	57,40
VE622	20,00	17,01	0,00	19,40	56,41
VE477	16,13	20,00	0,00	20,00	56,13
VE369	18,69	17,01	0,00	19,98	55,68
VE394	18,69	17,01	0,00	19,78	55,48
VE330	18,69	17,01	0,00	19,40	55,10
VE324	17,40	17,01	0,00	19,78	54,19
VE422	18,69	15,11	0,00	20,00	53,80
VE496	18,69	15,11	0,00	19,98	53,78
VE498	16,13	17,01	0,00	19,78	52,92

A Figura 26 destaca a monitorização realizada no evento de DR à 00:00. A Figura 27 ilustra os recursos energéticos da comunidade antes e após o evento de DR. Da mesma forma, também é ilustrado a flexibilidade dos participantes usada no evento. A Figura 27, ilustra os dados reais da comunidade no dia do evento, onde diferem dos dados previstos apresentados na Figura 25, principalmente no que diz respeito aos períodos com excessos de geração fotovoltaica. Maior parte da flexibilidade usada no evento de DR à 00:00, é flexibilidade obtida através de deslocamento, que foi posteriormente alocada, principalmente, durante os períodos com excessos de geração.

A Tabela 14 apresenta as avaliações dos diferentes cenários considerados para analisar a contribuição do modelo de gestão proposto numa comunidade de maior escala, ilustrando, para cada cenário, a energia que a comunidade comprou à rede, o respetivo custo energético e as emissões de CO₂. O respetivo custo energético foi calculado através de uma tarifa dinâmica. Além disso, os valores de energia apresentadas são os dados reais da comunidade recolhidos durante o evento, sendo que estes valores diferem dos valores de energia previstos. As Correções 1, 2 e 3 correspondem às respetivas correções aplicadas no evento de DR. Neste CE, as correções foram aplicadas sempre que o BA se encontrava acima da linha do limite.

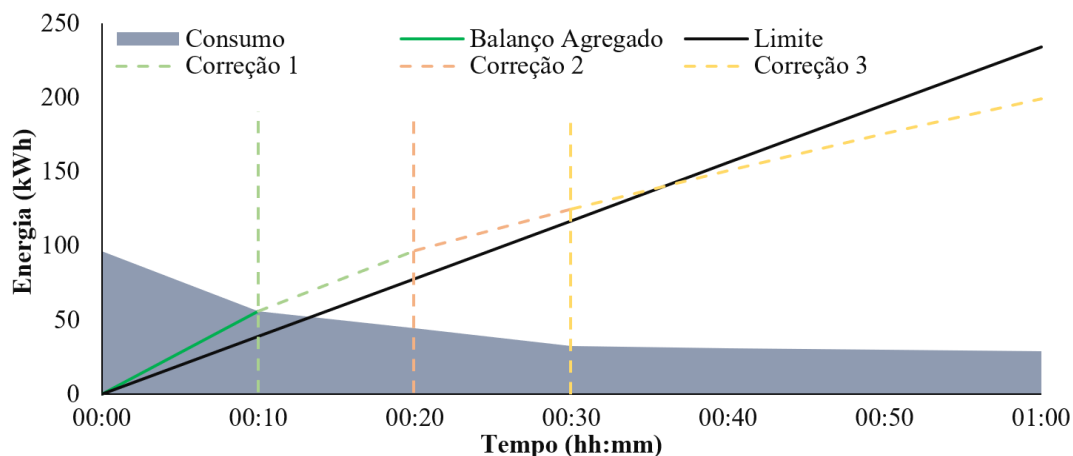


Figura 26. Monitorização do evento de DR, às 00:00 – CE 5.

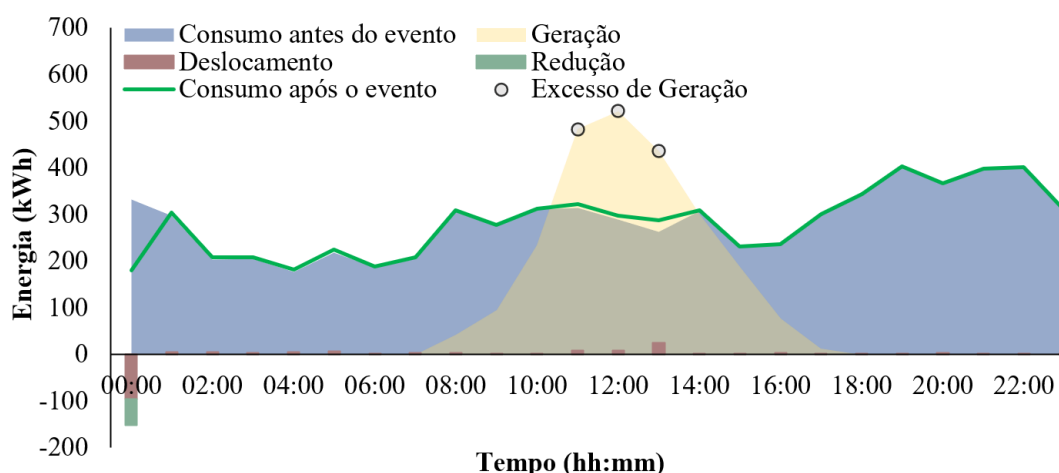


Figura 27. Balanço da energia da comunidade após o evento de DR, às 00:00 – CE 5.

Tabela 14. Avaliação do evento de DR – CE 5.

Crítérios	BaU	FT	BA	Correção 1	Correção 2	Correção 3
Custo (EUR)	34,14	5,90	22,96	21,67	20,75	20,48
Energia da rede (kWh)	331,72	57,35	223,06	210,58	201,62	198,97
Emissão de CO ₂ (kg)	80,74	13,50	54,29	51,25	49,07	48,43

4.6.2. DISCUSSÃO

Pela análise da Figura 26, verifica-se que o pico de consumo da comunidade foi logo no início do evento de DR. Isto deve-se ao facto de os VEs da comunidade em questão estarem a carregar, uma vez que o preço da energia nessa hora é mais baixo. Contudo, este pico de consumo inicial fez com que o BA da comunidade fosse muito superior ao limite, o que resultou na aplicação imediata de correções. Desta forma, durante os primeiros 30 minutos do evento de DR, foi necessário a aplicação de três correções, de modo a reduzir o BA da comunidade para um valor igual ou inferior ao limite estabelecido. As três correções aplicadas fizeram com que o BA da comunidade atingisse um valor abaixo do limite antes da 00:40. No final do evento de DR, o BA da comunidade atingiu um valor, aproximadamente, de 35 kWh abaixo do respetivo limite. No total, 300 candidatos contribuíram para este evento, sendo que 249 eram VEs.

Pela análise da Tabela 14, verifica-se que o BA seria o suficiente no final do evento de DR, onde o seu valor era inferior ao Limite estabelecido. Através da comparação dos cenários BaU e FT, verifica-se que a comunidade conseguiria poupar, no máximo, até 28,24 EUR. No entanto, o cenário FT requer a participação de todos os consumidores disponíveis, levando a uma situação em que o Limite definido iria ser largamente ultrapassado para valores inferiores. Com o evento de DR, o custo de energia da comunidade diminui cerca de 13,66 EUR, como se pode ver pela comparação dos cenários BaU e Correção 3, porém, apenas 300 participantes são convidados, permitindo uma aproximação com o Limite definido. Por fim, é também importante realçar que com a aplicação do evento de DR, foi possível reduzir as emissões de CO₂ em 32,31 kg. Assim, de uma forma geral, com este CE verifica-se que o modelo proposto pode ser adaptado para diferentes contextos.

4.7. CONCLUSÕES

De forma a analisar melhor a aplicabilidade do modelo de gestão de energia proposto, a Tabela 15 compara os diferentes CE apresentados, contendo os resultados obtidos em cada um dos diferentes CE considerados nesta dissertação. Neste contexto, de modo a representar a informação obtida com os cenários apresentados na CE 4, considera-se que o CE 4.1, CE 4.2 e CE 4.3, representam, respetivamente, os três eventos de DR durante os três dias do CE.

Com a análise do CE 1, foi possível verificar o impacto que as combinações das métricas têm na avaliação dos possíveis candidatos e, consequentemente, no evento de DR. Com este CE, demonstrou-se que com o cenário M_12 é possível aumentar a participação ativa dos membros da comunidade, enquanto com o cenário M_34 é possível selecionar corretamente os candidatos com a respetiva flexibilidade necessária para reduzir o valor previsto. Contudo, o melhor resultado obtido com o CE 1 é o cenário em que se combina as quatro métricas, o M_1234. Neste cenário, verificou-se que o respetivo planeamento do evento de DR foi o mais eficiente, visto que no fim do evento de DR o balanço energético entre o consumo e a geração da comunidade foi o mais próximo de zero.

Relativamente à análise dos CE 2 e 3, foi possível verificar a importância que a participação dos membros da comunidade tem para o desempenho do evento de DR. Para tal, nestes CEs, considerando o mesmo evento de DR, simulou-se a falta de compromisso dos candidatos perante a participação de um evento de DR, onde se analisou o impacto que a TdP e a TdF têm no evento. Considerando os dados da Tabela 15, pode-se verificar que em ambos os CE, à medida que se diminui o valor da respetiva taxa, o desempenho do evento de DR também diminui, sendo que a TdF é a que causa mais impactos negativos ao evento. Da mesma forma, com o CE 2 e 3 também se pretendeu analisar, respetivamente, o impacto que os tipos de participação Agregado e EpE têm no evento, isto é, analisar os cenários TdP₁₀₀ e TdF₁₀₀. De uma forma geral, durante o planeamento do evento de DR, verificou-se que, com o tipo de participação EpE é possível convidar mais membros da comunidade, comparativamente ao tipo de participação Agregado. Como também permite convidar os participantes necessários, capazes de fornecerem, no total, uma quantidade de flexibilidade próxima do valor da redução pretendida. Da mesma forma, após o evento de DR, verificou-se que o evento foi um sucesso no CE 2, enquanto no CE 3 constatou-se que apenas se reduziu 92,87 % do valor necessário a reduzir. O facto do evento do CE 3 não ter sido um sucesso deve-se ao erro de

previsão da redução necessária. Este erro de previsão não influenciou o CE 2, visto que neste CE os participantes convidados forneciam, no total, uma flexibilidade superior ao valor da redução prevista, o que permitiu compensar o respetivo desvio do erro.

Tabela 15. Comparação entre os CE considerados.

CE	Cenário	Participantes (#)		Correções (#)	Energia		Taxa de Redução (%)	Emissões de CO ₂ (g)	S (%)
		Principais	Reserva		Balanço (kWh)	Custo (EUR)			
1	BaU	N/A	N/A	N/A	6,110	0,74	N/A	2107,32	80,11
	I	N/A	N/A	N/A	N/A	1,71	N/A	6786,24	N/A
	M_12	23	13	2	-1,423	0,12	100,00	919,10	91,30
	M_34	10	37	2	-0,976	0,14	100,00	902,83	93,20
	M_1234	17	21	2	-0,186	0,19	100,00	984,66	90,67
	FT	50	N/A	N/A	-7,234	-0,24	100,00	580,60	93,20
2	TdP ₂₅	2	1	1	1,223	0,14	68,19	391,41	92,15
	TdP ₅₀	3	4	1	1,575	0,17	59,04	460,14	91,18
	TdP ₇₅	4	0	0	0,550	0,10	85,70	354,70	92,76
	TdP ₁₀₀	6	0	0	-0,216	0,04	100,00	227,90	94,89
3	TdF ₂₅	36	6	1	2,578	0,26	32,95	626,88	88,57
	TdF ₅₀	35	5	1	1,447	0,16	62,37	421,49	91,67
	TdF ₇₅	30	1	1	1,063	0,12	72,35	341,18	92,97
	TdF ₁₀₀	30	0	0	0,274	0,07	92,87	271,48	94,17
4.1	BaU	N/A	N/A	N/A	3,845	0,39	N/A	935,93	84,27
	I	N/A	N/A	N/A	N/A	1,08	N/A	4298,66	N/A
	DR_D1	7	0	0	0,129	0,07	96,64	296,98	93,67
	ME_D1	7	0	0	-0,004	0,06	100,00	290,24	93,78
	FT	32	N/A	N/A	-4,032	-0,17	100,00	148,55	96,41
4.2	BaU	N/A	N/A	N/A	2,478	0,49	N/A	1669,23	87,47
	I	N/A	N/A	N/A	N/A	1,78	N/A	7604,57	N/A
	DR_D2	8	0	0	-0,631	0,20	100,00	1080,68	91,10
	ME_D2	6	0	0	-0,118	0,25	100,00	1176,87	90,45
	FT	50	N/A	N/A	-15,422	-0,81	100,00	0,00	100,00
4.3	BAU	N/A	N/A	N/A	6,346	0,68	N/A	1590,72	86,54
	I	N/A	N/A	N/A	N/A	1,90	N/A	7236,90	N/A
	DR_D3	17	5	1	-0,169	0,08	100,00	426,11	95,79
	ME_D3	19	4	1	0,197	0,10	100,00	422,70	95,80
	FT	50	-	N/A	-10,059	-0,53	100,00	0,00	100,00
5	BaU	N/A	N/A	N/A	331,72	34,14	N/A	80741,22	N/A
	BA	227	N/A	N/A	223,06	22,96	100,00	54293,29	N/A
	Correção 3	227	73	3	198,97	20,48	100,00	48430,27	N/A
	FT	750	N/A	N/A	57,35	5,90	100,00	13496,95	N/A

N/A – Não Aplicável;

No CE 4, foi possível verificar o impacto que a aplicabilidade do ME tem nos evento de DR, onde para tal foram considerados três dias distintos da mesma semana. Neste CE, constatou-se que, de evento em evento, os candidatos selecionados como participantes principais mudaram, exceto o candidato C10, visto que este teve ótimas pontuações nas três classificações. Assim, com o CE 4 provou-se que a implementação do ME não interfere negativamente com o sucesso do evento de DR, permitindo a participação de outros candidatos. Por fim, comparando ainda o cenário ME_D1, do CE 4.1, com os cenários TdP₁₀₀ e TdF₁₀₀, do CE 2 e 3, respetivamente, podemos verificar que o tipo de participação DoR permitiu, para este evento, obter um balanço energético mais próximo de zero.

Por último, com o CE 5, pretendeu-se verificar o desempenho do modelo proposto numa comunidade de maior escala como também a aplicabilidade da mesma em diferentes contextos. Desta forma, para este CE, considerou-se uma comunidade de energia com cerca de 750 entidades capazes de participar nos eventos de DR, sendo que destas, 500 entidades são VEs. Desta forma, o contexto do CE 5 consiste em minimizar o impacto que os carregamentos do VEs, efetuados durante a madrugada, têm na rede da comunidade de energia, contribuindo, portanto, para a integração dos VEs na rede. Com este CE, verificou-se que o evento de DR planeado foi um sucesso, comprovando assim a adaptabilidade do modelo proposto neste trabalho de dissertação.

5. CONCLUSÕES

Esta secção apresenta as principais conclusões obtidas no âmbito desta dissertação. Posteriormente, são também identificados e descritos possíveis trabalhos futuros que permitirão melhorar e dar continuidade ao trabalho elaborado nesta dissertação.

5.1. CONCLUSÕES FINAIS

Com a elaboração desta dissertação, verificou-se que a emergência das comunidades de energia e a proliferação dos dispositivos de internet das coisas, possibilita o surgimento de novas oportunidades para otimizar o consumo e a eficiência energética dos sistemas energéticos. Esta análise é o resultado da pesquisa do estado da arte feita, correspondente ao Objetivo 1 (“Pesquisar o estado da arte, nomeadamente sobre edifícios inteligentes, comunidade de energia, TE, DR e arquiteturas de IoT”).

Desta forma, o trabalho realizado nesta dissertação apresenta um modelo baseado em *demand response* que permite gerir eficazmente a participação dos membros de uma comunidade de energia, tendo em consideração a privacidade e a segurança dos dados dos utilizadores finais. De uma forma geral, este modelo usa modelos de previsão, referente ao Objetivo 2 (“Desenvolver modelos de previsão de consumo, geração e flexibilidade da procura para identificar períodos temporais em que seja benéfica a utilização de DR para nivelar o consumo e a geração na comunidade de energia”), baseados em redes neurais, para prever as oportunidades de aplicação de programas de *demand response* para nivelar o consumo e a geração na comunidade de energia. Posteriormente, o modelo proposto, através de métricas baseadas em algoritmos de agrupamento, referente ao Objetivo 3 (“Desenvolver um modelo de DR que utiliza métricas que refletem o comportamento dos membros da comunidade de energia, as quais são baseadas em algoritmos de aprendizagem não

supervisionada”), avalia os dados dos possíveis candidatos para o evento e classifica-os. Após a classificação dos candidatos, o modelo proposto define a ordem de seleção pela qual os candidatos serão convidados para o evento. Durante o respetivo evento, existe a monitorização dos recursos energéticos da comunidade de energia para averiguar se o evento está a ter o seu devido efeito. Por fim, de forma a quantificar o impacto que o respetivo evento teve na comunidade de energia, efetua-se uma avaliação.

Esta dissertação, de modo a ir em conta com o Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (UE 2016/679), considera que o modelo proposto abrange três tipos de participação, onde os membros de uma comunidade podem optar por escolher um, sendo estes tipos de participação o Agregado, o Deslocamento ou Redução e o Equipamento por Equipamento. Cada um destes tipos de participação representa, de uma certa forma, um nível de privacidade, onde cada um implica que o membro da comunidade partilhe certos dados relacionados com a flexibilidade. Este desenvolvimento é o resultado do Objetivo 4 (“Definir e conceber vários tipos de participação dos membros da comunidade, considerando diferentes níveis de privacidade, para que os membros da comunidade possam ter várias opções para a sua participação”).

No âmbito desta dissertação também foi desenvolvido um mecanismo de equidade, dando resposta ao Objetivo 5 (“Desenvolver um mecanismo que promove a equidade nas oportunidades de participação dos membros da comunidade de energia na DR ao longo do tempo”). Este mecanismo permite melhorar a pontuação de todos os candidatos, especialmente os candidatos que participam poucas vezes em eventos de *demand response*. Desta forma, este mecanismo possibilita que todos membros da comunidade tenham oportunidade de contribuir para o balanço dos recursos energéticos da comunidade de energia.

De modo a verificar a fiabilidade do modelo proposto, foram considerados cinco casos de estudo. O primeiro caso de estudo serviu para averiguar o impacto que as diferentes métricas do modelo têm no evento. O segundo e terceiro casos de estudo serviram para analisar, respetivamente, os tipos de participação o Agregado e Equipamento por Equipamento e analisar o impacto que a falta de compromisso dos membros poderia ter nos eventos. O quarto caso de estudo serviu para avaliar o desempenho que o mecanismo de equidade tem nos eventos, no qual se considera o tipo de participação Deslocamento e Redução. E o quinto caso de estudo serve para verificar a adaptabilidade do respetivo modelo proposto perante uma comunidade de energia de maior escala e num contexto diferente. Assim, nesta dissertação, com a aplicação destes casos de estudo, foi possível testar e validar a aplicabilidade e adaptabilidade do modelo proposto, indo em conta com o Objetivo 6 (“Testar e validar os modelos concebidos e desenvolvidos no âmbito desta dissertação e mecanismos utilizando dados reais para a construção de caso de estudo e cenários”). Dos casos de estudo concluiu-se que:

- A implementação do modelo proposto, considerando as quatro métricas apresentadas na Secção 3.2.3, permite ter melhores resultados do que os casos em que se considera apenas duas métricas;
- Cada um dos três tipos de participação permitem implementar um evento de resposta dos consumidores com sucesso, contudo, o mais preciso dos três foi o caso em que considerou o tipo de participação Deslocamento e Redução;

- A falta de compromisso dos membros interfere significativamente com o sucesso dos eventos, sendo que a variação da taxa de flexibilidade dos membros é a mais prejudicial para o respetivo evento;
- É importante cativar devidamente os membros de modo a que estes participem nos respetivos eventos de *demand response*, contribuindo para o balanço energético dos recursos da comunidade de energia;
- O mecanismo de equidade possibilita que candidatos com pontuações mais baixas, devido ao seu histórico, ou falta dele, tenham as suas pontuações inflacionadas, resultando em mais oportunidades de participação, sem interferir com o sucesso dos eventos de *demand response*;
- O modelo é apto para ser implementado em diferentes contextos e capaz de gerir o balanço de uma comunidade de energia de maior escala, verificando assim a sua adaptabilidade e escalabilidade.

É também importante de realçar que, após a elaboração desta dissertação, é possível verificar que todos os objetivos estabelecidos na Secção 1.2 foram concretizados e que desta dissertação foram realizadas 11 publicações científicas, sendo 5 em revistas indexadas no SCIE (*Science Citation Index Expanded*), 3 em conferências e 2 em capítulos de livro

5.2. TRABALHO FUTURO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação propõe um modelo de gestão de energia orientado para as comunidades de energia, com especial foco na privacidade dos dados dos consumidores. Este trabalho terá continuidade, de modo a, por um lado, melhorar certos pontos, e, por outro lado, implementar novos modelos de forma a tornar este trabalho mais completo.

Neste trabalho, tendo em conta que o modelo proposto depende de algoritmos de previsão para identificar possíveis eventos de resposta dos consumidores, uma possível melhoria seria o aperfeiçoamento dos modelos de previsão implementados de modo a aumentar a precisão dos eventos planeados. É também importante realçar que, no contexto da resposta dos consumidores, a participação dos membros da comunidade de energia influencia fortemente o desempenho dos modelos de gestão de energia. Assim, de modo a garantir que os eventos planeados decorrem de forma pretendida e eficiente, é necessário incentivar e educar os respetivos membros.

Atendendo ao contexto de trabalho de dissertação, uma possível inovação seria a implementação de modelos que otimizem a distribuição da flexibilidade de deslocamento dos participantes após o evento de resposta. Desta forma, com a otimização da distribuição da flexibilidade de deslocamento, poder-se-ia contribuir para a correta distribuição da flexibilidade, diminuindo o esforço da rede e poder-se-ia considerar diversas restrições impostas pelos respetivos participantes, de modo a ir de encontro ao seu bem-estar.

Ao nível das métricas propostas, outras poderão ser aplicadas ao modelo proposto para permitir a análise e avaliação de outras variáveis e condicionantes. Como forma de continuidade do

trabalho aqui apresentado, foram já idealizadas duas novas métricas que avaliam o esforço de corte de consumo dos participantes. As duas novas métricas são:

- **Métrica 5:** considera a flexibilidade de redução anunciada pelo candidato na comunicação (explicada na Secção 3.2.2) versus a taxa de esforço do candidato, em que a respetiva flexibilidade de redução é o parâmetro de avaliação;
- **Métrica 6:** considera o preço médio por kWh da flexibilidade de deslocamento anunciada pelo candidato na comunicação (explicada na Secção 3.2.2) versus a taxa de esforço do candidato, em que o respetivo preço médio por kWh é o parâmetro de avaliação.

Estas duas novas métricas já foram testadas e implementadas num trabalho científico que já foi submetido. O respetivo trabalho científico é:

- **(Conferência, submetido) Barreto, R., Gomes, L. & Vale, Z. (2023).** Demand Response-based Energy Management Model for Energy Communities considering Data Privacy of the Members. IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe 2023 (ISGT Europe 2023).

Referências Bibliográficas

- Abd Rahman, N. M., Lim, C. H., & Fazlizan, A. (2021). Optimizing the energy saving potential of public hospital through a systematic approach for green building certification in Malaysia. *Journal of Building Engineering*, 43, 103088. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103088>
- Abdou, N., EL Mghouchi, Y., Hamdaoui, S., EL Asri, N., & Mouqallid, M. (2021). Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. *Building and Environment*, 204, 108141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141>
- Abrishambaf, O., Lezama, F., Faria, P., & Vale, Z. (2019). Towards transactive energy systems: An analysis on current trends. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100418. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100418>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Al-Qamash, A., Soliman, I., Abulibdeh, R., & Saleh, M. (2018). Cloud, Fog, and Edge Computing: A Software Engineering Perspective. *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, 276–284. <https://doi.org/10.1109/COMAPP.2018.8460443>
- Alasser, R., Tripathi, A., Joji Rao, T., & Sreekanth, K. J. (2017). A review on implementation strategies for demand side management (DSM) in Kuwait through incentive-based demand response programs. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 77, pp. 617–635). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.023>
- Alkaabi, N., Cho, C., Mayyas, A., & Azar, E. (2020). A data-driven modeling and analysis approach to test the resilience of green buildings to uncertainty in operation patterns. *Energy Science & Engineering*, 8(12), 4250–4269. <https://doi.org/10.1002/ese3.808>
- Ascione, F., De Masi, R. F., Gigante, A., & Vanoli, G. P. (2022). Resilience to the climate change of nearly zero energy-building designed according to the EPBD recast: Monitoring, calibrated energy models and perspective simulations of a Mediterranean nZEB living lab. *Energy and Buildings*, 262, 112004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112004>
- Bahramara, S. (2021). Robust Optimization of the Flexibility-constrained Energy Management Problem for a Smart Home with Rooftop Photovoltaic and an Energy Storage. *Journal of Energy Storage*, 36, 102358. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102358>
- Barreto, R., Gonçalves, C., Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2022). Evaluation Metrics to Assess the Most Suitable Energy Community End-Users to Participate in Demand Response. *Energies*, 15(7), 2380. <https://doi.org/10.3390/en15072380>
- Boreiko, D., Kozadajevs, J., & Sauhats, A. (2017). Implementing energy efficiency and demand-side management in glasswork company. *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2017-Novem*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2017.8124829>
- Bourazeri, A., & Pitt, J. (2018). Collective attention and active consumer participation in community energy systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, 119, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.06.001>
- Cambridge, D. (n.d.). *FAIRNESS | Significado, definição em Dicionário Cambridge inglês*. Retrieved April 11, 2023, from <https://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles/fairness>

- Cao, H., Wachowicz, M., Renso, C., & Carlini, E. (2019). Analytics Everywhere: Generating Insights From the Internet of Things. *IEEE Access*, 7, 71749–71769. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919514>
- Caramizaru, A., & Uihlein, A. (2019). *Energy communities : an overview of energy and social innovation*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a2df89ea-545a-11ea-aece-01aa75ed71a1/language-en>
- Casini, M. (2016). *Smart Buildings*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00182-4>
- Cielo, A., Margiaria, P., Lazzeroni, P., Mariuzzo, I., & Repetto, M. (2021). Renewable Energy Communities business models under the 2020 Italian regulation. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128217>
- Colak, I., Bayindir, R., & Sagiroglu, S. (2020). The Effects of the Smart Grid System on the National Grids. *8th International Conference on Smart Grid, IcSmartGrid 2020*, 122–126. <https://doi.org/10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144891>
- Cole, L. B. (2019). Green building literacy: a framework for advancing green building education. *International Journal of STEM Education*, 6(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40594-019-0171-6>
- Comissão Europeia. (2014). *2030 Climate & Energy Framework*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en
- Comissão Europeia. (2018, November). *2050 long-term strategy*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en
- Comissão Europeia. (2019). *Pacto Ecológico Europeu*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt
- European Climate Law, 2021 Official Journal of the European Union 17 (2021). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_en
- Cvitić, I., Peraković, D., Periša, M., & Gupta, B. (2021). Ensemble machine learning approach for classification of IoT devices in smart home. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 12(11), 3179–3202. <https://doi.org/10.1007/s13042-020-01241-0>
- de São José, D., Faria, P., & Vale, Z. (2021). Smart energy community: A systematic review with metanalysis. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100678>
- de Souza Dutra, M. D., & Alguacil, N. (2023). Fairness of prosumers' incentives in residential demand response: A practical decentralized optimization approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 109015. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109015>
- Dong, X., Li, X., & Cheng, S. (2020). Energy Management Optimization of Microgrid Cluster Based on Multi-Agent-System and Hierarchical Stackelberg Game Theory. *IEEE Access*, 8, 206183–206197. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037676>
- Etedadi Aliabadi, F., Agbossou, K., Kelouwani, S., Henao, N., & Hosseini, S. S. (2021). Coordination of Smart Home Energy Management Systems in Neighborhood Areas: A Systematic Review. *IEEE Access*, 9, 36417–36443. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061995>
- Faia, R., Soares, J., Pinto, T., Lezama, F., Vale, Z., & Corchado, J. M. (2021). Optimal Model for Local Energy Community Scheduling Considering Peer to Peer Electricity Transactions. *IEEE Access*, 9, 12420–12430. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051004>
- Falsafi, H., Zakariazadeh, A., & Jadid, S. (2014). The role of demand response in single and multi-objective wind-thermal generation scheduling: A stochastic programming. *Energy*, 64, 853–867. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.034>
- Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18–28. <https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876>

- Faria, P., Barreto, R., & Vale, Z. (2019). Demand Response in Energy Communities Considering the Share of Photovoltaic Generation from Public Buildings. *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SEST.2019.8849082>
- Faria, P., & Vale, Z. (2011). Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach. *Energy*, 36(8), 5374–5384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.049>
- Federal Energy Regulatory Commission. (2011). Assessment of Demand Response and Advanced Metering Staff Report Federal Energy Regulatory Commission. In *Energy* (Vol. 74, Issues 0022-3042 SB-IM). <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-06/2010-dr-report.pdf>
- Fei, X., Shah, N., Verba, N., Chao, K. M., Sanchez-Anguix, V., Lewandowski, J., James, A., & Usman, Z. (2019). CPS data streams analytics based on machine learning for Cloud and Fog Computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 90, 435–450. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.06.042>
- Frieden, D., Tuerk, A., Roberts, J., D’Herbement, S., Gubina, A. F., & Komel, B. (2019). Overview of emerging regulatory frameworks on collective self-consumption and energy communities in Europe. *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2019-Septe, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEM.2019.8916222>
- Gheydi, M., Farhadi, P., & Ghafari, R. (2016). The effect of demand response on operation of smart home energy system with renewable energy resources. *2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISFEE.2016.7803218>
- Gjorgievski, V. Z., Cundeva, S., & Georghiou, G. E. (2021). Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review. *Renewable Energy*, 169, 1138–1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>
- Gomes, L., Ramos, C., Jozi, A., Serra, B., Paiva, L., & Vale, Z. (2019). IoH: A Platform for the Intelligence of Home with a Context Awareness and Ambient Intelligence Approach. *Future Internet*, 11(3), 58. <https://doi.org/10.3390/fi11030058>
- Gomes, L., Sousa, F., & Vale, Z. (2018). An Intelligent Smart Plug with Shared Knowledge Capabilities. *Sensors*, 18(11), 3961. <https://doi.org/10.3390/s18113961>
- Gomes, L., Spínola, J., Vale, Z., & Corchado, J. M. (2019). Agent-based architecture for demand side management using real-time resources’ priorities and a deterministic optimization algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118154>
- Gomes, L., Vale, Z. A., & Corchado, J. M. (2020). Multi-Agent Microgrid Management System for Single-Board Computers: A Case Study on Peer-to-Peer Energy Trading. *IEEE Access*, 8, 64169–64183. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985254>
- Goncalves, C., Barreto, R., Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2022a). Dataset of an energy community’s generation and consumption with appliance allocation. *Data in Brief*, 45, 108590. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108590>
- Goncalves, C., Barreto, R., Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2022b). Energy Community Consumption and Generation Dataset with Appliance Allocation. *IFAC-PapersOnLine*, 55(9), 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.050>
- Goncalves, C., Faia, R., Gomes, L., & Vale, Z. (2023). A complete energy community dataset with photovoltaic generation, battery energy storage systems and electric vehicles. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.7602546>
- GridWise. (2015). *GridWise Transactive Energy Framework Version 1.0*. https://www.gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf
- Grzanic, M., Morales, J. M., Pineda, S., & Capuder, T. (2021). Electricity Cost-Sharing in Energy

- Communities Under Dynamic Pricing and Uncertainty. *IEEE Access*, 9, 30225–30241. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059476>
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- Guo, M., Xia, M., & Chen, Q. (2022). A review of regional energy internet in smart city from the perspective of energy community. *Energy Reports*, 8, 161–182. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.286>
- HaddadPajouh, H., Dehghantanha, A., M. Parizi, R., Aledhari, M., & Karimipour, H. (2019). A survey on internet of things security: Requirements, challenges, and solutions. *Internet of Things*, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100129>
- Hafeez, G., Wadud, Z., Khan, I. U., Khan, I., Shafiq, Z., Usman, M., & Khan, M. U. A. (2020). Efficient energy management of IoT-enabled smart homes under price-based demand response program in smart grid. *Sensors (Switzerland)*, 20(11), 3155. <https://doi.org/10.3390/s20113155>
- Hai, T., Ashraf Ali, M., Dhahad, H. A., Alizadeh, A., Sharma, A., Fahad Almojil, S., Ibrahim Almohana, A., Fahmi Alali, A., & Wang, D. (2023). Optimal design and transient simulation next to environmental consideration of net-zero energy buildings with green hydrogen production and energy storage system. *Fuel*, 336, 127126. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127126>
- Hameed, A., & Alomary, A. (2019, September 1). Security issues in IoT: A survey. *2019 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies, 3ICT 2019*. <https://doi.org/10.1109/3ICT.2019.8910320>
- Hasan, M., Biswas, P., Bilash, M. T. I., & Dipto, M. A. Z. (2018). Smart home systems: Overview and comparative analysis. *Proceedings - 2018 4th IEEE International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks, ICRCICN 2018*, 264–268. <https://doi.org/10.1109/ICRCICN.2018.8718722>
- Honarmand, M. E., Hosseinneshad, V., Hayes, B., Shafie-Khah, M., & Siano, P. (2021). An Overview of Demand Response: From its Origins to the Smart Energy Community. *IEEE Access*, 9, 96851–96876. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094090>
- Hossain, M. A., Pota, H. R., Hossain, M. J., & Blaabjerg, F. (2019). Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, 160–186. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.038>
- Hu, F., Lu, Y., Vasilakos, A. V., Hao, Q., Ma, R., Patil, Y., Zhang, T., Lu, J., Li, X., & Xiong, N. N. (2016). Robust Cyber-Physical Systems: Concept, models, and implementation. *Future Generation Computer Systems*, 56, 449–475. <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.06.006>
- Hu, J., & Bhowmick, P. (2020). A consensus-based robust secondary voltage and frequency control scheme for islanded microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 116, 105575. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105575>
- Ibarra-Esquer, J., González-Navarro, F., Flores-Rios, B., Burtseva, L., & Astorga-Vargas, M. (2017). Tracking the Evolution of the Internet of Things Concept Across Different Application Domains. *Sensors*, 17(6), 1379. <https://doi.org/10.3390/s17061379>
- IEA. (2021). Global EV Outlook 2021. In *International Energy Agency (IEA)*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- IEA. (2023). CO2 Emissions in 2022 – Analysis - International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- Ireshika, M. A. S. T., Rheinberger, K., Lliuyacc-Blas, R., Kolhe, M. L., Preißinger, M., &

- Kepplinger, P. (2022). Optimal power tracking for autonomous demand side management of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 52, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104917>
- Irfan, M., Abas, N., & Saleem, M. S. (2019). Net Zero Energy Buildings (NZEB): A Case Study of Net Zero Energy Home in Pakistan. *4th International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies, PGSRET 2018*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2018.8685970>
- Ismael, N. T., Ali Hussain, A. H., & Abdulwahab, A. M. (2019). Proposed Vision for Green Buildings in Iraq. *2019 International Engineering Conference (IEC)*, 55–59. <https://doi.org/10.1109/IEC47844.2019.8950623>
- Jacobowicz, Y., Raz, D., & Beck, Y. (2022). Fairness algorithm for emergency demand response operation in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 138, 107871. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107871>
- Javadi, M. S., Gough, M., Nezhad, A. E., Santos, S. F., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. S. (2022). Pool trading model within a local energy community considering flexible loads, photovoltaic generation and energy storage systems. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103747. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103747>
- Javed, A. R., Fahad, L. G., Farhan, A. A., Abbas, S., Srivastava, G., Parizi, R. M., & Khan, M. S. (2021). Automated cognitive health assessment in smart homes using machine learning. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102572. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102572>
- Jeyasheeli, P. G., & Selva, J. V. J. (2017). An IOT design for smart lighting in green buildings based on environmental factors. *2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICACCS.2017.8014559>
- Jing, R., Xie, M. N., Wang, F. X., & Chen, L. X. (2020). Fair P2P energy trading between residential and commercial multi-energy systems enabling integrated demand-side management. *Applied Energy*, 262, 114551. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114551>
- Khajeh, H., Firoozi, H., & Laaksonen, H. (2022). Flexibility Potential of a Smart Home to Provide TSO-DSO-level Services. *Electric Power Systems Research*, 205, 107767. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107767>
- Khajeh, H., Laaksonen, H., & Simões, M. G. (2023). A fuzzy logic control of a smart home with energy storage providing active and reactive power flexibility services. *Electric Power Systems Research*, 216, 109067. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.109067>
- Knight, M. R. (2016). Stochastic Impacts of Metaheuristics from the Toaster to the Turbine [Technology Leaders]. *IEEE Electrification Magazine*, 4(4), 52–40. <https://doi.org/10.1109/MELE.2016.2614218>
- Kok, K., & Widergren, S. (2016). A Society of Devices: Integrating Intelligent Distributed Resources with Transactive Energy. *IEEE Power and Energy Magazine*, 14(3), 34–45. <https://doi.org/10.1109/MPE.2016.2524962>
- Kolahan, A., Maadi, S. R., Teymouri, Z., & Schenone, C. (2021). Blockchain-based solution for energy demand-side management of residential buildings. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103316. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103316>
- Koltsaklis, N., Panapakidis, I., Christoforidis, G., & Knápek, J. (2022). Smart home energy management processes support through machine learning algorithms. *Energy Reports*, 8, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.033>
- Laitsos, V. M., Bargiotas, D., Daskalopulu, A., Arvanitidis, A. I., & Tsoukalas, L. H. (2021). An Incentive-Based Implementation of Demand Side Management in Power Systems. *Energies*, 14(23), 7994. <https://doi.org/10.3390/en14237994>
- Lampropoulos, I., Alskaf, T., Schram, W., Bontekoe, E., Coccato, S., & van Sark, W. (2020).

- Review of Energy in the Built Environment. *Smart Cities*, 3(2), 248–288. <https://doi.org/10.3390/smartcities3020015>
- Lezama, F., Soares, J., Hernandez-Leal, P., Kaisers, M., Pinto, T., & Vale, Z. (2019). Local Energy Markets: Paving the Path Toward Fully Transactive Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(5), 4081–4088. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2833959>
- Li, H., Wang, Z., Hong, T., & Piette, M. A. (2021). Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications. *Advances in Applied Energy*, 3, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100054>
- Liang, M., Wang, J., Meng, Y., Lu, N., Lubkeman, D., & Kling, A. (2019). Impacts of Zero Net Energy Buildings on Customer Energy Savings and Distribution System Planning. *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT 2019*, 2561–2565. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2019.8881425>
- Liu, Z., Fan, G., Sun, D., Wu, D., Guo, J., Zhang, S., Yang, X., Lin, X., & Ai, L. (2022). A novel distributed energy system combining hybrid energy storage and a multi-objective optimization method for nearly zero-energy communities and buildings. *Energy*, 239, 122577. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122577>
- Mahin, A. U., Sakib, M. A., Zaman, M. A., Chowdhury, M. S., & Shanto, S. A. (2017). Developing demand side management program for residential electricity consumers of Dhaka city. *2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 743–747. <https://doi.org/10.1109/ECACE.2017.7913001>
- Malekpour, A. R., Annaswamy, A. M., & Shah, J. (2020). Hierarchical Hybrid Architecture for Volt/Var Control of Power Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(2), 854–863. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2941969>
- Mansó Borràs, I., Neves, D., & Gomes, R. (2023). Using urban building energy modeling data to assess energy communities' potential. *Energy and Buildings*, 282, 112791. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112791>
- Mariano-Hernández, D., Hernández-Callejo, L., Zorita-Lamadrid, A., Duque-Pérez, O., & Santos García, F. (2021). A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 33, p. 101692). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101692>
- Marnay, C., Chatzivasileiadis, S., Abbey, C., Iravani, R., Joos, G., Lombardi, P., Mancarella, P., & von Appen, J. (2015). Microgrid Evolution Roadmap. *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, 139–144. <https://doi.org/10.1109/SEDST.2015.7315197>
- Martinez, L. A., Romero, C. M., Castellanos, F. A., Chavez, M. W., Flores, C. M., Rodriguez, L., Cisneros, C. A., & Ariza, R. I. (2018). Energy Simulation of Proposed Net Zero Energy Laboratory Building in Central America. *2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2018.8596534>
- Martirano, L., Habib, E., Giuseppi, A., & Di Giorgio, A. (2018). Nearly Zero Energy Building Model Predictive Control for efficient heating. *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544632>
- Mehraban, S. A., & Eslami, R. (2023). Multi-microgrids energy management in power transmission mode considering different uncertainties. *Electric Power Systems Research*, 216, 109071. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109071>
- Mell, P. M., & Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>
- Minerva, R. (2015). *Towards a Definition of the Internet of Things (IoT)*.

https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf

- Mocrii, D., Chen, Y., & Musilek, P. (2018). IoT-based smart homes: A review of system architecture, software, communications, privacy and security. *Internet of Things*, 1–2, 81–98. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2018.08.009>
- Mohseni, S., Brent, A. C., Kelly, S., Browne, W. N., & Burmester, D. (2021). Modelling utility-aggregator-customer interactions in interruptible load programmes using non-cooperative game theory. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 133, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107183>
- Moslehi, K., & Kumar, R. (2010). A Reliability Perspective of the Smart Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(1), 57–64. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2046346>
- Mottaghizadeh, P., Jabbari, F., & Brouwer, J. (2022). Integrated solid oxide fuel cell, solar PV, and battery storage system to achieve zero net energy residential nanogrid in California. *Applied Energy*, 323, 119577. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119577>
- Muller, T. (2017). The role of demand side management for the system integration of renewable energies. *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEM.2017.7981892>
- Nguyen, T. A., & Aiello, M. (2013). Energy intelligent buildings based on user activity: A survey. In *Energy and Buildings* (Vol. 56, pp. 244–257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.005>
- Nwulu, N. I., & Xia, X. (2017). Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response. *Renewable Energy*, 101, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.026>
- Ortega-Ruiz, G., Mena-Nieto, A., Golpe, A. A., & García-Ramos, J. E. (2022). CO2 emissions and causal relationships in the six largest world emitters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112435. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112435>
- Palensky, P., & Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 381–388. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841>
- Park, K., Lee, J., Das, A. K., & Park, Y. (2023). BPPS:Blockchain-Enabled Privacy-Preserving Scheme for Demand-Response Management in Smart Grid Environments. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 20(2), 1719–1729. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2022.3163138>
- Parlamento Europeu e do Conselho. (2016). Regulamento (UE) 2016/679 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de abril de 2016, relativo à proteção das pessoas singulares no que diz respeito ao tratamento de dados pessoais e à livre circulação desses dados e que revoga a Diretiva 95/46/CE. In *Jornal Oficial da União Europeia*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>
- Parlamento Europeu e do Conselho. (2018). *Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2018 relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>
- Parlamento Europeu e do Conselho. (2019). *Diretiva (UE) 2019/944 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de junho de 2019, relativa a regras comuns para o mercado interno da eletricidade e que altera a Diretiva 2012/27/UE*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>
- Parlamento Europeu e do Conselho. (2020). Regulamento (UE) 2021/1119 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de junho de 2021 que cria o regime para alcançar a neutralidade climática e que altera os Regulamentos (CE) n° 401/2009 e (UE) 2018/1999 («Lei europeia em matéria

- de clima»). In *Jornal Oficial da União Europeia* (Vol. 2021, Issue 2). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>
- Parrish, B., Heptonstall, P., Gross, R., & Sovacool, B. K. (2020). A systematic review of motivations, enablers and barriers for consumer engagement with residential demand response. *Energy Policy*, 138, 111221. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111221>
- Pitt, J., Diaconescu, A., & Bourazeri, A. (2017). Democratisation of the SmartGrid and the active participation of prosumers. *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1707–1714. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001505>
- Pliatsikas, P., & Economides, A. A. (2022). Factors Influencing Intention of Greek Consumers to Use Smart Home Technology. *Applied System Innovation*, 5(1), 26. <https://doi.org/10.3390/asi5010026>
- Ponocko, J., & Milanovic, J. V. (2018). Forecasting Demand Flexibility of Aggregated Residential Load Using Smart Meter Data. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(5), 5446–5455. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2799903>
- Porto Editora, D. (n.d.). *equidade | Dicionário Infopédia da Língua Portuguesa*. Retrieved May 29, 2023, from <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/equidade>
- Pradhan, S., Mishra, D., & Maharana, M. K. (2017). Energy management system for micro grid pertaining to renewable energy sources: A review. *IEEE International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications, ICIMIA 2017 - Proceedings*, 18–23. <https://doi.org/10.1109/ICIMIA.2017.7975612>
- Pramudhita, A. N., Asmara, R. A., Siradjuddin, I., & Rohadi, E. (2018). Internet of Things Integration in Smart Grid. *Proceedings - 2018 International Conference on Applied Science and Technology, ICAST 2018*, 718–722. <https://doi.org/10.1109/iCAST1.2018.8751518>
- Saleem, Y., Crespi, N., Rehmani, M. H., & Copeland, R. (2019). Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions. *IEEE Access*, 7, 62962–63003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913984>
- Salman, L., Salman, S., Jahangirian, S., Abraham, M., German, F., Blair, C., & Krenz, P. (2017). Energy efficient IoT-based smart home. *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016*, 526–529. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2016.7845449>
- Sequeiros, H., Oliveira, T., & Thomas, M. A. (2022). The Impact of IoT Smart Home Services on Psychological Well-Being. *Information Systems Frontiers*, 24(3), 1009–1026. <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10118-8>
- Shakeri, M., Shayestegan, M., Reza, S. M. S., Yahya, I., Bais, B., Akhtaruzzaman, M., Sopian, K., & Amin, N. (2018). Implementation of a novel home energy management system (HEMS) architecture with solar photovoltaic system as supplementary source. *Renewable Energy*, 125, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.114>
- Shareef, H., Ahmed, M. S., Mohamed, A., & Al Hassan, E. (2018). Review on Home Energy Management System Considering Demand Responses, Smart Technologies, and Intelligent Controllers. *IEEE Access*, 6, 24498–24509. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831917>
- Smend, J., Mnatsakanyan, A., & Sgouridis, S. (2021). A Smart Grid Solution Integrating Distributed Generation and Internet of Things Sensors for Demand Side Management and Fault Identification: Case Study. *2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/PEDG51384.2021.9494196>
- Srinivas, J., Das, A. K., Li, X., Khan, M. K., & Jo, M. (2021). Designing Anonymous Signature-Based Authenticated Key Exchange Scheme for Internet of Things-Enabled Smart Grid Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(7), 4425–4436. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3011849>

- Stavrakas, V., & Flamos, A. (2020). A modular high-resolution demand-side management model to quantify benefits of demand-flexibility in the residential sector. *Energy Conversion and Management*, 205, 112339. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112339>
- Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., & Butunoi, B.-P. (2022). Access control and surveillance in a smart home. *High-Confidence Computing*, 2(1), 100036. <https://doi.org/10.1016/j.hcc.2021.100036>
- Teixeira, B., Pinto, T., Faria, P., & Vale, Z. (2021). PV Generation Forecasting Model for Energy Management in Buildings. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12981 LNAI* (pp. 176–182). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86230-5_14
- Teixeira, N., Barreto, R., Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2022). A Trustworthy Building Energy Management System to Enable Direct IoT Devices' Participation in Demand Response Programs. *Electronics*, 11(6), 897. <https://doi.org/10.3390/electronics11060897>
- Tianfield, H. (2018). Towards Edge-Cloud Computing. *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 4883–4885. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622052>
- Tom, R. J., Sankaranarayanan, S., de Albuquerque, V. H. C., & Rodrigues, J. J. P. C. (2020). Aggregator based RPL for an IoT-fog based power distribution system with 6LoWPAN. *China Communications*, 17(1), 104–117. <https://doi.org/10.23919/JCC.2020.01.008>
- Ton, D. T., & Smith, M. A. (2012). The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>
- Tostado-Véliz, M., Rezaee Jordehi, A., Icaza, D., Mansouri, S. A., & Jurado, F. (2023). Optimal participation of prosumers in energy communities through a novel stochastic-robust day-ahead scheduling model. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 147, 108854. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108854>
- Tsvetkov, N. A., Tolstykh, A. V., Khutornoi, A. N., Boldyryev, S., Kolesnikova, A. V., & Tsvetkov, D. N. (2021). Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia. *Environmental Challenges*, 4, 100101. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100101>
- United Nations. (2016). *Paris Climate Change Conference - November 2015*. <https://unfccc.int/documents/9097>
- US Department of Energy. (2006). *Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them*. <https://www.energy.gov/oe/downloads/benefits-demand-response-electricity-markets-and-recommendations-achieving-them-report>
- Vaidya, V. D., & Vishwakarma, P. (2018). A Comparative Analysis on Smart Home System to Control, Monitor and Secure Home, based on technologies like GSM, IOT, Bluetooth and PIC Microcontroller with ZigBee Modulation. *2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology, ICSCET 2018*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSCET.2018.8537381>
- Vuelvas, J., Ruiz, F., & Gruosso, G. (2018). Limiting gaming opportunities on incentive-based demand response programs. *Applied Energy*, 225, 668–681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.050>
- Wang, B., Ma, H., Wang, F., Dampage, U., Al-Dhaifallah, M., Ali, Z. M., & Mohamed, M. A. (2023). An IoT-Enabled Stochastic Operation Management Framework for Smart Grids. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(1), 1025–1034. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3183327>
- Wuebben, D., Romero-Luis, J., & Gertrudix, M. (2020). Citizen Science and Citizen Energy Communities: A Systematic Review and Potential Alliances for SDGs. *Sustainability*, 12(23), 10096. <https://doi.org/10.3390/su122310096>
- Wurm, J., Hoang, K., Arias, O., Sadeghi, A. R., & Jin, Y. (2016). Security analysis on consumer and industrial IoT devices. *Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation*

- Conference, ASP-DAC, 25-28-January-2016, 519–524.
<https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2016.7428064>
- Xu, Z., Han, G., Zhu, H., Liu, L., & Guizani, M. (2021). Adaptive DE Algorithm for Novel Energy Control Framework Based on Edge Computing in IIoT Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(7), 5118–5127. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3007644>
- Yang, Q., & Wang, H. (2020). Blockchain-Empowered Socially Optimal Transactive Energy System: Framework and Implementation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tii.2020.3027577>
- Yang, Q., & Wang, H. (2021). Privacy-Preserving Transactive Energy Management for IoT-Aided Smart Homes via Blockchain. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(14), 11463–11475. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3051323>
- Yang, Z., Chen, H., Du, L., Lin, C., & Lu, W. (2021). How does alliance-based government-university-industry foster cleantech innovation in a green innovation ecosystem? *Journal of Cleaner Production*, 283, 124559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124559>
- Yousefpour, A., Fung, C., Nguyen, T., Kadiyala, K., Jalali, F., Niakanlahiji, A., Kong, J., & Jue, J. P. (2019). All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey. *Journal of Systems Architecture*, 98, 289–330. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.02.009>
- Yu, X., & Xue, Y. (2016). Smart Grids: A Cyber–Physical Systems Perspective. *Proceedings of the IEEE*, 104(5), 1058–1070. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2503119>
- Zaidan, A. A., Zaidan, B. B., Qahtan, M. Y., Albahri, O. S., Albahri, A. S., Alaa, M., Jumaah, F. M., Talal, M., Tan, K. L., Shir, W. L., & Lim, C. K. (2018). A survey on communication components for IoT-based technologies in smart homes. *Telecommunication Systems*, 69(1), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0430-8>
- Zhang, L., Tai, N., Huang, W., Liu, J., & Wang, Y. (2018). A review on protection of DC microgrids. In *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* (Vol. 6, Issue 6, pp. 1113–1127). Springer Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0381-9>
- Zhang, M., Li, Y., Liu, F., Lee, W.-J., Peng, Y., Liu, Y., Li, W., & Cao, Y. (2020). A robust distributed secondary voltage control method for islanded microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 121, 105938. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105938>
- Zhang, X., & Mohandes, S. R. (2020). Occupational Health and Safety in green building construction projects: A holistic Z-numbers-based risk management framework. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122788>
- Zia, M. F., Benbouzid, M., Elbouchikhi, E., Muyeen, S. M., Techato, K., & Guerrero, J. M. (2020). Microgrid Transactive Energy: Review, Architectures, Distributed Ledger Technologies, and Market Analysis. *IEEE Access*, 8, 19410–19432. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968402>
- Zielonka, A., Sikora, A., Wozniak, M., Wei, W., Ke, Q., & Bai, Z. (2021). Intelligent Internet of Things System for Smart Home Optimal Convection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4308–4317. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3009094>