



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Gonçalo Daniel Soares Gonçalves

**ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM COMUNIDADES
DE ENERGIA RENOVÁVEL**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, orientada pelo Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura e pela Professora Doutora Ana Raquel Gonçalves Soares e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2021



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM COMUNIDADES DE ENERGIA RENOVÁVEL

Gonçalo Daniel Soares Gonçalves

ORIENTADORES

Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura
Professora Doutora Ana Raquel Gonçalves Soares

JÚRI

Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge
Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos
Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura

Outubro de 2021

Resumo

O aumento do consumo de combustíveis fósseis para a produção de energia trouxe a necessidade de uma alternativa sustentável: as energias renováveis. Estas tecnologias têm vindo a ser otimizadas e são cada vez mais adotadas pelos utilizadores, devido às poupanças que estas soluções podem introduzir nas faturas energéticas. Um dos exemplos deste tipo de geração renovável são os painéis solares fotovoltaicos, que são uma solução adequada para instalação em edifícios, devido à facilidade de instalação dos sistemas, seja em telhados ou em fachadas. O aumento da geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos em edifícios leva a desafios relacionados com o desajuste temporal entre a oferta e o consumo de energia. Contudo, têm-se registado vários avanços tecnológicos, tal como o desenvolvimento e instalação de baterias nos edifícios, para assegurar um melhor aproveitamento da energia renovável produzida. Ao longo do tempo, houve várias alterações ao nível de legislação relativa à geração de energia em edifícios e à partilha de energia entre diversos produtores e consumidores, e atualmente já existe a possibilidade de implementar comunidades de energia com edifícios fisicamente próximos, e também a agregação de edifícios de forma virtual.

Nesta dissertação desenvolveu-se a formulação de um algoritmo para a otimização do armazenamento de energia em comunidades, assim como a sua implementação em *Python*. O algoritmo implementado foi usado para simular diversos cenários tendo como objetivo avaliar os potenciais benefícios técnicos e económicos da instalação destes sistemas de baterias em conjunto com a geração de energia renovável. Foram avaliados dois cenários: um primeiro cenário em que cada um dos 4 edifícios possui uma bateria de 110 kWh sendo feita a gestão dos edifícios a nível individual e a nível comunitário; e um segundo cenário onde existe apenas uma bateria, com 440 kWh, a nível centralizado, sendo o uso desta partilhado por todos os edifícios. Concluiu-se que sempre que existe uma gestão a nível comunitário aumentam os benefícios técnicos e económicos. Com uma gestão individual, no primeiro cenário, foi possível obter uma poupança de 6,46% na soma das faturas energéticas dos edifícios, um aproveitamento do excesso de geração de 25,94% e uma redução de 7,12% no custo de importação de energia da rede. No que diz respeito à gestão comunitária, no 1º e 2º cenário, obtiveram-se poupanças de 9,88% e 5,35% nas faturas, um aproveitamento do excesso de geração de 69,34% e 69,94%, e uma redução de 17,30% e 14,71% no custo de importação da rede, respetivamente. Concluiu-se ainda que a participação na comunidade de energia apresenta potencial para benefícios económicos, mesmo que não exista armazenamento, sendo possível obter uma poupança de 4,10% nas faturas de energia.

Palavras-Chave: Energia Fotovoltaica; Armazenamento de Energia; Armazenamento Comunitário; Baterias; Agregação Virtual de Edifícios.

Abstract

The rise in fossil fuel consumption to produce energy raised the need for more sustainable alternatives: renewable energies. These technologies have been optimized and became more adopted by the users, due to the savings introduced on energy bills. One example of this type of technologies is solar photovoltaic panels, which are an appropriate solution to be integrated into buildings, due to its easy installation, both in rooftops or facades. The increase in the use of photovoltaic systems in buildings creates challenges related to the mismatch between energy generation and demand. Nevertheless, several technological breakthroughs have been achieved, such as the development and installation of battery systems in buildings in order to ensure the best utilization of the generated renewable energy. Over time, there have been several changes in the legislation regarding the generation of energy in buildings and the energy share between several producers and consumers, and nowadays there is already the possibility of implementing energy communities with buildings physically close to each other, and also the aggregation of buildings in a virtual way.

In this thesis, the formulation of an algorithm for the optimization of energy storage in communities was developed, and implemented in *Python*. The implemented algorithm was used to simulate various scenarios in order to assess the potential technical e economic benefits of the installation of these battery systems coupled with renewable generation systems. Two scenarios were assessed: in the first scenario each of the four buildings has its own 110 kWh battery whose management can be done both at individual and community levels; in the second scenario there is only one 440 kWh battery at a centralized level, being the battery shared by all buildings. It was concluded that for the management at the community level, the technical and economic benefits increased. With individual management, in the first scenario, it was possible to obtain savings of 6.46% in the sum of the buildings' energy bills, a 25.94% use of surplus generation and a 7.12% reduction in the import cost of energy from the grid, while for community management, in the first and second scenario, it was possible to obtain savings of 9.88% and 5.35% in the energy bills, 69.34% and 69.94% use of surplus generation, and 17.30% and 14.71% reduction in the import cost of energy from the grid, respectively. It was further concluded that participating in the energy community has potential in terms of economic benefits, even if there is no energy storage, being possible to reach 4.10% reduction in the energy bills.

Keywords: Photovoltaic Power; Energy Storage; Community Storage; Battery; Virtual Aggregation of Buildings.

Índice

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura	2
Capítulo 2 – Armazenamento de Energia Solar Fotovoltaica.....	3
2.1. Energia Solar Fotovoltaica	3
2.2. Armazenamento de Energia em Edifícios	7
2.3. Community Storage	10
Capítulo 3 – Formulação do Problema.....	13
3.1. Introdução aos objetivos e restrições.....	13
3.2. Formulação	14
3.2.1. Objetivos.....	14
3.2.2 Restrições	16
Capítulo 4 – Casos de Estudo	18
4.1. Edifícios	18
4.2. Tarifas.....	19
4.3. Armazenamento de energia	20
Capítulo 5 – Resultados de Simulação	21
5.1. Tarifas na Comunidade	21
5.2. 1º Cenário – Uma bateria por edifício	22
5.3. 2º Cenário – Uma bateria na Comunidade, a nível centralizado.....	32
5.4. Impacto da previsão das tarifas.....	40
Capítulo 6 – Conclusões e Trabalho Futuro	42
6.1. Conclusões	42
6.2. Trabalho Futuro	44
Bibliografia	45
Anexo I.....	47
Procura de energia líquida nos 4 Edifícios, para cada dia da semana	47
Anexo II.....	50
Partes relativas à implementação do algoritmo, em <i>Python</i>	50
1º Cenário	50
2º Cenário	52
Anexo III.....	54
Tarifas na comunidade.....	54
Anexo IV	59

Resultados 1º Cenário.....	59
Anexo V	88
Resultados 2º Cenário.....	88

Índice de Figuras

Figura 1 - Produção de eletricidade na Europa por forma a atingir 32% de renováveis em 2030 [2]	3
Figura 2 - Crescimento da potência instalada de energia solar a nível mundial [3]	4
Figura 3 - Resposta de uma bateria integrada com um sistema fotovoltaico a operar em modo de autoconsumo [10]	8
Figura 4 - Capacidade simulada da bateria, em modo autoconsumo, com variações de temperatura sazonais de 18/28/12/5°C, representando as estações primavera/verão/outono/inverno, respetivamente [10]	8
Figura 5 - Exemplo de Sistema com armazenamento de energia com ligação com ligação à RESP [11]	9
Figura 6 - Exemplo de Sistema com armazenamento de energia com ligação à RESP [11]	9
Figura 7 - Battery Inverter 500/630/730/1000 da Efacec [12]	10
Figura 8 - Arquitetura dos sistemas com armazenamento de energia [18]	11
Figura 9 - Comunidade com Sistema de Energia [21]	11
Figura 10 - Representação de agregação de edifícios (não fisicamente próximos) de forma virtual [26]	12
Figura 11 - Impacto da DoD na vida útil da bateria	16
Figura 12 - Carga líquida nos 4 edifícios considerados ao longo de uma semana	18
Figura 13 - Carga líquida nos 4 edifícios na quarta-feira	19
Figura 14 - Tarifas para a eletricidade importada e exportada para a rede	20
Figura 15 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na quarta-feira	22
Figura 16 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na quarta-feira	22
Figura 17 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira	23
Figura 18 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira	23
Figura 19 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, segunda-feira	24
Figura 20 - Procura de energia líquida no Edifício 3, segunda-feira	25
Figura 21 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado	26
Figura 22 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado	26
Figura 23 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, quarta-feira	27
Figura 24 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, terça-feira (DoD máximo igual a 0,75)	30
Figura 25 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, terça-feira (DoD máximo igual a 0,9)	31
Figura 26 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira	32
Figura 27 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, segunda-feira	33
Figura 28 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, segunda-feira	33
Figura 29 - Procura de energia líquida no Edifício 1, segunda-feira	34
Figura 30 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado	35
Figura 31 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sábado	35
Figura 32 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, sábado	35
Figura 33 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e bateria) e a Comunidade, quarta-feira ...	36
Figura 34 - Comportamento da bateria no edifício 3 (SoC e potência de carga/descarga), com base em tarifas da comunidade reais e tarifas previstas, domingo	40
Figura 35 - Carga líquida nos 4 edifícios, segunda-feira	47

Figura 36 - Carga líquida nos 4 edifícios, terça-feira	47
Figura 37 - Carga líquida nos 4 edifícios, quarta-feira.....	47
Figura 38 - Carga líquida nos 4 edifícios, quinta-feira.....	48
Figura 39 - Carga líquida nos 4 edifícios, sexta-feira.....	48
Figura 40 - Carga líquida nos 4 edifícios, sábado	48
Figura 41 - Carga líquida nos 4 edifícios, domingo.....	49
Figura 42 - Inicialização de variáveis	50
Figura 43 - Definição de algumas restrições	50
Figura 44 - Função de resolução do problema para o caso comunitário.....	51
Figura 45 - Função de resolução do problema para o caso individual.....	51
Figura 46 - Inicialização de variáveis	52
Figura 47 - Definição de algumas restrições	52
Figura 48 - Função de resolução do problema para o caso comunitário.....	53
Figura 49 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na segunda-feira	54
Figura 50 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na terça-feira.....	54
Figura 51 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na quarta-feira	54
Figura 52 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na quinta-feira.....	55
Figura 53 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na sexta-feira.....	55
Figura 54 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, no sábado.....	55
Figura 55 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, no domingo	56
Figura 56 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na segunda-feira	56
Figura 57 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na terça-feira	56
Figura 58 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na quarta-feira	57
Figura 59 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na quinta-feira	57
Figura 60 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na sexta-feira	57
Figura 61 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, no sábado.....	58
Figura 62 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, no domingo.....	58
Figura 63 - Procura de energia líquida no Edifício 1, segunda-feira	59
Figura 64 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira.....	59
Figura 65 - Procura de energia líquida no Edifício 2, segunda-feira	60
Figura 66 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira.....	60
Figura 67 - Procura de energia líquida no Edifício 3, segunda-feira	60
Figura 68 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira.....	61
Figura 69 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira	61

Figura 70 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira.....	61
Figura 71 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, segunda-feira	62
Figura 72 - Procura de energia líquida no Edifício 1, terça-feira.....	62
Figura 73 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira	62
Figura 74 - Procura de energia líquida no Edifício 2, terça-feira.....	63
Figura 75 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira	63
Figura 76 - Procura de energia líquida no Edifício 3, terça-feira.....	63
Figura 77 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira	64
Figura 78 - Procura de energia líquida no Edifício 4, terça-feira.....	64
Figura 79 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira	64
Figura 80 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, terça-feira.....	65
Figura 81 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quarta-feira	65
Figura 82 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira.....	65
Figura 83 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quarta-feira	66
Figura 84 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira.....	66
Figura 85 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quarta-feira	66
Figura 86 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira.....	67
Figura 87 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quarta-feira	67
Figura 88 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira.....	67
Figura 89 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, quarta-feira	68
Figura 90 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quinta-feira.....	68
Figura 91 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira.....	68
Figura 92 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quinta-feira.....	69
Figura 93 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira.....	69
Figura 94 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quinta-feira.....	69
Figura 95 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira.....	70
Figura 96 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quinta-feira.....	70
Figura 97 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira.....	70
Figura 98 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, quinta-feira	71
Figura 99 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sexta-feira	71
Figura 100 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira.....	71
Figura 101 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sexta-feira	72
Figura 102 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira.....	72
Figura 103 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sexta-feira	72
Figura 104 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira.....	73

Figura 105 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sexta-feira	73
Figura 106 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira.....	73
Figura 107 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, sexta-feira	74
Figura 108 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sábado	74
Figura 109 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado	74
Figura 110 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sábado	75
Figura 111 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado	75
Figura 112 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sábado	75
Figura 113 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado	76
Figura 114 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado	76
Figura 115 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado	76
Figura 116 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, sábado	77
Figura 117 - Procura de energia líquida no Edifício 1, domingo	77
Figura 118 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo.....	77
Figura 119 - Procura de energia líquida no Edifício 2, domingo	78
Figura 120 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo.....	78
Figura 121 - Procura de energia líquida no Edifício 3, domingo	78
Figura 122 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo.....	79
Figura 123 - Procura de energia líquida no Edifício 4, domingo	79
Figura 124 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo.....	79
Figura 125 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, domingo	80
Figura 126 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, segunda-feira	80
Figura 127 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, segunda-feira	80
Figura 128 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, segunda-feira	81
Figura 129 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, segunda-feira	81
Figura 130 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, terça-feira	81
Figura 131 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, terça-feira	81
Figura 132 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, terça-feira	82
Figura 133 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, terça-feira	82
Figura 134 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, quarta-feira	82
Figura 135 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, quarta-feira	82
Figura 136 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, quarta-feira	83
Figura 137 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, quarta-feira	83
Figura 138 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, quinta-feira	83
Figura 139 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, quinta-feira	83
Figura 140 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, quinta-feira	84
Figura 141 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, quinta-feira	84
Figura 142 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, sexta-feira	84
Figura 143 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, sexta-feira	84
Figura 144 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, sexta-feira	85
Figura 145 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, sexta-feira	85
Figura 146 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, sábado	85

Figura 147 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, sábado	85
Figura 148 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, sábado	86
Figura 149 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, sábado	86
Figura 150 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, domingo	86
Figura 151 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, domingo	86
Figura 152 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, domingo	87
Figura 153 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, domingo	87
Figura 154 - Procura de energia líquida no Edifício 1, segunda-feira	88
Figura 155 - Procura de energia líquida no Edifício 2, segunda-feira	88
Figura 156 - Procura de energia líquida no Edifício 3, segunda-feira	89
Figura 157 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira	89
Figura 158 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, segunda-feira	89
Figura 159 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, segunda-feira.....	90
Figura 160 - Procura de energia líquida no Edifício 1, terça-feira.....	90
Figura 161 - Procura de energia líquida no Edifício 2, terça-feira.....	90
Figura 162 - Procura de energia líquida no Edifício 3, terça-feira.....	91
Figura 163 - Procura de energia líquida no Edifício 4, terça-feira.....	91
Figura 164 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, terça-feira....	91
Figura 165 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, terça-feira	92
Figura 166 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quarta-feira	92
Figura 167 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quarta-feira	92
Figura 168 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quarta-feira	93
Figura 169 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quarta-feira	93
Figura 170 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, quarta-feira .	93
Figura 171 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quarta-feira	94
Figura 172 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quinta-feira.....	94
Figura 173 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quinta-feira.....	94
Figura 174 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quinta-feira.....	95
Figura 175 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quinta-feira.....	95
Figura 176 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, quinta-feira..	95
Figura 177 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quinta-feira.....	96
Figura 178 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sexta-feira	96
Figura 179 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sexta-feira	96
Figura 180 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sexta-feira	97
Figura 181 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sexta-feira	97
Figura 182 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, sexta-feira....	97
Figura 183 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sexta-feira.....	98
Figura 184 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sábado	98
Figura 185 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sábado	98
Figura 186 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sábado	99
Figura 187 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado	99
Figura 188 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, sábado	99
Figura 189 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sábado	100
Figura 190 - Procura de energia líquida no Edifício 1, domingo	100
Figura 191 - Procura de energia líquida no Edifício 2, domingo	100
Figura 192 - Procura de energia líquida no Edifício 3, domingo	101
Figura 193 - Procura de energia líquida no Edifício 4, domingo	101
Figura 194 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, domingo	101
Figura 195 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, domingo	102
Figura 196 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, segunda-feira.....	102

Figura 197 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, terça-feira	102
Figura 198 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quarta-feira	102
Figura 199 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quinta-feira.....	103
Figura 200 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sexta-feira.....	103
Figura 201 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sábado	103
Figura 202 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, domingo	103

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores médios do OMIE relativos ao ano 2019 [4]	5
Tabela 2 - Tarifa de acesso às redes do autoconsumo através da RESP em MT.....	6
Tabela 3 - Tarifa de acesso às redes do autoconsumo através da RESP em BTN para potências inferiores a 20,7 kVA	6
Tabela 4 - Aproveitamento do excesso de geração para os diferentes casos nos dias úteis (%)	24
Tabela 5 - Aproveitamento do excesso de geração para os diferentes casos no fim de semana (%)	26
Tabela 6 - Troca de Energia (kWh) entre cada edifício e a Comunidade, para os dias da semana	27
Tabela 7 - Custos por Edifício para o Caso Base (€)	28
Tabela 8 - Custos por Edifício para o Caso Individual e Comunitário (€)	28
Tabela 9 - Desagregação do custo <i>CE</i> (€), Caso Base	29
Tabela 10 - Desagregação do custo <i>CE</i> (€), Caso Individual	29
Tabela 12 - Custos por Edifício para o Caso Individual e Comunidade com DoD máximo igual a 0,9 (€)	31
Tabela 13 - Aproveitamento do excesso de geração para o caso comunitário nos dias úteis (%)	34
Tabela 14 - Aproveitamento do excesso de geração para o caso comunitário no fim de semana (%)	36
Tabela 15 - Troca de Energia (kWh) entre cada edifício (e bateria) e a Comunidade, para os dias da semana	37
Tabela 16 - Custos por Edifício para o Caso Base e Comunitário (€)	37
Tabela 17 - Desagregação do custo <i>CE</i> (€), Caso Base	38
Tabela 18 - Desagregação do custo <i>CE</i> (€), Caso Comunitário.....	38
Tabela 19 - Custos por Edifício para o Caso Comunidade com DoD máximo igual a 0,9 (€)	39

Índice de Acrónimos

BTN – Baixa Tensão Normal

CUR – Comercializador de Último Recurso

DoD – Depth of Discharge (Profundidade de descarga)

MIBEL – Mercado Ibérico de Eletricidade

MT – Média Tensão

OMIE – Operador do Mercado Ibérico de Energia

RESP – Rede Elétrica de Serviço Público

SGE – Sistema de Gestão de Energia

SoC – State of Charge (Estado de carga)

UPAC – Unidades de Produção para Autoconsumo

UPP – Unidades de Pequena Produção

Nomenclatura

Δh – Intervalo de tempo (hora)

η_{BS}^b – Eficiência da carga/descarga das baterias no edifício b (%)

λ – Fator de impacto da DoD na vida útil da bateria

B_C^b – Capacidade de bateria utilizável do edifício b (kWh)

B_L^b – Tempo de vida da bateria do edifício b (número de ciclos)

C_{bd} – Custo associado ao desgaste da bateria (€)

$C_E^b(h)$ – Custo de eletricidade do edifício b no intervalo de tempo h (€)

$C_{EC}(h)$ – Tarifa para potência exportada para a comunidade no intervalo de tempo h (€/kWh)

$C_{IC}(h)$ – Tarifa para potência importada da comunidade no intervalo de tempo h (€/kWh)

$C_{IC}^m(h)$ – Tarifa mínima para potência importada da comunidade no intervalo de tempo h (€/kWh)

$C_{IC}^M(h)$ – Tarifa máxima para potência importada da comunidade no intervalo de tempo h (€/kWh)

$C_G(h)$ – Tarifa para uso da rede para troca de energia entre edifícios (€/kWh)

$C_{EG}(h)$ – Tarifa para a energia exportada para a rede no intervalo de tempo h (€/kWh)

$C_{IG}(h)$ – Tarifa para a energia importada da rede no intervalo de tempo h (€/kWh)

C_{PC} – Custo da potência contratada (€)

C_{sub}^b – Custo de substituição da bateria do edifício b (€)

CP^b – Potência contratada no edifício b (kW)

E_{BS}^b – Capacidade total das baterias no edifício b (kWh)

$E_{fornecida,m}$ – Energia fornecida no mês ' m ', em kWh

$L^{b+}(h)$ – Procura de energia líquida positiva no edifício b no intervalo de tempo h (kW)

$L^{b-}(h)$ – Procura de energia líquida negativa (excesso de geração) no edifício b no intervalo de tempo h (kW)

$OMIE_m$ – Valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês ' m ' em €/kWh;

$P_{BS}^{b+}(h)$ – Potência de carga das baterias no edifício b no intervalo de tempo h (kW)

$P_{BS}^{b-}(h)$ – Potência de descarga das baterias no edifício b no intervalo de tempo h (kW)

$P_{BS}^{b+,M}$ – Potência máxima de carga das baterias no edifício b (kW)

$P_{BS}^{b-,M}$ – Potência máxima de descarga das baterias no edifício b (kW)

$P_c(h)$ – Procura de energia líquida na comunidade no intervalo de tempo h (kW)

$P_c^{b+}(h)$ – Fluxo de potência de exportação no intervalo de tempo h entre o edifício b e a comunidade c (kW)

$P_c^{b-}(h)$ – Fluxo de potência de importação no intervalo de tempo h entre o edifício b e a comunidade c (kW)

$P_c^m(h)$ – Valor mínimo da procura de energia líquida total na comunidade (kW)

$P_c^M(h)$ – Valor máximo da procura de energia líquida total na comunidade (kW)

$\hat{P}_{c,t+1}(h)$ – Previsão da procura de energia líquida total da comunidade (kW) no intervalo de tempo h

$\hat{P}_{c_{t+1}}^m(h)$ – Valor mínimo previsto da procura de energia líquida total da comunidade (kW) no intervalo de tempo h

$\hat{P}_{c_{t+1}}^M(h)$ – Valor máximo previsto da procura de energia líquida total da comunidade (kW) no intervalo de tempo h

$R_{UPAC,m}$ – Remuneração da eletricidade fornecida à RESP no mês ' m ', em €;

$S_{BS}^b(h)$ – Estado de carga das baterias no edifício b (%)

$S_{BS}^{b,m}$ – Estado de carga mínimo das baterias no edifício b (%)

$S_{BS}^{b,M}$ – Estado de carga máximo das baterias no edifício b (%)

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Motivação

Ao longo dos anos tem-se assistido a uma maior utilização de fontes renováveis de geração local, o que é principalmente notório ao nível da instalação de painéis fotovoltaicos em edifícios. No entanto, na maioria dos edifícios existe um desequilíbrio entre a produção de energia e o consumo, o que leva à exportação de energia para a rede, apesar de, mais tarde, a mesma quantidade ser importada da rede para consumo local [1].

O regime jurídico aplicável ao autoconsumo de energia renovável em Portugal¹ prevê a possibilidade de implementar contratos bilaterais entre consumidores ou o estabelecimento de comunidades de energia renovável, por forma a fazer a partilha de excessos de geração renovável.

Analisando ao nível de edifícios e comunidades, os sistemas de baterias de iões de lítio surgem como uma solução para o aproveitamento dos excessos de energia produzida, sendo introduzido o conceito de *community storage* (i.e., armazenamento comunitário de energia). Será então necessário fazer uma gestão agregada dos recursos, de forma a assegurar benefícios técnicos e económicos para os diversos intervenientes que constituem as comunidades de energia.

1.2. Objetivos

O autoconsumo de energia ao nível residencial tem vindo a aumentar ao longo dos anos. No entanto, até recentemente, a legislação não permitia que se efetuassem trocas de energia entre consumidores nem permitia a criação de comunidades de energia renovável. O novo regime jurídico aplicável ao autoconsumo de energia renovável¹ permite a criação de contratos bilaterais entre consumidores e o estabelecimento de comunidades de energia renovável, com o objetivo de partilhar excessos de geração renovável em cada instalação, levando a um maior aproveitamento destes excessos.

Será assim importante uma otimização agregada de recursos, utilizando recursos de flexibilidade presentes em cada edifício para assegurar um maior ajuste entre o consumo e a produção de energia renovável na comunidade e minimizar os custos.

Desta forma, na dissertação considera-se o caso de uma comunidade constituída por grandes edifícios com sistemas de baterias de iões de lítio, estando estes sistemas instalados em cada edifício, e também ao nível da comunidade, seguindo o conceito de *community storage*. Pretende-se assim avaliar as vantagens e desvantagens da aplicação deste conceito. Para tal, foram desenvolvidos algoritmos para a gestão de sistemas de armazenamento de forma agregada em comunidades, com o intuito de assegurar benefícios técnicos e económicos para os diversos intervenientes que as constituem.

¹ Decreto-Lei nº. 162/2019 e Regulamento de Autoconsumo 8/2021 (março)

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No capítulo 1 é apresentada a introdução, onde se encontra a motivação do desenvolvimento da dissertação e ainda os objetivos da mesma.

No capítulo 2 é elaborada uma abordagem teórica ao tema, onde são apresentados os temas principais associados à dissertação, tais como a energia solar fotovoltaica, o armazenamento de energia em edifícios e o conceito de *community storage*, juntamente com a legislação portuguesa. É ainda descrito e analisado o estado da arte relativamente a casos de estudo relacionados com estes temas.

No capítulo 3 é apresentada a formulação do problema, incluindo os objetivos e as restrições associados.

O capítulo 4 foca-se nos cenários a serem desenvolvidos no âmbito desta dissertação e respetiva análise. São ainda apresentados os diferentes casos analisados em cada um dos cenários.

No capítulo 5 são apresentados, analisados e comparados os resultados dos diferentes cenários estudados no capítulo anterior.

No capítulo 6 são discutidas as conclusões retiradas da presente dissertação e são apresentadas propostas de trabalho futuro.

Capítulo 2 – Armazenamento de Energia Solar Fotovoltaica

2.1. Energia Solar Fotovoltaica

A energia produzida através de painéis solares fotovoltaicos consiste no aproveitamento da radiação solar, transformando esta em energia elétrica. Têm vindo a ser feitos acordos relacionados com a energia renovável, tal como o Acordo de Paris, que determina vários objetivos a cumprir nesta área até ao ano 2030. Por forma a cumprir estes objetivos, o Parlamento Europeu definiu uma meta de 32% de produção de energia através de fontes renováveis na União Europeia, até ao ano 2030. A evolução da produção de eletricidade na Europa de forma a atingir os 32% é apresentada na Figura 1. Para tal objetivo ser atingido a geração de energia a partir de fontes renováveis deverá atingir o patamar dos 1800 a 2000 TWh/ano em 2030, o dobro do valor em 2016. A maior parte desta percentagem de renováveis será assegurada pelas energias solar e eólica, com cerca de 1300 TWh/ano [2]. Sendo assim, em 2030 espera-se ter uma capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos de 350 a 400 GW, na Europa.

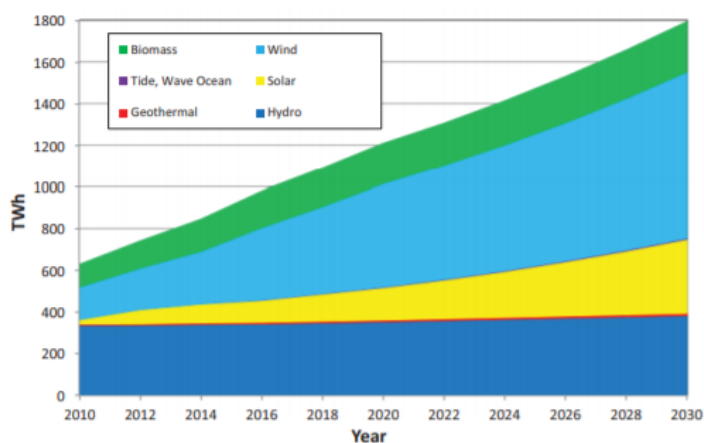


Figura 1 - Produção de eletricidade na Europa por forma a atingir 32% de renováveis em 2030 [2]

Existem duas opções principais para a instalação de sistemas fotovoltaicos: são estas as de grande escala e que consistem em centrais fotovoltaicas com elevada potência instalada, ligadas à rede de transporte ou distribuição, e as de pequena escala, que são os sistemas integrados em coberturas ou fachadas de edifícios. As centrais tiram vantagem de economias de escala por forma a reduzir custos, tanto de investimento como operacionais, e a eletricidade gerada poderá ser vendida nos mercados de energia. Já as instalações de mais baixa potência, nos edifícios, têm custos capitais mais elevados, mas a eletricidade pode ser consumida total ou parcialmente no local. Em 2019 atingiu-se uma capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos de 633,7 GW a nível global. Analisando a Figura 2, é possível ainda concluir que a capacidade de fotovoltaico aumentou 1500% em 10 anos desde 2010 [3].

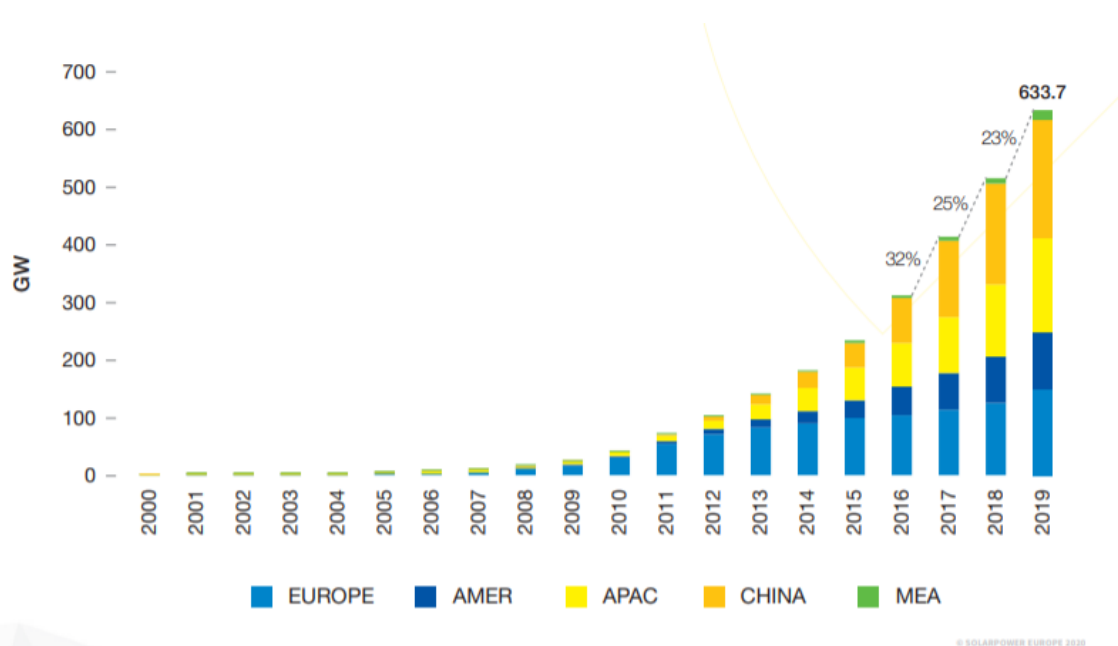


Figura 2 - Crescimento da potência instalada de energia solar a nível mundial [3]

Este crescimento foi impulsionado pela introdução de tarifas *feed-in*, introduzidas em 2000 pela Alemanha [3]. Estas tarifas baseiam-se no pagamento da eletricidade injetada na rede por parte das entidades nacionais aos produtores de energias renováveis. Em 2007 é publicado o Decreto-Lei nº 363/2007 de 2 de novembro, relativo à produção de eletricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas por unidades de microprodução, estabelecendo o regime jurídico aplicável a este tipo de produção.

Já em 2014, devido à rentabilidade económica que os sistemas fotovoltaicos atingiram, é publicado o Decreto-Lei nº 153/2014 de 20 de outubro, com o objetivo de incentivar o consumo na instalação de utilização associada à respetiva unidade produtora, com ou sem ligação à rede elétrica, sem prejuízo do excedente de energia produzida ser injetado na rede elétrica de serviço público (RESP). Este decreto designa este tipo de instalações por “Unidades de Produção para Autoconsumo” (UPAC). No caso de a produção de eletricidade (a partir de recursos renováveis) de uma instalação de pequena potência ser vendida na totalidade à RESP, estas instalações são designadas por “Unidades de Pequena Produção” (UPP), com a condição de que a potência de ligação à rede seja inferior a 250 kW. Tendo em conta que o tema estudado se prende com o autoconsumo em edifícios, é analisada, de seguida, a Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) com mais ênfase.

O valor de energia elétrica fornecida à RESP pelo produtor é remunerado ($R_{UPAC,m}$). Este valor é calculado de acordo com a equação (2.1).

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} \cdot OMIE_m \cdot 0,9 \quad (2.1)$$

onde,

$E_{fornecida,m}$ – Energia fornecida no mês ‘m’, em kWh;

$OMIE_m$ – Valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês ‘m’ em €/kWh.

As UPAC com potência instalada superior a 1,5 kW, que tenham a instalação elétrica de consumo ligada à RESP, estão sujeitas a uma compensação mensal fixa, nos primeiros 10 anos após a obtenção do certificado de exploração.

Na Tabela 1, pode-se verificar os valores médios do OMIE relativamente ao ano de 2019 [4], e o preço já com a taxa de 10% de compensação de custos da geração injetada na rede. Observa-se que o valor da remuneração é bastante mais reduzido do que o preço pago pela energia consumida. Tendo em conta essa diferença de valores, torna-se mais aliciente a instalação de painéis fotovoltaicos apenas para autoconsumo, reduzindo o custo de compra de energia elétrica ao comercializador [5]. É importante referir que estes valores são variáveis ao longo do tempo. Os valores recentes são muito mais elevados, tendo-se assistido a preços recorde no MIBEL superiores a 0,15 €/kWh, devido à subida dos custos das licenças de emissão de carbono e do gás natural.

Tabela 1 - Valores médios do OMIE relativos ao ano 2019 [4]

Mês ‘m’ de 2019	Valor OMIE €/kWh	90% do valor da OMIE €/kWh
Janeiro	0,06269	0,05642
Fevereiro	0,05471	0,04924
Março	0,04920	0,04428
Abril	0,05066	0,04559
Mai	0,04875	0,04388
Junho	0,04721	0,04249
Julho	0,05146	0,04631
Agosto	0,04496	0,04046
Setembro	0,04214	0,03793
Outubro	0,04721	0,04249
Novembro	0,04213	0,03792
Dezembro	0,03368	0,02941
Média Anual	0,04787	0,04308

Já em 2019 é publicado o Decreto-Lei nº 162/2019 que visa promover e facilitar o autoconsumo de energia e as comunidades de energia renovável, facilitando a participação ativa na transição energética, permitindo desta forma que existam consumidores coletivos, como condomínios de edifícios ou grupos de autoconsumidores² situados no mesmo edifício, etc., que possam proceder ao autoconsumo, através de UPAC. Isto significa que será possível proceder a trocas de energia entre diferentes utilizadores, podendo ainda proceder ao seu armazenamento. Neste

² «Autoconsumidores coletivos», um grupo de pelo menos dois autoconsumidores organizados, nos termos da alínea b) do artigo 5.º, Decreto Lei nº 162/2019, de 25 de outubro, artigo 2.

caso, não seriam pagas tarifas de acesso às redes, pois a energia produzida e autoconsumida circula numa rede interna, tratando-se este de autoconsumo coletivo em rede interna.

No entanto, existe ainda o autoconsumo coletivo através da rede elétrica de serviço público. Neste tipo de autoconsumo, a energia pode ser partilhada entre participantes ligados pela rede pública. Neste caso serão pagas tarifas associadas ao consumo da rede faturado e à energia produzida e autoconsumida que circula na rede pública. Este Decreto-Lei define que a energia produzida e não consumida poderá ser armazenada, cedida à rede gratuitamente ou ainda vendida a um comercializador ou agregador³. Para venda deste excesso de energia produzida a um comercializador ou agregador é necessário celebrar um contrato de compra e venda da energia excedente. É ainda possível vender o excedente ao CUR (Comercializador de Último Recurso) com preço indexado ao mercado (desde que a central possua uma potência de injeção na rede até 1 MW, como apresentado no artigo 8º do Decreto-Lei n.º 76/2019, de 3 de junho).

A 20 de março de 2020 é publicada a Diretiva n.º 5/2020, que aprova as tarifas de acesso às redes a aplicar ao autoconsumo de energia elétrica através da RESP em 2020. Na Tabela 2 e na Tabela 3 são apresentadas as tarifas de acesso às redes do autoconsumo através da RESP em MT e em BTN, definidas por esta Diretiva.

Tabela 2 - Tarifa de acesso às redes do autoconsumo através da RESP em MT

Tarifa de acesso às redes do autoconsumo através da RESP em MT		Preços	
Potência		(€/kW.mês)	(€/kW.dia)
Horas de ponta		2,011	0,0660
Energia ativa		(€/kWh)	
Períodos I, IV	Horas de ponta	0,0548	
	Horas cheias	0,0390	
	Horas de vazio normal	0,0134	
	Horas de super vazio	0,0130	
Períodos II, III	Horas de ponta	0,0546	
	Horas cheias	0,0389	
	Horas de vazio normal	0,0133	
	Horas de super vazio	0,0130	

Tabela 3 - Tarifa de acesso às redes do autoconsumo através da RESP em BTN para potências inferiores a 20,7 kVA

Tarifa de acesso às redes do autoconsumo através da RESP em BTN (≤20,7 kVA)		Preços
Energia ativa		(€/kWh)
Tarifas simples		0,0588
Tarifa bi-horária	Horas de fora de vazio	0,0786
	Horas de vazio	0,0287
Tarifa tri-horária	Horas de ponta	0,1034
	Horas cheias	0,0716
	Horas de vazio	0,0287

³ “Agregador independente”, um participante no mercado envolvido na agregação que não se encontra associado ao comercializador do cliente.

2.2. Armazenamento de Energia em Edifícios

A geração fotovoltaica e o consumo de energia não possuem o mesmo perfil de variação e desta forma, em certos momentos do dia, é exportada energia produzida no edifício para a rede e, mais tarde, a mesma quantidade de energia poderá ser importada para consumo local. Estes aspetos são fonte de falhas na completa adequação dos sistemas e podem ser fonte de perdas económicas para os utilizadores, tendo em conta situações em que o preço pago pela energia importada é mais elevado do que o valor recebido por injeção de energia na rede. Tendo isto em consideração, verifica-se a necessidade de maximizar o autoconsumo da energia gerada localmente.

É perante esta necessidade que surge o armazenamento de energia, pois compensa a intermitência das energias renováveis [6]. Estes sistemas armazenam energia durante os períodos de elevada geração para permitir que esta seja utilizada durante os períodos de elevada procura, e da mesma forma permitem armazenar durante períodos de baixas tarifas para utilizar a energia em períodos de altas tarifas.

Existem várias formas de armazenamento de energia. São exemplo as hídricas reversíveis, armazenamento por ar comprimido, baterias ou *flywheels*. Neste trabalho são analisados sistemas de baterias de iões de Lítio. Estas células de iões de Lítio são atrativas para diversas aplicações devido ao seu elevado rendimento e à elevada densidade de energia e potência. A maior parte destas células consiste num eléctrodo negativo à base de carbono, um eléctrodo positivo e eletrólito baseado numa solução de sais de lítio misturados com solventes orgânicos [7]. A degradação das baterias de lítio pode ser quantificada analisando o aumento da resistência interna desta e/ou a diminuição da capacidade da mesma. Os mecanismos de degradação podem ser influenciados pela *depth of discharge* (DoD), pela taxa de corrente, pela temperatura e também pelo *state of charge* (SoC).

Como anteriormente mencionado, o tempo de vida das baterias de iões de lítio depende muito da temperatura, principalmente das temperaturas elevadas que levam à degradação mais rápida destas. O desempenho das baterias atinge o seu pico quando a temperatura ronda os 25-30 °C [8]. Estas baterias não devem ser usadas em aplicações que exijam a sua descarga completa. Este tipo de baterias possui um ciclo de vida que pode chegar no mínimo até aos 5000 ciclos mesmo a 40°C, podendo atingir um tempo de vida de 20 anos [9].

A Figura 3 apresenta o comportamento de uma bateria de iões de Lítio alimentada por um sistema fotovoltaico. Este sistema está programado por forma a que as cargas locais sejam alimentadas usando apenas a energia proveniente dos sistemas fotovoltaicos e/ou a bateria, enquanto tal é possível, mantendo o SoC entre limites específicos [10].

No exemplo apresentado, os principais fatores a ter impacto na taxa de degradação da bateria são uma temperatura média de 32°C, SoC médio de 45%, DoD máximo de 74% e uma capacidade diária de 64 Ah. Assumindo este comportamento durante os 365 dias do ano, a bateria iria durar 7,3 anos até atingir o patamar de 70% dos 75 Ah da capacidade apresentada pelos fornecedores do serviço. Contudo, considerando que esta bateria está sujeita a variações de temperatura sazonais, a bateria dura 4,9 anos até atingir o patamar de 70% da capacidade, como apresentado na Figura 4.

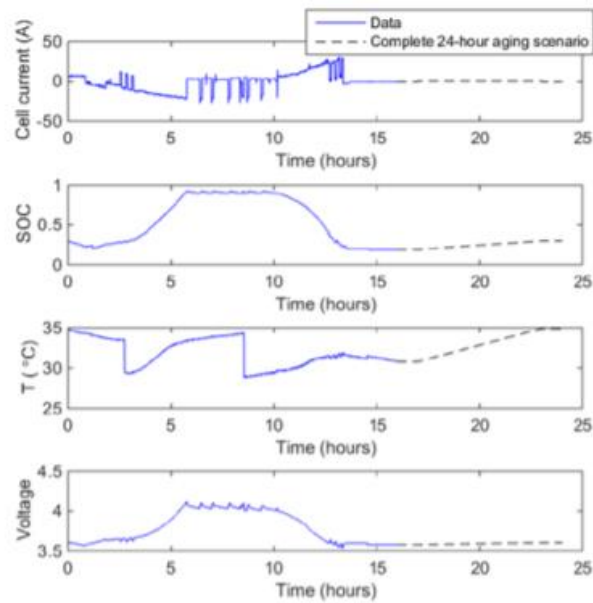


Figura 3 - Resposta de uma bateria integrada com um sistema fotovoltaico a operar em modo de autoconsumo [10]

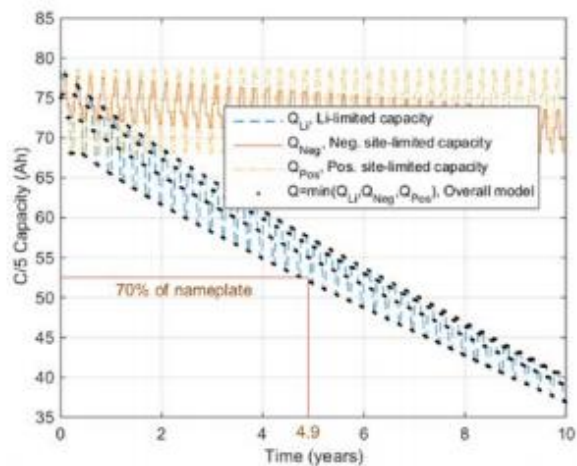


Figura 4 - Capacidade simulada da bateria, em modo autoconsumo, com variações de temperatura sazonais de 18/28/12/5°C, representando as estações primavera/verão/outono/inverno, respetivamente [10]

Em casos residenciais, por vezes, a bateria poderá também ser carregada durante a noite, com energia importada da rede, beneficiando das tarifas mais reduzidas durante os períodos de vazio. É assim possível então armazenar esta energia mais barata e usá-la mais tarde, nas horas de ponta, em que o custo de energia é mais elevado. Trata-se de uma adição ao carregamento através da energia solar, que se mantém e não de uma substituição do método de carregamento. Este método é visível na Figura 5.

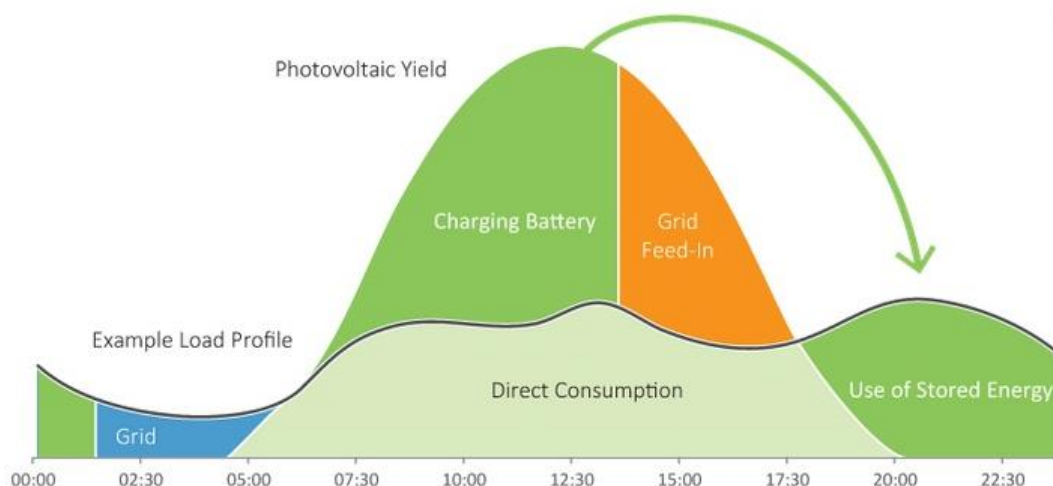


Figura 5 - Exemplo de Sistema com armazenamento de energia com ligação com ligação à RESP [11]

Existem atualmente vários fabricantes de sistemas de energia em residências. Marcas como a *Efacec*, *Tesla*, *Panasonic*, etc., competem num mercado relativamente novo, oferecendo fiabilidade e eficiência tanto quanto possível aos clientes. Na Figura 6 apresenta-se o exemplo de um sistema de armazenamento de energia renovável com ligação à RESP. Estes sistemas são constituídos tipicamente por painéis fotovoltaicos, um inversor, baterias e um controlador de carga. Na Figura 7 é apresentado um produto da *Efacec* para o setor residencial.

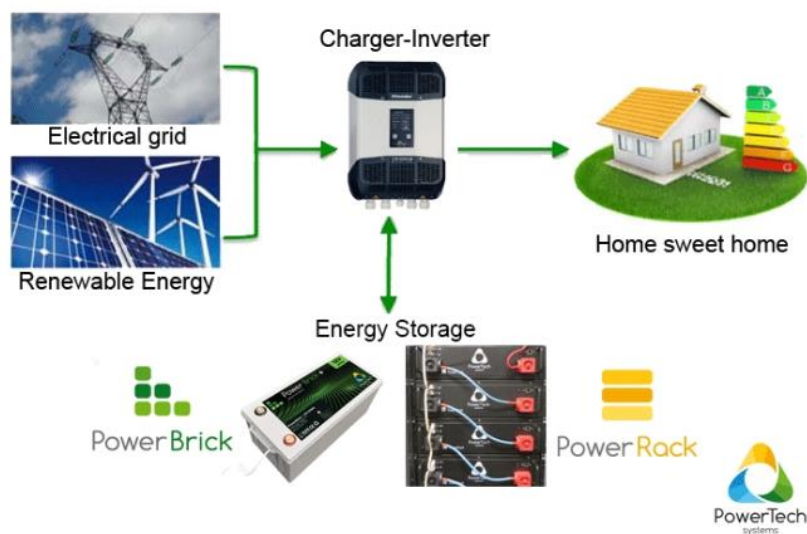


Figura 6 - Exemplo de Sistema com armazenamento de energia com ligação à RESP [11]



Figura 7 - Battery Inverter 500/630/730/1000 da Efacec [12]

2.3. Community Storage

Dentro do domínio do armazenamento de energia, surge o conceito de *Community Storage*, um conceito a ser implementado perto dos centros de consumo de energia com ligações a UPACs de geração renovável [13]. Grande parte da geração fotovoltaica não é aproveitada pelos consumidores pois acontece durante o dia em horas em que eles não se encontram normalmente nas residências, não podendo essa energia ser usada para alimentar as cargas à noite. O armazenamento de energia surge então como uma solução em que energia gerada não aproveitada pelos painéis solares é armazenada e usada posteriormente pelo autoconsumidor. No entanto, esta solução pode não ser atrativa para os consumidores devido aos elevados custos. Neste contexto, a utilização partilhada destes serviços de armazenamento de energia pode ser vista como uma alternativa atrativa para uma comunidade [14-15].

Para o sucesso destas comunidades é importante que as necessidades e os objetivos das comunidades de energia sejam atingidos [16]. O armazenamento ao nível das comunidades de energia tem várias aplicações e impactos positivos, não só ao para o produtor/consumidor, mas também para o operador do sistema [17]. Estas comunidades de armazenamento asseguram mais benefícios do que o armazenamento individual, principalmente devido à economia de escala, à menor necessidade de trocas de energia com a rede e à melhor capacidade para ajuste local entre a oferta e o consumo. Em [18], é feita a comparação de sistemas de armazenamento de energia, com geração renovável, numa só residência com esse sistema isolado de outras residências, com uma comunidade de residências em que existe um sistema de armazenamento que é partilhado entre diferentes residências com geração renovável. Os diferentes sistemas são apresentados na Figura 8.

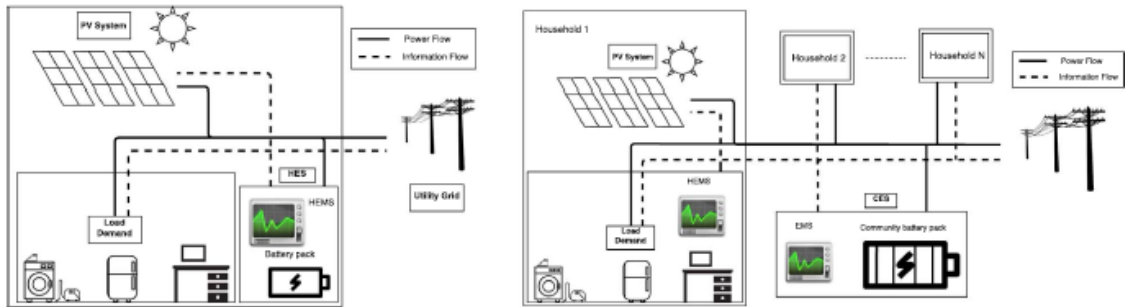


Figura 8 - Arquitetura dos sistemas com armazenamento de energia [18]

Em [19] é mostrado o processo para otimização do tamanho das baterias, tanto para comunidades como para cada residência. Na comunidade apresentada nesse artigo, o custo de várias baterias pequenas é superior às potenciais poupanças. No entanto, com o aumento da capacidade das baterias, as poupanças introduzidas por estas são maiores que os custos. Daí que o uso de uma bateria ao nível da comunidade seja mais benéfico [20].

Na Figura 9 é apresentado um esquema de uma comunidade com um Sistema de Gestão de Energia (SGE) centralizado. Este SGE controla o fluxo de energia disponível das residências para o sistema de armazenamento e vice-versa. Cada uma das residências possui fontes renováveis e partilham o mesmo sistema de armazenamento [21]. Os resultados obtidos pela simulação deste sistema mostram que residências podem atingir poupanças de até 68% na compra de energia da rede apenas por partilhar o excesso de energia renovável produzido.

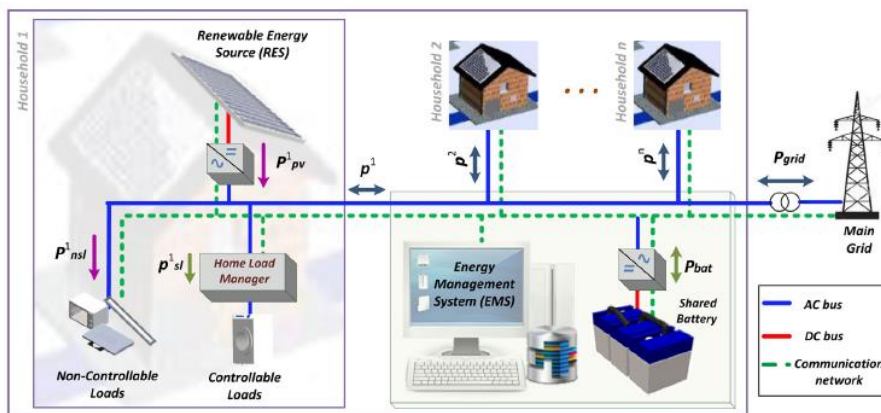


Figura 9 - Comunidade com Sistema de Energia [21]

Em [22] é formulado um *framework* de troca de energia onde os residentes que possuem um excesso de geração de energia proveniente dos seus sistemas fotovoltaicos podem vender essa energia à rede ou ao sistema de armazenamento da comunidade, diminuindo assim os seus próprios custos de energia. Alguns fatores importantes para a integração de sistemas de armazenamento em comunidades são a localização, o tamanho e as características operacionais destes. Tendo em vista precisamente a existência de sistemas de armazenamento em comunidades e de unidades fotovoltaicas, é proposto um *framework* [23] que visa a sua integração. Em [24-25] é proposto um sistema para controlo de armazenamento ao nível de uma comunidade, em que um dos objetivos é assegurar um perfil de procura à rede mais “plano”, eliminando a procura elevada nas horas de ponta.

No entanto, de acordo com a nova legislação, será possível partilhar energia com edifícios fisicamente próximos, com apenas um sistema de armazenamento, e também a agregação de edifícios de forma virtual, podendo simplesmente usar a rede para fazer partilhas de energia entre diferentes edifícios, não fisicamente próximos. Poderá existir, mesmo assim, armazenamento comunitário, mas uma vez que os edifícios não se encontram nas proximidades uns dos outros, este armazenamento não necessita de estar concentrado num único local. Desta forma, considerando que cada edifício participante na comunidade possui uma unidade de armazenamento, esta pode ser gerida de acordo com as necessidades da comunidade e não apenas do edifício a que o sistema de armazenamento pertence. Tendo em conta este facto, o sistema funcionaria assim, virtualmente, como um sistema centralizado de armazenamento. Na Figura 10 é feita uma representação possível desta agregação de edifícios de forma virtual.

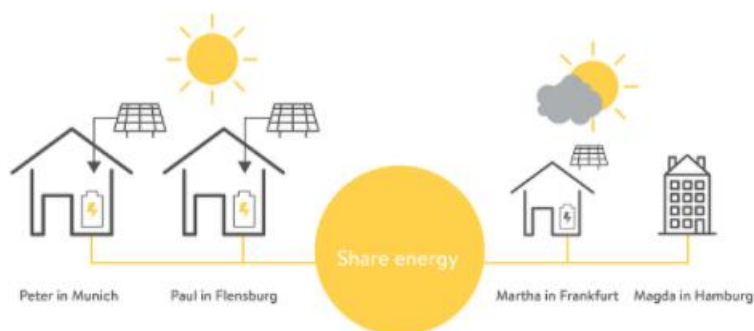


Figura 10 - Representação de agregação de edifícios (não fisicamente próximos) de forma virtual [26]

Em [27] é elaborada uma simulação de um sistema virtual, sendo este constituído por 500 edifícios com geração fotovoltaica e sistemas de armazenamento, organizados em várias comunidades parametrizáveis. Um dos objetivos é relacionar o número de edifícios numa comunidade virtual com a eficiência dos sistemas de armazenamento verificando-se que uma comunidade de 5 edifícios atinge 98% da eficiência de uma comunidade com 500 edifícios o que mostra que os benefícios são elevados mesmo para pequenas comunidades. É concluído que a implementação de comunidades de armazenamento de energia virtuais é desejável do ponto de vista técnico e permite benefícios na eficiência dos sistemas de armazenamento em mais de 21% quando comparado com o caso em que é feita uma gestão individual destes. É importante afirmar que estes dados são obtidos relativamente a um determinado perfil de consumidores.

Capítulo 3 – Formulação do Problema

3.1. Introdução aos objetivos e restrições

Alguns dos objetivos mais usuais para a otimização de armazenamento de energia em comunidades, incluem:

- A minimização dos custos totais de energia ao nível da comunidade, que consiste no valor agregado dos custos de energia associados a cada edifício, tendo em consideração tanto os custos de importação da rede/comunidade, como os custos de exportação para a rede/comunidade;
- Minimização da energia comprada à rede, ou seja, maximizar o autoconsumo em cada edifício (e globalmente ao nível da comunidade) e maximizar a energia comprada à comunidade ao invés de comprar energia da rede. Consiste em aumentar o ajuste entre o perfil de consumo e de geração;
- Minimização da ponta, ou seja, minimização do valor máximo de consumo do edifício, por forma a diminuir a potência contratada e assim também os custos associados a esta;
- Maximização do tempo de vida das baterias, que consiste em impor limites à operação dos sistemas de armazenamento, nomeadamente aos limites do SoC mínimo e da potência de carga/descarga.

Analisando os objetivos apresentados é observado que o objetivo mais abrangente é a minimização dos custos totais ao nível da comunidade, pois o facto de diminuir o custo de energia contribui também para atingir os outros objetivos. Ao minimizar o custo de energia está por analogia a maximizar o autoconsumo, pois é dada prioridade ao autoconsumo e apenas em último recurso se procede à compra de energia da rede, ou seja, está também a minimizar a energia comprada à rede. Isto acontece porque a tarifa para a energia injetada na rede é sempre menor que a tarifa da energia consumida da rede tornando-se assim, portanto, mais vantajoso consumir a energia gerada no edifício do que enviar para a rede. É ainda de notar que a minimização da ponta de consumo leva à minimização da potência contratada e consequentemente à minimização dos custos. Tendo em conta esta abrangência, esse objetivo é o escolhido para esta dissertação.

Da mesma forma, são de seguida apresentadas algumas restrições normalmente associadas a este tipo de estudo. Para as restrições associadas às baterias, por norma é imposto um valor de potência de carga/descarga da bateria limitado pelo SoC das baterias e pela potência máxima de carga/descarga do inversor. É também importante referir que as baterias não têm a capacidade de carregar e descarregar simultaneamente e que estas não possuem um rendimento de 100%, pelo que é necessário ter em consideração perdas nestes sistemas de armazenamento. Deve ter-se em consideração que a operação da bateria leva a uma degradação da mesma, tendo este facto um custo associado. Deve-se ainda evitar descargas profundas, por forma a prevenir a degradação rápida das baterias, o que pode ser conseguido através do aumento do SoC mínimo por exemplo.

Para as restrições associadas à comunidade, o valor máximo de energia que um edifício pode partilhar com a comunidade não deve exceder o valor absoluto da procura de energia

líquida (diferença entre o consumo e a geração local), afetado pela carga e descarga da bateria. É importante afirmar que um edifício apenas pode exportar energia para a comunidade se um outro edifício precisar de importar essa mesma energia. Ou seja, não é possível a exportação para a comunidade apenas porque um edifício tem excedente de geração por exemplo, sendo necessário que haja uma procura de energia por parte de outro edifício da comunidade. Adicionalmente, não é possível um edifício importar e exportar energia da comunidade simultaneamente.

Relativamente às tarifas na comunidade, a tarifa para exportar energia para a comunidade deve ser superior ao valor das tarifas para exportação para a rede e inferior ao valor de importação de energia da rede, de forma a proporcionar poupanças aos utilizadores. Se não existir este tipo de incentivos económicos, a existência de comunidades de energia não seria viável. Da mesma forma, a tarifa para importar energia da comunidade deve ser superior ao valor da tarifa de exportação para a comunidade somada com o uso da rede e inferior ao valor de importação de energia da rede. A geração fotovoltaica e a procura de energia são consideradas como incertezas. Se as tarifas forem determinadas 24 horas antes com base nas previsões de consumo e geração para o dia seguinte, existe incerteza em relação ao ajuste das tarifas à variação real da disponibilidade de renováveis na comunidade.

3.2. Formulação

3.2.1. Objetivos

Em primeiro lugar, é importante assinalar que a geração fotovoltaica e a procura de eletricidade são previsões e desta forma têm uma incerteza associada. Para tal, as tarifas são calculadas com base numa previsão da geração e do consumo, sendo que, por norma, os valores reais e exatos são ligeiramente diferentes. As tarifas são então calculadas no início do dia, às 00h00m, para o dia todo. Procede-se depois à otimização do armazenamento tendo em conta estas tarifas.

Por forma a providenciar incentivos para a partilha de excessos de geração na comunidade, a tarifa para exportar energia ($C_{EC}(h)$) para a comunidade deve ser superior ao valor das tarifas para exportação para a rede ($C_{EG}(h)$) e inferior ao valor de importação de energia da rede ($C_{IG}(h)$) menos o uso da rede ($C_G(h)$) (equação (3.1)). A tarifa para importar energia da comunidade ($C_{IC}(h)$) deve ser superior ao valor da tarifa de exportação para a comunidade ($C_{EC}(h)$) mais o uso da rede ($C_G(h)$) e inferior ao valor de importação de energia da rede ($C_{IG}(h)$) (equação (3.2)).

$$-C_{EG}(h) \leq -C_{EC}(h) \leq C_{IG}(h) - C_G(h), \quad (3.1)$$

$$-C_{EC}(h) + C_G(h) \leq C_{IC}(h) \leq C_{IG}(h), \quad (3.2)$$

Os preços são então adaptados às condições de mercado fazendo a ligação entre a tarifa de importação com a previsão da procura de energia líquida total da comunidade ($\hat{P}_{c_{t+1}}(h)$), sendo considerado o valor mínimo ($\hat{P}_{c_{t+1}}^m(h)$) e máximo ($\hat{P}_{c_{t+1}}^M(h)$) desta, variando a tarifa

entre o seu valor mínimo ($C_{IC}^m(h)$) e máximo ($C_{IC}^M(h)$) de forma proporcional com a variação total da previsão da procura de energia líquida na comunidade (equação (3.3)). Desta forma, uma procura de energia líquida elevada levaria a tarifas elevadas e períodos com excesso de geração levariam a tarifas mais baixas. A tarifa para exportação de energia para a comunidade pode ser obtida pela diferença entre a tarifa associada ao uso da rede para troca de energia entre edifícios e a tarifa de importação (equação (3.4)).

$$C_{IC}(h) = C_{IC}^m(h) + \frac{\hat{P}_{c,t+1}(h) - \hat{P}_c^m{}_{t+1}(h)}{\hat{P}_c^M{}_{t+1}(h) - \hat{P}_c^m{}_{t+1}(h)} (C_{IC}^M(h) - C_{IC}^m(h)), \quad (3.3)$$

$$C_{EC}(h) = C_G(h) - C_{IC}(h), \quad (3.4)$$

Como mencionado anteriormente, o principal objetivo que se pretende atingir é a minimização dos custos totais de energia ao nível da comunidade ao longo do tempo h para um intervalo total de tempo H . É então considerada uma comunidade com B edifícios, todos com geração fotovoltaica e com um sistema de armazenamento de energia (bateria de iões de lítio). O objetivo consiste na equação (3.5) em que é englobado o custo total da energia $C_E^b(h)$, o custo da potência contratada ($CP^b \cdot C_{PC}$, onde CP^b é a potência contratada no edifício e C_{PC} é o custo associado à potência contratada) e o custo da degradação da bateria (C_{bd} , calculado com base na potência de descarga das baterias ($P_{BS}^{b-}(h)$)), tendo em conta todos os edifícios da comunidade.

$$\min \sum_{b=1}^B \left(\left(\sum_{h=1}^H C_E^b(h) \right) + \sum_{h=1}^H (P_{BS}^{b-}(h) \cdot \Delta h \cdot C_{bd}) + CP^b \cdot C_{PC} \right), \quad (3.5)$$

O custo de energia em cada edifício b é apresentado na equação (3.6). Este está associado à procura de energia líquida ($L^{b+}(h)$ ou $L^{b-}(h)$) e considera o custo/receita da energia comprada/injetada da comunidade (C_{IC} , C_{EC}) ou da rede ($C_{IG}(h)$, $C_{EG}(h)$). Então, o custo é influenciado pela procura de energia líquida de base em cada edifício e também pelos fluxos de potência com o sistema de armazenamento ($P_{BS}^{b+}(h)$, $P_{BS}^{b-}(h)$) e com a comunidade ($P_c^{b+}(h)$, $P_c^{b-}(h)$).

$$C_E^b(h) = \Delta h \cdot \left[P_c^{b-}(h) \cdot C_{IC} + P_c^{b+}(h) \cdot C_{EC} + (L^{b+}(h) - P_c^{b-}(h) - P_{BS}^{b-}(h)) C_{IG}(h) + (L^{b-}(h) - P_c^{b+}(h) - P_{BS}^{b+}(h)) C_{EG}(h) \right], \quad (3.6)$$

Por forma a formular o custo da degradação da bateria (C_{bd}) é assumido um modelo que determina este tendo em conta o custo da substituição do sistema de armazenamento (C_{sub}^b) e a percentagem de tempo de vida usado em cada período de descarga, sendo que esta depende da capacidade de bateria utilizável (B_C^b) e do tempo de vida da mesma (B_L^b), como apresentado

na equação (3.7). De maneira a atribuir um peso à forma como a bateria é tratada, introduz-se um fator que denota o impacto que a DoD tem na vida da bateria. Em [28] é avaliada esta relação, em que se considera que o impacto da DoD na vida da bateria é negligenciável até que esta obtenha valores iguais ou superiores a 0,75, considerando um valor máximo de 0,9 para esta. É usada uma aproximação deste estudo para a formulação do impacto da DoD no custo da degradação da bateria, como apresentado na Figura 11. Desta forma, o tempo de vida (B_L^b) é afetado por um fator ($\lambda(DoD^b)$), sendo este definido na equação (3.8).

$$C_{bd} = \frac{C_{sub}^b}{\lambda(DoD^b) \cdot B_L^b \cdot B_C^b} \quad (3.7)$$

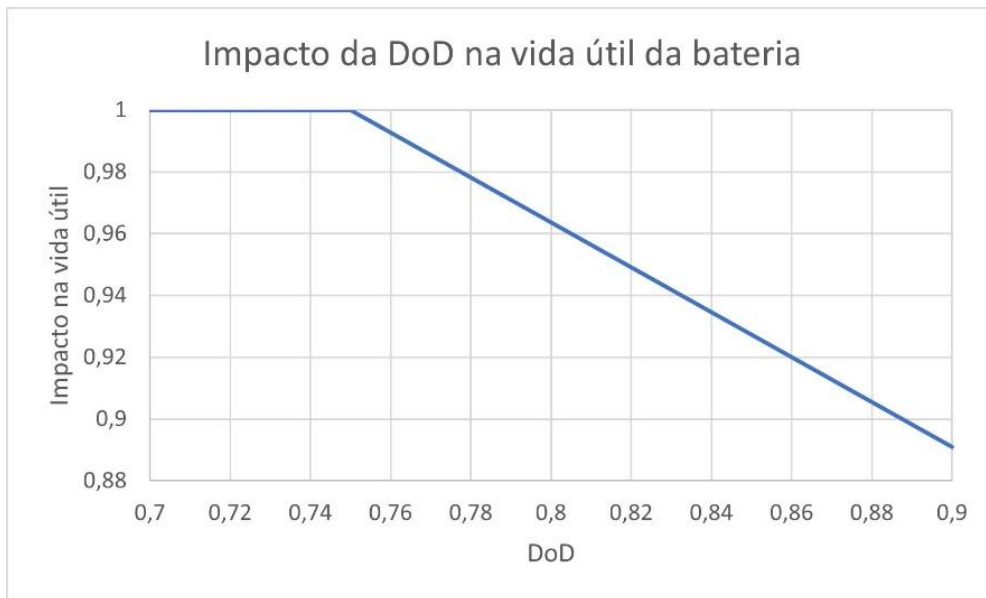


Figura 11 - Impacto da DoD na vida útil da bateria

$$\lambda(DoD^b) = \begin{cases} 1, & DoD^b \leq 0,75 \\ -0,727 \cdot (DoD^b - 0,75) + 1, & 0,75 < DoD^b \leq 0,9 \end{cases} \quad (3.8)$$

3.2.2 Restrições

A formulação proposta está sujeita a diversas restrições relacionadas com a flexibilidade dos recursos e também com a gestão da comunidade.

1) Armazenamento de energia nas baterias

A potência de carga/descarga das baterias ($P_{BS}^{b+}(h)$, $P_{BS}^{b-}(h)$) está limitada a um valor máximo (equação (3.9)) e a um valor mínimo (equação (3.10)) do SoC das baterias ($S_{BS}^b(h)$) representado na equação (3.11) e ainda por um valor máximo de potência de carga/descarga ($P_{BS}^{b+,M}$ e $P_{BS}^{b-,M}$, respetivamente) (equação (3.12)). O SoC das baterias está limitado a valores mínimos ($S_{BS}^{b,m}$) e

máximos ($S_{BS}^{b,M}$) (equação (3.13)). Ter-se-á em conta que as baterias não têm uma eficiência ($\eta_{BS,n}^b$) de 100%, ou seja, existem perdas durante a carga e descarga destas. No entanto, para simplificação, as perdas serão consideradas na totalidade durante a carga das baterias. A DoD por sua vez, pode ser relacionada com o estado de carga ($S_{BS}^b(h)$), como apresentado na equação (3.14).

$$P_{BS}^{b+}(h) \cdot \Delta h \cdot \eta_{BS,n}^b \leq (-S_{BS}^b(h-1) + S_{BS}^{b,M}) E_{BS}^b, \quad (3.9)$$

$$P_{BS}^{b-}(h) \cdot \Delta h \leq (S_{BS}^b(h-1) - S_{BS}^{b,m}) E_{BS}^b, \quad (3.10)$$

$$S_{BS}^b(h) = S_{BS}^b(h-1) + (\eta_{BS}^b \cdot P_{BS}^{b+}(h) - P_{BS}^{b-}(h)) \cdot \frac{\Delta h}{E_{BS}^b}, \quad (3.11)$$

$$P_{BS}^{b+}(h) \leq P_{BS}^{b+,M}, \quad P_{BS}^{b-}(h) \leq P_{BS}^{b-,M}, \quad (3.12)$$

$$S_{BS}^{b,m} \leq S_{BS}^b(h) \leq S_{BS}^{b,M}, \quad (3.13)$$

$$DoD^b \geq 1 - S_{BS}^b(h), \quad (3.14)$$

2) Comunidade

O fluxo de potências de importação (equação (3.15)) e de exportação (equação (3.16)) entre cada edifício e a comunidade é limitado à procura de energia líquida do edifício em causa e ao impacto dos recursos de flexibilidade. É importante ainda notar que apenas é possível um edifício exportar energia para a comunidade se um outro edifício precisar de importar essa quantidade de energia (equação (3.17)).

$$P_c^{b-}(h) \leq L^{b+}(h) - P_{BS}^{b-}(h), \quad (3.15)$$

$$P_c^{b+}(h) \leq L^{b-}(h) - P_{BS}^{b+}(h), \quad (3.16)$$

$$\sum_{b=1}^B (P_c^{b+}(h) - P_c^{b-}(h)) = 0, \quad (3.17)$$

Relativamente à potência contratada, esta tem que ser superior à procura de energia líquida (positiva) subtraída da potência de descarga das baterias no edifício, como apresentado na equação (3.18).

$$CP^b \geq L^{b+}(h) - P_{BS}^{b-}(h), \quad (3.18)$$

Capítulo 4 – Casos de Estudo

4.1. Edifícios

Os dados utilizados para a formulação proposta são provenientes do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra (Portugal), sendo este um edifício com cerca de 10.000 m² e um consumo de eletricidade anual na ordem dos 500 MWh/ano. O edifício encontra-se equipado com um sistema fotovoltaico com uma potência de 79 kWp, assegurando assim cerca de 16% da procura de eletricidade do edifício [29]. No entanto, o nível real da geração não apresenta regularmente a um excesso de geração fotovoltaica face ao consumo. Assim, de forma a haver excessos de geração que necessitem de ser compensados pelo armazenamento e pela comunidade, foi considerado um cenário futuro com um sistema de geração fotovoltaica de maior dimensão capaz de assegurar 50% da procura, tendo os dados da geração fotovoltaica sido ajustados proporcionalmente para essa nova capacidade fotovoltaica.

A formulação proposta foi simulada para um intervalo de uma semana e por forma a gerar cenários com consumo e geração intermédios, foram selecionados dados de março. Para representar cada um dos 4 edifícios pertencentes à comunidade foi então selecionada uma semana de dados para cada edifício, tal como representado na Figura 12.

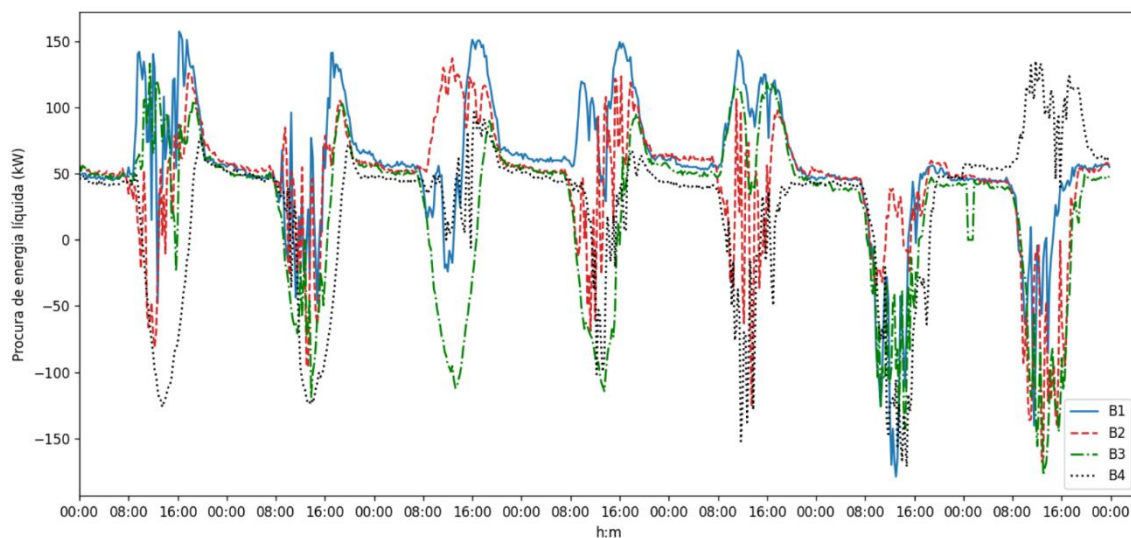


Figura 12 - Carga líquida nos 4 edifícios considerados ao longo de uma semana

Na Figura 13 são apresentados com mais detalhe os dados relativos aos 4 edifícios na quarta-feira, como exemplo, por forma a melhor visualizar a procura de energia líquida dos edifícios. O Anexo I apresenta os dados relativos a todos os dias da semana. Uma procura líquida de energia positiva indica défice de geração fotovoltaica, ao passo que uma procura líquida de energia negativa indica um excesso da mesma. Como pode ser observado, tais dados assumem que há simultaneamente edifícios com excesso de geração fotovoltaica e outros com défice de geração. Numa comunidade, a variação da geração fotovoltaica apresenta uma elevada correlação, mas as variações na procura líquida de energia podem ter uma correlação baixa, pois é possível a existência de diferentes perfis de procura de energia, levando assim a uma diferente energia

líquida, mesmo perante uma variação semelhante da geração. Tal justifica a possibilidade de existirem edifícios na mesma comunidade com variações de procura líquida distintas.

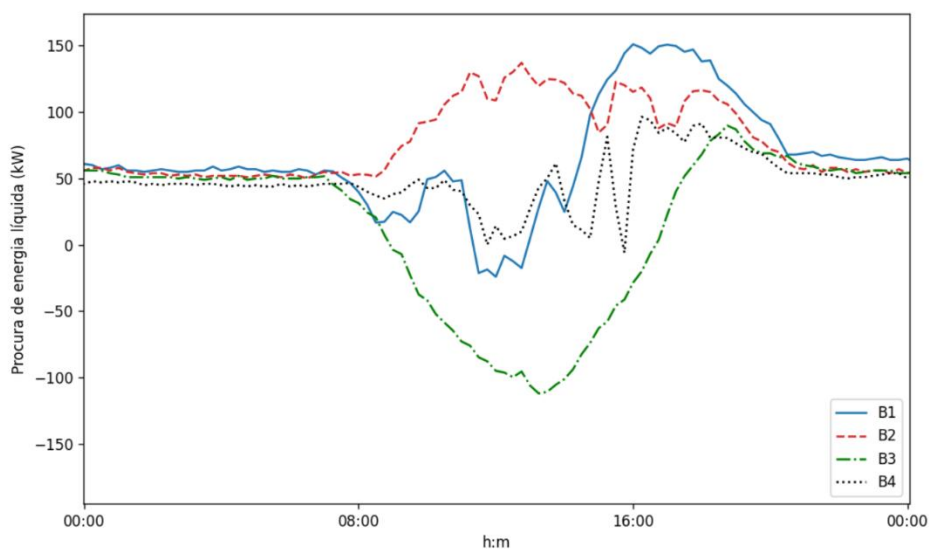


Figura 13 - Carga líquida nos 4 edifícios na quarta-feira

4.2. Tarifas

Para definir as tarifas para a eletricidade importada e exportada para a rede, foram usadas as tarifas reais do edifício de referência. A eletricidade importada da rede considera um custo médio igual ao custo médio no edifício (0,1228 €/kWh), mas com uma variação proporcional ao perfil médio de variação dos preços do mercado em março, ou seja, a variação horária dos preços nos mesmos dias considerados foi retirada dos dados do OMIE [30] e foi calculada a variação média desta, obtendo o valor médio para cada uma das 24h. Para essa variação é imposta uma média de 0,1228, sendo o preço em cada hora multiplicado por este valor e dividido pela média original. De tal forma, os preços de importação possuem o mesmo perfil para os diferentes dias, seja este um dia útil ou um dia de fim de semana.

A eletricidade exportada para a rede considera uma tarifa constante com 90% da média mensal do mercado (-0,0358 €/kWh), como definido pela regulação portuguesa, sendo esta calculada para o mês de março usando também os dados do OMIE. Na Figura 14 são apresentadas as tarifas ao longo de um dia. Para trocas entre os edifícios da comunidade, a tarifa para o uso da rede considerada é constante e é-lhe atribuído o valor de 0,05 €/kWh.

O custo associado à potência contratada utilizado é igual ao valor real do edifício de referência, sendo este de 0,0324 €/kW.dia.

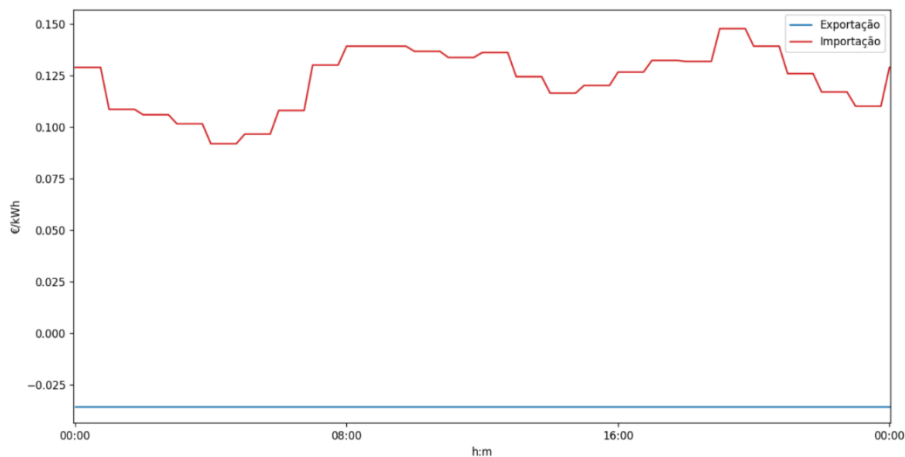


Figura 14 - Tarifas para a eletricidade importada e exportada para a rede

4.3. Armazenamento de energia

O edifício de referência possui um sistema de armazenamento composto por baterias de íões de lítio, assegurando uma capacidade de armazenamento de cerca de 30 kWh e inversores com uma potência de carga/descarga de 15 kW. Tal como para o caso da geração fotovoltaica, também aqui foi considerado um cenário futuro, no qual se admitiu uma capacidade de armazenamento de 110 kWh e uma potência de carga/descarga de 55 kW. É considerado que a eficiência das baterias é de 85%, com uma vida útil de 7300 ciclos e com um custo de 100 €/kWh. O valor considerado para o custo trata-se de um cenário num futuro próximo, sendo este um valor previsto para o final de 2021, considerando que a média do preço da capacidade das baterias foi 137 \$/kWh em 2020 (aproximadamente 116 €/kWh) e de acordo com a previsão da empresa de pesquisa *BloombergNEF* (BNEF), o preço médio destas será cerca de 101 \$/kWh (85,57 €/kWh) em 2023 [31].

A avaliação foi feita com diferentes valores do SoC mínimo, para determinar o impacto da degradação da bateria, sendo que o valor 0,1 foi o menor valor considerado e 0,25 o valor mais elevado para o SoC mínimo, sendo que este corresponde ao valor máximo de profundidade de descarga para a qual não há efeitos no tempo de vida da bateria (DoD igual a 0,75). Desta forma, ao igualar o SoC mínimo a 0,1 é avaliado um cenário extremo para testar a degradação.

Foram avaliados dois cenários diferentes. No primeiro cenário foi considerado que cada um dos edifícios possui uma bateria, com as características acima mencionadas, enquanto que no segundo cenário foi considerada apenas uma bateria ao nível da comunidade, partilhada por todos os edifícios da comunidade, não se localizando esta em nenhum dos edifícios. Para este segundo cenário, foi considerada uma bateria com uma capacidade total de 440 kWh e uma potência de carga/descarga de 220 kW, sendo que as restantes características permanecem iguais.

Capítulo 5 – Resultados de Simulação

O algoritmo para a simulação foi implementado em *Python*, usando o software PyCharm (*Community Edition 2021.1.1*) como editor [32] e utilizando o *Gurobi* (versão 9.1.2) como otimizador para a resolução do problema [33]. Algumas partes do código utilizado estão presentes no Anexo II.

Posteriormente foram simulados vários cenários de teste com os dados apresentados para os diferentes casos, considerando otimização do armazenamento ao nível individual, sem comunidade, armazenamento comunitário com baterias em cada um dos edifícios (ambos apresentados no 1º Cenário) e ainda armazenamento comunitário com a bateria na comunidade (apresentado no 2º Cenário, com uma bateria a nível centralizado).

5.1. Tarifas na Comunidade

Tal como mencionado anteriormente, as tarifas para a eletricidade importada e exportada para a comunidade são tidas como incertezas, sendo estas calculadas no início do dia (às 00h00) tendo em conta previsões. Estas previsões são baseadas no dia anterior, sendo este processo separado para dias úteis e para fins de semana, devido à elevada variação do consumo entre os dias úteis e o fim de semana. As tarifas de importação/exportação para a comunidade baseadas em previsões são comparadas com as tarifas da rede, representadas na Figura 15, para a quarta-feira, a título de exemplo, onde se observa que as tarifas da comunidade são mais benéficas na maioria do tempo, sendo que no pior cenário possível, estas atingem o mesmo valor que as tarifas da rede, garantindo desta forma, a clara vantagem em fazer trocas entre a comunidade. É possível ainda observar que a maior diferença para a energia importada se concentra nas horas de produção fotovoltaica, como seria de esperar, promovendo assim a compra de energia à comunidade nessas horas com excesso de geração.

Já na Figura 16 é possível observar a diferença entre as tarifas previstas e as tarifas reais para a troca de energia na comunidade. Comparando estas verifica-se que a maior diferença entre os valores previstos para a importação e os valores reais é de 27,18% (sendo o valor previsto superior ao valor real, usando o valor real como referência para o cálculo da percentagem), sendo este obtido na segunda-feira às 11h45m. Relativamente à diferença entre os valores previstos para a exportação e os valores reais, a maior diferença é de 59,89% (sendo o valor previsto superior ao valor real, usando o valor real como referência para o cálculo da percentagem), sendo este obtido também na segunda-feira às 11h45m. É importante denotar que estes valores se tratam de valores extremos, sendo que o erro médio observado nas tarifas de importação é de 4,5% e o erro médio observado nas tarifas de exportação é de 8,71%.

As figuras relativas aos restantes dias encontram-se no Anexo III.

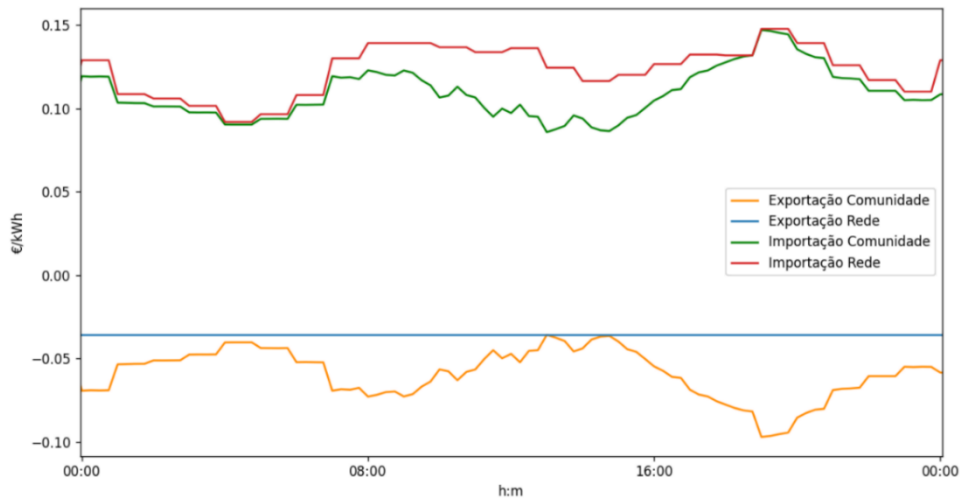


Figura 15 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na quarta-feira

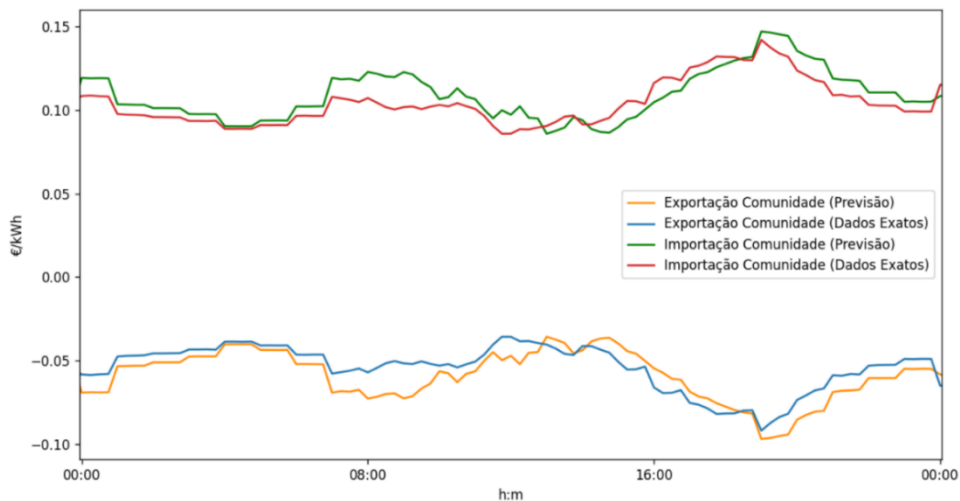


Figura 16 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na quarta-feira

5.2. 1º Cenário – Uma bateria por edifício

Foi considerado que cada edifício possui a sua própria bateria, tendo cada uma destas uma capacidade total de 110 kWh e uma potência de carga/descarga de 55 kW e que o seu SoC mínimo é de 0,25, não havendo impacto da profundidade de descarga no seu tempo de vida útil. Por exemplo, a Figura 17 representa os resultados obtidos para o edifício 4 na segunda-feira, com a procura de energia líquida para o caso base (sem baterias e sem pertencer a uma comunidade) e para os casos que incluem sistema de armazenamento com gestão individual ou comunitária. Observa-se que, nas horas de tarifas de importação de energia da rede mais baixas, durante a noite, a procura aumenta. Este aumento deve-se ao facto de a bateria aproveitar estas tarifas para armazenar energia durante esses períodos de modo a, posteriormente, usar esta energia durante os períodos de tarifas mais elevadas, obtendo assim poupanças ao nível do consumidor (e também da comunidade).

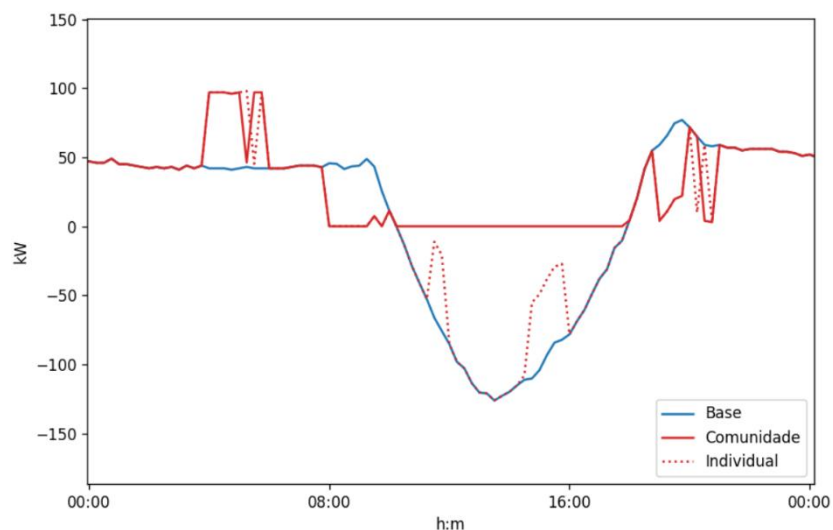


Figura 17 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira

Durante o dia, pode observar-se que a bateria carrega preferencialmente durante os períodos de procura de energia líquida negativa (excesso de geração) e descarrega nos períodos de procura de energia líquida positiva (défice de geração). Tal pode ser comprovado através da análise da Figura 18, onde são apresentados em mais detalhe o uso dos recursos de flexibilidade para o mesmo intervalo de tempo, no mesmo edifício. Um fluxo de potência positivo entre um edifício e a comunidade significa que o edifício exportou energia para a comunidade, ao passo que um fluxo de potência negativo significa importação por parte do edifício.

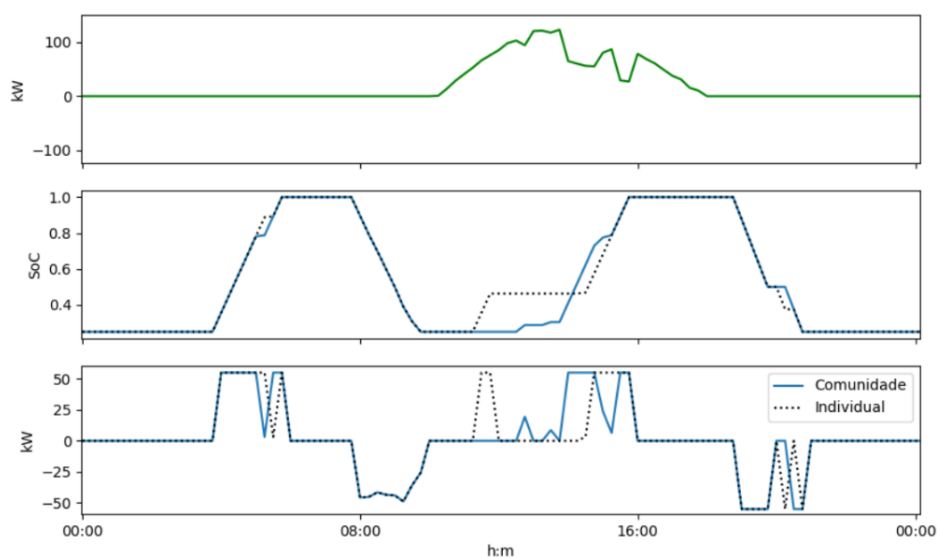


Figura 18 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira

O recurso de flexibilidade adicional (o fluxo de potência com a comunidade) na gestão comunitária justifica os diferentes perfis do uso das baterias para os diferentes casos. É importante salientar ainda que a procura de energia líquida observada nas figuras é do ponto de vista da rede, ou seja, é a troca de energia de cada edifício com a rede. Tal justifica assim a diferença entre os perfis dos diferentes casos. Isto porque num caso existe uma comunidade, sendo feitas trocas de energia entre os edifícios da comunidade e não com a rede, e no outro

não existe, sendo necessário fazer trocas com a rede, quando as baterias não têm disponibilidade para armazenar/entregar energia.

É ainda notória a complementaridade entre a comunidade e as baterias. Observa-se que quando as baterias atingem o máximo (estado de carga igual a 1), os edifícios começam a utilizar a comunidade e a bateria é descarregada posteriormente quando não há geração de energia fotovoltaica e as tarifas de importação de energia da rede são elevadas.

Pela observação da procura de energia líquida deste edifício, neste dia, retira-se que, para uma gestão comunitária, todo o excesso de geração é aproveitado pelo próprio edifício ou pela comunidade, sendo que nenhum excesso de energia é vendido à rede. Isto comprova-se para maioria dos dias úteis, em todos os edifícios, sendo que os edifícios 2, 3 e 4, na terça-feira (tratando-se então de 15% dos casos), não são capazes de fazer este aproveitamento de geração na totalidade. No entanto, é possível observar que quando se trata de uma gestão individual, nem todos os períodos de procura de energia líquida negativos são aproveitados. O aproveitamento destes excessos de geração em cada caso é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Aproveitamento do excesso de geração para os diferentes casos nos dias úteis (%)

Edifício #	Excesso de geração nos dias úteis (kWh) Base	Aproveitamento do excesso de geração nos dias úteis face ao caso Base (%)	
		Individual	Comunidade
1	102,16	100	100
2	464,13	83,14	95,09
3	1354,55	22,00	89,31
4	1684,04	25,99	86,39

Através da análise do fluxo de potências entre cada edifício e a comunidade na segunda-feira, na Figura 19, verifica-se que o edifício 4 é o maior exportador de energia para a comunidade neste dia, sendo que o edifício 3 importa a maioria desta mesma energia, para diminuir o consumo de energia da rede nas horas de custo mais elevado.

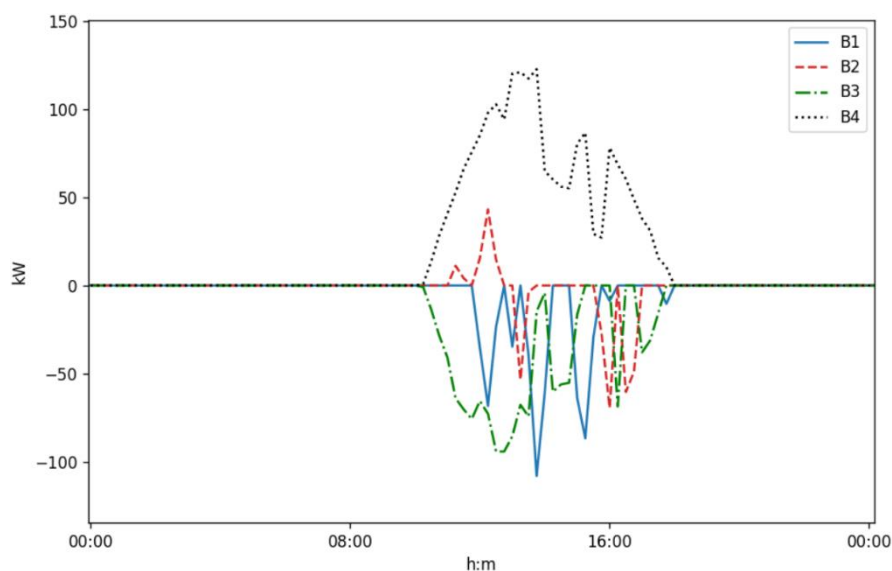


Figura 19 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, segunda-feira

A Figura 20 apresenta a procura de energia líquida do edifício 3 neste mesmo dia e observando esta, comprova-se que o consumo é diminuído no caso da Comunidade durante as horas de tarifas da rede mais elevadas, permitindo obter poupanças no edifício 3. As figuras relativas a todos os edifícios, em todos os dias da semana, encontram-se no Anexo IV.

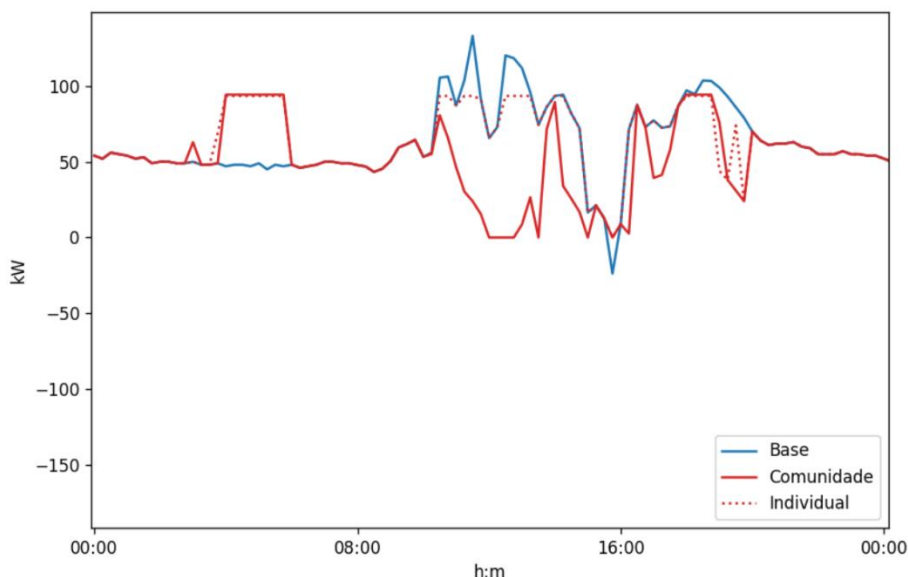


Figura 20 - Procura de energia líquida no Edifício 3, segunda-feira

No entanto, o aproveitamento total do excesso de geração fotovoltaica pode não acontecer noutros dias, tal como no sábado e no domingo, em que maioria dos edifícios possui excesso de geração fotovoltaica. A Figura 21 apresenta a procura de energia líquida do edifício 4 no sábado (nos diferentes casos), na qual se pode observar que, apesar da redução do excesso de geração, grande parte da energia gerada tem de ser vendida à rede. Seria possível aumentar a capacidade das baterias para fazer face a este excesso, mas poderia haver um subaproveitamento das mesmas nos dias úteis, já que com a capacidade instalada é possível fazer face aos excessos de geração fotovoltaica em quase todos os dias úteis nos edifícios em questão e o investimento em baterias de maior capacidade poderá não compensar, devido ao seu elevado custo, pois este não é compensado quando a capacidade é apenas usada no fim de semana.

Na Figura 22 são apresentados em mais detalhe o uso dos recursos de flexibilidade para o mesmo intervalo de tempo, no mesmo edifício. Observa-se que, ao contrário do que se sucede na segunda-feira, a bateria não carrega totalmente durante a noite, o que se deve ao facto de se tratar de um dia em que é esperado haver muito excesso de geração. Assim, a bateria carrega durante a noite apenas o necessário para fazer face à procura de energia líquida positiva quando as tarifas são mais elevadas, visto que posteriormente pode carregar com o excesso de geração no edifício, obtendo desta forma poupanças. As diferenças da potência durante a noite (entre a gestão individual e a comunitária) devem-se ao facto de que quando existem trocas com a comunidade, a procura de energia líquida durante o dia é diferente e por isso, a quantidade a armazenar durante a noite pode ser menor.

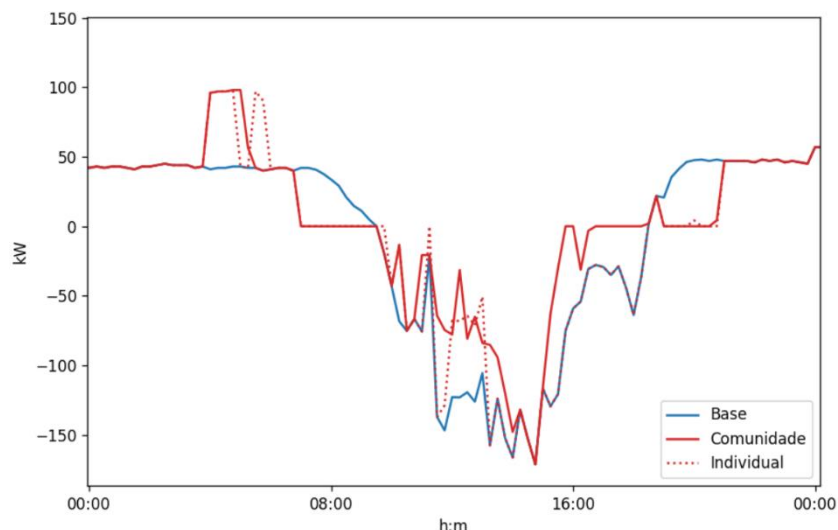


Figura 21 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado

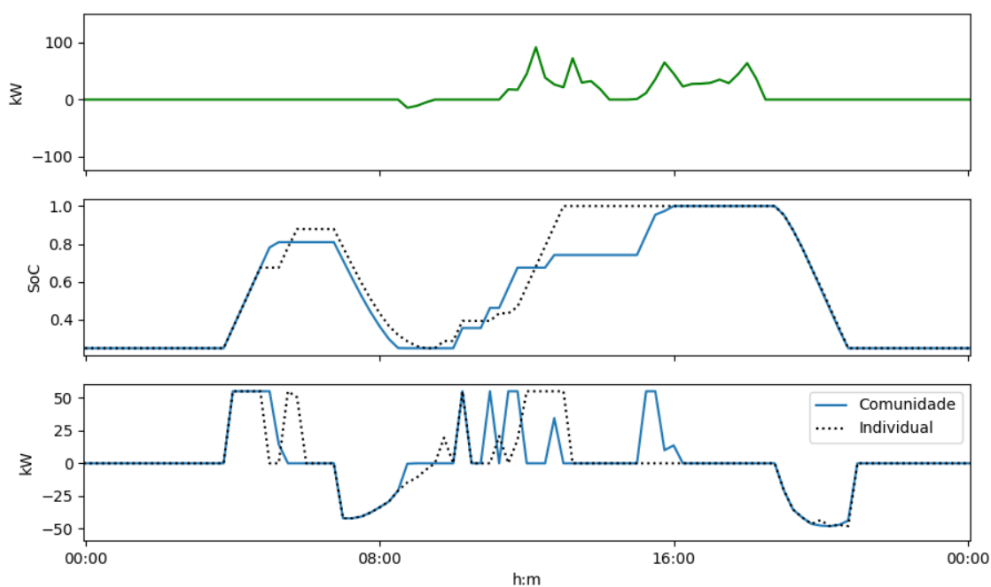


Figura 22 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado

O aproveitamento destes excessos de geração para cada caso é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Aproveitamento do excesso de geração para os diferentes casos no fim de semana (%)

Edifício #	Excesso de geração no fim de semana (kWh)	Aproveitamento do excesso de geração no fim de semana face ao caso Base (%)	
		Individual	Comunidade
1	749,08	26,43	32,22
2	715,34	23,05	70,58
3	1382,27	14,04	54,13
4	790,00	12,29	40,33

Relativamente ao caso comunitário, há edifícios a importar e outros a exportar para a comunidade, como pode ser observado na Figura 23, onde se observa o fluxo de potências entre

cada edifício e a comunidade, na quarta-feira. É possível observar que a potência exportada para a comunidade é igual à potência importada da mesma, em todos os momentos.

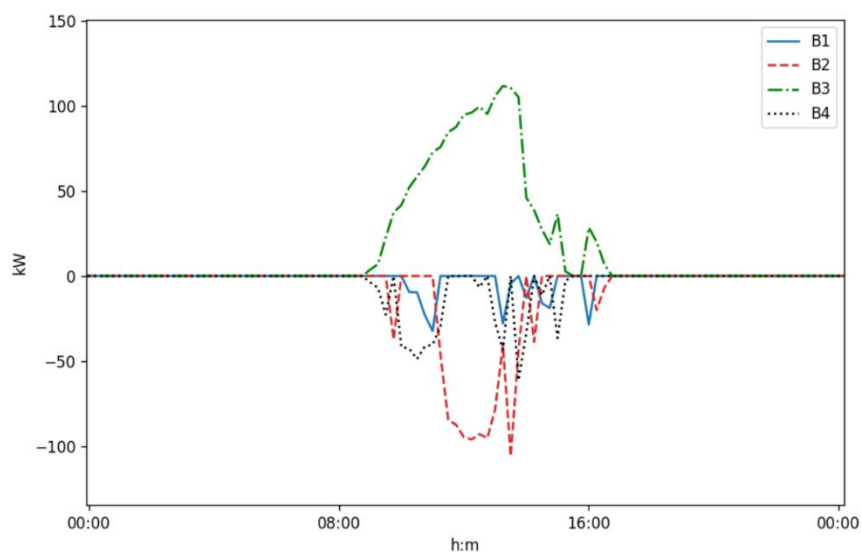


Figura 23 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, quarta-feira

Na Tabela 6 são apresentadas as trocas de energia entre cada edifício e a comunidade, podendo observar-se que em cada dia, a quantidade de energia exportada para a Comunidade equivale à energia importada da Comunidade. Na quarta-feira, por exemplo, a totalidade da energia exportada para a comunidade provém do edifício 3 e os restantes edifícios importam esta energia, sendo que a soma das importações nos diferentes edifícios é igual à exportação assegurada pelo edifício 3.

Tabela 6 - Troca de Energia (kWh) entre cada edifício e a Comunidade, para os dias da semana

	Edifício	Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.	Dom.
Imp. (kWh)	1	142,38	221,36	45,81	338,72	101,23	61,84	82,24
	2	65,80	135,27	242,51	90,15	14,76	160,34	0
	3	302,41	13,20	0	0	130,93	7,91	0
	4	0	22,56	125,28	1,08	0	7,60	838,62
	Total	510,59	392,39	413,60	429,95	246,92	237,69	920,86
Exp. (kWh)	1	0	0	0	0	0	2,88	40,43
	2	22,20	0	0	4,70	28,58	0	339,53
	3	0	114,03	413,60	384,11	0	13,25	540,90
	4	488,39	278,36	0	41,14	218,34	221,56	0
	Total	510,59	392,39	413,60	429,95	246,92	237,69	920,86

Os custos obtidos nos casos simulados são apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8. Os custos associados à degradação não são tidos em conta no valor a pagar (Custo), uma vez que se trata de uma depreciação e não de um pagamento que o utilizador tem de efetuar, ao contrário do custo da eletricidade e do custo da potência contratada. Este custo associado à degradação serve para dar um peso à forma como se utiliza a bateria, se conscientemente ou de forma abusiva, e desta forma é apenas incluído na função objetivo (Obj.). Observando a Tabela 7 e a Tabela 8 retira-se que é possível diminuir a fatura de energia elétrica tanto no caso Individual

como no caso Comunitário, sendo mais notória a diferença para o caso Comunitário. Introduzindo uma bateria em cada edifício e sendo feita uma gestão individual é possível baixar os custos de energia em 3,79%, 6,72%, 7,92% e 8,98% em cada edifício, respetivamente, permitindo uma poupança de 6,46% na soma das faturas energéticas. É de notar ainda que, usando a gestão individual, a potência contratada é inferior em todos os edifícios, quando comparada com o caso base, o que é observável através dos custos da potência, que diminuíram, o que é uma consequência direta do uso de baterias.

Tabela 7 - Custos por Edifício para o Caso Base (€)

Edifício #	Base			
	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Obj.	Custo
1	1225,00	35,66	1260,65	1260,65
2	997,25	31,10	1028,35	1028,35
3	760,02	30,19	790,21	790,21
4	733,49	30,64	764,13	764,13
Total	3715,75	127,59	3843,34	3843,34

Analisando o caso em que estes edifícios se encontram interligados, formando uma comunidade, é possível reduzir a fatura de energia em 5,97%, 9,12%, 11,62% e 15,55%, respetivamente, permitindo uma poupança de 9,88% na fatura de energia da comunidade. Neste caso, também a potência contratada é inferior em todos os edifícios, quando comparada com o caso base, sendo esta muito semelhante à observada com uma gestão individual das baterias. Isto deve-se ao facto de serem as baterias que causam impacto na potência contratada, sendo que a troca de energia entre edifícios não permite a redução desta, pois apesar de não ser comprada energia diretamente a um comercializador da rede, a energia proveniente da comunidade circula e é entregue pela rede de distribuição. Assim, considerou-se que esta também contribui para o cálculo da potência contratada. As poupanças são mais notórias nos edifícios 3 e 4 pois estes possuem mais excesso de geração que os outros. As diferenças ao nível da Degradação da Bateria para os dois casos não são muito significativas. Tais resultados comprovam os benefícios da inclusão dos edifícios numa comunidade de energia.

Tabela 8 - Custos por Edifício para o Caso Individual e Comunitário (€)

Edifício #	Individual					Comunidade				
	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Degradação da Bateria	Obj.	Custo	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Degradação da Bateria	Obj.	Custo
1	1184,99	27,82	10,92	1223,73	1212,81	1157,58	27,82	11,61	1197,01	1185,40
2	935,20	24,07	14,12	973,39	959,27	910,47	24,07	14,11	948,65	934,54
3	706,41	21,19	12,33	739,93	727,60	676,98	21,39	12,26	710,63	698,37
4	673,19	22,32	14,23	709,74	695,51	620,13	25,20	14,60	659,93	645,33
Total	3499,79	95,40	51,60	3646,79	3595,19	3365,16	98,48	52,58	3516,22	3463,64

As seguintes tabelas (Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11) mostram a desagregação do custo C_E para os casos Base, Individual e Comunidade, respetivamente. Da comparação entre estes retira-se que o custo de importação da rede pode ser diminuído em 7,12% e em 17,30% e ainda que a exportação para a rede diminui em 25,94% e em 69,34%, comparando o caso Individual e Comunidade com o caso Base, respetivamente.

Tabela 9 - Desagregação do custo C_E (€), Caso Base

Edifício #	Base		
	C_E	C_E importação da rede	C_E exportação para a rede
1	1225,00	1255,45	-30,45
2	997,25	1039,45	-42,20
3	760,02	857,93	-97,91
4	733,49	822,00	-88,51
Total	3715,76	3974,83	-259,07

Tabela 10 - Desagregação do custo C_E (€), Caso Individual

Edifício #	Individual		
	C_E	C_E importação da rede	C_E exportação para a rede
1	1184,99	1204,70	-19,71
2	935,20	957,69	-22,49
3	706,41	786,71	-80,30
4	673,19	742,57	-69,38
Total	3499,79	3691,67	-191,88

Tabela 11 - Desagregação do custo C_E (€), Caso Comunitário

Edifício #	Comunidade				
	C_E	C_E importação da rede	C_E exportação para a rede	C_E importação da comunidade	C_E exportação para a comunidade
1	1157,58	1077,83	-18,17	100,35	-2,43
2	910,47	867,11	-8,34	71,71	-20,01
3	676,98	727,24	-27,86	48,77	-71,17
4	620,13	614,82	-25,06	98,99	-68,62
Total	3365,16	3287,00	-79,43	319,82	-162,23

As diferenças entre o caso Individual e Comunidade devem-se às trocas de energia entre os diferentes edifícios da Comunidade, que beneficiam economicamente os utilizadores e então são tidas primeiro em consideração, pelo que, sempre que é possível trocar energia com a

comunidade não é utilizada energia da rede. Quando comparando apenas o Caso Individual com o Caso Comunidade, conclui-se que, apenas por se incluírem numa Comunidade, os edifícios 1, 2, 3 e 4 obtêm uma diminuição nos custos de importação de energia (tendo em conta a importação da rede e da comunidade) de 2,20%, 1,97%, 1,36% e 3,87% respetivamente, e ainda um aumento na remuneração proveniente da venda de energia (tendo em conta a exportação para a rede e para a comunidade) de 4,52%, 26,06%, 23,33% e 35,02%, respetivamente, sendo que no caso comunitário a exportação para a rede é reduzida em 58,60%, comprovando o benefício associado à venda de energia para a comunidade.

Foi ainda simulado um cenário no qual não existe armazenamento, para comprovar os benefícios de apenas pertencer a uma comunidade. Da análise dos resultados desta, conclui-se que só pelo facto de pertencer a uma comunidade de energia, é possível obter poupanças na fatura de energia elétrica na ordem dos 4,10%, diminuindo a energia injetada na rede em 50,64%.

Por forma a avaliar o impacto da degradação da bateria no comportamento da bateria foi avaliado um caso em que é permitido que as baterias atinjam um valor extremo de DoD igual a 0,9, ou seja, o estado de carga mínimo é 0,1 e o estado de carga máximo permanece igual a 1. Com esta alteração, o tempo de vida máximo das baterias diminui em 11%. Este caso foi então avaliado por forma a determinar o impacto que esta alteração pode ter nos custos dos casos Individual e Comunidade e no comportamento da bateria.

A Figura 24 e a Figura 25 mostram o comportamento da bateria do edifício 3, na terça-feira, com DoD máximo igual a 0,75 e com DoD máximo igual a 0,9, respetivamente. Da análise destas retira-se que o comportamento da bateria é diferente quando é permitido que esta utilize uma maior capacidade, ou seja, quando o DoD máximo é igual a 0,9, tanto para o caso Individual como para o Comunitário. No entanto, a bateria acaba por descarregar até ao valor mínimo possível na mesma, apesar de ser notória a diferença na forma como esta carrega/descarrega.

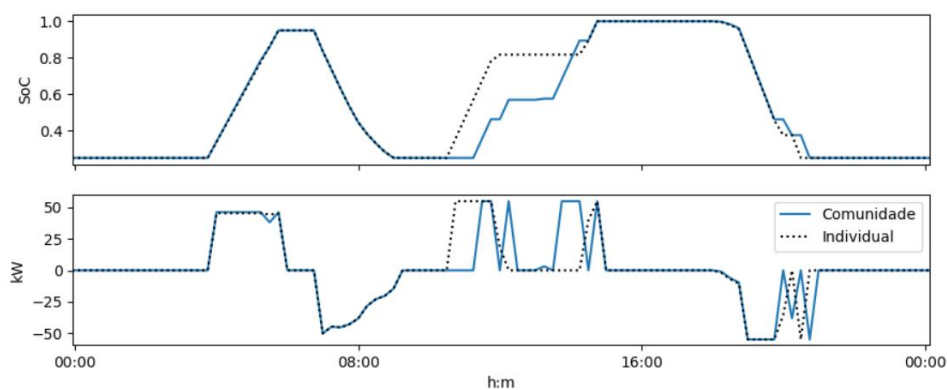


Figura 24 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, terça-feira (DoD máximo igual a 0,75)

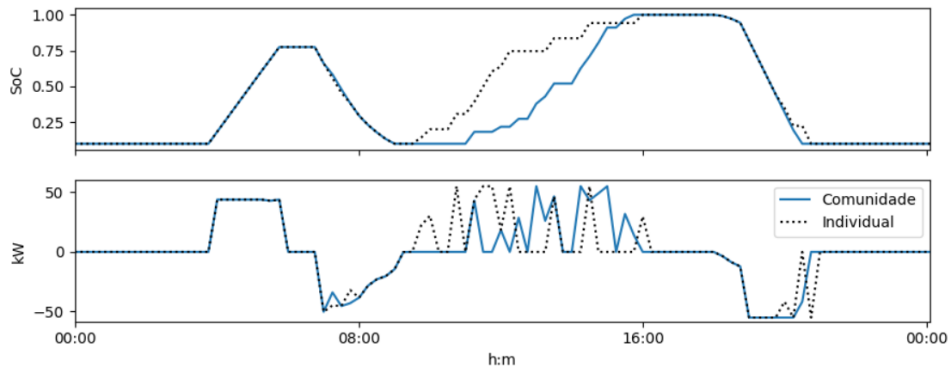


Figura 25 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, terça-feira (DoD máximo igual a 0,9)

Os custos obtidos nos casos simulados são apresentados na Tabela 12. Da comparação direta destes custos com os custos obtidos para DoD máximo igual a 0,75 é possível observar que o aumento da capacidade utilizável das baterias permite aumentar as poupanças nos custos de energia, tanto com a gestão individual como com a gestão comunitária. Com uma gestão individual, os 4 edifícios obtêm uma poupança superior em 0,45%, 0,41%, 1,10% e 1,03%, respetivamente. Com uma gestão comunitária, os edifícios podem obter uma poupança superior em 0,66%, 0,40%, 1,03% e 0,51%, respetivamente, sendo que, a nível comunitário, a poupança total é superior em 0,63%. Estas maiores poupanças devem-se ao facto de ser possível armazenar mais energia, proveniente da maior capacidade utilizável das baterias.

Relativamente à potência contratada, observando o custo relativo a esta, conclui-se que o aumento da capacidade utilizável das baterias não afeta significativamente a potência contratada, sendo que para uma gestão individual são observadas apenas diferenças nos edifícios 2, 3 e 4 onde a potência contratada é inferior em 1,08%, 1,75% e 1,03%, respetivamente, e para uma gestão comunitária apenas são observadas diferenças nos edifícios 2 e 3, tendo a potência contratada diminuído em 1,08% e 2,66%, respetivamente. O custo associado à degradação da bateria aumenta em 25,27% para o cenário Individual e em 26,25% para o cenário Comunidade, quando comparado com o caso em que a DoD não afeta o tempo de vida da bateria. Isto deve-se ao facto de que, no caso com DoD máximo igual a 0,9, existe um maior peso na degradação da bateria.

Tabela 12 - Custos por Edifício para o Caso Individual e Comunidade com DoD máximo igual a 0,9 (€)

Edifício #	Individual					Comunidade				
	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Degradação da Bateria	Obj.	Custo	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Degradação da Bateria	Obj.	Custo
1	1179,41	27,82	14,04	1221,27	1207,23	1149,30	27,82	14,99	1192,11	1177,12
2	931,23	23,81	17,50	972,54	955,04	906,62	23,81	17,55	947,98	930,43
3	698,14	20,82	15,48	734,44	718,96	669,46	20,82	15,48	705,76	690,28
4	665,54	22,09	17,62	705,25	687,63	616,20	25,20	18,36	660,03	641,40
Total	3474,32	94,54	64,64	3633,50	3568,86	3341,58	97,65	66,38	3505,61	3439,23

Tendo em conta os resultados obtidos nos dois casos (DoD máximo igual a 0,75 e DoD máximo igual a 0,9), verifica-se que o facto de permitir um maior uso da capacidade da bateria, permitindo que esta atinja valores de SoC iguais a 0,1, poderá compensar no caso Individual

principalmente para os edifícios 3 e 4, pois as poupanças que esta alteração permite atingir poderão ser mais vantajosas, mesmo com a diminuição do tempo de vida da bateria. Já no caso comunitário, retira-se que esta alteração não traz vantagens significativas à comunidade, pelo que se conclui que o estado de carga mínimo das baterias não deverá ser inferior a 0,25.

5.3. 2º Cenário – Uma bateria na Comunidade, a nível centralizado

Neste cenário foi considerado que apenas existe uma bateria na comunidade, a nível centralizado, sendo esta utilizada por todos os edifícios. A bateria em questão tem uma capacidade total de 440 kWh e uma potência de carga/descarga de 220 kW. Estes valores foram escolhidos por forma a obter uma bateria equivalente ao conjunto de baterias utilizadas no 1º Cenário, possuindo então uma capacidade e potência equivalente à soma das capacidades e potências das baterias utilizadas no 1º Cenário.

Foi assumido que o SoC mínimo das baterias é de 0,25, não havendo impacto da profundidade de descarga no tempo de vida útil da bateria. Por forma a fazer uma comparação com o primeiro cenário, é estudado o comportamento do Edifício 4 na segunda-feira como representado pela Figura 26. Nesta figura é apresentada a procura de energia líquida para o caso base (sem bateria e sem pertencer a uma comunidade) e para o caso que inclui um sistema de armazenamento a nível comunitário.

As figuras relativas aos diferentes edifícios (e bateria) para cada dia da semana são apresentados no Anexo V.

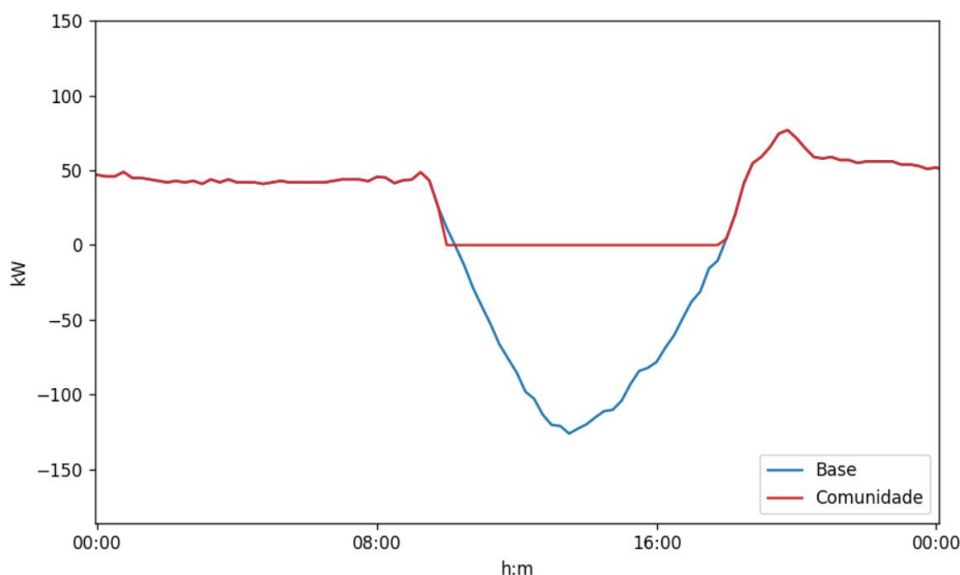


Figura 26 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira

Pela observação da procura de energia líquida deste edifício, neste dia, observa-se que (para uma gestão comunitária) todo o excesso de geração é aproveitado pela comunidade, sendo que nenhum excesso de energia é vendido à rede. Isto ocorre para maioria dos dias úteis, em todos os edifícios, sendo que os 4 edifícios na terça-feira (tratando-se então de 20% dos casos), não são capazes de fazer este aproveitamento de geração na totalidade.

De acordo com a Figura 27 e a Figura 28, onde são apresentados em mais detalhe o uso dos recursos de flexibilidade para o mesmo intervalo de tempo, observa-se que a bateria, ao

contrário do 1º Cenário, não carrega durante a noite, carregando exclusivamente durante os períodos de procura de energia líquida negativa (excesso de geração) e descarregando nos períodos de procura de energia líquida positiva (défice de geração). Isto deve-se ao facto de não ser permitido que a bateria da comunidade faça trocas de energia com a rede, mas apenas com os edifícios pertencentes a esta, enquanto que no 1º Cenário as baterias podiam carregar com energia proveniente da rede que era consumida pelo edifício. Esta restrição é incluída para obter um maior aproveitamento dos excessos de geração dos diferentes edifícios, sendo a bateria usada apenas em função desses mesmos excessos.

Retira-se ainda que neste dia, o edifício 4 é o principal contribuinte para a carga da bateria, sendo que este edifício possui um elevado excesso de geração.

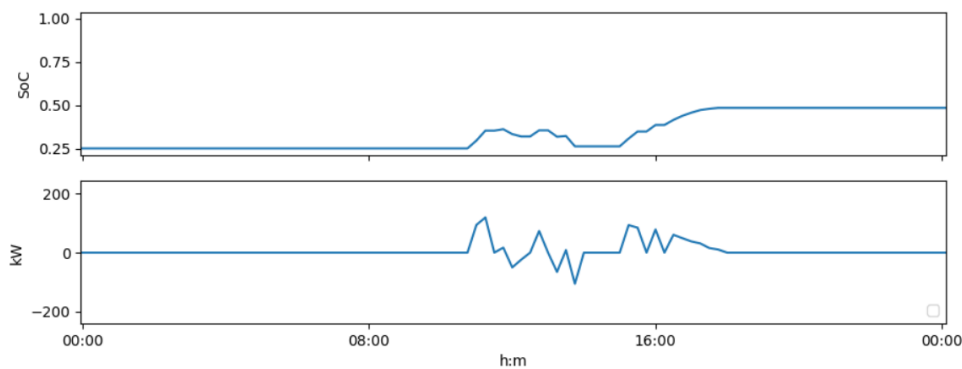


Figura 27 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, segunda-feira

Através da análise do fluxo de potências entre cada edifício (e bateria) e a comunidade, Figura 28, verifica-se que em alguns instantes em que a tarifa de importação da rede é elevada, o edifício 1, por exemplo, importa energia da comunidade, para obter poupanças na fatura de energia. A Figura 29 comprova que estas trocas de energia contribuem para a diminuição da compra de energia à rede no edifício 1, durante instantes de tarifas da rede elevadas.

É importante lembrar que um fluxo de potência positivo entre um edifício e a comunidade significa que o edifício (ou bateria) exportou energia para a comunidade, ao passo que um fluxo de potência negativo significa importação por parte do edifício (ou bateria).

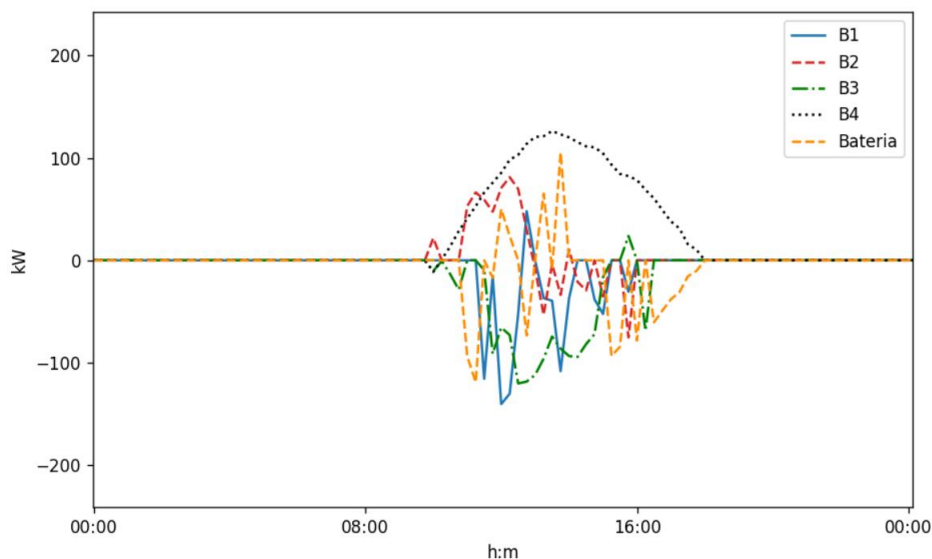


Figura 28 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, segunda-feira

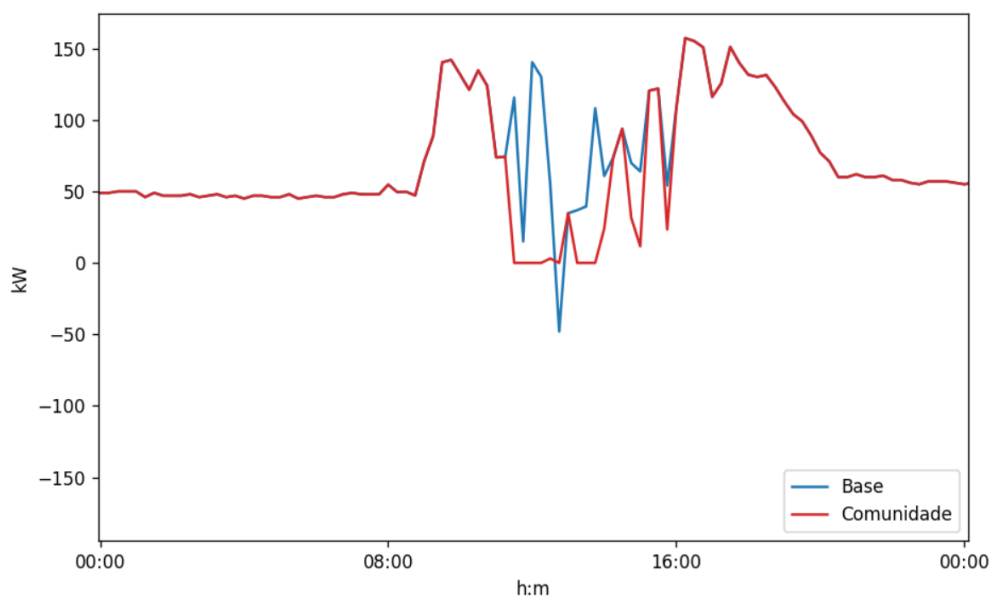


Figura 29 - Procura de energia líquida no Edifício 1, segunda-feira

O aproveitamento dos excessos de geração em cada edifício, durante a semana, é apresentado na Tabela 13. Ao contrário do 1º Cenário (analisando o caso da Comunidade), onde se conseguiu um maior aproveitamento do excesso de geração nos edifícios com menor excesso, aqui observa-se que é nos edifícios com maior excesso que se aproveita mais. Isto acontece pois quando o armazenamento se encontra em cada edifício, todos os edifícios têm uma bateria com a mesma capacidade, e quando o excesso é menor, o impacto dessa capacidade é maior. Contudo, neste cenário a capacidade da bateria pode estar a ser utilizada apenas por um edifício e não obrigatoriamente por todos, pelo que a sua utilização é concentrada nos edifícios onde será possível causar um maior impacto económico, que é normalmente nos edifícios onde há maior excesso de geração.

Tabela 13 - Aproveitamento do excesso de geração para o caso comunitário nos dias úteis (%)

Edifício #	Excesso de geração nos dias úteis (kWh)	Aproveitamento do excesso de geração nos dias úteis face ao caso Base (%)
	Base	Comunidade
1	102,16	64,07
2	464,13	83,50
3	1354,55	92,01
4	1684,04	89,50

O aproveitamento total do excesso de geração pode não acontecer em alguns dias, principalmente nos dias de fim de semana, tal como observado no 1º Cenário. A Figura 30 apresenta a procura de energia líquida do edifício 4 no sábado, para os diferentes casos, onde se observa que, apesar do melhor aproveitamento de geração, grande parte da energia gerada terá de ser vendida à rede. Uma solução para este subaproveitamento, como mencionado também no 1º Cenário, seria o aumento da capacidade e potência da bateria.

Na Figura 31 e na Figura 32 são apresentados em mais detalhe o uso dos recursos de flexibilidade para o mesmo intervalo de tempo, de onde se retira ainda que este edifício é um dos principais contribuintes para a carga da bateria.

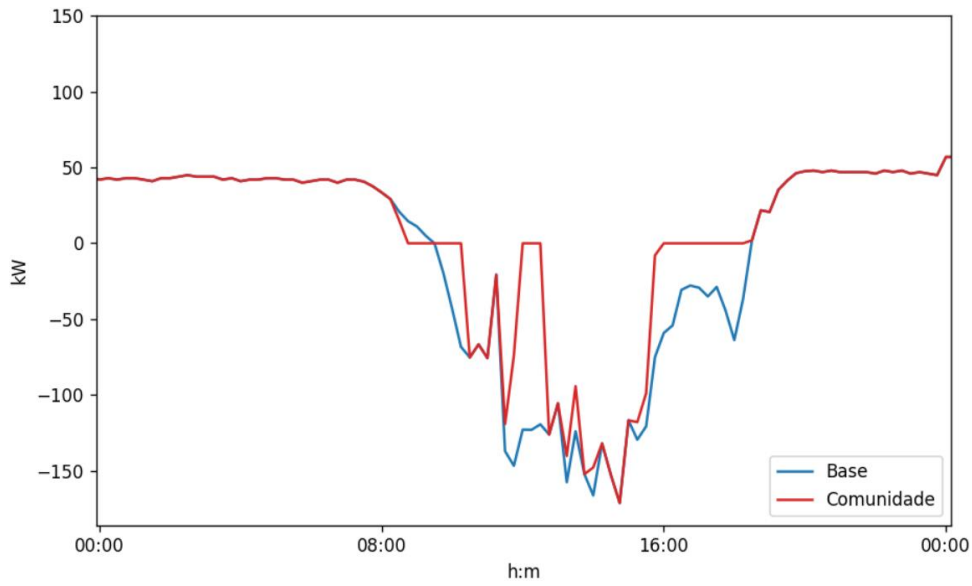


Figura 30 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado

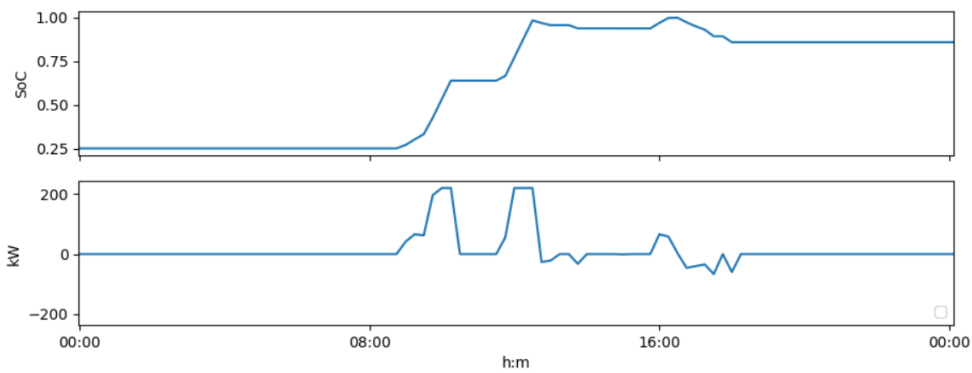


Figura 31 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sábado

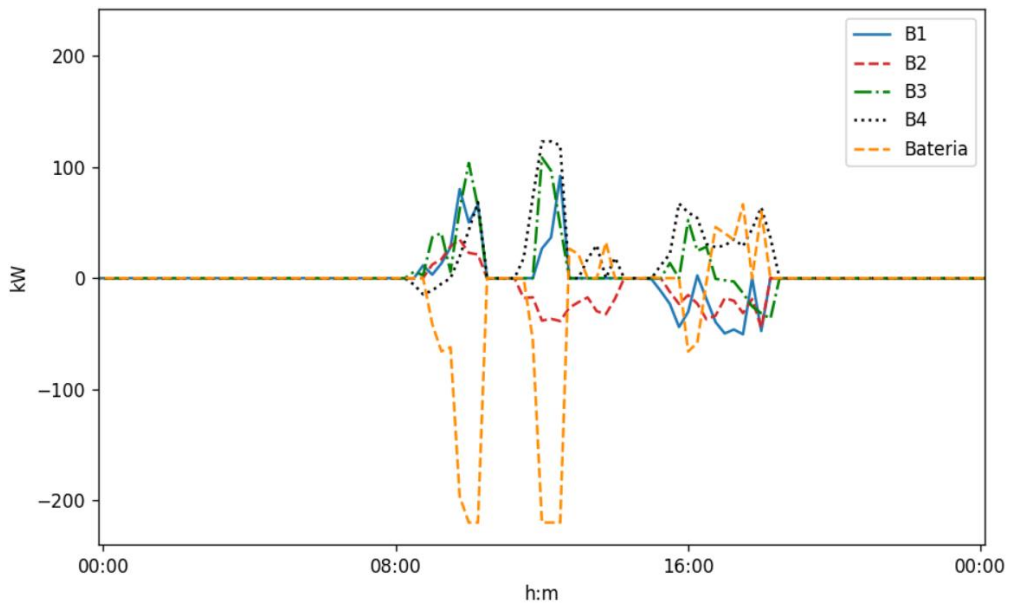


Figura 32 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, sábado

O aproveitamento dos excessos de geração em cada edifício, no fim de semana, é apresentado na Tabela 14. Comparativamente ao 1º Cenário, observa-se que com o armazenamento centralizado, a utilização da capacidade da bateria está concentrada nos edifícios que causam uma maior impacto económico, como mencionado anteriormente. Desta forma, quando comparando os valores do excesso de geração aproveitada com os obtidos no 1º Cenário, o edifício 3, que é aquele que possui maior excesso, beneficia de um aumento no aproveitamento de geração, enquanto que os edifícios com menor geração sofrem uma diminuição do aproveitamento de geração.

Tabela 14 - Aproveitamento do excesso de geração para o caso comunitário no fim de semana (%)

Edifício #	Excesso de geração no fim de semana (kWh)	Aproveitamento do excesso de geração no fim de semana face ao caso Base (%)
	Base	Comunidade
1	749,08	30,89
2	715,34	62,13
3	1382,27	64,48
4	790,00	36,81

Relativamente ao caso comunitário, há edifícios a importar e outros a exportar para a comunidade, como pode ser visto na Figura 33. Nesta figura observa-se o fluxo de potências entre cada edifício (e bateria) e a comunidade na quarta-feira, onde o principal exportador de energia para a comunidade é o edifício 3, ao passo que o edifício 2 é o maior importador. É possível observar que a potência exportada para a comunidade é igual à potência importada da mesma, em todos os momentos.

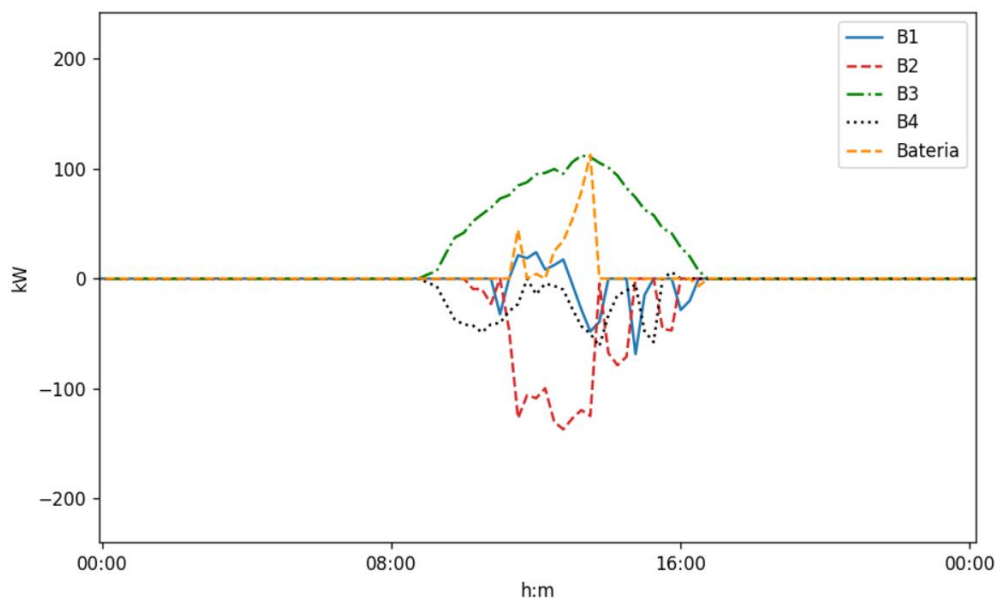


Figura 33 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e bateria) e a Comunidade, quarta-feira

Na Tabela 15 são apresentadas as trocas de energia entre cada edifício e a comunidade, podendo observar-se que em cada dia, a quantidade de energia exportada para a comunidade equivale à energia importada da comunidade. Na quarta-feira, por exemplo, a maioria da

energia exportada para a comunidade provém do edifício 3 e da bateria e os restantes edifícios importam esta energia, sendo que a soma das importações nos diferentes edifícios é igual à soma das exportações.

Tabela 15 - Troca de Energia (kWh) entre cada edifício (e bateria) e a Comunidade, para os dias da semana

	Edifício	Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.	Dom.
Imp. (kWh)	1	199,03	149,96	71,31	411,29	251,55	90,61	122,30
	2	65,08	202,23	371,06	174,96	62,59	143,09	44,83
	3	331,64	61,80	0	6,43	362,47	28,12	51,40
	4	2,83	66,88	181,80	111,92	0	9,13	918,37
	Bateria	193,10	400,28	1,72	192,51	23,42	412,20	388,23
	Total	791,68	881,15	625,89	897,11	700,03	683,15	1525,13
Exp. (kWh)	1	11,99	28,05	25,42	0	0	102,52	128,88
	2	127,28	64,26	0	65,10	130,90	34,33	410,09
	3	5,94	247,66	510,66	482,03	0	173,23	718,03
	4	585,45	427,84	1,48	148,72	343,72	290,83	0
	Bateria	61,02	113,34	88,33	201,26	225,41	82,24	268,13
	Total	791,68	881,15	625,89	897,11	700,03	683,15	1525,13

Observando a Tabela 16, onde são apresentados os custos obtidos nos casos simulados, retira-se que é possível diminuir a fatura de energia elétrica no caso comunitário. Analisando este caso em que os edifícios 1, 2, 3 e 4 se encontram interligados, formando uma comunidade, é possível reduzir a fatura de energia em 3,52%, 4,30%, 6,03% e 9,08%, respetivamente, permitindo uma poupança de 5,35% a nível comunitário. As poupanças são mais notórias nos edifícios 3 e 4 pois estes possuem mais excesso de geração que os outros. Neste caso, a potência contratada permanece constante, porque não existem baterias em cada edifício que permitam a diminuição da potência que a rede tem que fornecer a cada edifício. Como neste caso o armazenamento se encontra fora dos edifícios, não tem impacto na potência pedida por cada edifício (total da potência comprada à rede e à comunidade). As diferenças ao nível da Degradação da Bateria para os dois cenários não são muito significativas.

Tabela 16 - Custos por Edifício para o Caso Base e Comunitário (€)

Edifício #	Base			Comunidade				
	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Custo	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Degradação da Bateria	Obj.	Custo
1	1225,00	35,66	1260,65	1180,64	35,66	3,56	1219,86	1216,30
2	997,25	31,10	1028,35	953,06	31,10	3,56	987,72	984,16
3	760,02	30,19	790,21	712,39	30,19	3,56	746,14	742,58
4	733,49	30,64	764,13	664,10	30,64	3,56	698,30	694,74
Total	3715,75	127,59	3843,34	3510,19	127,59	14,24	3652,02	3637,78

A Tabela 17 e a Tabela 18 mostram a desagregação do custo C_E para os casos Base e Comunidade, respetivamente. Da comparação entre estes casos conclui-se que, ao serem incluídos numa comunidade com uma bateria partilhada, os edifícios 1, 2, 3 e 4 obtêm uma

diminuição nos custos de importação de energia (tendo em conta a importação da rede e da comunidade) de 3,10%, 2,89%, 2,36% e 4,51% respetivamente, e ainda um aumento na remuneração proveniente da venda de energia (tendo em conta a exportação para a rede e para a comunidade) de 17,73%, 33,63%, 27,99% e 36,47%, respetivamente. Conclui-se ainda que ao nível da comunidade o custo de importação da rede pode ser diminuído em 14,71% e ainda que a exportação para a rede diminui em 69,94%, comparando o caso Comunidade com o caso Base. As diferenças entre estes casos devem-se às trocas de energia entre os diferentes edifícios da comunidade e ao uso da bateria partilhada, trocas estas que beneficiam economicamente os utilizadores e então são tidas primeiro em consideração, pelo que, sempre que é possível trocar energia com a comunidade não é utilizada energia da rede.

Tabela 17 - Desagregação do custo C_E (€), Caso Base

Edifício #	Base		
	C_E	C_E importação da rede	C_E exportação para a rede
1	1225,00	1255,45	-30,45
2	997,25	1039,45	-42,20
3	760,02	857,93	-97,91
4	733,49	822,00	-88,51
Total	3715,76	3974,83	-259,07

Tabela 18 - Desagregação do custo C_E (€), Caso Comunitário

Edifício #	Comunidade				
	C_E	C_E importação da rede	C_E exportação para a rede	C_E importação da comunidade	C_E exportação para a comunidade
1	1184,64	1085,91	-19,83	130,58	-16,02
2	953,06	903,04	-12,43	106,41	-43,96
3	712,39	748,48	-21,44	89,23	-103,88
4	664,10	652,71	-24,18	132,18	-96,61
Total	3510,19	3390,14	-77,88	458,40	-260,47

Comparando este 2º Cenário com o 1º Cenário, é possível observar as vantagens de ter um sistema de armazenamento descentralizado, tendo baterias em cada edifício, pois é possível obter uma poupança na fatura energética da comunidade de 9,88% no 1º Cenário e apenas de 5,35% no 2º Cenário. Esta diferença deve-se principalmente ao facto de a bateria do 2º Cenário não efetuar trocas de energia diretamente com a rede. No entanto, é importante afirmar que, mesmo que fosse permitido ao armazenamento centralizado efetuar trocas de energia com a rede, este não iria comprar energia da rede, pois tal não asseguraria vantagens económicas em fazê-lo. Isto deve-se ao facto de que, a mesma energia iria ser paga duas vezes, quando é importada da rede e, posteriormente, quando importada pelos edifícios.

No entanto, é de notar que o número de ciclos completos das baterias diverge, sendo que, no 1º Cenário, durante o intervalo de tempo em questão, pode ser completado mais que um ciclo por dia em cada bateria (ou seja, 7 ou mais ciclos), ao passo que no 2º Cenário, devido à existência de apenas uma bateria com maior capacidade, esta poderá completar apenas dois ou três ciclos durante o mesmo intervalo de tempo. Isto pode justificar o uso de apenas uma bateria a nível centralizado, sendo que esta poderá ter um tempo de vida (em anos) bastante superior às baterias de menor capacidade instaladas nos diversos edifícios. Da comparação destes cenários conclui-se ainda que ao colocar uma bateria a nível centralizado não é possível diminuir a potência contratada em todos os edifícios, comparativamente ao armazenamento dividido pelos diferentes edifícios.

Por forma a avaliar o impacto da degradação da bateria no comportamento da bateria, tal como no 1º Cenário, foi avaliado um caso em que é permitido que a bateria atinja um valor extremo de DoD igual a 0,9, ou seja, o estado de carga mínimo é 0,1 e o estado de carga máximo permanece igual a 1. Com esta alteração, o tempo de vida máximo da bateria diminui em 11%. Este caso é então avaliado por forma a determinar o impacto que esta alteração pode ter nos custos do caso Comunidade e no comportamento da bateria. Os custos obtidos no caso simulado são apresentados na Tabela 19.

Comparando estes resultados com aqueles obtidos anteriormente, quando a DoD é menos profunda não afetando o tempo de vida da bateria, observa-se que é possível reduzir a fatura de energia elétrica em mais 0,09%, permitindo um uso de capacidade da bateria superior, mas o custo associado à degradação da bateria aumenta em 15,31%. Relativamente à potência contratada, esta permanece inalterada quando é usada uma maior capacidade da bateria, tal como esperado.

Tabela 19 - Custos por Edifício para o Caso Comunidade com DoD máximo igual a 0,9 (€)

Edifício #	Comunidade				
	C_E	$CP^b \cdot C_P$	Degradação da Bateria	Obj.	Custo
1	1181,33	35,66	4,11	1221,10	1216,99
2	950,67	31,10	4,11	985,88	981,77
3	711,69	30,19	4,11	745,99	741,88
4	662,80	30,64	4,11	697,55	693,44
Total	3506,49	127,59	16,42	3650,50	3634,08

Tendo em conta os resultados obtidos nos dois casos (DoD máximo igual a 0,75 e DoD máximo igual a 0,9), concluiu-se o mesmo que no 1º Cenário na presença de uma gestão comunitária, ou seja, o estado de carga mínimo não deverá ser inferior a 0,25.

Será importante ainda lembrar que um dos objetivos de ter uma bateria comunitária de maior capacidade, a nível centralizado, ao invés de cada edifício possuir uma única bateria, é a redução do seu custo inicial. Para isso, seria adquirida uma bateria com uma capacidade superior à das baterias individuais e ainda inferior à soma das capacidades de todas as baterias individuais, ou seja, inferior àquela analisada neste 2º Cenário. Procedeu-se então novamente à simulação deste cenário, mas agora com uma capacidade instalada de 330 kWh, com uma

potência de carga/descarga de 165 kW, perfazendo esta então, um custo 25% inferior ao da bateria considerada anteriormente. Concluiu-se que a comunidade em questão, aliada a este sistema de armazenamento, consegue obter uma poupança de 5,16% na fatura de energia elétrica. Foi ainda simulada uma comunidade com uma bateria instalada com 50% de capacidade e potência (220 kWh e 110 kW), na qual se obtiveram poupanças de 4,93% na fatura energética. Desta forma, verifica-se o benefício destas soluções de menor capacidade face àquela estudada ao longo do 2º Cenário, sendo que se obtêm poupanças inferiores às estudadas em apenas 0,19% e 0,42%, para 75% e 50% da capacidade instalada, respetivamente, com um investimento em armazenamento muito inferior.

5.4. Impacto da previsão das tarifas

Como mencionado anteriormente, as tarifas da comunidade para um determinado dia utilizadas nas simulações tratam-se de previsões baseadas no dia anterior a este. Assim, é importante avaliar as diferenças entre a gestão das baterias quando o funcionamento destas é determinado com base em tarifas previstas e quando é determinado tendo como base as tarifas que resultariam dos dados reais desse dia. Para tal, procedeu-se à simulação para o 1º Cenário, escolhido devido à maior quantidade de dados, tendo em conta as tarifas da comunidade previstas e as tarifas reais.

A Figura 34 apresenta um dos casos em que existem maiores discrepâncias entre a gestão das baterias com base em previsões e com base em tarifas reais (edifício 3, no domingo, 1º Cenário), sendo estas mais observadas nos dias de fim de semana. Observam-se discrepâncias, ainda que algumas mínimas, em todos os casos, ou seja, em todos os edifícios para todos os dias. Foi observado um erro médio igual a 7,72%, sendo que 50% dos casos têm um erro inferior a 6,31% e que 75% dos casos possuem um erro inferior a 9,78%. O maior erro observado é de 21,12%. É importante afirmar que os casos que possuem maior erro são os dias de fim de semana, devido às maiores flutuações na procura durante o fim de semana.

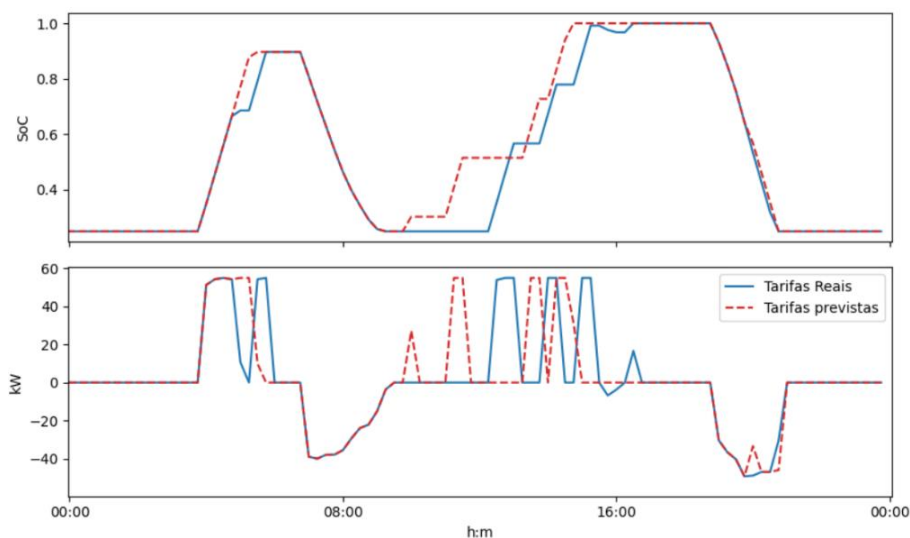


Figura 34 - Comportamento da bateria no edifício 3 (SoC e potência de carga/descarga), com base em tarifas da comunidade reais e tarifas previstas, domingo

Conclui-se que o uso das tarifas previstas para determinar o comportamento da bateria para um dia específico é, em regra geral, uma boa aproximação à gestão que estas teriam se as tarifas tidas em conta fossem as tarifas calculadas em tempo real.

Capítulo 6 – Conclusões e Trabalho Futuro

6.1. Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo principal o desenvolvimento e implementação de um algoritmo para a gestão de baterias numa comunidade de energia. Para tal, foi primeiro feito o estudo de dois cenários de armazenamento de energia numa comunidade, sendo estes o descentralizado e o centralizado. No descentralizado cada habitação possui uma bateria e é comparado o comportamento destas com uma gestão individual e uma gestão comunitária. No centralizado existe apenas uma bateria, a nível centralizado, sendo o uso desta partilhado pelos edifícios constituintes da comunidade, ou seja, sendo feita uma gestão comunitária. Como referência, foi utilizado o caso base, sendo este o caso em que nenhum edifício possui armazenamento e no qual os edifícios não pertencem a uma comunidade, tendo apenas trocas de energia com a rede. Para permitir fazer estas comparações, implementou-se em *Python* um algoritmo para simular os diferentes casos, sendo utilizada uma estratégia de minimização dos custos, tendo como dados de entrada a capacidade e potência das baterias, o estado de carga inicial e o tempo de vida das mesmas, os dados de geração e consumo de cada edifício e as tarifas de compra e venda de energia, tanto da rede como da comunidade. É importante salientar que foram considerados diversos fatores inovadores no estudo destas comunidades, tal como a influência da potência contratada nos custos dos edifícios, o impacto da degradação das baterias e o mercado de energia ao nível da comunidade, sendo este dependente da disponibilidade de renováveis.

Inicialmente, foi introduzido teoricamente o armazenamento de energia e o conceito de *community storage*, sendo apresentados diferentes estudos mostrando as vantagens do armazenamento comunitário face ao armazenamento individual, sendo algumas destas a menor necessidade de trocas de energia com a rede, a melhor capacidade necessária para ajuste local entre a oferta e o consumo, a economia de escala, etc. O armazenamento de energia permite ainda uma redução do consumo de energia da rede nas horas de ponta, levando a poupanças nos custos de compra de energia da rede.

De seguida procedeu-se à escolha dos objetivos e concluiu-se que o objetivo mais abrangente e pertinente seria a minimização dos custos totais ao nível da comunidade, envolvendo este a soma do custo de energia, do custo de degradação da bateria e do custo da potência contratada em cada edifício. Posteriormente, foram definidas as restrições a ter na formulação, nomeadamente as relacionadas com os custos de energia e fluxos de potência da comunidade, custo de energia e de potência contratada de cada edifício, armazenamento de energia e degradação das baterias.

Seguiu-se a implementação do algoritmo, em *Python*, tendo por base o objetivo e as restrições definidas. Foram depois introduzidas as características necessárias para os diferentes cenários e respetivos casos, ou seja, para o 1º Cenário onde existe armazenamento em cada um dos diferentes edifícios, sendo este dividido em três casos, o caso com gestão individual, o caso com gestão comunitária e o caso base, para comparação, e para o 2º Cenário, onde existe armazenamento centralizado sendo feita uma gestão comunitária deste. Após a implementação deste algoritmo, foi simulado então cada um destes cenários, considerando os dados provenientes de 4 edifícios, ao longo de uma semana.

Em primeiro lugar foi feita a comparação entre o caso base, ou seja, o caso em que os edifícios não possuem armazenamento nem pertencem a uma comunidade, com o caso individual, em que cada edifício possui uma bateria de 110 kWh com uma potência de carga/descarga de 55 kW (correspondendo ao 1º Cenário) e onde é feita uma gestão individual desta, não existindo partilha de energia entre edifícios. Foi depois feita a comparação com o caso comunitário, em que os edifícios possuem as mesmas características de armazenamento mencionadas no caso individual, mas onde é feita uma gestão comunitária, permitindo aos edifícios trocarem energia entre si. Registou-se que houve uma redução no custo de importação de energia da rede de 7,12% e 17,30%, para o caso individual e comunitário, respetivamente, quando em comparação com o caso base, aliado com uma redução na exportação de energia para a rede de 25,94% e 69,34%, respetivamente. Observou-se ainda uma diminuição dos custos de energia nos quatro edifícios, tanto para uma gestão individual, como para uma gestão comunitária, sendo esta diminuição de 6,46% e de 9,88%, respetivamente, considerando a soma dos custos da totalidade dos edifícios.

Foi feita novamente a simulação, mas desta vez foi permitido que as baterias atinjam um SoC mínimo igual a 0,1, afetando desta forma o tempo de vida da bateria, devido à degradação da bateria imposta pela DoD. Desta simulação concluiu-se que esta maior capacidade disponível tem impactos pouco significativos nas poupanças, tanto para o caso individual como para o caso comunitário. No entanto, estas poderão compensar para os edifícios 3 e 4 com gestão individual, sendo que estes edifícios obtêm uma poupança superior em 1,10% e 1,03% com esta alteração, respetivamente. Para o caso comunitário é obtida uma poupança superior em 0,63%, sendo este um valor quase residual, pelo que se conclui que não há vantagens em ter um SoC mínimo inferior a 0,25.

De seguida, foi feita a comparação entre o caso base e o caso comunitário, onde existe uma bateria a nível centralizado, partilhada por todos os edifícios, correspondente ao 2º Cenário. Esta bateria possui uma capacidade de 440 kWh e uma potência de carga/descarga de 220 kW, sendo estas características o resultado da agregação das baterias o 1º Cenário. Neste caso registou-se uma redução no custo de importação de energia da rede de 14,71%, para o caso comunitário, quando em comparação com o caso base, e uma redução da energia injetada na rede de 69,94%. Registou-se também uma diminuição nos custos de energia de 5,35%, considerando o conjunto dos quatro edifícios. Foi novamente simulado o efeito da DoD na degradação da bateria, sendo permitido que a bateria atinja um SoC mínimo igual a 0,1. Registou-se um aumento nas poupanças obtidas, sendo este igual a 0,09%, demonstrando novamente que esta alteração poderá não compensar face à perda de tempo de vida. Foi ainda concluído que a potência contratada não sofre alterações quando a bateria se encontra centralizada e não em cada edifício.

Para avaliar o impacto da economia de escala foram avaliados os casos em que a bateria tem uma capacidade e potência inferior em 25% e 50% à utilizada inicialmente, que teria como principal consequência uma redução quase proporcional do custo de aquisição do sistema de armazenamento. Com estes sistemas foram registadas diminuições nos custos de energia de 5,16% e 4,93%, respetivamente, uma poupança inferior àquela obtida originalmente no 2º cenário em apenas 0,19% e 0,42%, comprovando o benefício associado à redução da capacidade instalada no caso da bateria comunitária devido aos menores custos para os utilizadores.

Em conclusão, pode-se afirmar que, com a gestão implementada pelo algoritmo, a integração de armazenamento tanto ao nível descentralizado, com gestão individual ou comunitária, como a nível centralizado, com gestão comunitária, tem vantagens técnicas e económicas. No entanto, comprova-se que a opção de armazenamento comunitário é a solução mais vantajosa quando comparada com a gestão individual dos sistemas de armazenamento, trazendo esta mais vantagens económicas. Deve-se destacar que a obtenção de poupanças com armazenamento comunitário e a implementação do mercado na comunidade de energia eram os objetivos principais do algoritmo desenvolvido. Conclui-se ainda que dentro das opções de gestão comunitária, as comunidades com armazenamento descentralizado apresentam poupanças superiores, no entanto, as baterias sofrem uma diminuição do tempo de vida útil. Contudo, é importante ter em consideração que os resultados obtidos e as respetivas conclusões retiradas poderão diferir para outros casos, pois são apenas avaliados edifícios inspirados em dados de um único edifício real, podendo então existir discrepâncias para diferentes comunidades, com dados de edifícios distintos e com localizações diferentes.

6.2. Trabalho Futuro

Para possíveis trabalhos futuros propõe-se a continuação do estudo do conceito de *community storage*, mas com recurso a dados de edifícios com funções distintas, permitindo assim o estudo de comunidades com dados mais diversificados e, conseqüentemente, mais realistas. Nesses cenários os edifícios devem ter diferentes capacidades instaladas de fotovoltaico, e conseqüentemente diferentes níveis de geração, e ainda baterias de diferentes capacidades. Seria ainda relevante o estudo dos custos de instalação e manutenção dos sistemas e previsão de *payback*, assim como do impacto da gestão assegurada pelo algoritmo no *payback* dos sistemas de baterias.

Além destes estudos possíveis, propõe-se uma melhoria do algoritmo, incluindo modelos mais detalhados para a degradação das baterias e outras estratégias para a gestão das tarifas na comunidade. Além das baterias como opção de flexibilidade, poderiam ser adicionadas opções como Veículos Elétricos ou *Demand Response*. Outro aspeto que poderia obter melhorias seria a previsão das tarifas na comunidade, podendo ser incluídos métodos de *machine learning* para a sua previsão.

Bibliografia

- [1] P. Moura, U. Sriram, J. Mohammadi (2021) Sharing Mobile and Stationary Energy Storage Resources in Transactive Energy Communities. In 11th IEEE PES PowerTech Conference (PowerTech 2021), Virtual Event, 28th June – 2nd July 2021.
- [2] Jäger-Waldau, A., Huld, T., Bódis, K., & Szabo, S. (2018, June). Photovoltaics in Europe after the Paris Agreement. In 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC) (pp. 3835-3837). IEEE.
- [3] S. P. Europe, “Global Market Outlook for Solar Power 2020-2024”, 2020.
- [4] OMIE, “Relatório anual 2019”, OMIE, 2019.
- [5] Joni E. C. Rodrigues, “Controlo Coordenado de Armazenamento de Energia em Edifícios Residenciais”, Dissertação, Universidade de Coimbra, 2019.
- [6] F. M. Vieira, P. S. Moura, and A. T. de Almeida, “Energy storage system for self-consumption of photovoltaic energy in residential zero energy buildings”, Elsevier, Renewable Energy 103, 308-320, 2018.
- [7] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraouli, “Energy storage: Applications and challenges”, Elsevier, Solar Energy Materials & Solar Cells 120, 59-80, 2014.
- [8] A. Carnovale, and X. Li, “A modeling and experimental study of capacity fade for lithium-ion batteries”, Elsevier, Energy and AI 2, 100032, 2020.
- [9] Gailani, A., Mokidm, R., & Al-Greer, M. (2020, September). Analysis of Lithium-ion Battery Cells Degradation Based on Different Manufacturers. In 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) (pp. 1-6). IEEE.
- [10] K. Smith, A. Saxon, M. Keyser, and B. Lundstrom, “Life Prediction Model for Grid-Connected Li-ion Battery System” National Renewable Energy Laboratory, 2017.
- [11] PowerTech, Advanced Energy Storage Systems. [Online]. Available: <https://www.powertechsystems.eu/home/applications/energy-storage/self-consumption/>. [Accessed: 01-12-2020].
- [12] “Battery Inverter 500/63/730/1000 | Efacec”. [Online]. Available: <https://www.efacec.pt/en/products/battery-inverter-500-630-730-1000/>. [Accessed: 01-12-2020].
- [13] D. Parra, M. Swierczynski, D. I. Stroe, S. A. Norman, A. Abdon, J. Woelitschek, T. O’Doherty, L. Rodrigues, M. Gillott, X. Zhang, C. Bauer, and M. K. Patel, “An interdisciplinary review of energy storage for communities: Challenges and perspectives”, Renewable and Sustainable Energy Reviews”, vol. 79, 730-749, 2017.
- [14] F. Hafiz, A. R. de Queiroz, P. Fajri, and I. Husain, “Energy management and optimal storage sizing for a shared community: A multi-stage stochastic programming approach”, Applied Energy, vol.236, 42-54, 2019.
- [15] J. Rajasekharan, and V. Koivunen, “Cooperative Game-Theoretic Approach to Load Balancing in Smart Grids with Community Energy Storage”, IEEE, 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2015.
- [16] B. P. Koirala, E. van Oost, and H. van der Windt, “Community energy storage: A responsible innovation towards a sustainable energy system”, Elsevier, Applied Energy, vol.231, 570-585, 2018.
- [17] R. Arghandeh, J. Woyak, A. Onen, J. Jung, and R. P. Broadwater, “Economic optimal operation of Community Energy Storage systems in competitive energy markets”, Elsevier, Applied Energy, vol. 135, 71-80, 2014.
- [18] S. van der Stelt, T. AlSkaif, and W. van Sark, “Techno-economic analysis of household and community energy storage for residential prosumers with smart appliances”, Elsevier, Applied Energy, vol. 209, 266-276, 2018.

- [19] E. Barbour, D. Parra, Z. Awwad, M. C. González, “Community energy storage: A smart choice for the smart grid?”, Elsevier, Applied Energy, vol. 212, 489-497, 2018.
- [20] D. Parra, S. A. Norman, G. S. Walker, and M. Gillott, “Optimum community energy storage for renewable energy and demand load management”, Elsevier, Applied Energy, vol. 200, 358-369, 2017.
- [21] T. AlSkaif, A. C. Luna, M. G. Zapata, J. M. Guerrero, and B. Bellalta, “Reputation-based joint scheduling of households appliances and storage in a microgrid with a shared battery”, Elsevier, Energy and Buildings, vol. 138, 228-239, 2017.
- [22] C. P. Mediwaththe, E. R. Stephens, D. B. Smith, and A. Mahanti, “ A Dynamic Game for Electricity Load Management in Neighborhood Area Networks”, IEEE Transactions on smart grid, vol. 7, no. 3, 2016.
- [23] J. Sardi, N. Mithulananthan, and D. Q. Hung, “Strategic allocation of community energy storage in a residential system with rooftop PV units”, Elsevier, Applied Energy, vol. 206, 159-171, 2017.
- [24] Pezeshki, H., Wolfs, P., & Ledwich, G. (2014, July). A model predictive approach for community battery energy storage system optimization. In 2014 IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition (pp. 1-5). IEEE.
- [25] Huq, K. M. M., Baran, M. E., Lukic, S., & Nare, O. E. (2012, September). An energy management system for a community energy storage system. In 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 2759-2763). IEEE.
- [26] SonnenCommunity, “sonnenCommunity”, sonnen. [Online]. Available: <https://sonnengroup.com/sonnencommunity/>. [Accessed: 13-01-2021].
- [27] Schlund, J., Pflugradt, N., Steber, D., Muntwyler, U., & German, R. (2018, October). Benefits of Virtual Community Energy Storages Compared to Individual Batteries Based on Behaviour Based Synthetic Load Profiles. In 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe) (pp. 1-6). IEEE.
- [28] L. Setyawan, J. Xiao, P. Wang, (2017, October). Optimal Depth-of-Discharge Range and Capacity Settings for Battery Energy Storage in Microgrid Operation. In 2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). IEEE.
- [29] P. Fonseca, P. Moura, H. Jorge, and A. T. de Almeida, “Sustainability in university campus: options for achieving nearly zero energy goals,” IJSHE, vol. 19, no. 4, pp. 790–816, Jan 2018.
- [30] OMIE, Preço horário do mercado diário. [Online]. Available: <https://www.omie.es/pt/market-results/daily/daily-market/daily-hourly-price>. [Accessed: 22-07-2021].
- [31] BloombergNEF, “Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh”. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>. [Accessed: 28-07-2021].
- [32] JET BRAINS, PyCharm. [Online]. Available: <https://www.jetbrains.com/pycharm/>. [Accessed: 28-07-2021].
- [33] GUROBI OPTIMIZATION, Gurobi. [Online]. Available: <https://www.gurobi.com/>. [Accessed: 28-07-2021].

Anexo I

Procura de energia líquida nos 4 Edifícios, para cada dia da semana

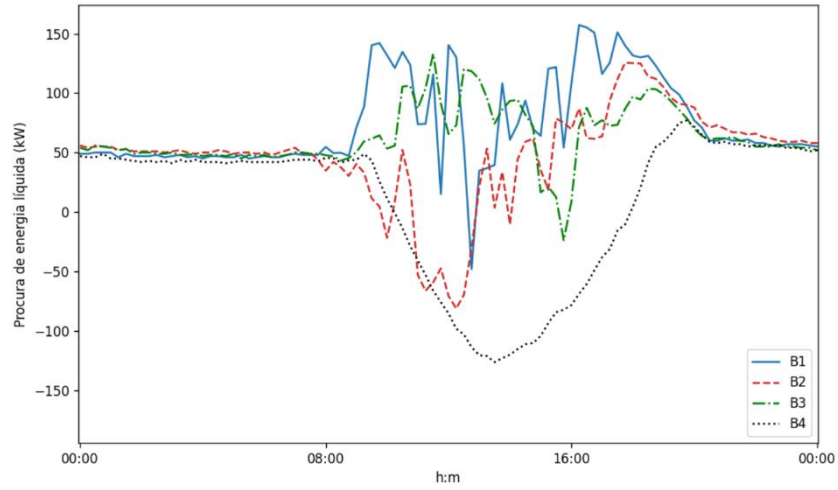


Figura 35 - Carga líquida nos 4 edifícios, segunda-feira

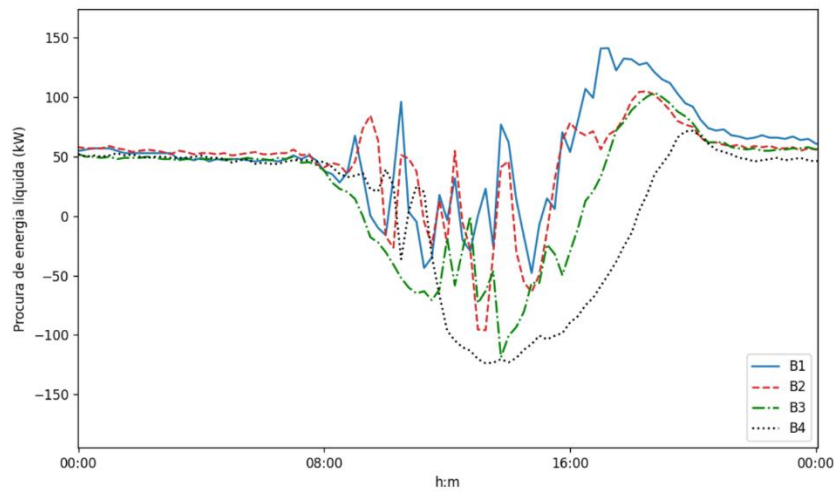


Figura 36 - Carga líquida nos 4 edifícios, terça-feira

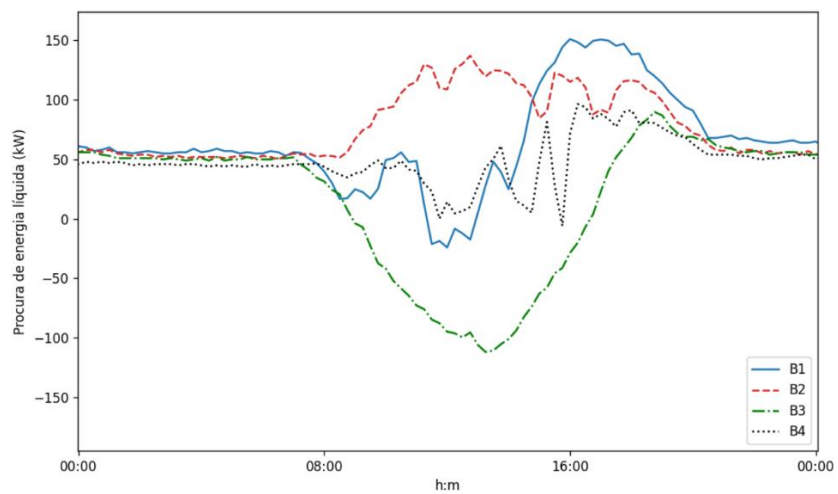


Figura 37 - Carga líquida nos 4 edifícios, quarta-feira

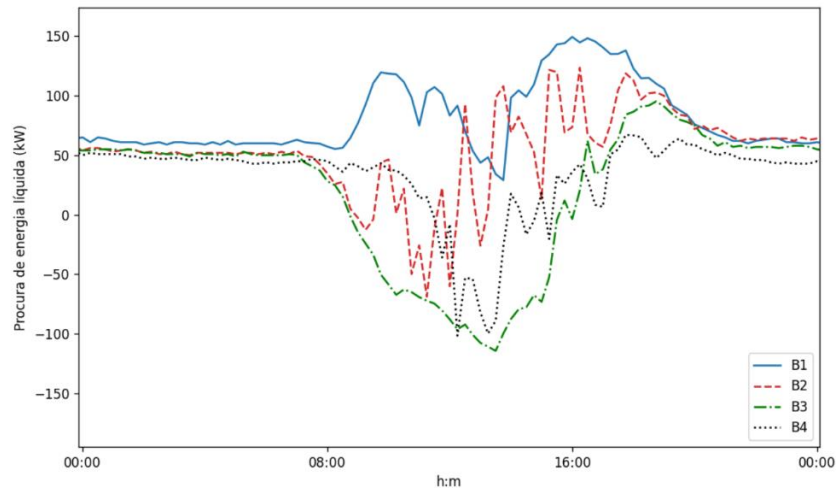


Figura 38 - Carga líquida nos 4 edifícios, quinta-feira

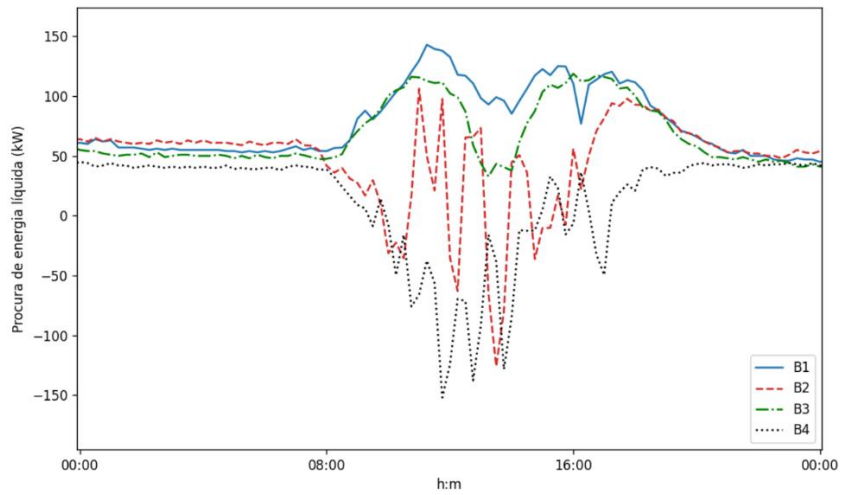


Figura 39 - Carga líquida nos 4 edifícios, sexta-feira

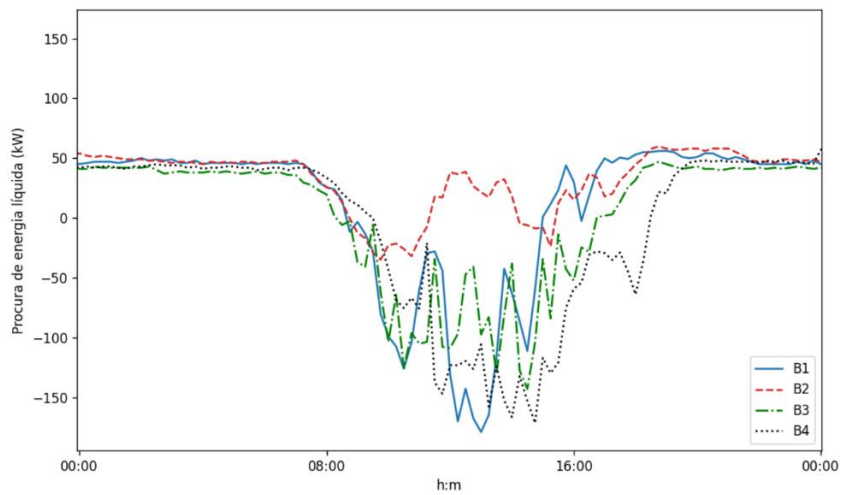


Figura 40 - Carga líquida nos 4 edifícios, sábado

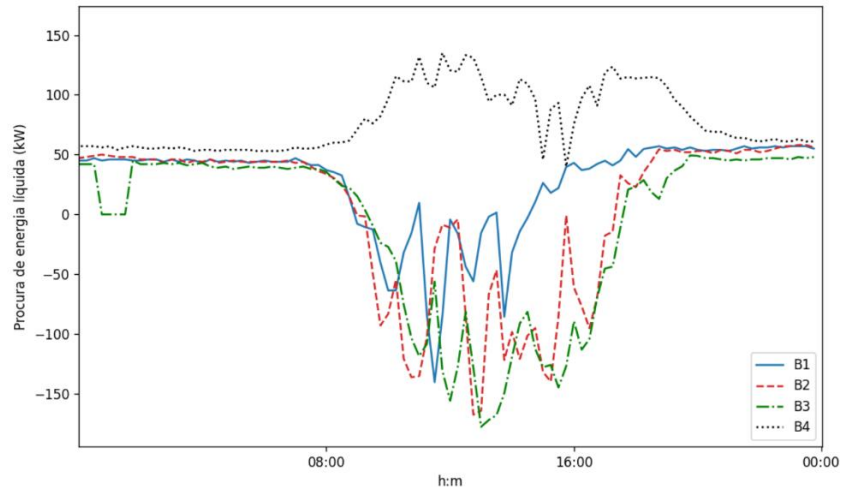


Figura 41 - Carga líquida nos 4 edifícios, domingo

Anexo II

Partes relativas à implementação do algoritmo, em *Python*.

1º Cenário

```
self.PBSpmax = 55 # PBS + max
self.PBSnmax = 55 # PBS - max
self.Cap = 110 # Capacidade total das baterias no edificio b
self.ef = 0.85 # Eficiencia das baterias
self.SOCmin = 0.1 # SoC min
self.SOCmax = 1 # SoC max
self.Csub = 110 * 100 # Custo de substituição da bateria (100€/kWh)
self.Bl = 7300 # Tempo de vida útil (ciclos)
self.Bc = 110 # Capacidade de bateria utilizável (kWh)
self.Cpot = 0.0324 # Custo associado à potência contratada (€/kW)
self.DoDfactor = 1 # DoDfactor = 1 para DoDmax <= 0.75 e DoDfactor = 0.89 para DoDmax <= 0.9
```

Figura 42 - Inicialização de variáveis

```
self.constraints.append(self.Lnet == self.L + self.PBSnet + self.PCp - self.PCn) # eq 16 and 17
self.constraints.append(self.Lnet == self.Lp - self.Ln) # (helper)

##### Constraints time #####

for b in range(B):
    for t in range(1, T):
        self.constraints.append(self.SOCplus[t, b] >= self.SOCmin) # setting SOC lower limit eq. 3.13
        self.constraints.append(self.SOCplus[t, b] <= self.SOCmax) # setting SOC upper limit eq. 3.13
        self.constraints.append(self.SOCplus[0, b] == 0.25)
        self.constraints.append(self.SOC[t, b] == self.SOCplus[t - 1, b]) # stores (h-1) values in SOC
        self.constraints.append(
            self.PBSp[t, b] <= (self.SOCmax - self.SOC[t, b]) * self.Cap / (self.ef * deltaH) # eq. 3.9
        )
        self.constraints.append(
            self.PBSn[t, b] <= (self.SOC[t, b] - self.SOCmin) * self.Cap / deltaH # eq. 3.10
        )
        self.constraints.append(self.PBSp[0, b] == 0)
        self.constraints.append(self.PBSn[0, b] == 0)
        self.constraints.append(self.SOC[t, b] >= self.SOCmin) # setting SOC lower limit eq. 3.13
        self.constraints.append(self.SOC[t, b] <= self.SOCmax) # setting SOC upper limit eq. 3.13
        self.constraints.append(self.SOCplus[t, b] == self.SOC[t, b] + (
            self.PBSp[t, b] * self.ef - self.PBSn[t, b]) * deltaH / self.Cap) # eq 3.11
        self.constraints.append(self.DoD[t, b] == 1 - self.SOCplus[t, b]) # eq. 3.14
        self.constraints.append(
            self.DoD[0, b] == 1 - self.SOCplus[0, b]) # inicializar a DoD para o valor inicial de SOC
```

Figura 43 - Definição de algumas restrições

```

# Resolver numa comunidade considerando as tarifas CIC e CEC previstas
def solve_prob(case, B, I):
    case.CE = cp.Variable((B,))
    case.CP = cp.Variable((B,))
    case.Cbd = cp.Variable((B,))

    CE_constraint = []
    CP_constraint = []
    Cbd_constraint = []
    for b in range(B):
        CE_constraint.append(
            case.CE[b] == deltaH *
            (case.PCp[:, b] * case.CEC + case.PCn[:, b] * case.CIC +
            (case.Lp[:, b]) * case.CIG +
            (case.Ln[:, b]) * case.CE6) # eq. 3.2

    for b in range(B):
        CP_constraint.append(
            case.CP[b] == case.CPb[b] * case.Cpot * case.ndias

    for b in range(B):
        Cbd_constraint.append(
            case.Cbd[b] == sum(case.PBSn[:, b]) * ((case.Csub / (case.DoDfactor * case.Bl * case.Bc)) * deltaH)

    case.obj = cp.Minimize(sum(case.CE + case.CP + case.Cbd)) # eq 3.1
    case.prob = cp.Problem(case.obj, case.constraints + CE_constraint + CP_constraint + Cbd_constraint)

    case.prob.solve(solver="GUROBI", verbose=False)
    print(case.prob.status)

    return case

```

Figura 44 - Função de resolução do problema para o caso comunitário

```

def solve_individual(case, b, B, I):
    case.CE = cp.Variable()
    case.CP = cp.Variable()
    case.Cbd = cp.Variable()

    CE_constraint = case.CE == deltaH * ((case.Lp[:, b]) * case.CIG + (case.Ln[:, b]) * case.CE6) # (2)

    CP_constraint = case.CP == case.CPb[b] * case.Cpot * case.ndias

    Cbd_constraint = case.Cbd == deltaH * sum(case.PBSn[:, b]) * (case.Csub / (case.DoDfactor * case.Bl * case.Bc))

    case.obj = cp.Minimize(case.CE + case.CP + case.Cbd) # (result)
    case.prob = cp.Problem(
        case.obj, case.constraints +
        [case.PCp == 0, case.PCn == 0, CE_constraint, CP_constraint, Cbd_constraint]) #
    case.prob.solve(solver="GUROBI", verbose=False)

    print(case.prob.status)
    return case

```

Figura 45 - Função de resolução do problema para o caso individual

2º Cenário

```
self.PBSpmax = 220 # PBS + max
self.PBSnmax = 220 # PBS - max
self.Cap = 440 # Capacidade total da bateria
self.ef = 0.85 # Eficiência das baterias
self.SOCmin = 0.1 # SoC min
self.SOCmax = 1 # SoC max
self.Csub = 440 * 100 # Custo de substituição da bateria (100 €/kWh)
self.Bl = 7300 # Tempo de vida útil (ciclos)
self.Bc = 440 # Capacidade de bateria utilizável (kWh)
self.Cpot = 0.0324 # Custo associado à potência contratada (€/kW)
self.DoDfactor = 1 # DoDfactor = 1 para DoDmax <= 0.75 e DoDfactor = 0.89 para DoDmax = 0.9
```

Figura 46 - Inicialização de variáveis

```
self.constraints.append(self.PBSp[0, B - 1] == 0)
self.constraints.append(self.PBSn[0, B - 1] == 0)

for t in range(1, T):
    b = B - 1
    self.constraints.append(self.PCp[t, b] == self.PBSn[t, b])
    self.constraints.append(self.PCn[t, b] == self.PBSp[t, b])
    self.constraints.append(self.SOCplus[t, b] >= self.SOCmin) # setting SOC lower limit eq. 3.13
    self.constraints.append(self.SOCplus[t, b] <= self.SOCmax) # setting SOC upper limit eq. 3.13
    self.constraints.append(self.SOCplus[0, b] == 0.25)
    self.constraints.append(self.SOC[t, b] == self.SOCplus[t - 1, b]) # stores (h-1) values in SOC
    self.constraints.append(
        self.PBSp[t, b] <= (self.SOCmax - self.SOC[t, b]) * self.Cap / (self.ef * deltaH)) # eq. 3.9
    self.constraints.append(
        self.PBSn[t, b] <= (self.SOC[t, b] - self.SOCmin) * self.Cap / deltaH) # eq. 3.10
    self.constraints.append(self.SOC[t, b] >= self.SOCmin) # setting SOC lower limit eq. 3.13
    self.constraints.append(self.SOC[t, b] <= self.SOCmax) # setting SOC upper limit eq. 3.13
    self.constraints.append(self.SOCplus[t, b] == self.SOC[t, b] + (
        self.PBSp[t, b] * self.ef - self.PBSn[t, b]) * deltaH / self.Cap) # eq 3.11
    self.constraints.append(self.DoD[t, b] == 1 - self.SOCplus[t, b]) # eq. 3.14
    self.constraints.append(
        self.DoD[0, b] == 1 - self.SOCplus[0, b]) # inicializar a DoD para o valor inicial de SOC
```

Figura 47 - Definição de algumas restrições

```

# Resolver numa comunidade considerando as tarifas CIC e CEC previstas
def solve_prob(case, B, T):
    case.CE = cp.Variable((B,))
    case.CP = cp.Variable((B,))
    case.Cbd = cp.Variable((B,))

    CE_constraint = []
    CP_constraint = []
    Cbd_constraint = []
    for b in range(B - 1):
        # Edifícios
        CE_constraint.append(
            case.CE[b] == deltaH *
            (case.PCp[:, b] * case.CEC + case.PCn[:, b] * case.CIC +
            (case.Lp[:, b]) * case.CIG +
            (case.Ln[:, b]) * case.CEG) # eq. 3.2
        )
    # Bateria
    CE_constraint.append(
        case.CE[B - 1] == deltaH *
        (case.PCp[:, B - 1] * 0 + case.PCn[:, B - 1] * 0 +
        (case.Lp[:, B - 1]) * case.CIG +
        (case.Ln[:, B - 1]) * case.CEG
        # (case.Ln[:, B - 1]) * (case.CEG * (-10))
        )
    )
    for b in range(B):
        CP_constraint.append(
            case.CP[b] == case.CPb[b] * case.Cpot * case.ndias
        )
    for b in range(B):
        Cbd_constraint.append(
            case.Cbd[b] == sum(case.PBSn[:, b] * deltaH * (case.Csub / (case.DoDfactor * case.Bl * case.Bc)))
        )

    case.obj = cp.Minimize(sum(case.CE + case.CP + case.Cbd)) # eq 3.1
    case.prob = cp.Problem(case.obj, case.constraints + CE_constraint + CP_constraint + Cbd_constraint)

    case.prob.solve(solver="GUROBI", verbose=False)
    print(case.prob.status)

```

Figura 48 - Função de resolução do problema para o caso comunitário

Anexo III

Tarifas na comunidade

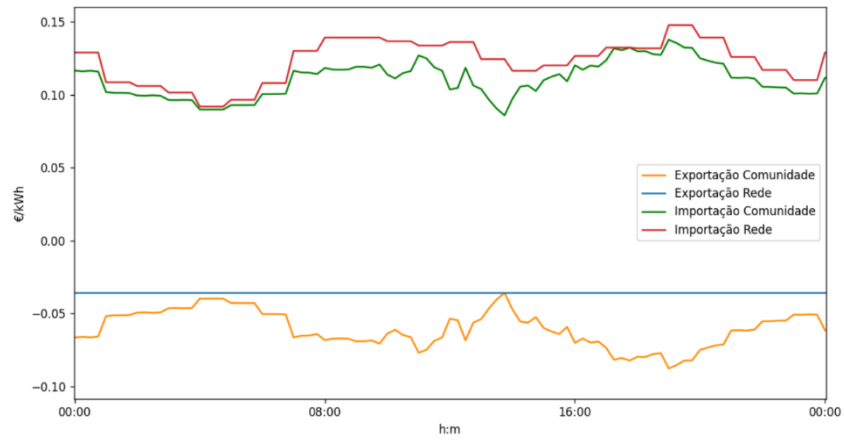


Figura 49 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na segunda-feira

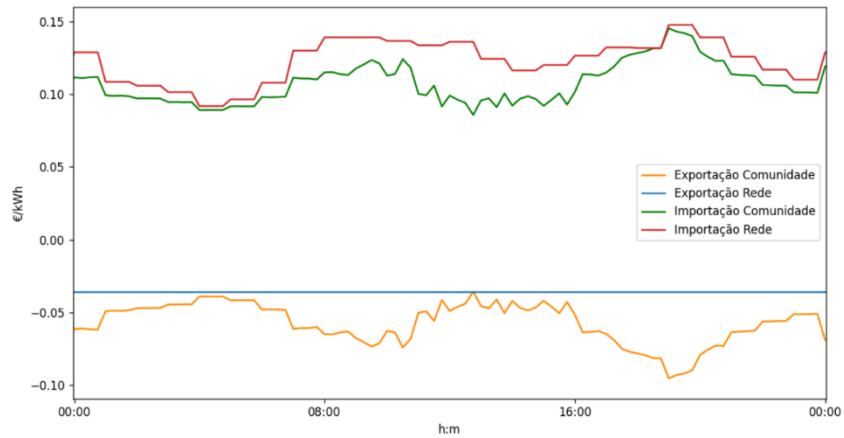


Figura 50 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na terça-feira

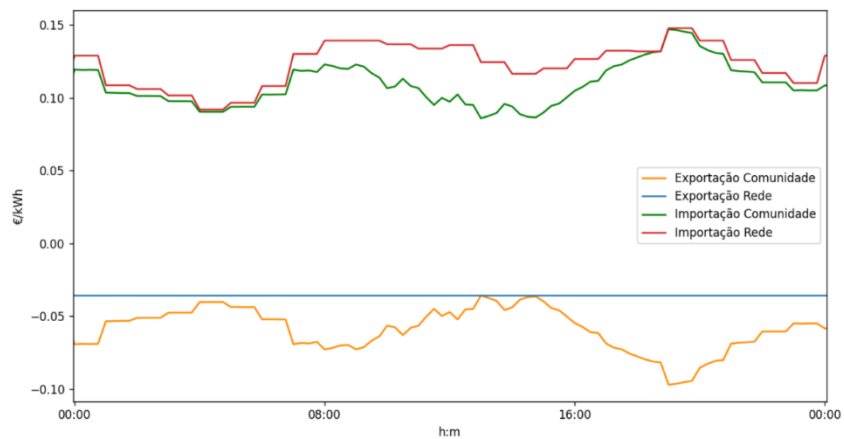


Figura 51 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na quarta-feira

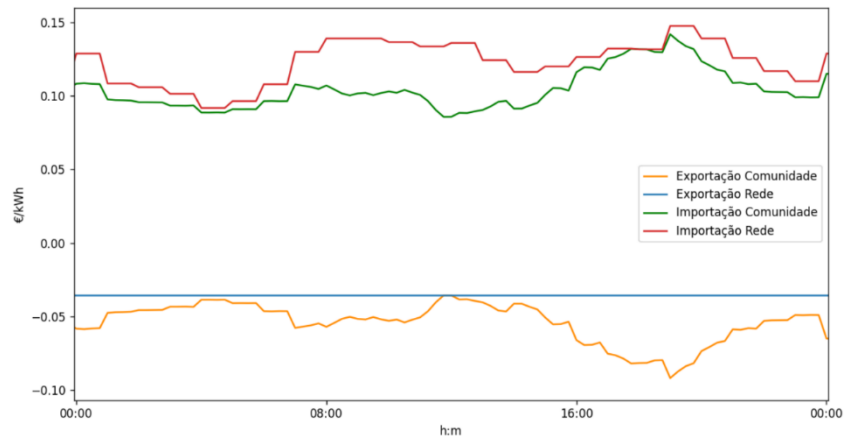


Figura 52 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na quinta-feira

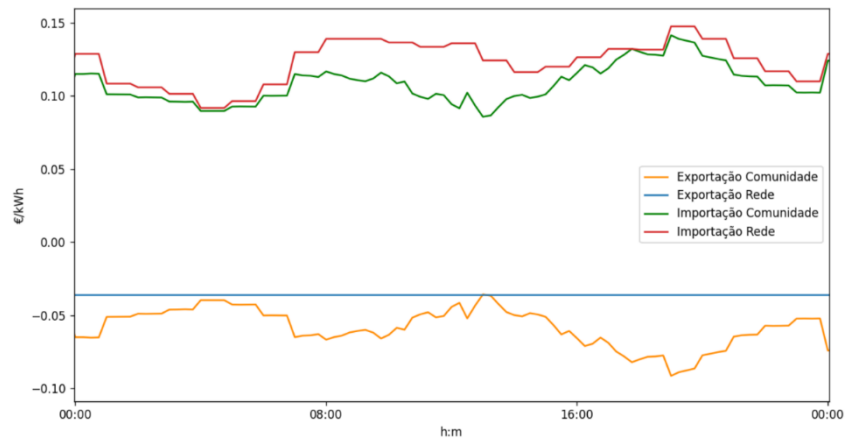


Figura 53 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, na sexta-feira

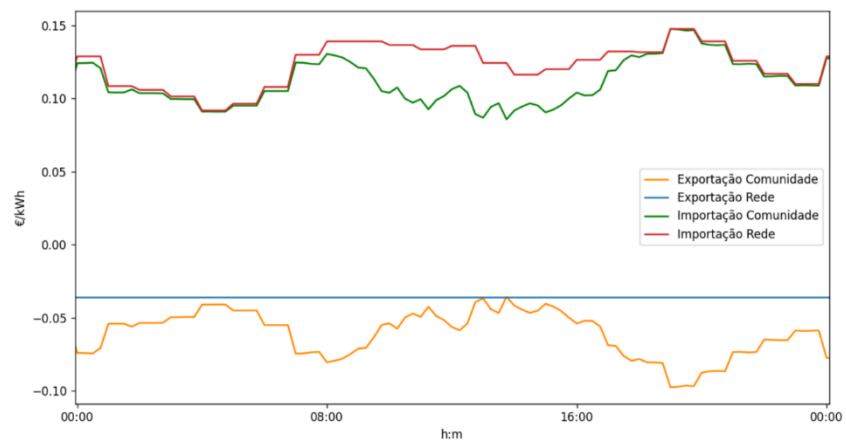


Figura 54 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, no sábado

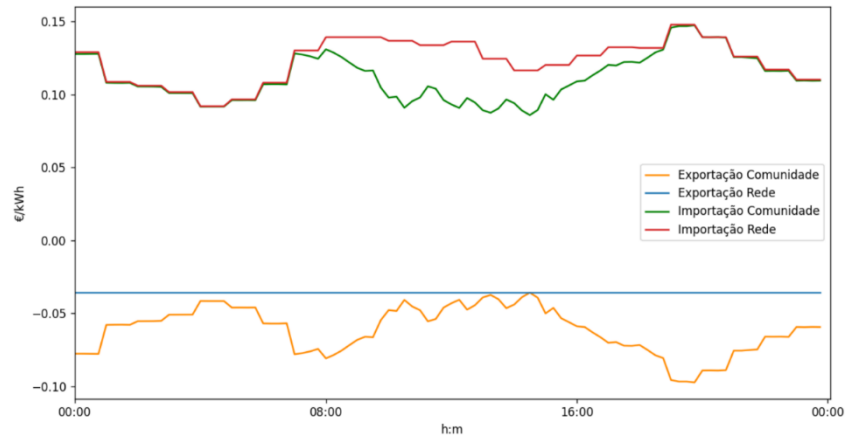


Figura 55 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia para a rede vs. comunidade, no domingo

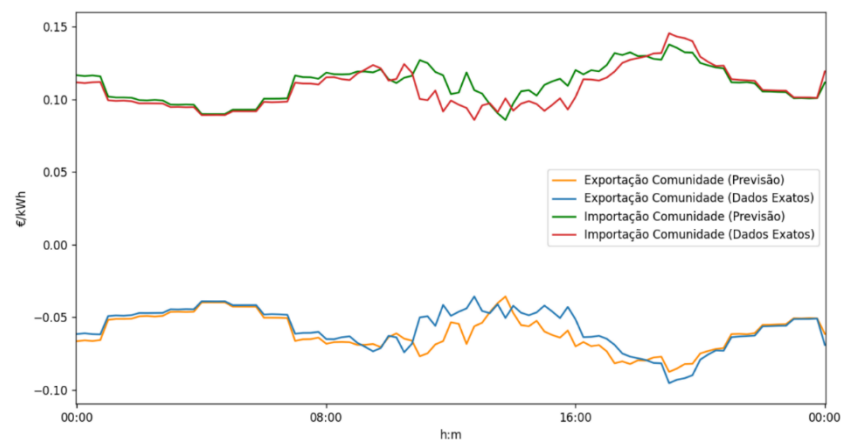


Figura 56 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na segunda-feira

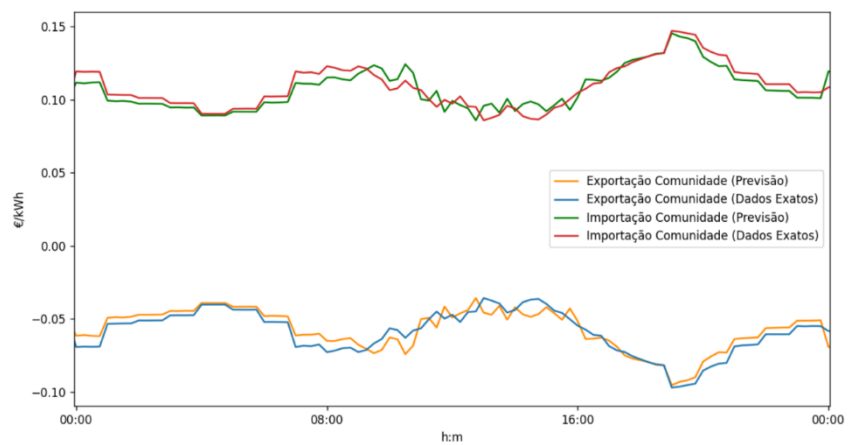


Figura 57 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na terça-feira

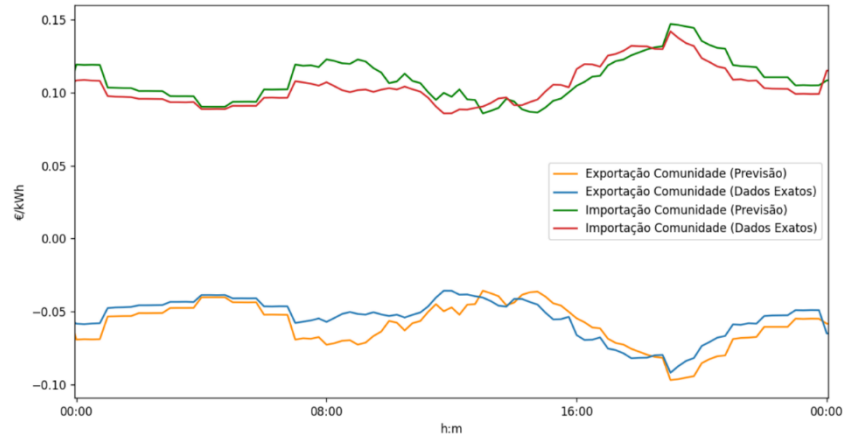


Figura 58 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na quarta-feira

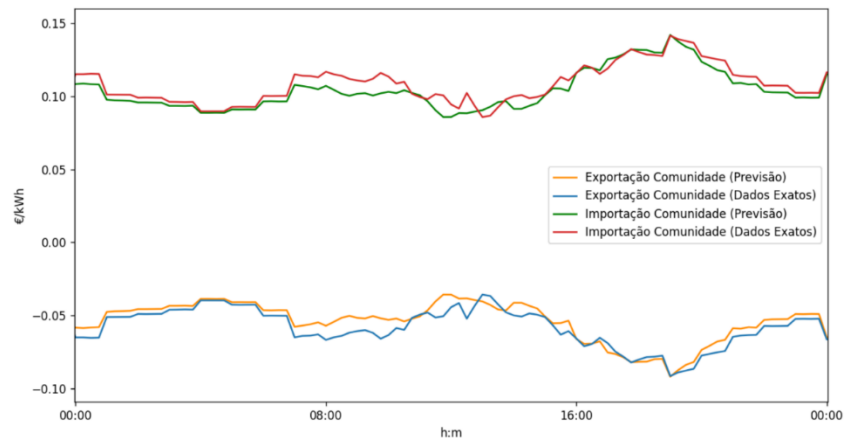


Figura 59 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na quinta-feira

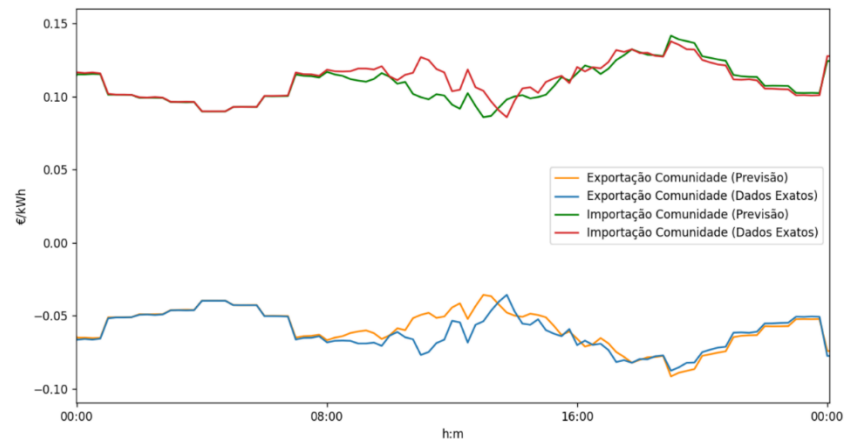


Figura 60 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, na sexta-feira

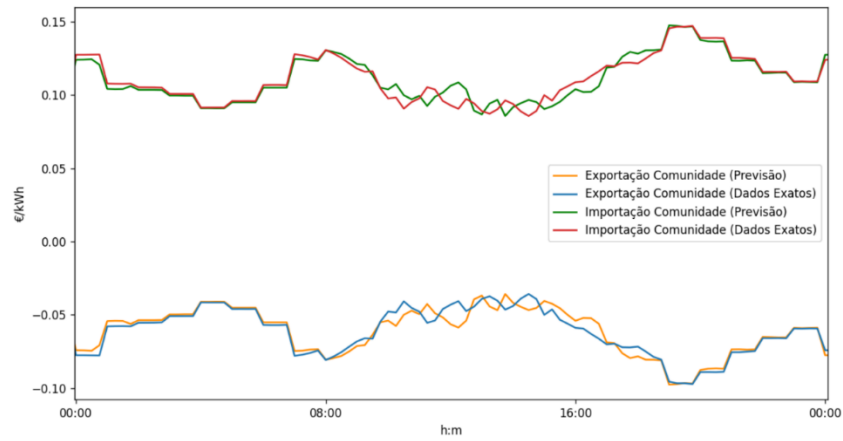


Figura 61 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, no sábado

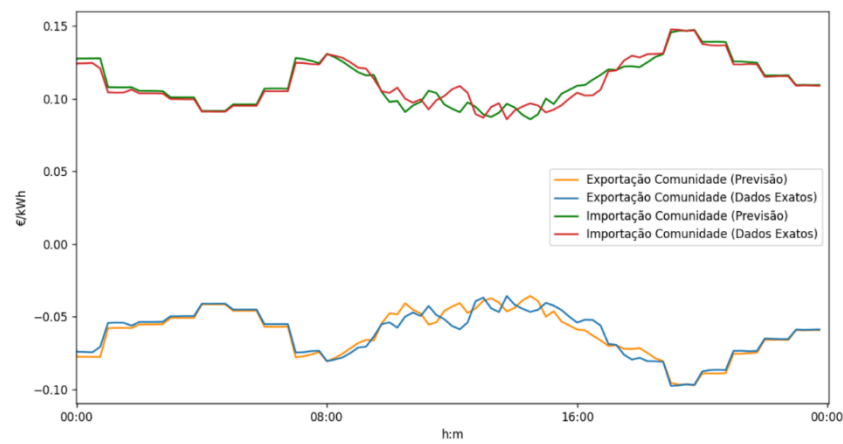


Figura 62 - Comparação entre as tarifas de importação/exportação de energia na comunidade previstas vs. reais, no domingo

Anexo IV

Resultados 1º Cenário

Procura de energia líquida nos diferentes edifícios, com caso Base, Individual e Comunidade, comportamento das baterias (com DoD máximo igual a 0,75) e trocas de energia entre a comunidade

Segunda-feira:

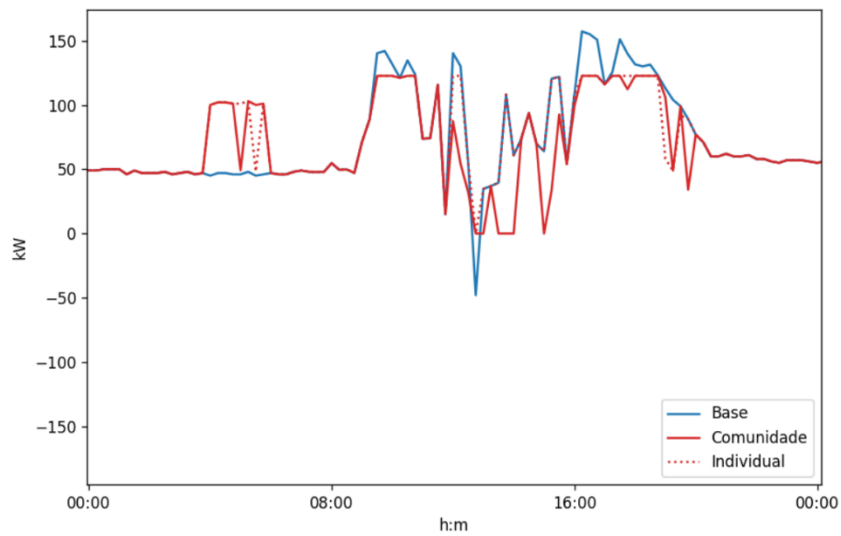


Figura 63 - Procura de energia líquida no Edifício 1, segunda-feira

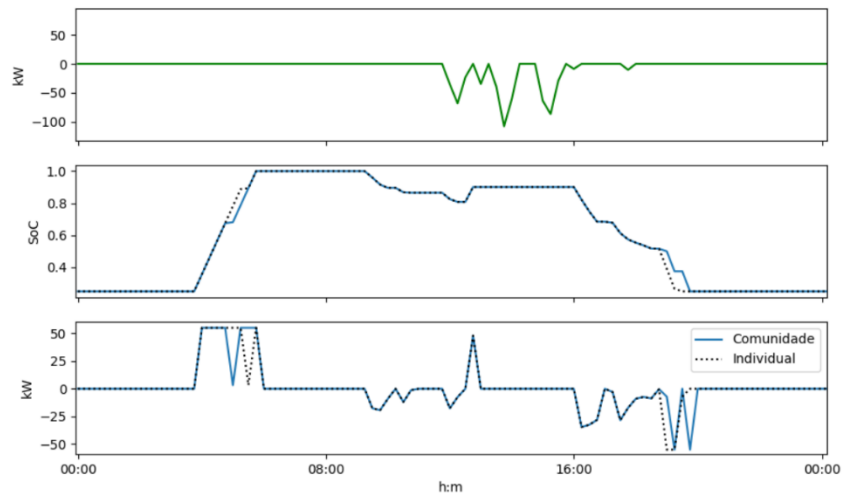


Figura 64 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira

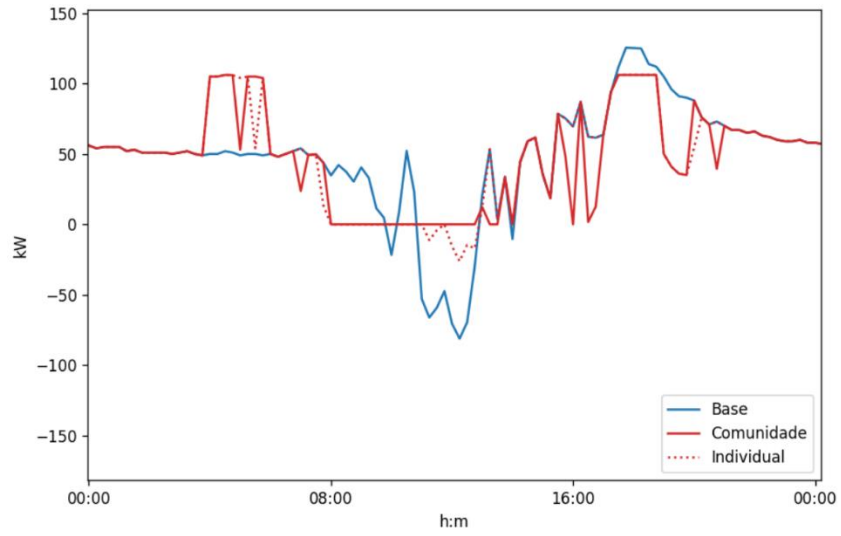


Figura 65 - Procura de energia líquida no Edifício 2, segunda-feira

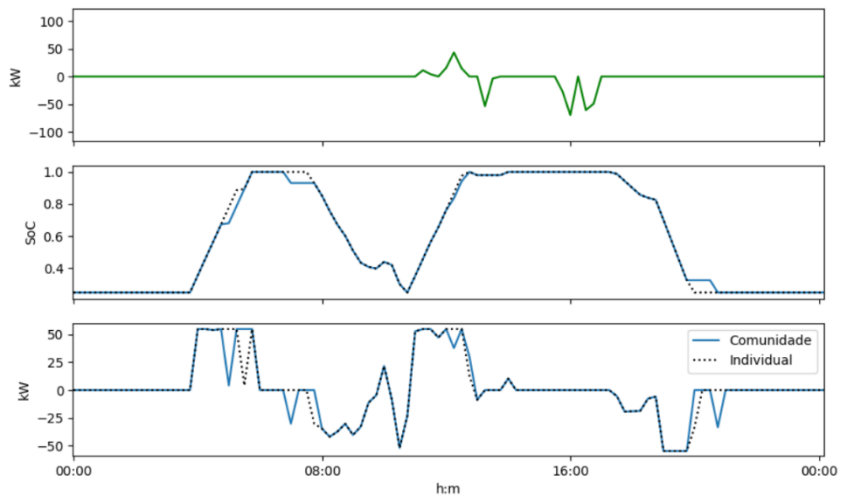


Figura 66 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira

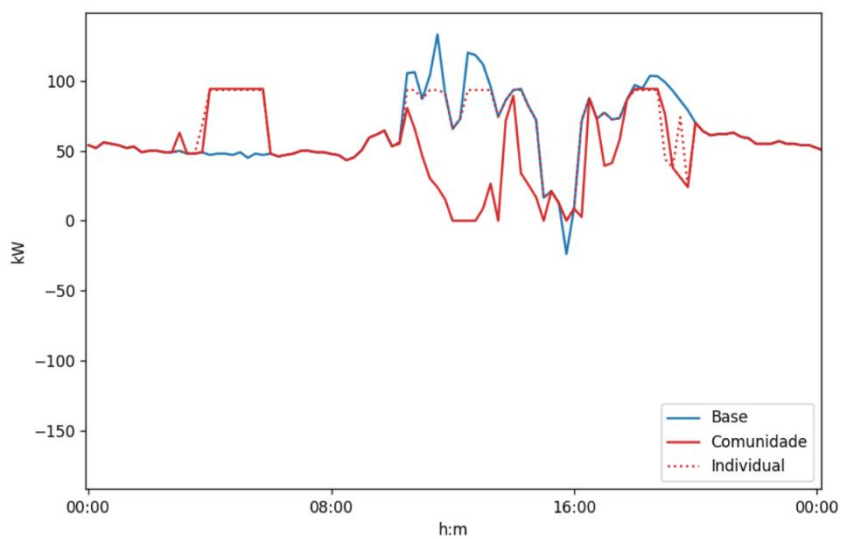


Figura 67 - Procura de energia líquida no Edifício 3, segunda-feira

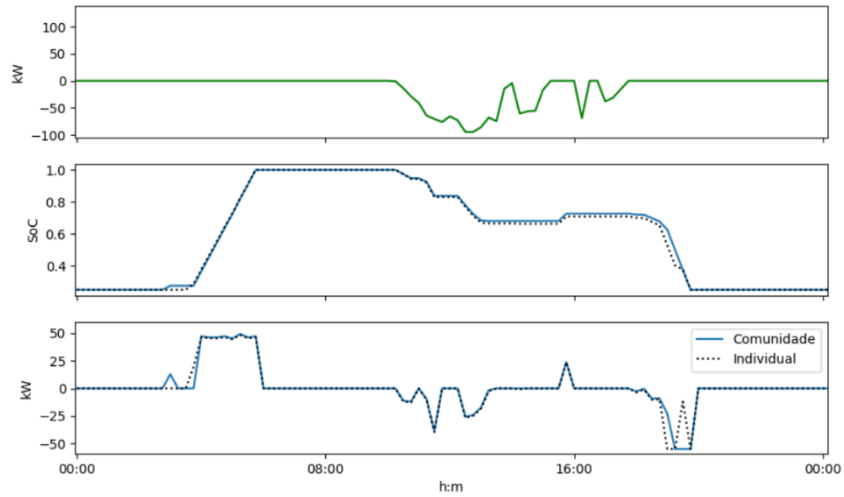


Figura 68 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira

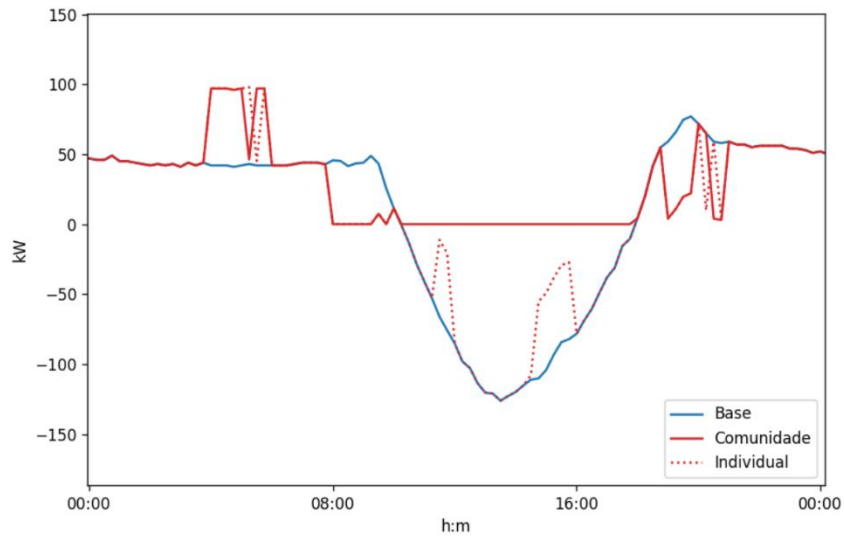


Figura 69 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira

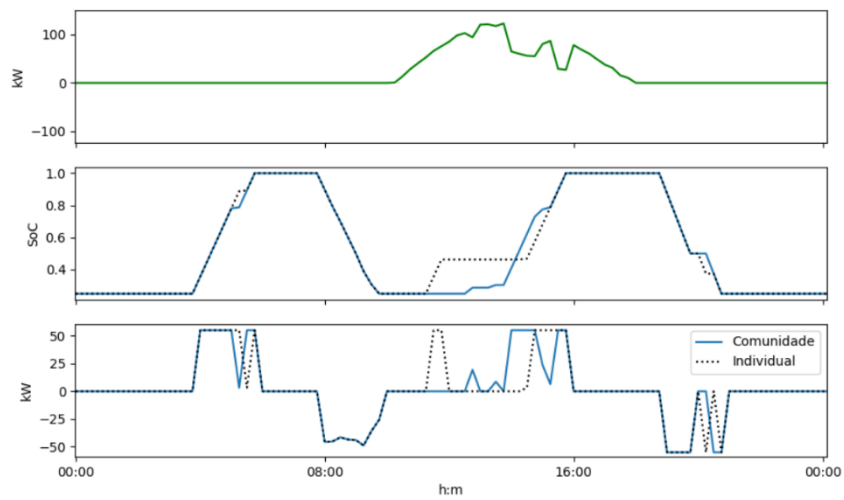


Figura 70 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, segunda-feira

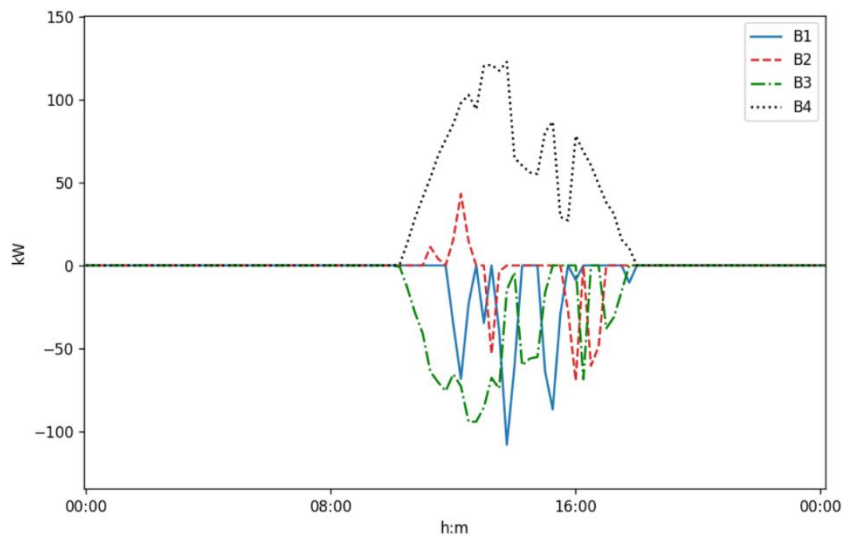


Figura 71 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, segunda-feira

Terça-feira:

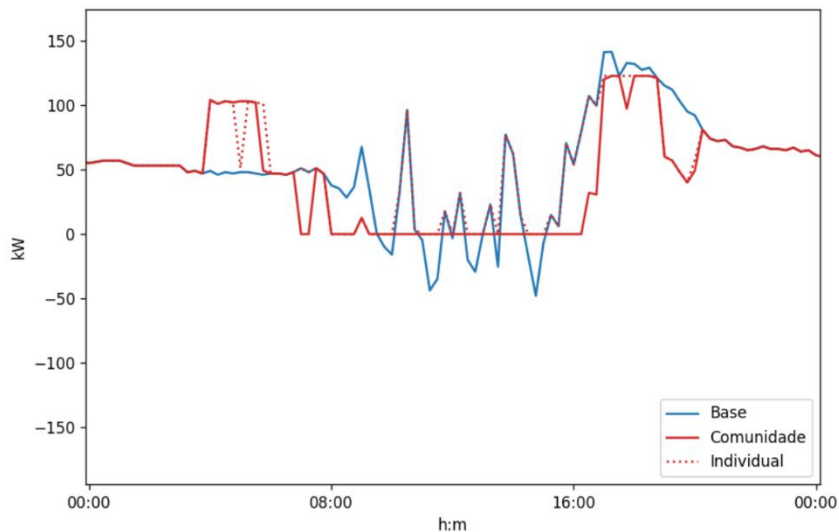


Figura 72 - Procura de energia líquida no Edifício 1, terça-feira

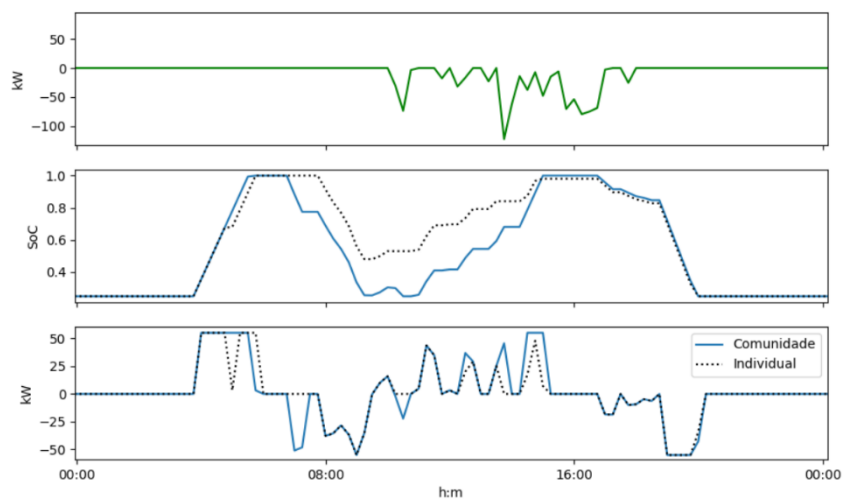


Figura 73 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira

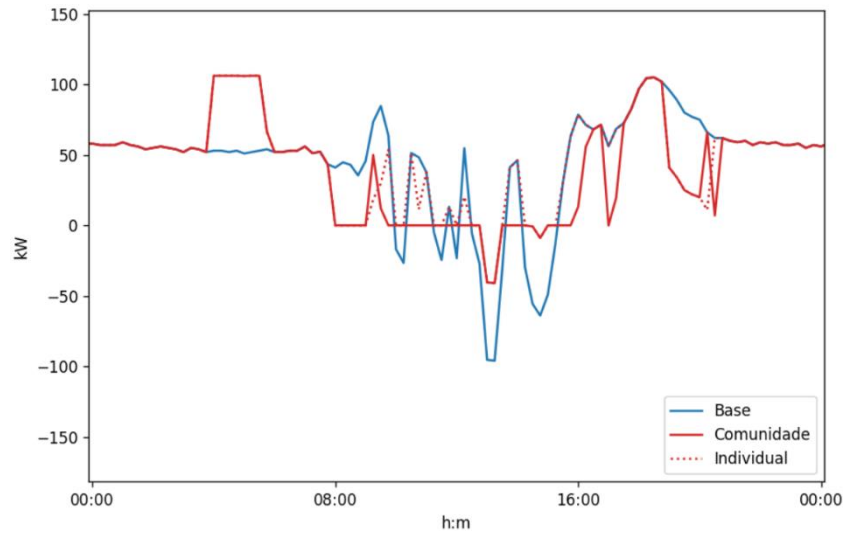


Figura 74 - Procura de energia líquida no Edifício 2, terça-feira

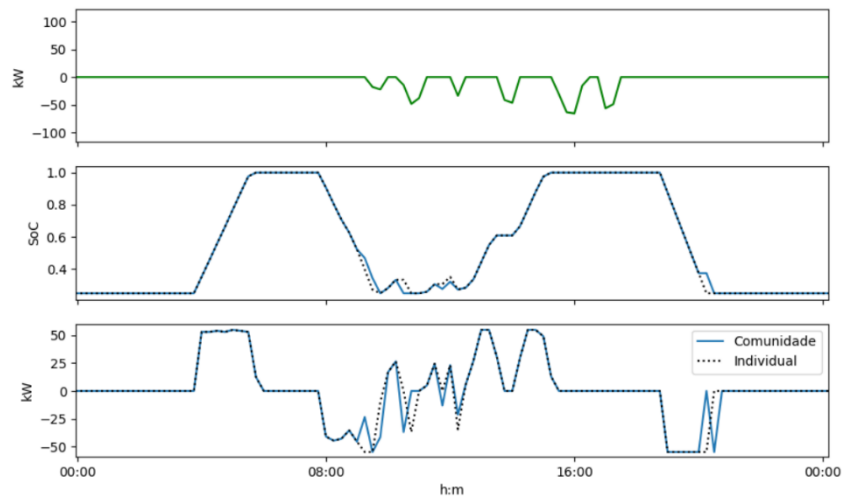


Figura 75 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira

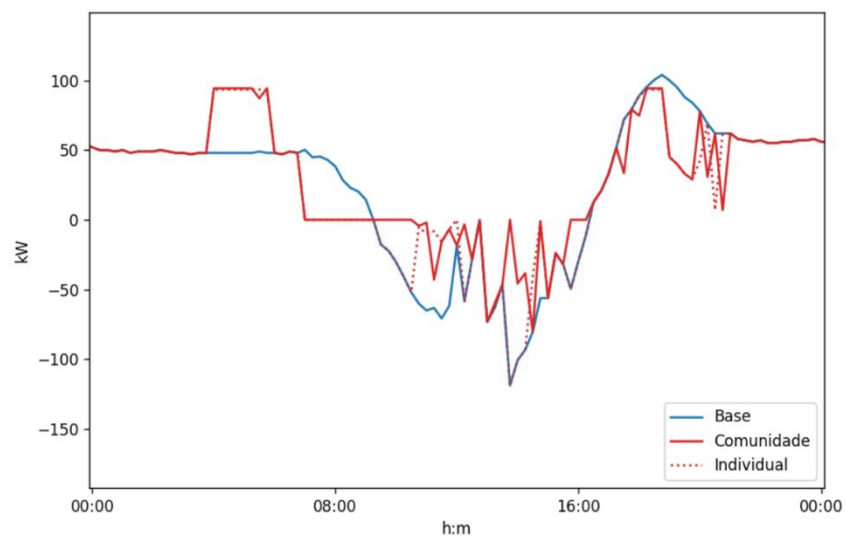


Figura 76 - Procura de energia líquida no Edifício 3, terça-feira

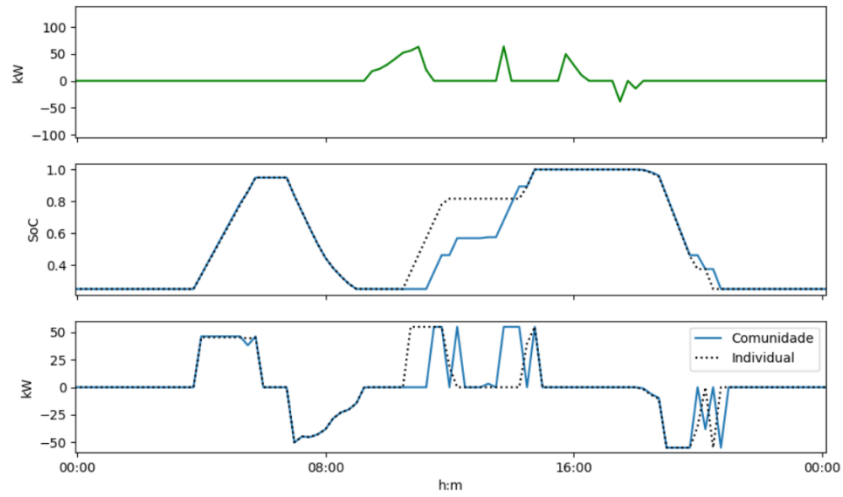


Figura 77 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira

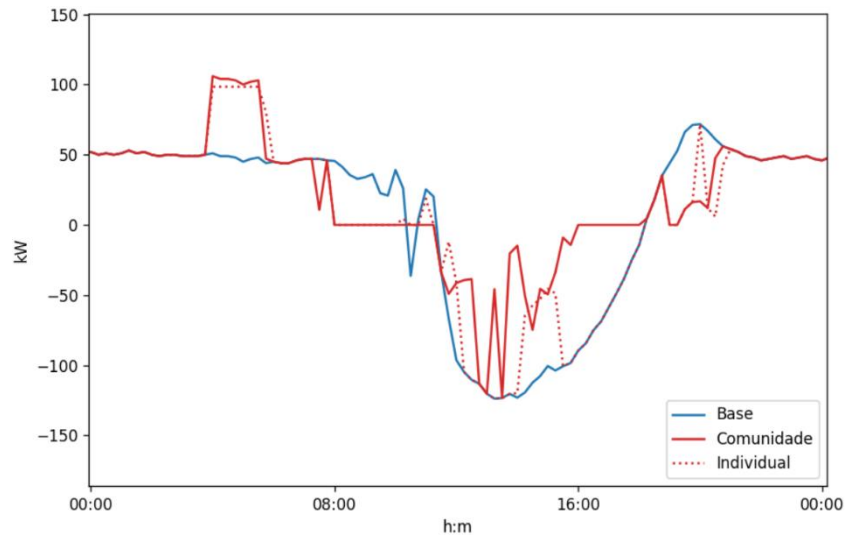


Figura 78 - Procura de energia líquida no Edifício 4, terça-feira

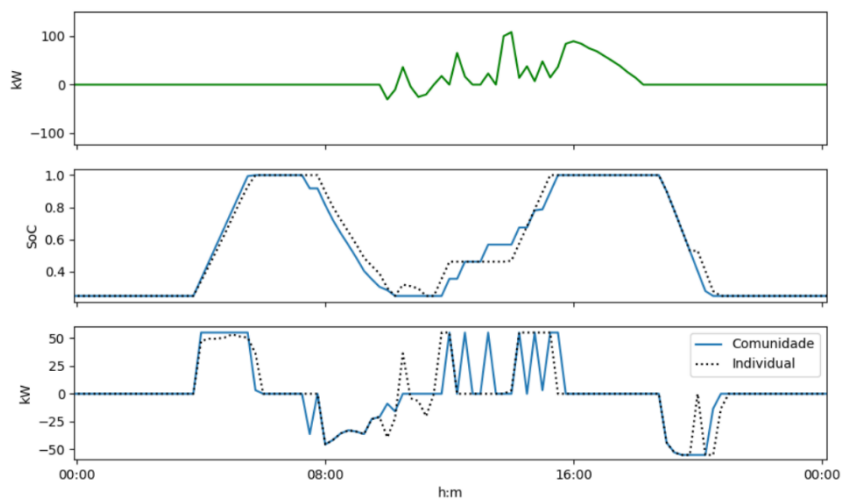


Figura 79 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, terça-feira

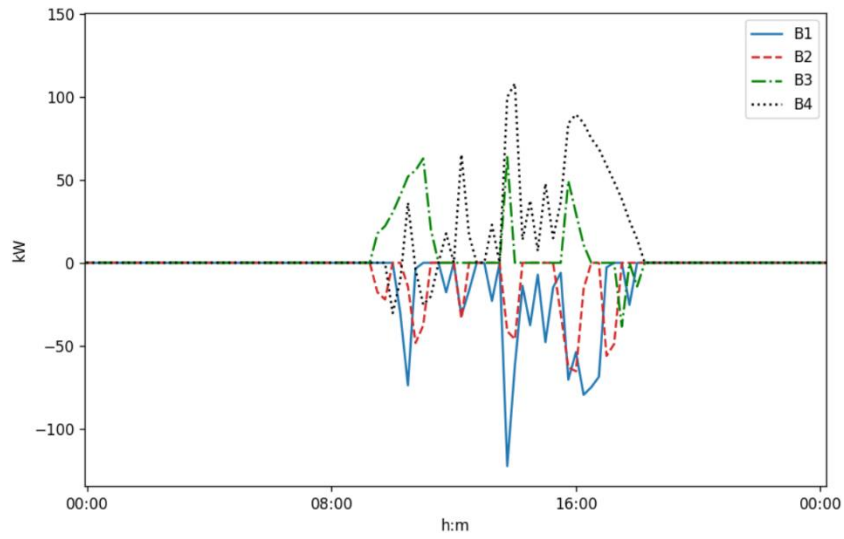


Figura 80 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, terça-feira

Quarta-feira:

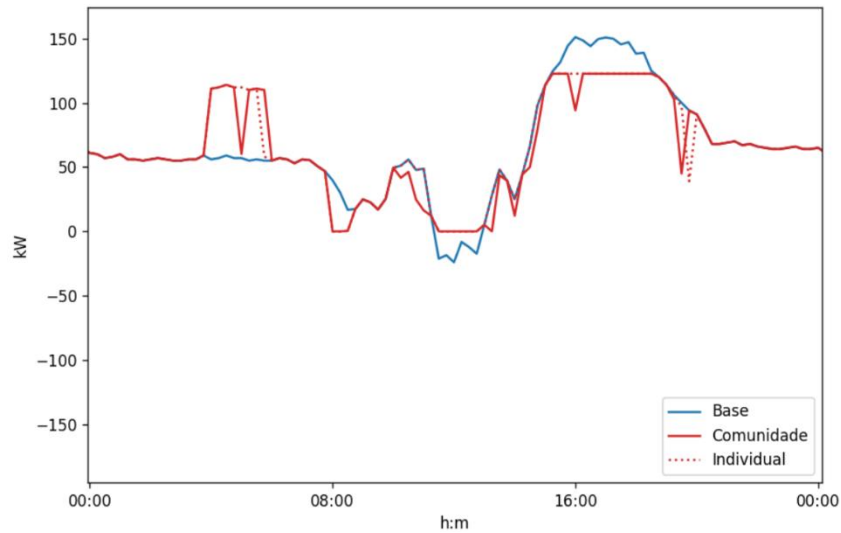


Figura 81 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quarta-feira

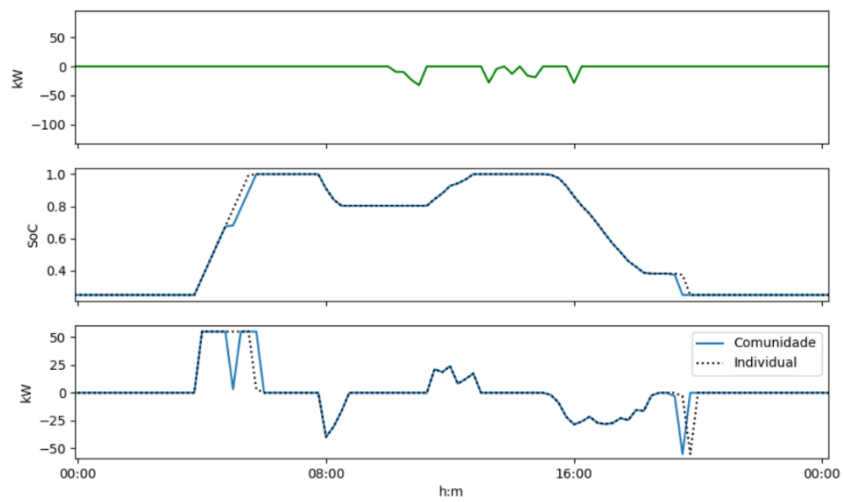


Figura 82 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira

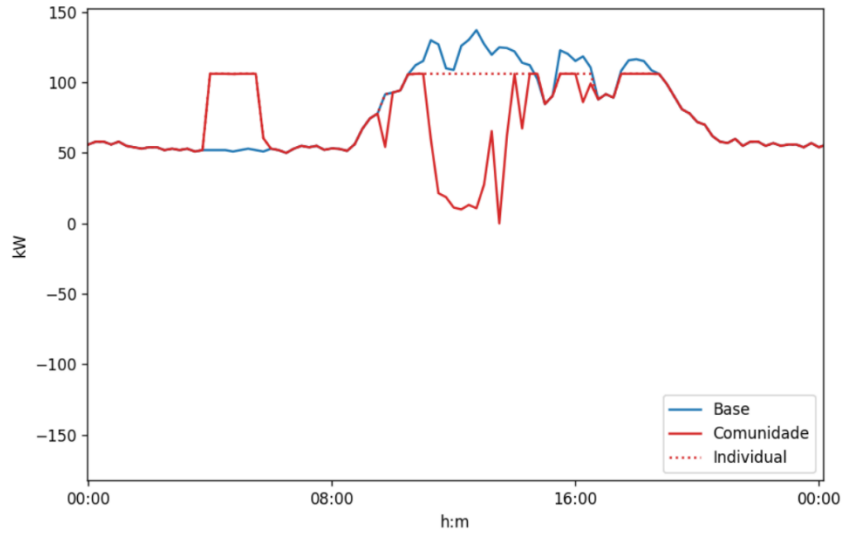


Figura 83 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quarta-feira

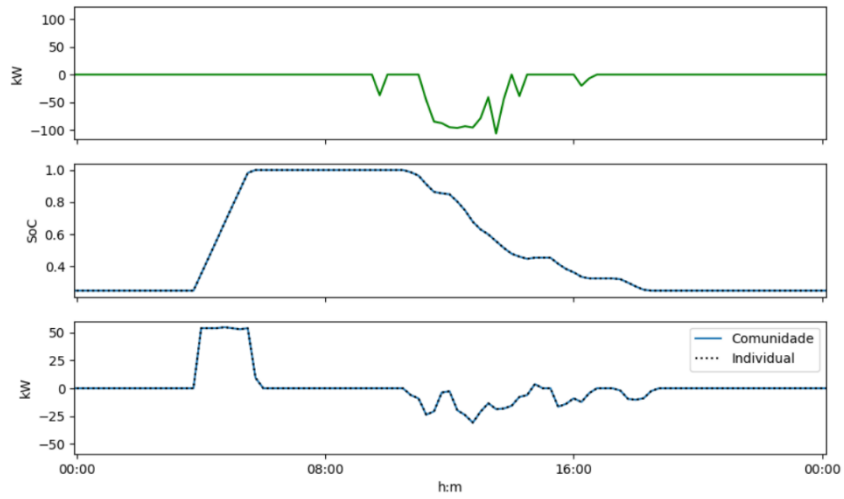


Figura 84 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira

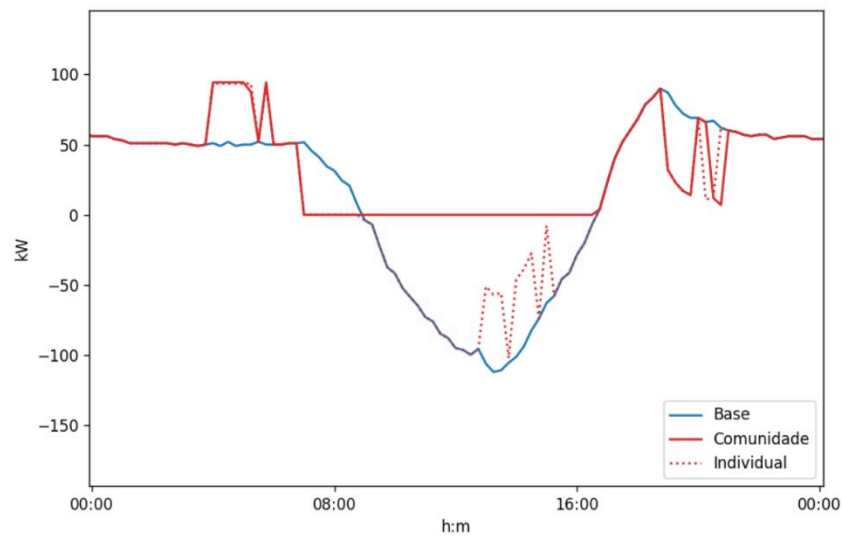


Figura 85 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quarta-feira

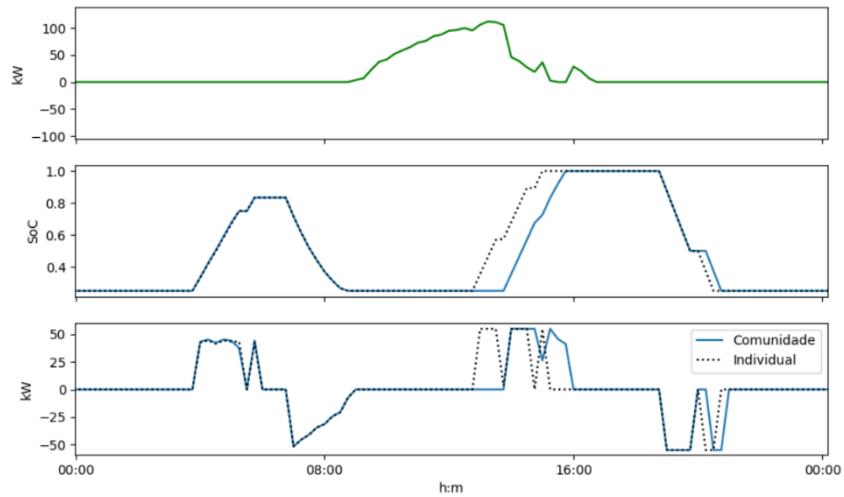


Figura 86 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira

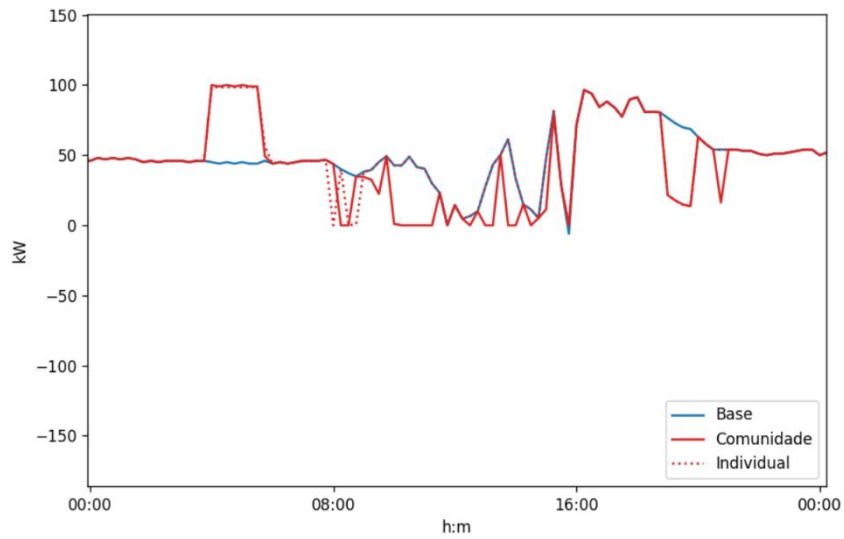


Figura 87 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quarta-feira

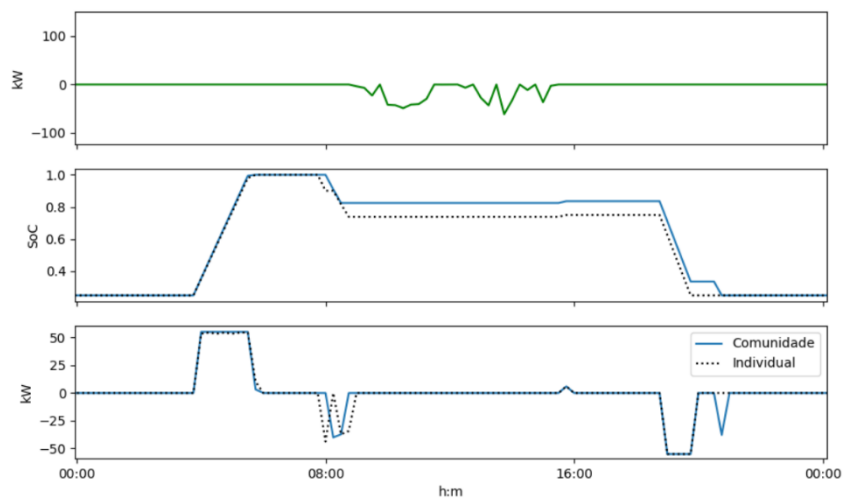


Figura 88 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quarta-feira

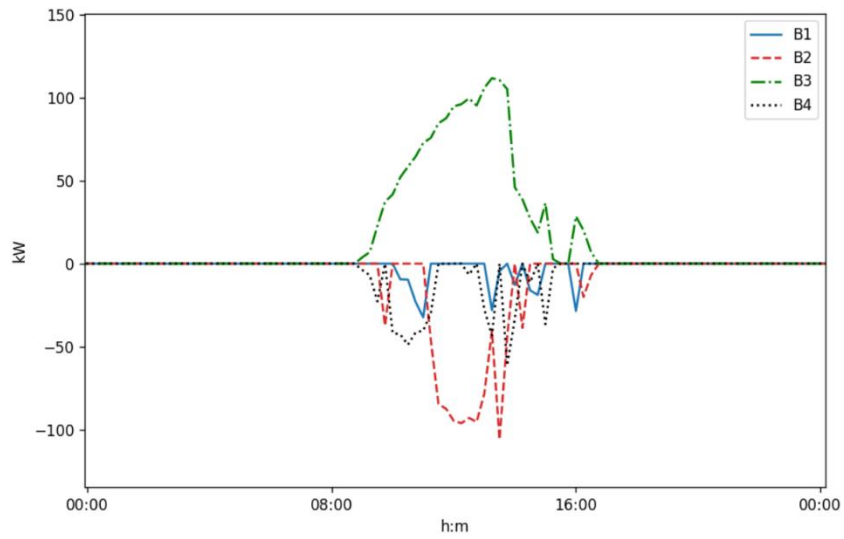


Figura 89 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, quarta-feira

Quinta-feira:

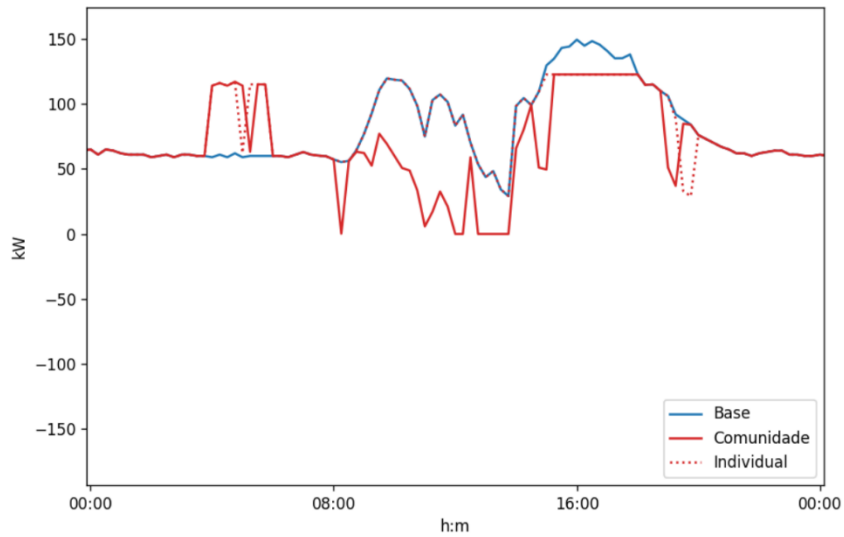


Figura 90 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quinta-feira

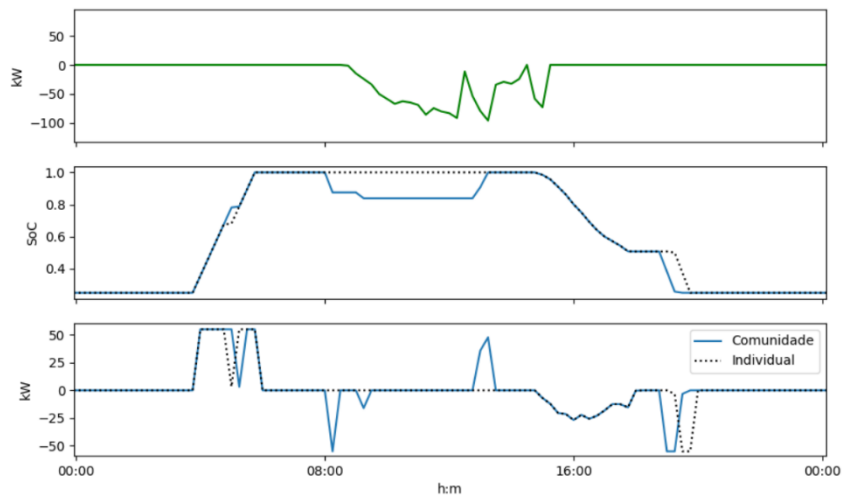


Figura 91 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira

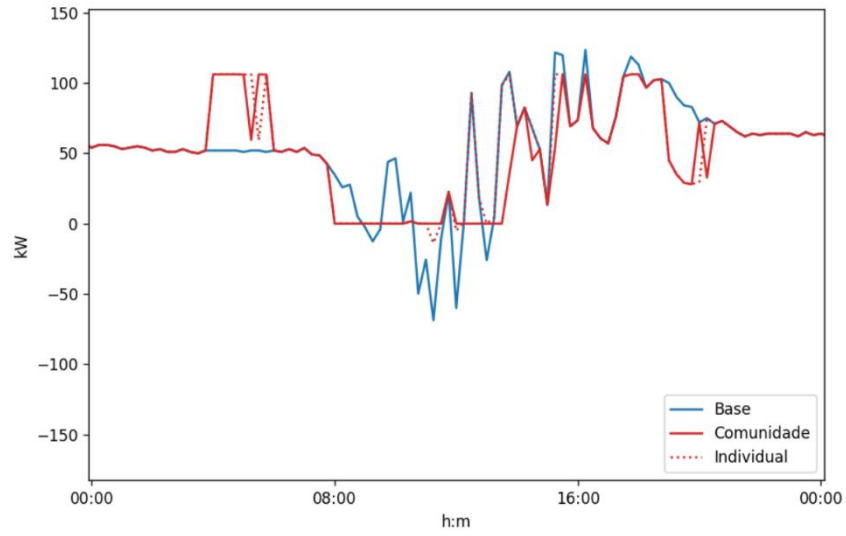


Figura 92 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quinta-feira

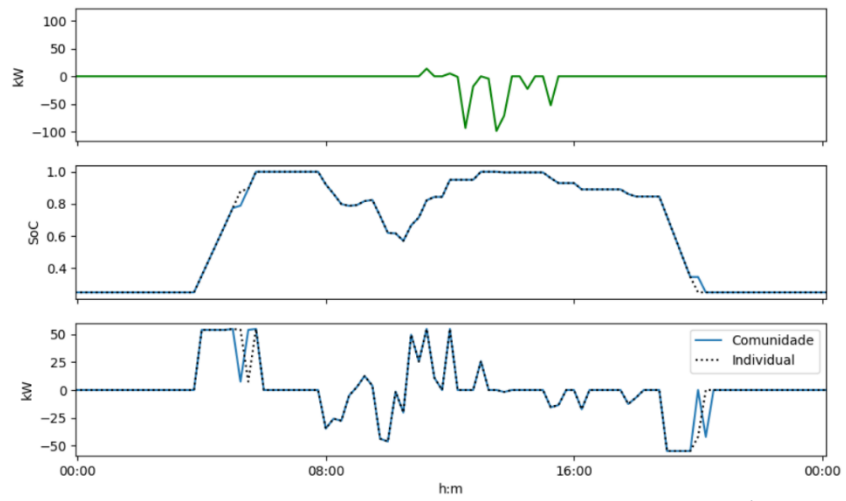


Figura 93 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira

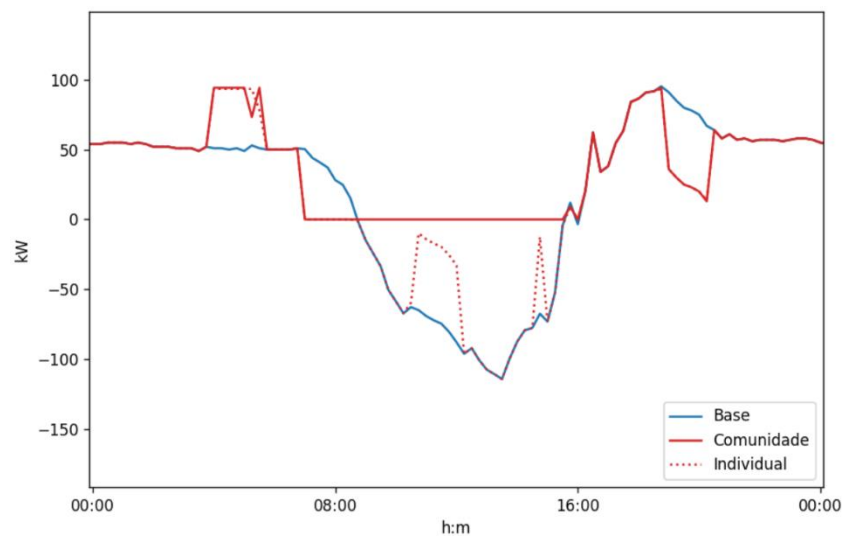


Figura 94 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quinta-feira

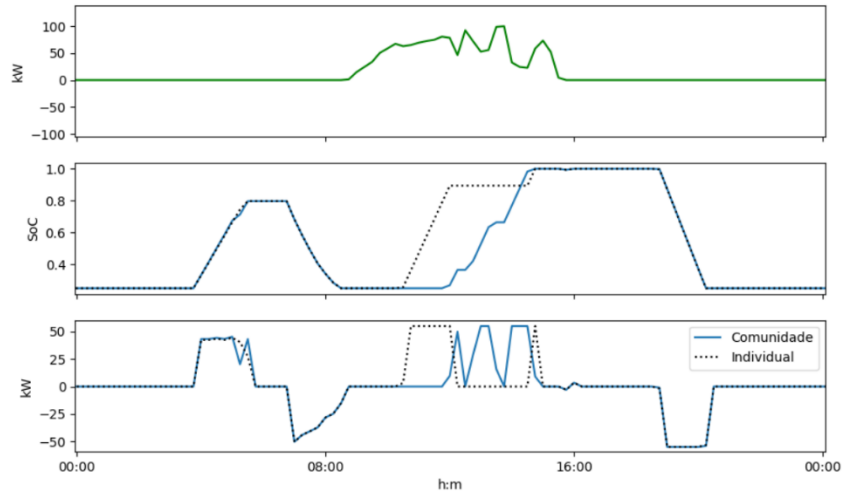


Figura 95 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira

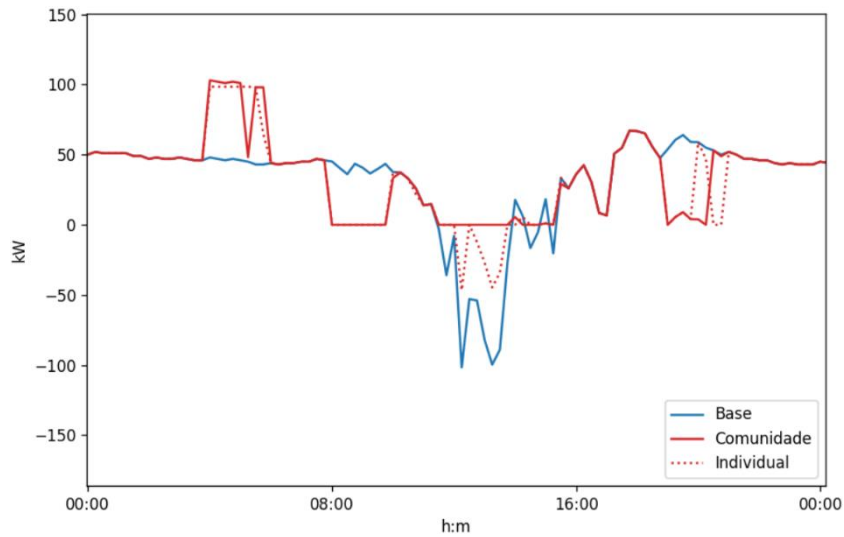


Figura 96 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quinta-feira

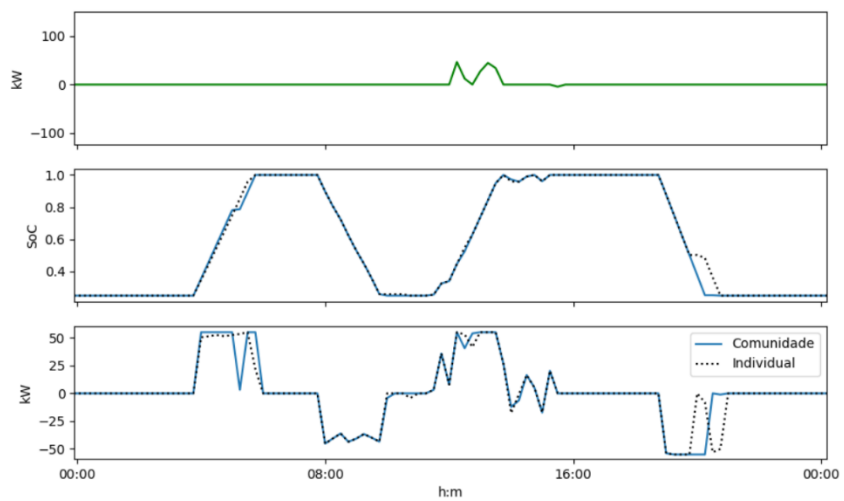


Figura 97 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, quinta-feira

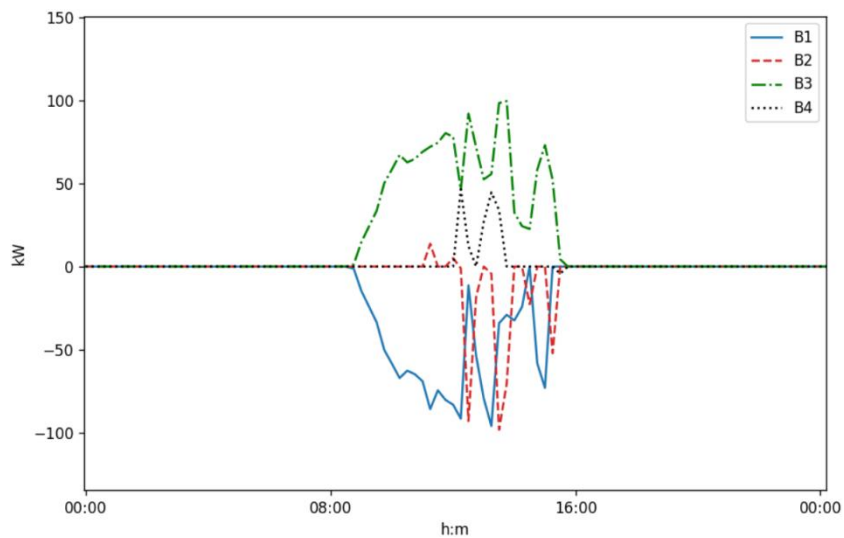


Figura 98 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, quinta-feira

Sexta-feira:

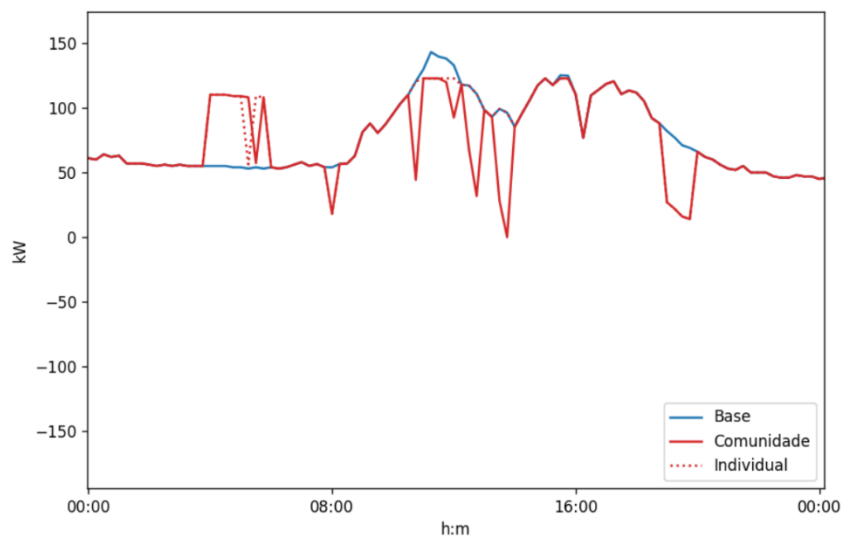


Figura 99 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sexta-feira

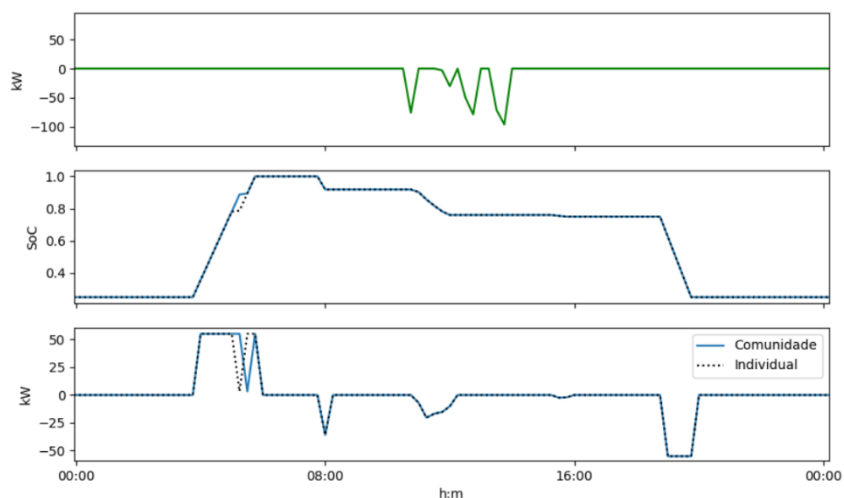


Figura 100 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira

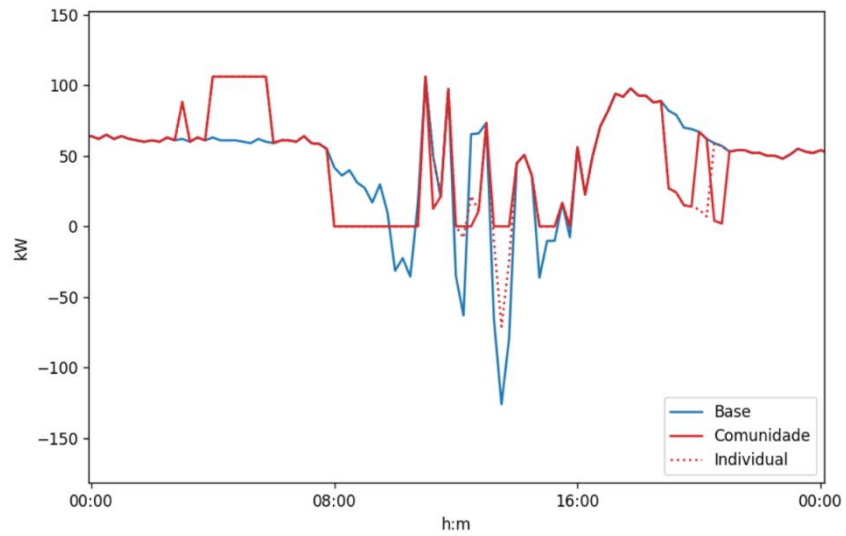


Figura 101 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sexta-feira

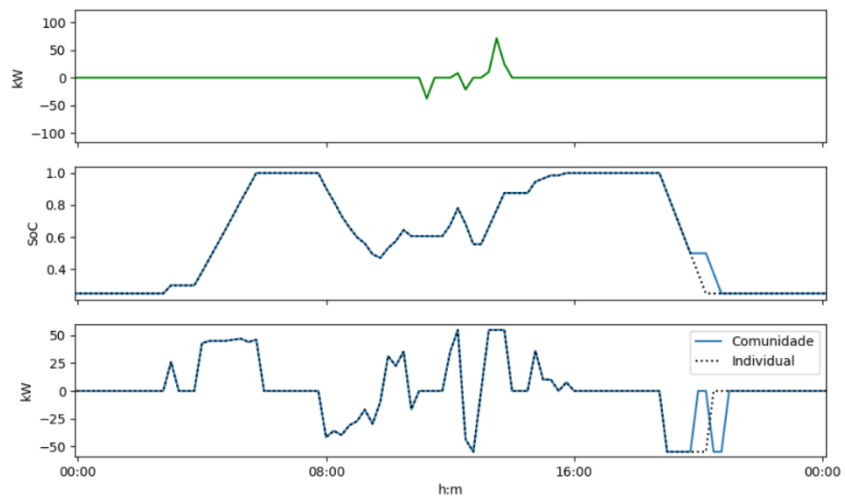


Figura 102 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira

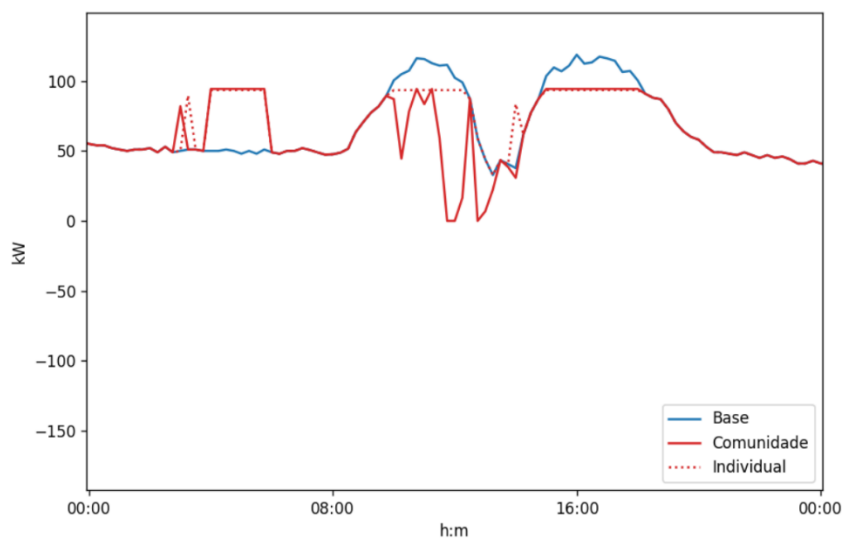


Figura 103 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sexta-feira

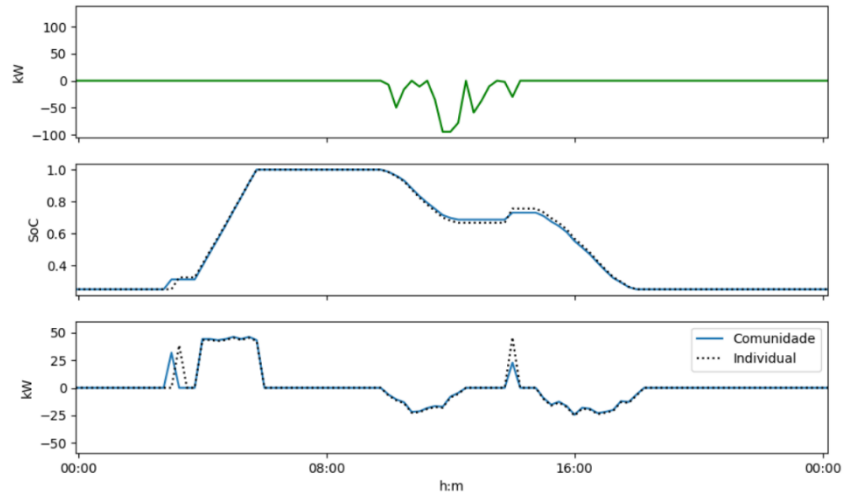


Figura 104 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira

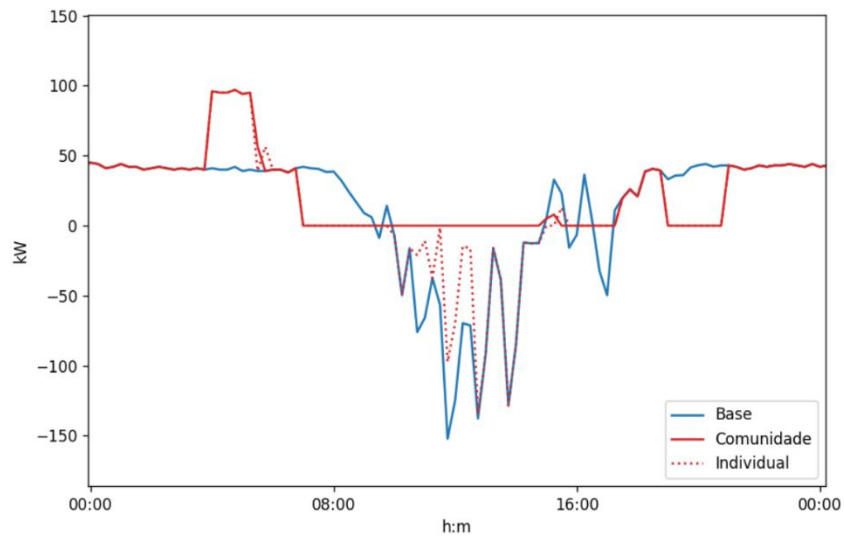


Figura 105 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sexta-feira

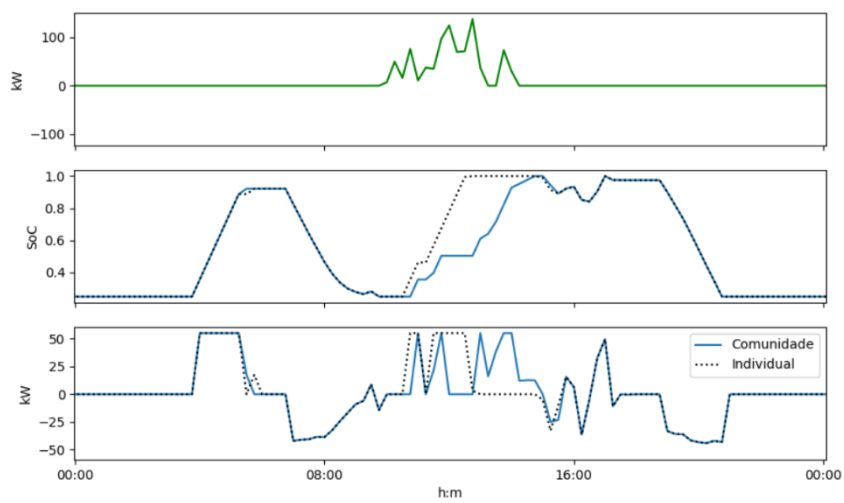


Figura 106 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sexta-feira

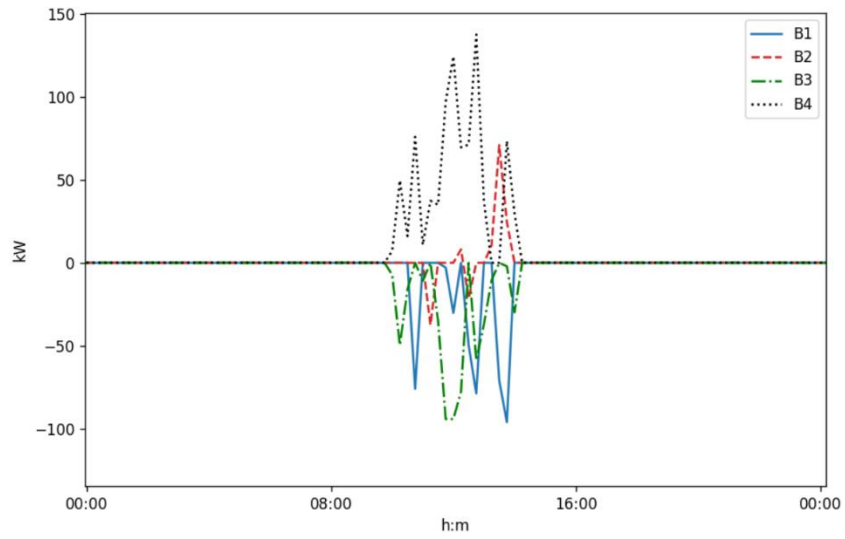


Figura 107 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, sexta-feira

Sábado:

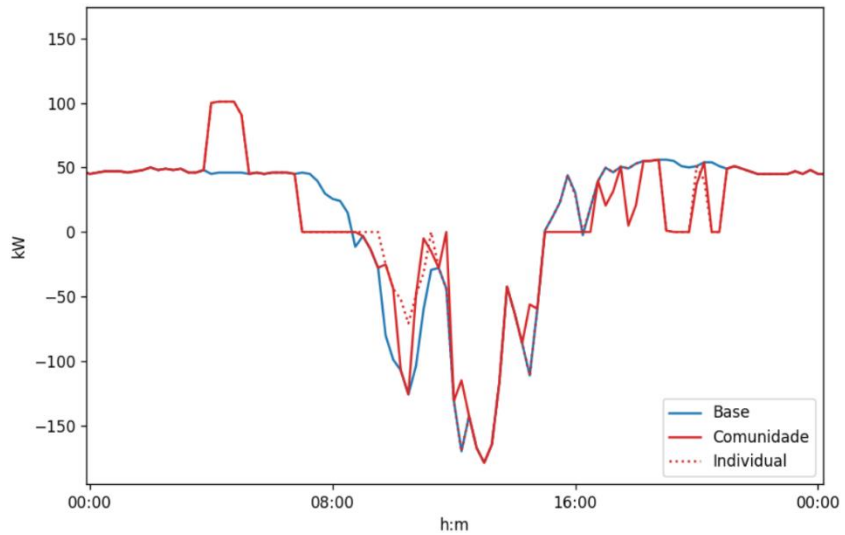


Figura 108 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sábado

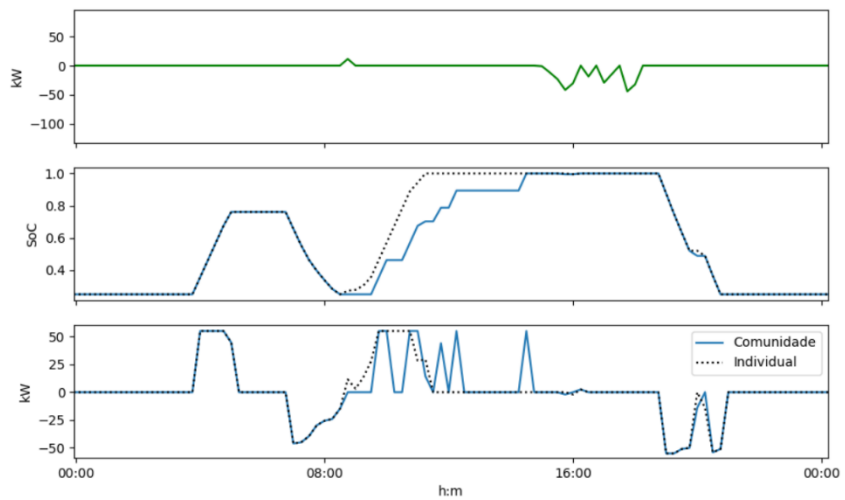


Figura 109 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado

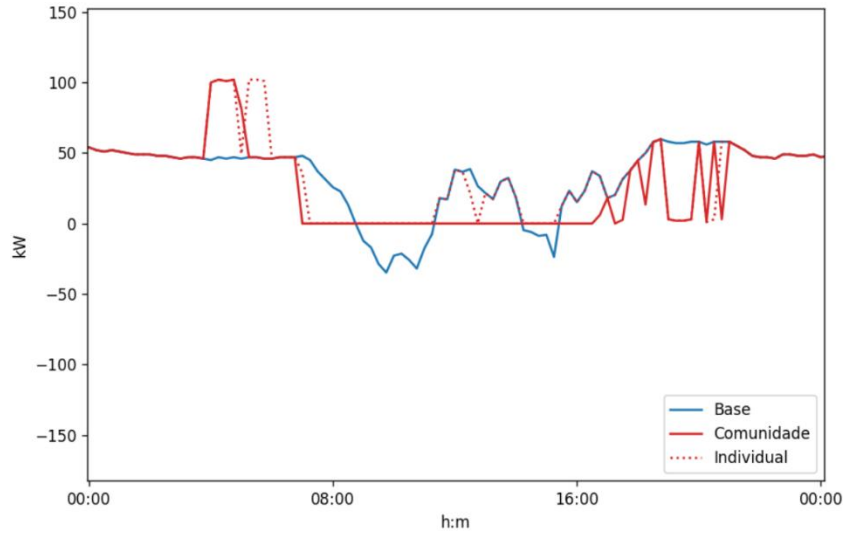


Figura 110 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sábado

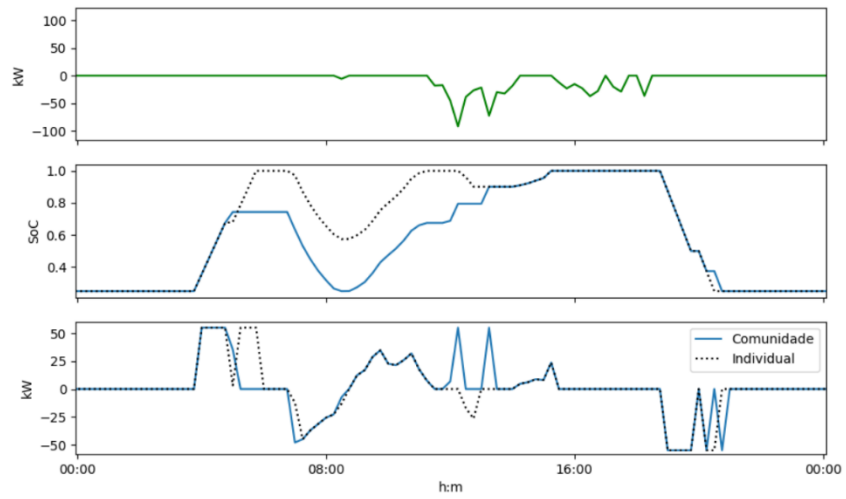


Figura 111 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado

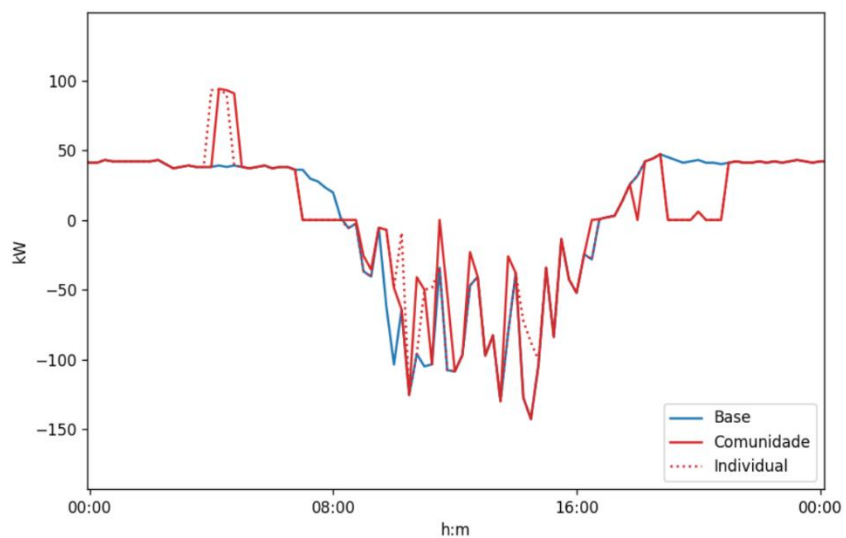


Figura 112 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sábado

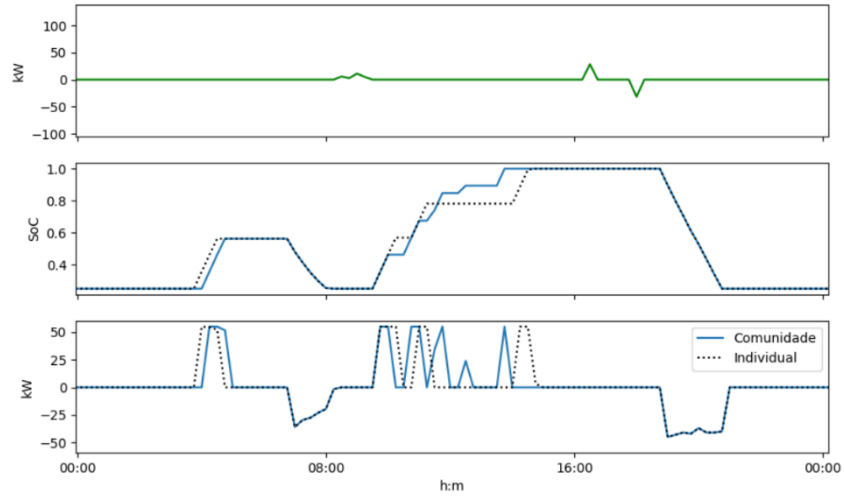


Figura 113 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado

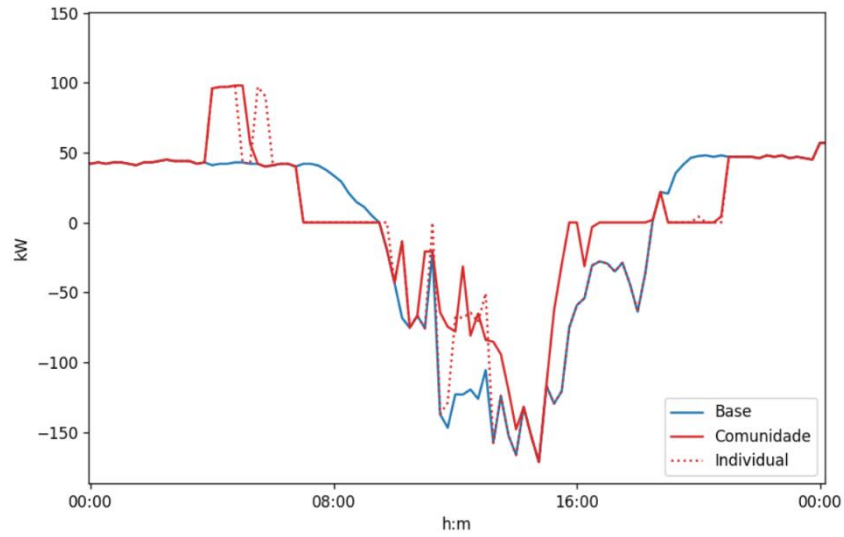


Figura 114 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado

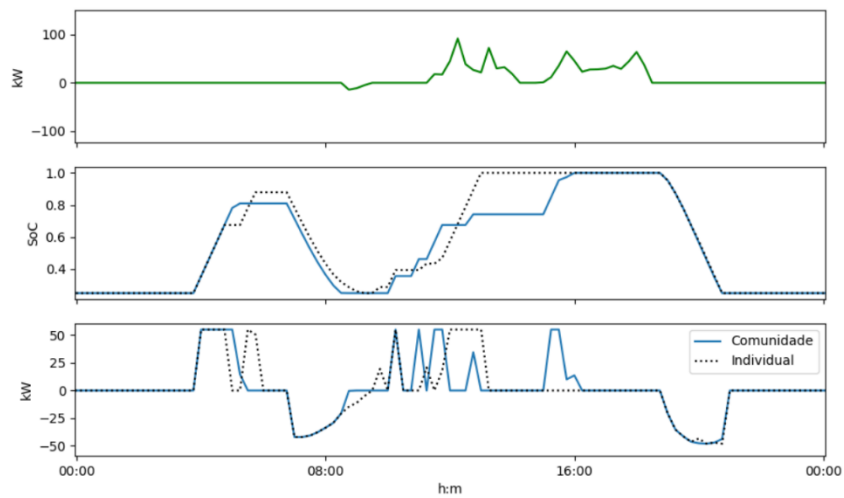


Figura 115 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, sábado

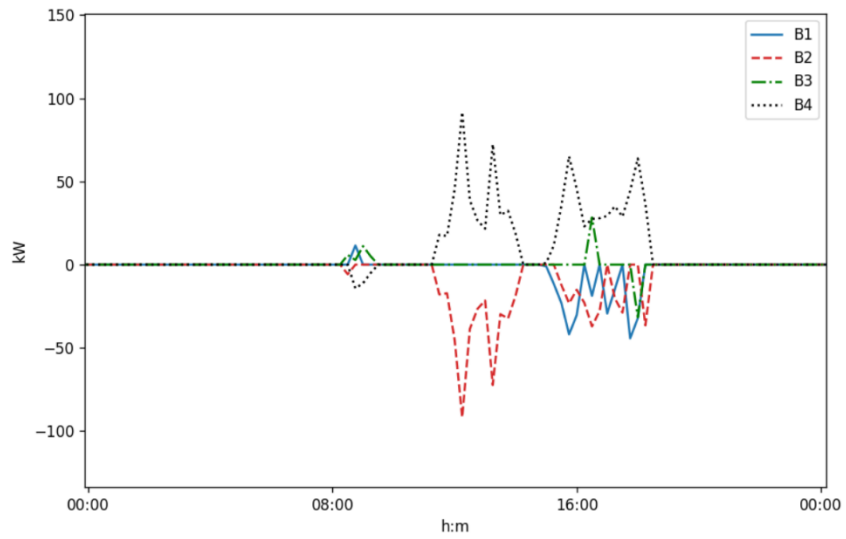


Figura 116 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, sábado

Domingo:

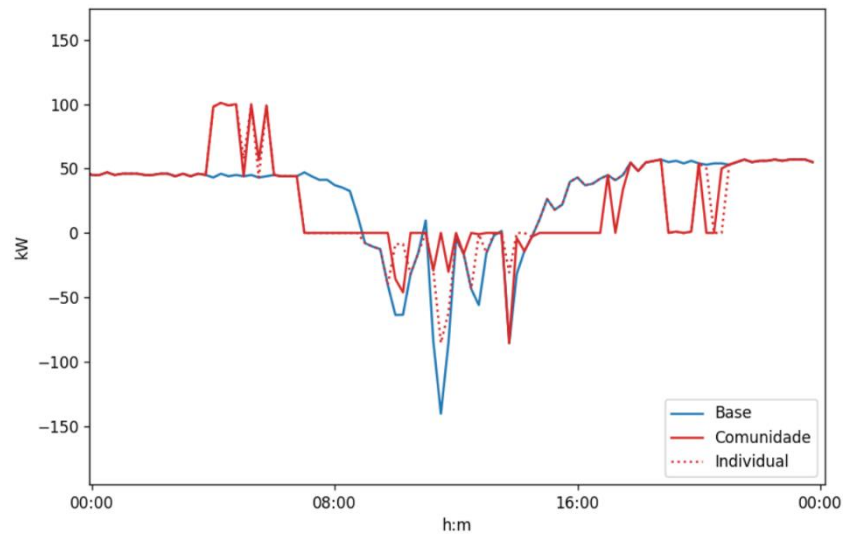


Figura 117 - Procura de energia líquida no Edifício 1, domingo

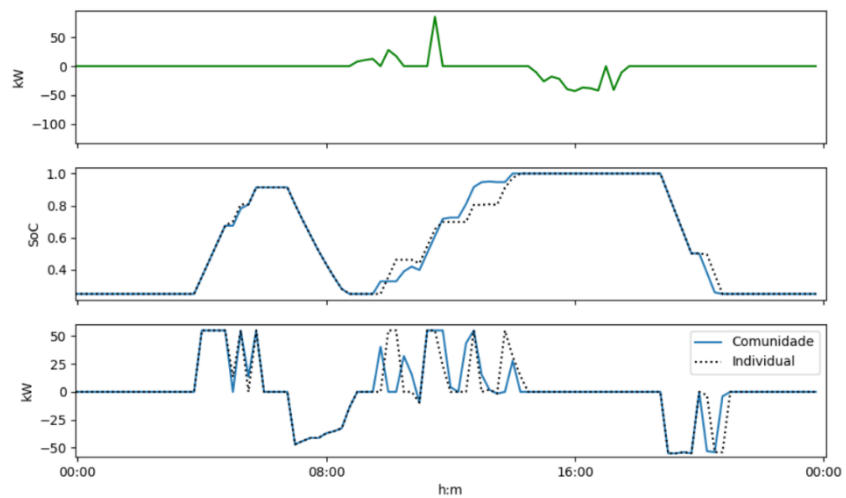


Figura 118 - Fluxo de Potências entre o Edifício 1 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo

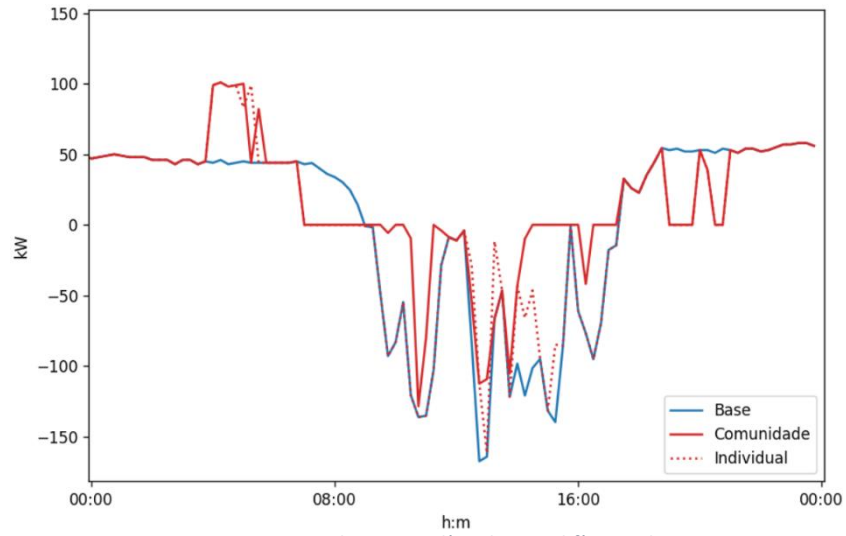


Figura 119 - Procura de energia líquida no Edifício 2, domingo

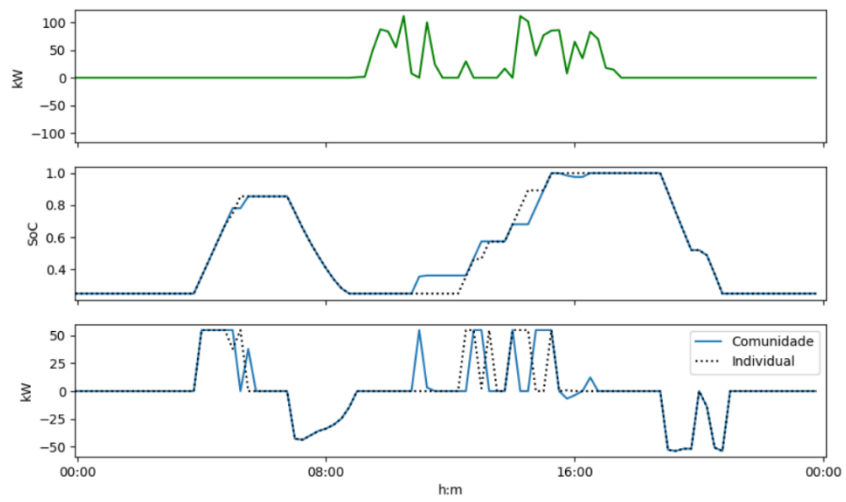


Figura 120 - Fluxo de Potências entre o Edifício 2 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo

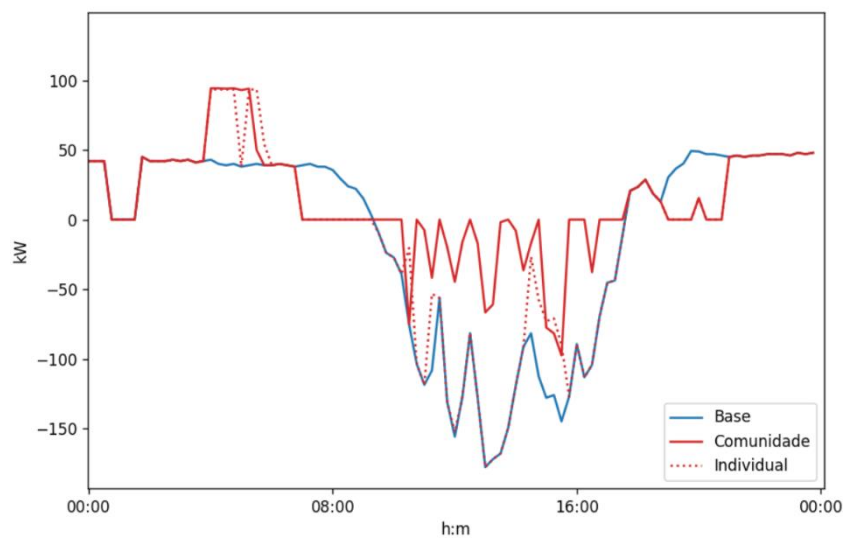


Figura 121 - Procura de energia líquida no Edifício 3, domingo

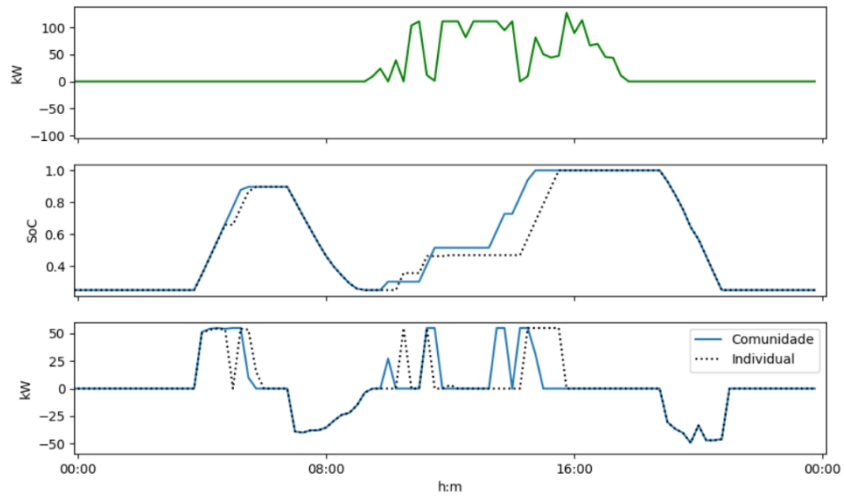


Figura 122 - Fluxo de Potências entre o Edifício 3 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo

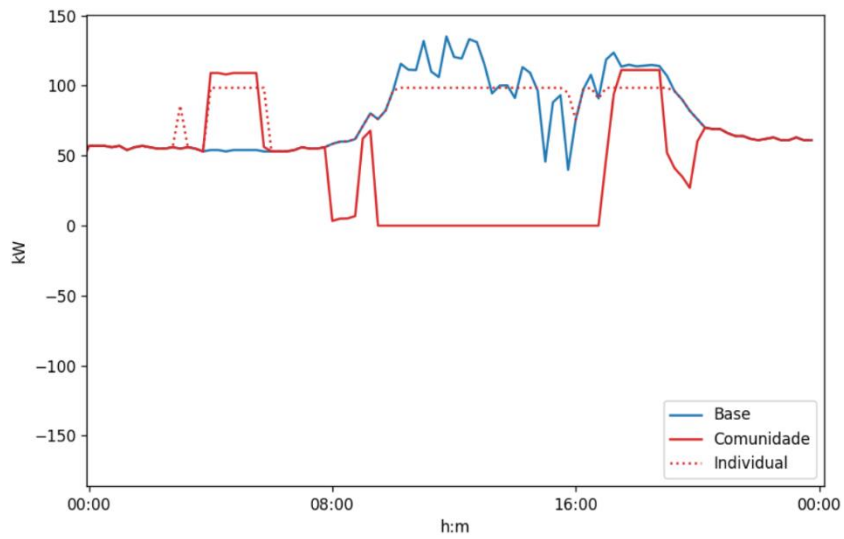


Figura 123 - Procura de energia líquida no Edifício 4, domingo

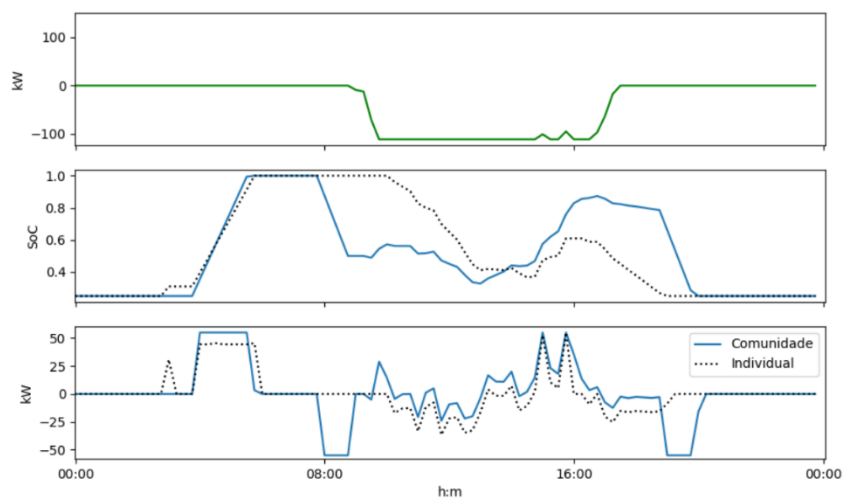


Figura 124 - Fluxo de Potências entre o Edifício 4 e a Comunidade, SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício, domingo

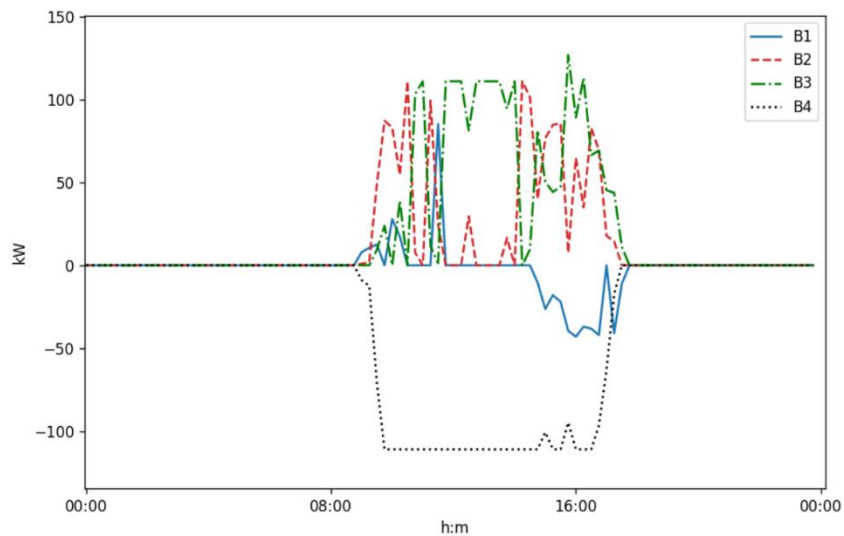


Figura 125 - Fluxo de Potências entre cada Edifício e a Comunidade, domingo

Comportamento das baterias nos diferentes edifícios (com DoD máximo igual a 0,9)

Segunda-feira:

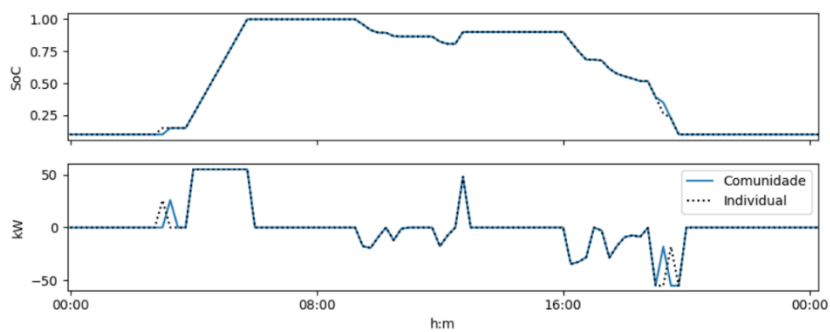


Figura 126 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, segunda-feira

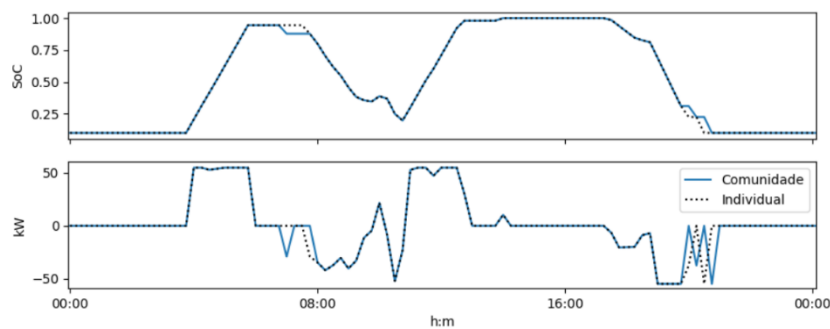


Figura 127 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, segunda-feira

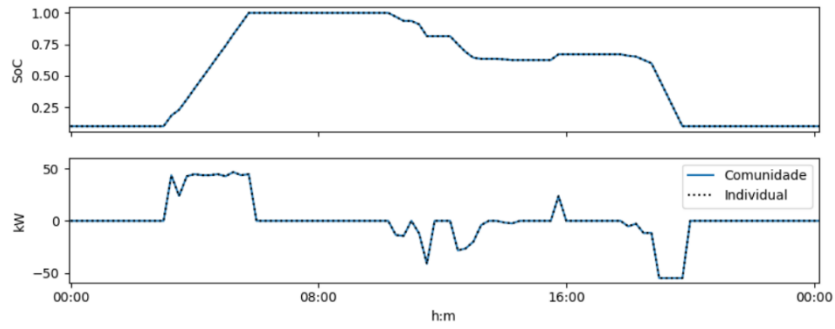


Figura 128 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, segunda-feira

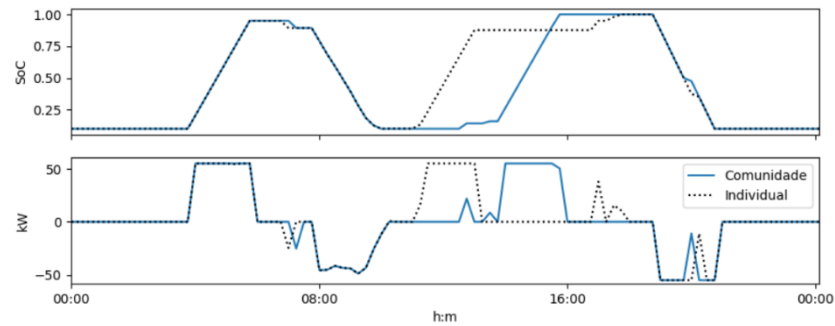


Figura 129 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, segunda-feira

Terça-feira:

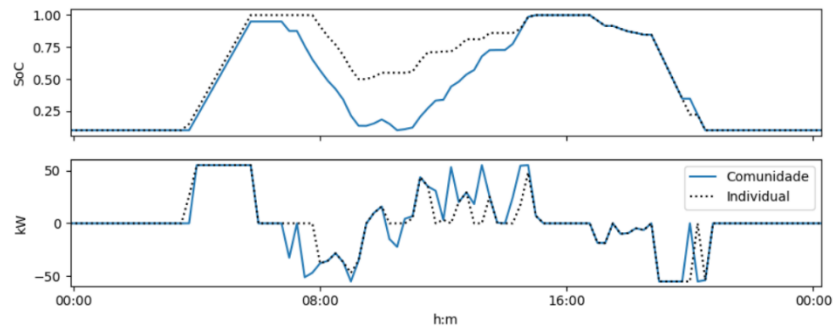


Figura 130 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, terça-feira

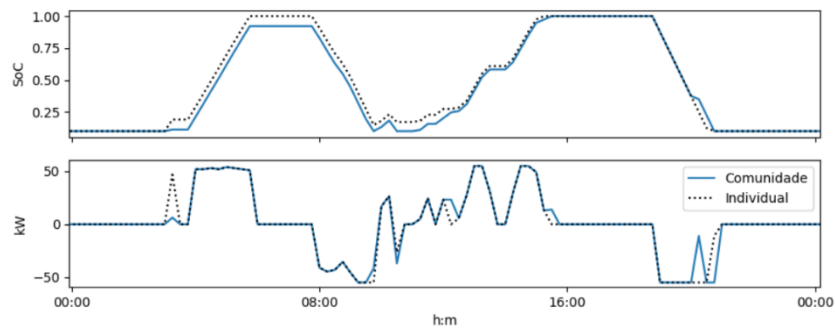


Figura 131 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, terça-feira

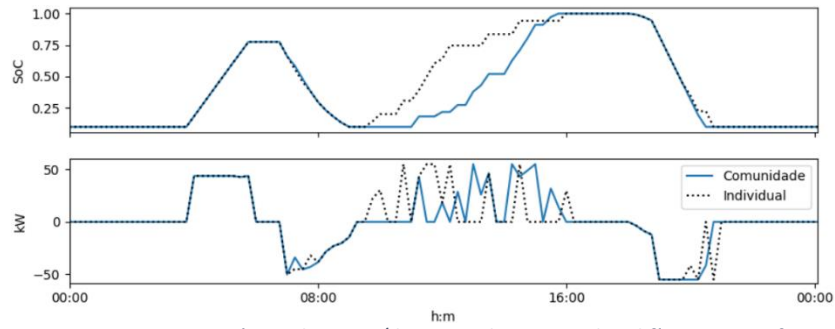


Figura 132 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, terça-feira

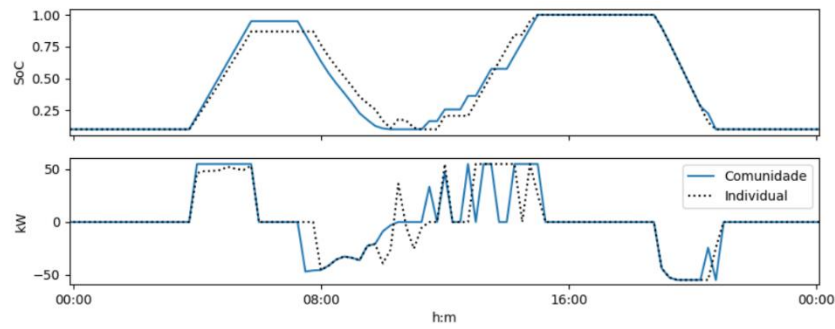


Figura 133 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, terça-feira

Quarta-feira:

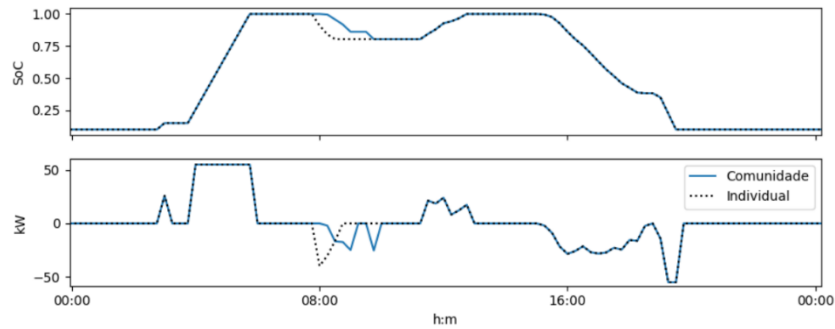


Figura 134 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, quarta-feira

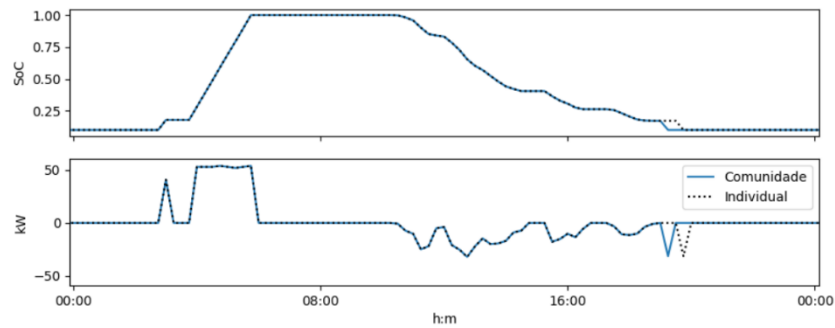


Figura 135 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, quarta-feira

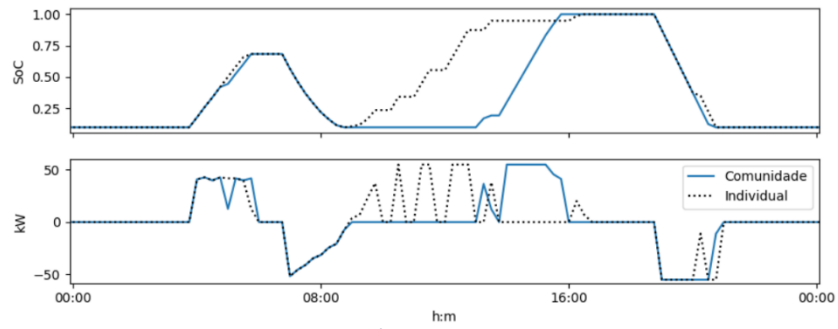


Figura 136 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, quarta-feira

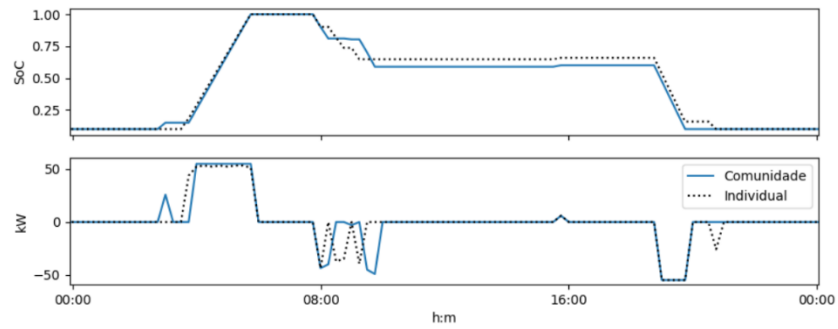


Figura 137 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, quarta-feira

Quinta-feira:

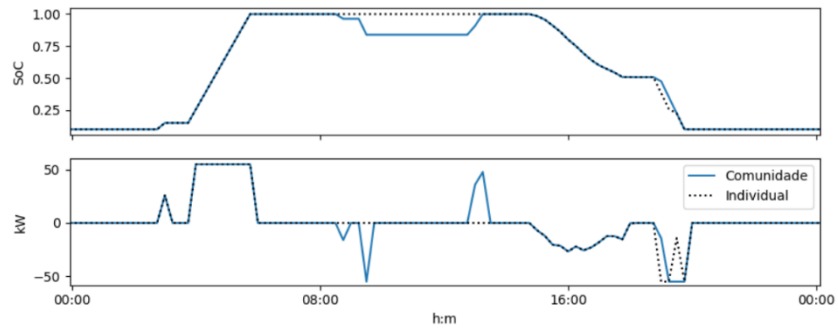


Figura 138 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, quinta-feira

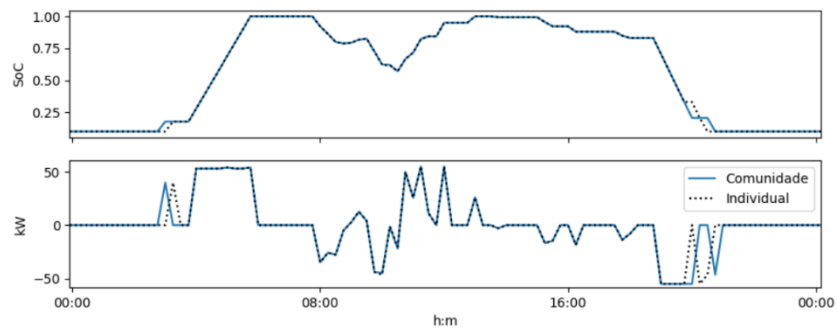


Figura 139 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, quinta-feira

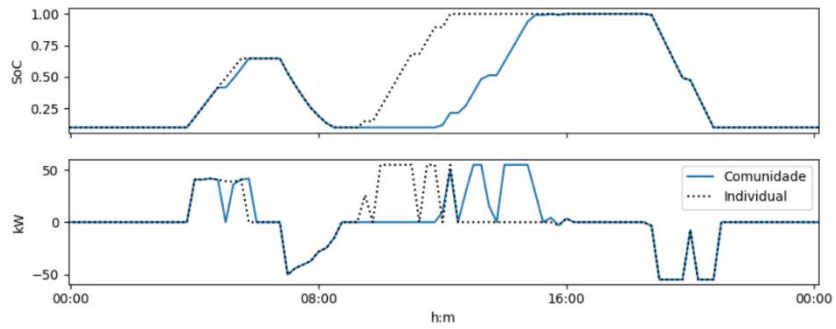


Figura 140 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, quinta-feira

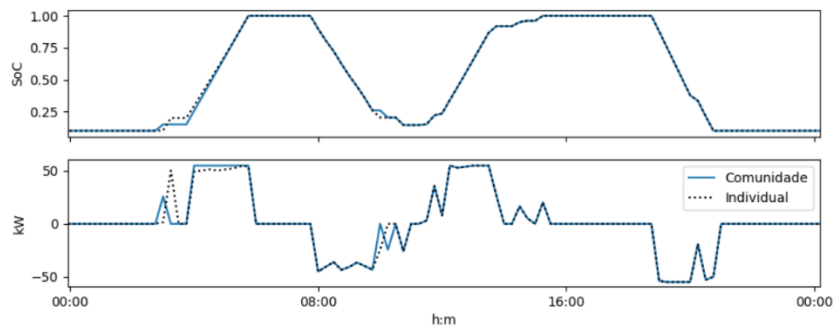


Figura 141 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, quinta-feira

Sexta-feira:

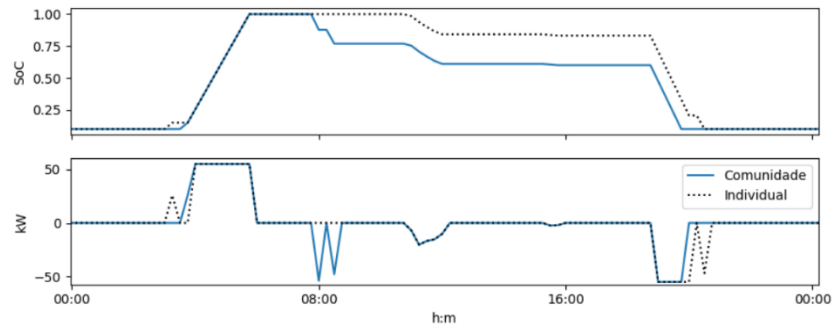


Figura 142 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, sexta-feira

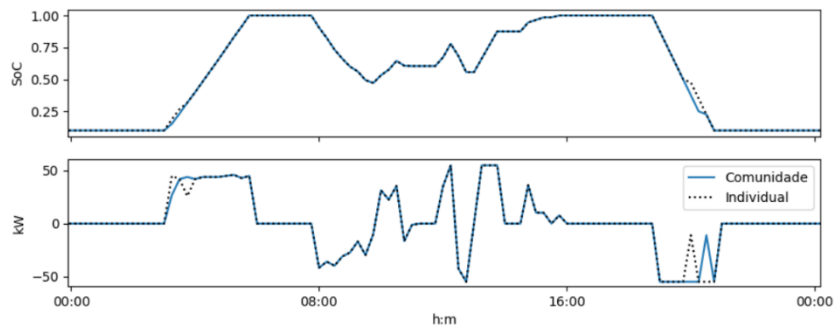


Figura 143 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, sexta-feira

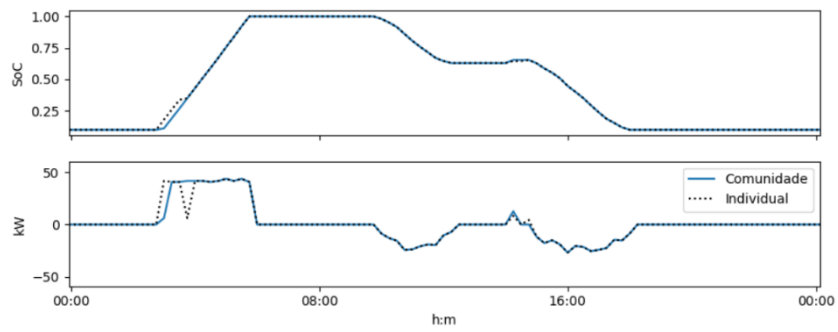


Figura 144 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, sexta-feira

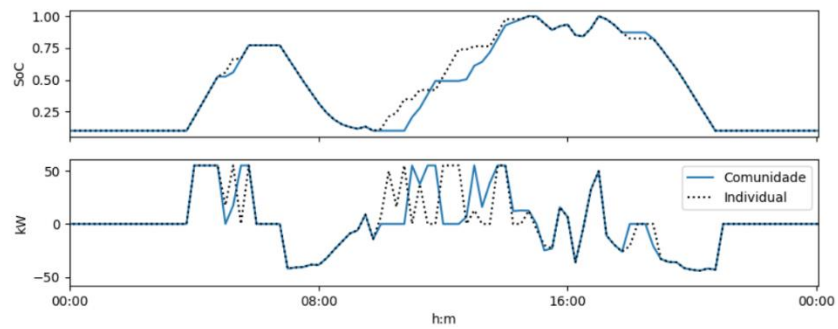


Figura 145 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, sexta-feira

Sábado:

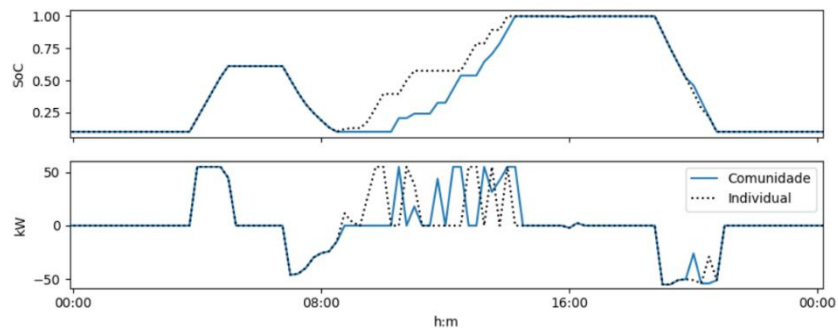


Figura 146 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, sábado

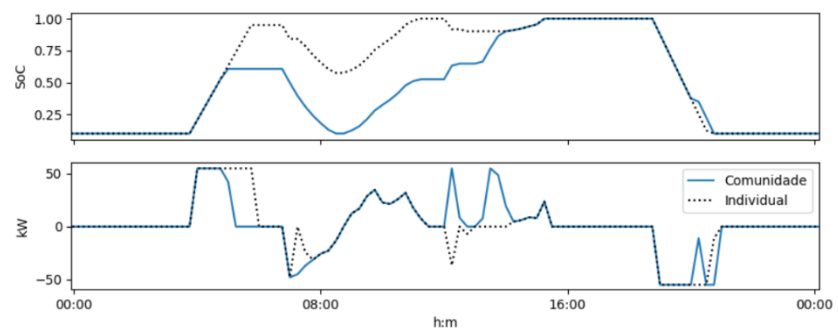


Figura 147 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, sábado

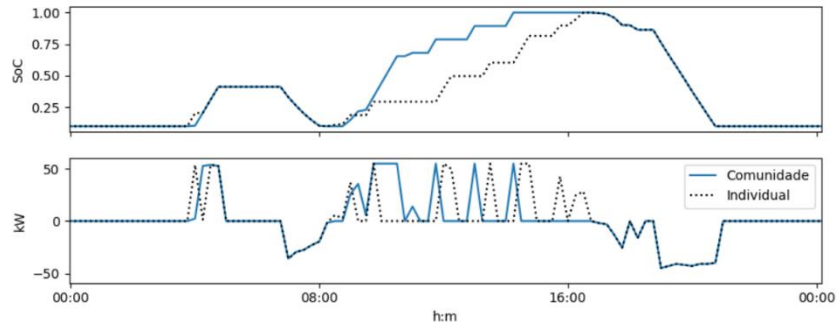


Figura 148 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, sábado

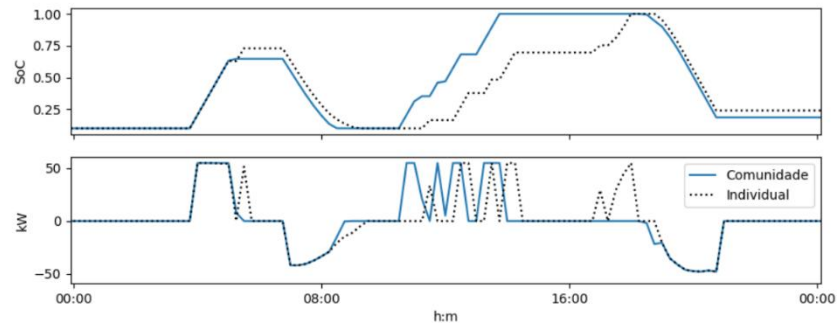


Figura 149 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, sábado

Domingo:

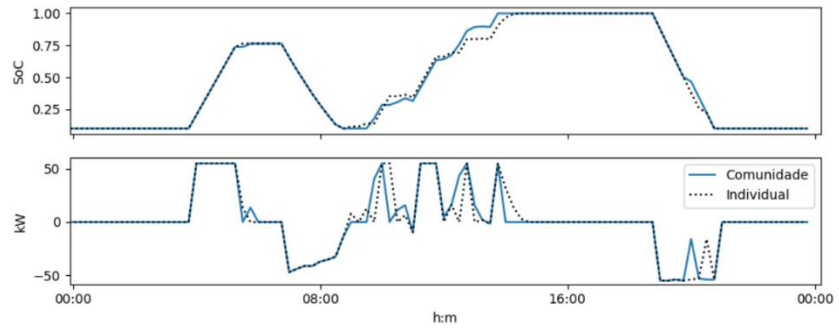


Figura 150 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 1, domingo

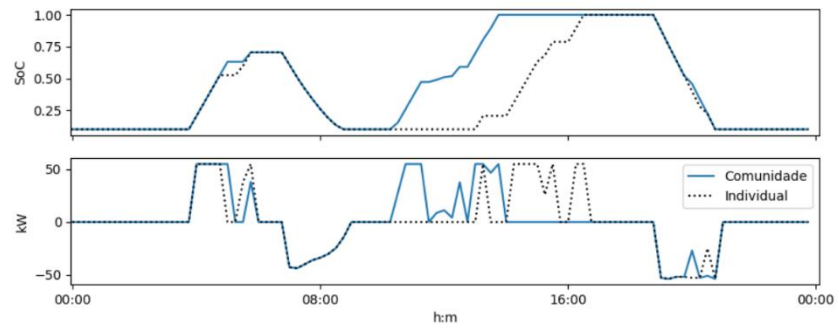


Figura 151 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 2, domingo

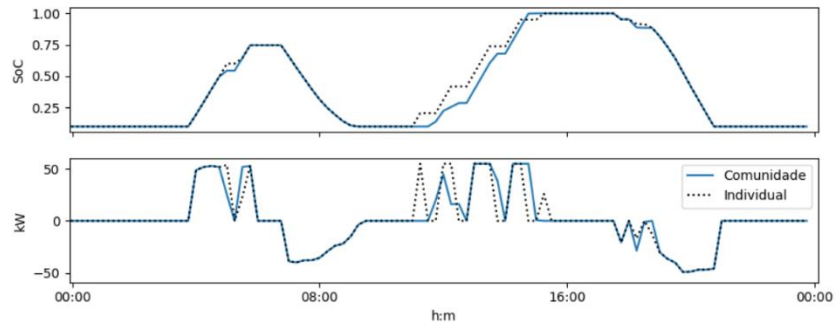


Figura 152 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 3, domingo

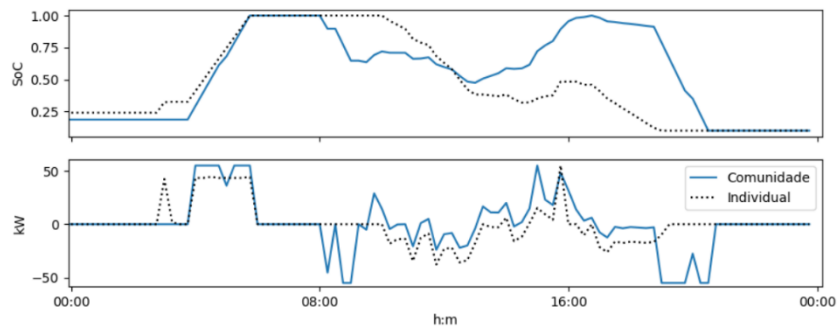


Figura 153 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria do Edifício 4, domingo

Anexo V

Resultados 2º Cenário

Procura de energia líquida nos diferentes edifícios, com caso Base e Comunidade, trocas de energia entre a comunidade e comportamento da bateria (com DoD máximo igual a 0,75)

Segunda-feira:

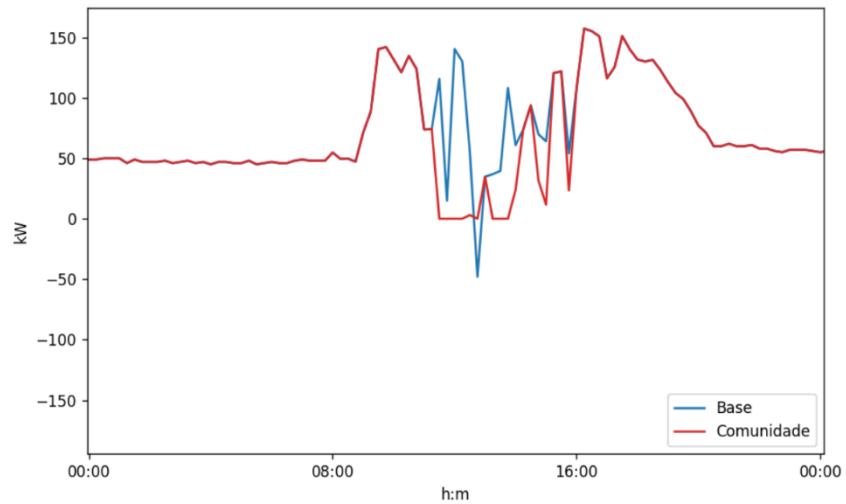


Figura 154 - Procura de energia líquida no Edifício 1, segunda-feira

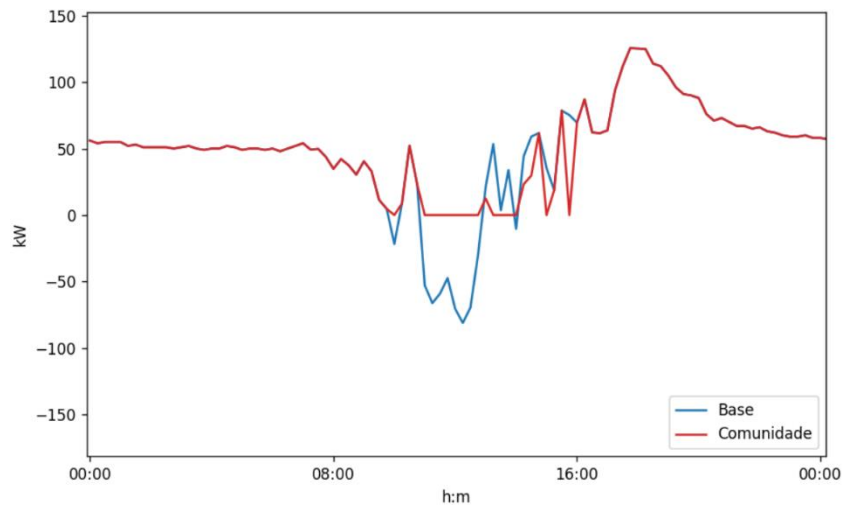


Figura 155 - Procura de energia líquida no Edifício 2, segunda-feira

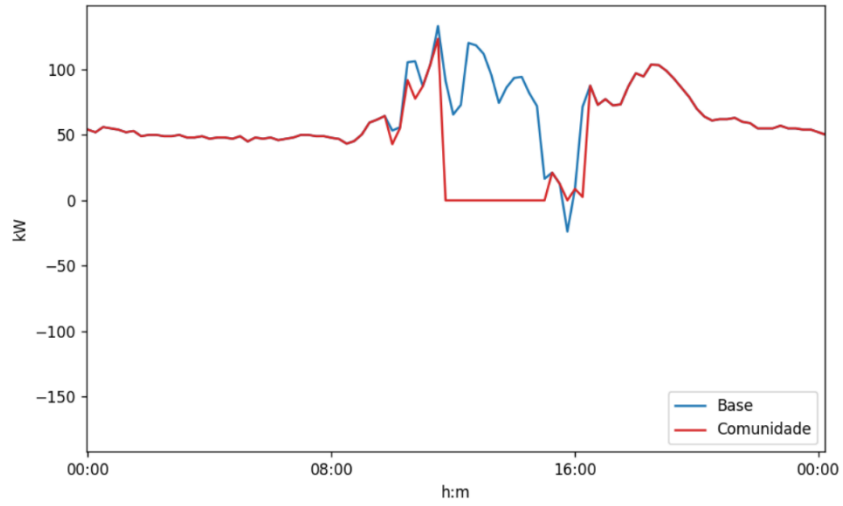


Figura 156 - Procura de energia líquida no Edifício 3, segunda-feira

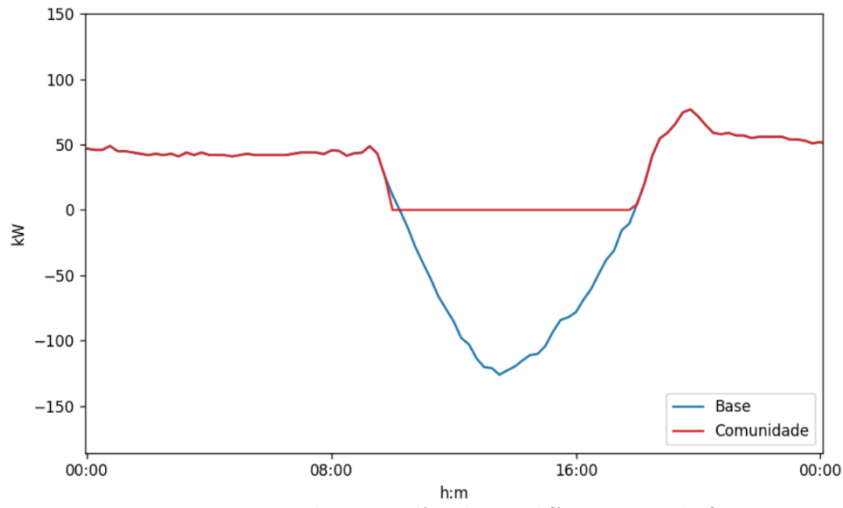


Figura 157 - Procura de energia líquida no Edifício 4, segunda-feira

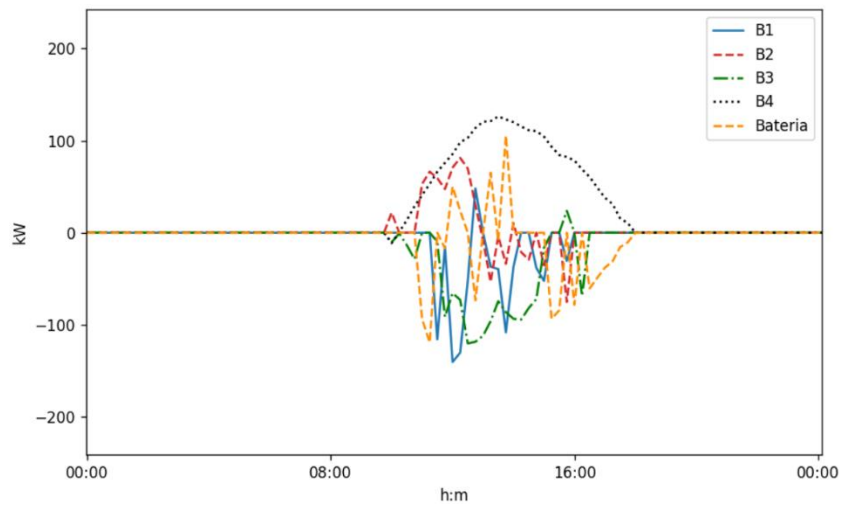


Figura 158 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, segunda-feira

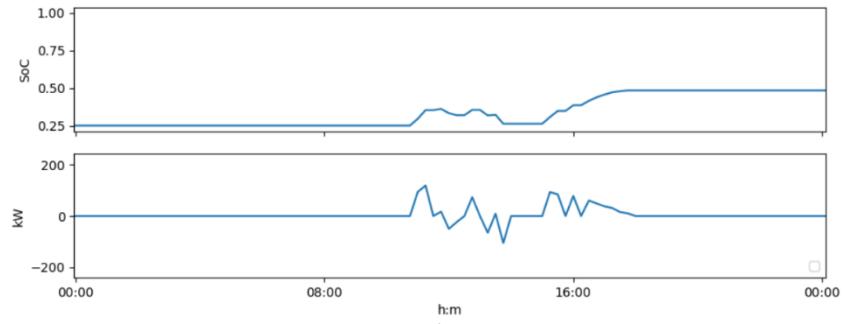


Figura 159 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, segunda-feira

Terça-feira:

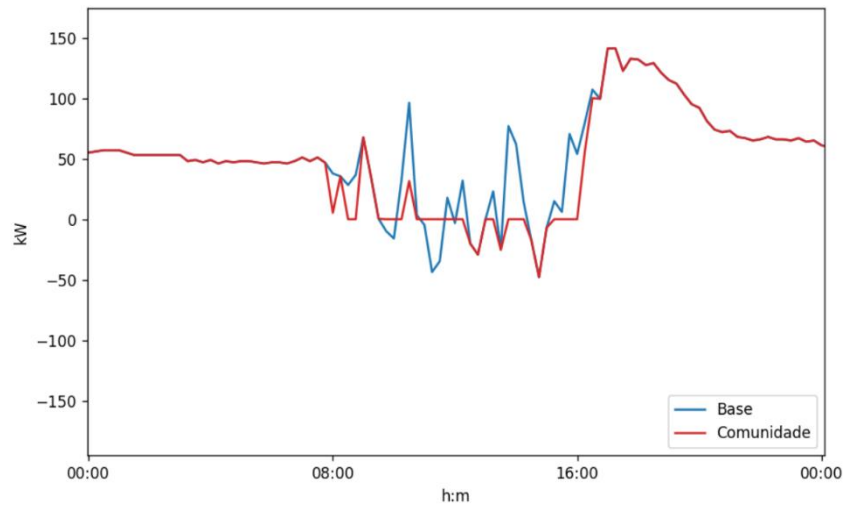


Figura 160 - Procura de energia líquida no Edifício 1, terça-feira

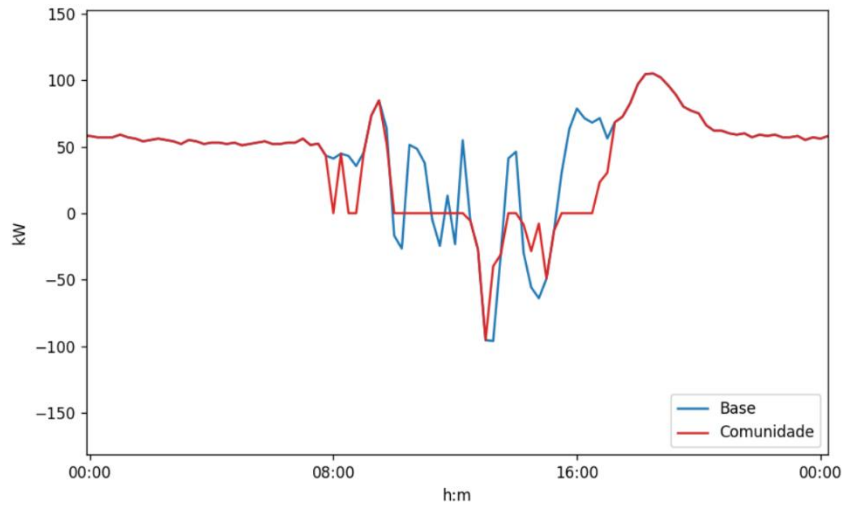


Figura 161 - Procura de energia líquida no Edifício 2, terça-feira

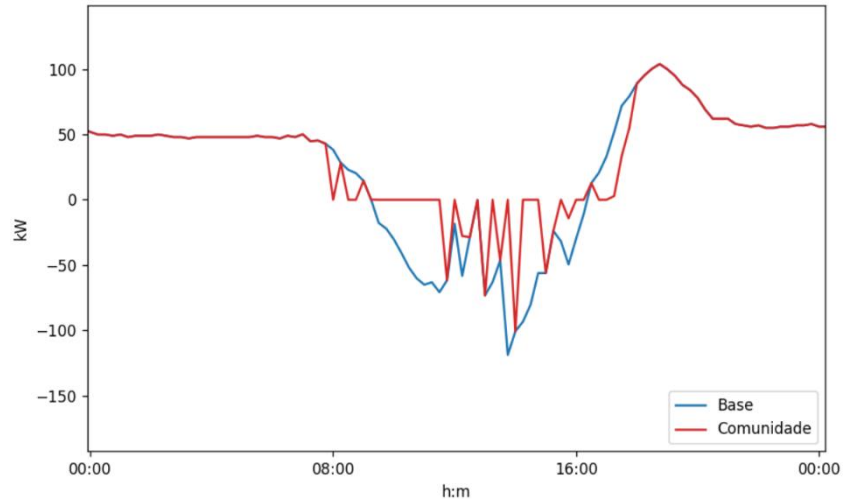


Figura 162 - Procura de energia líquida no Edifício 3, terça-feira

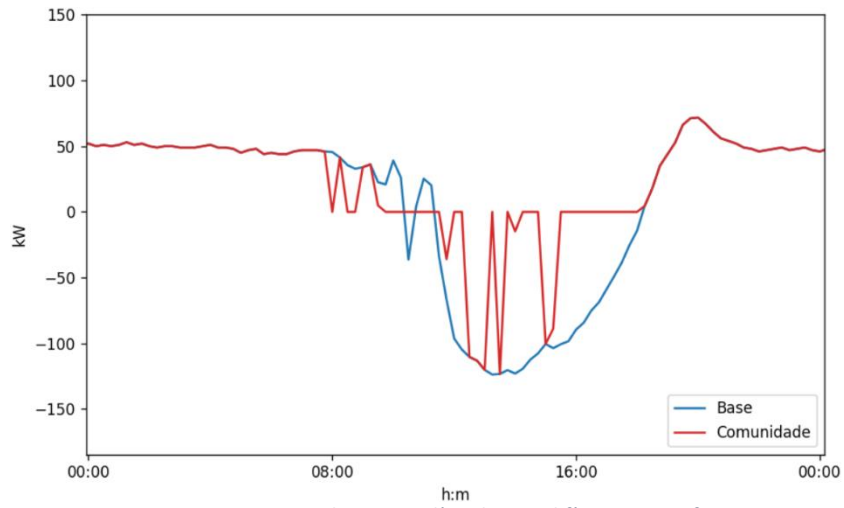


Figura 163 - Procura de energia líquida no Edifício 4, terça-feira

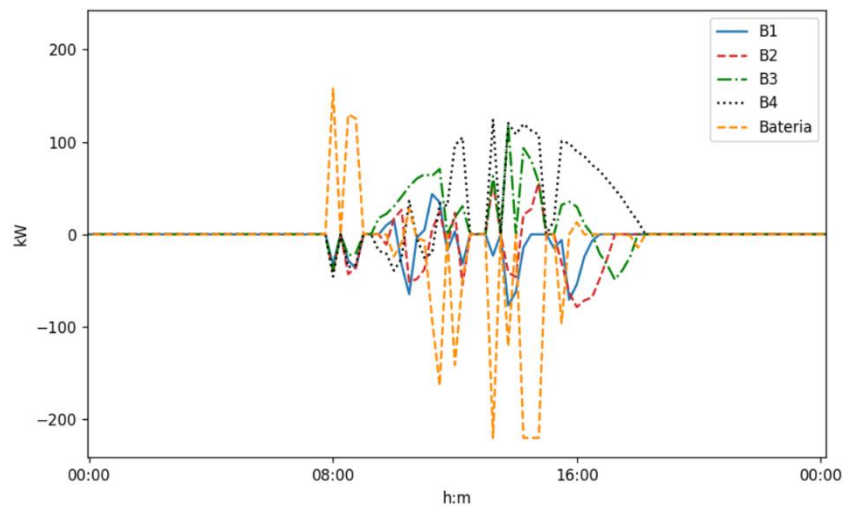


Figura 164 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, terça-feira

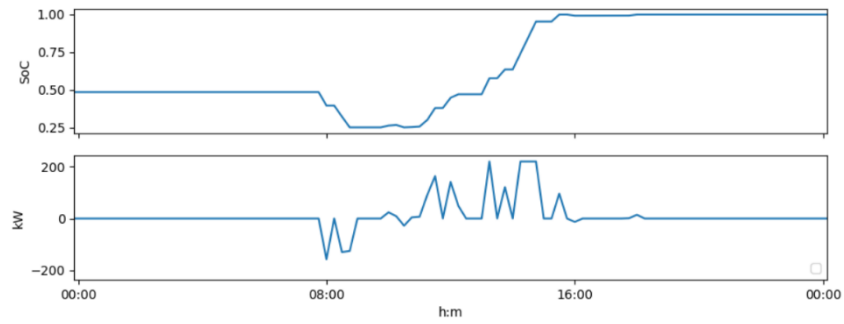


Figura 165 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, terça-feira

Quarta-feira:

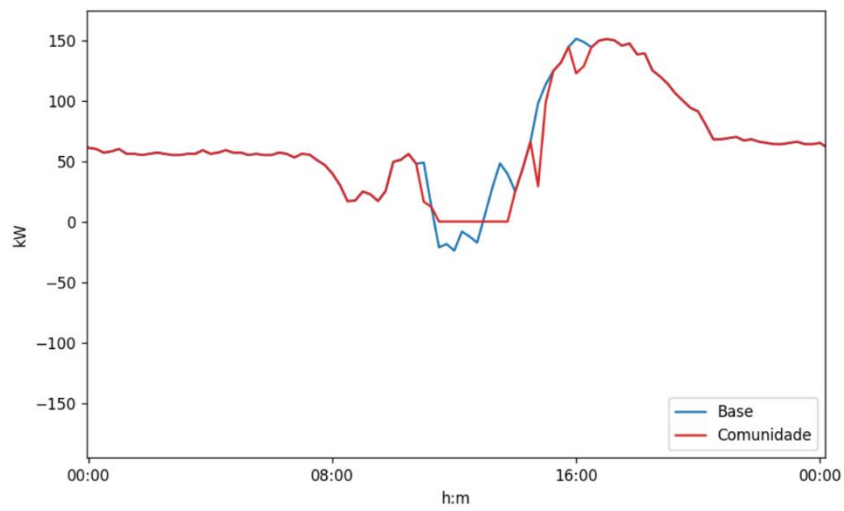


Figura 166 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quarta-feira

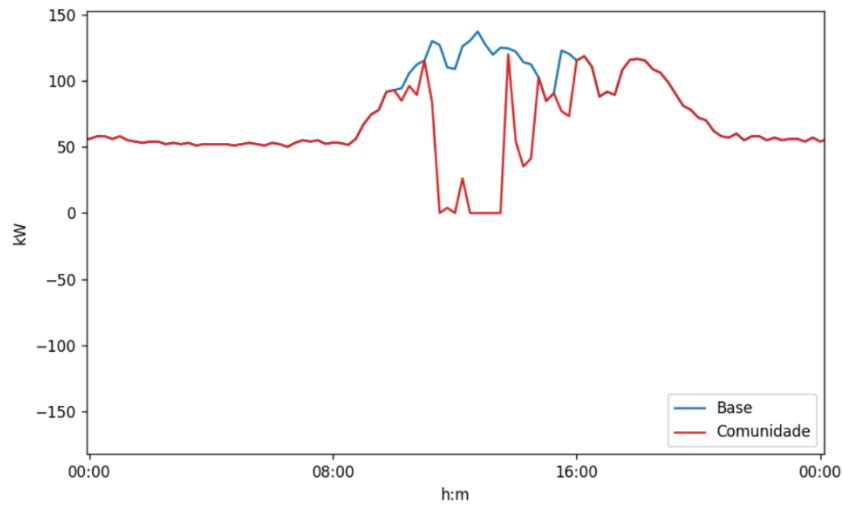


Figura 167 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quarta-feira

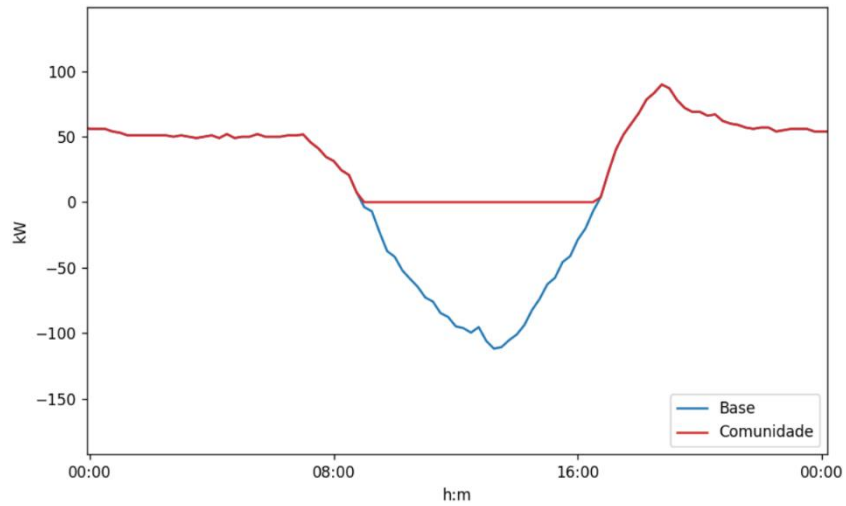


Figura 168 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quarta-feira

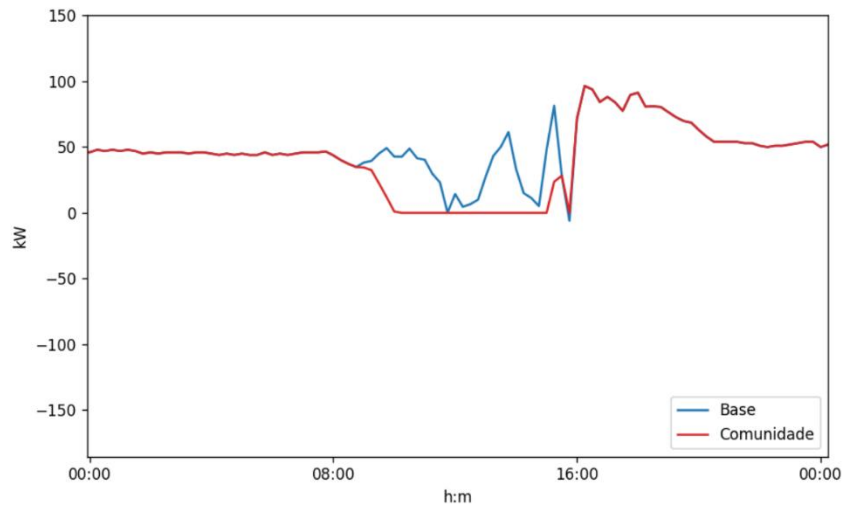


Figura 169 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quarta-feira

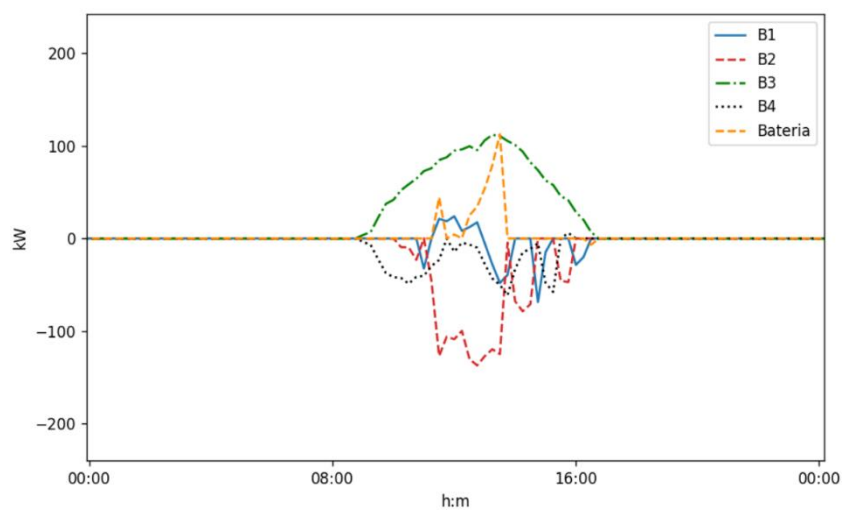


Figura 170 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, quarta-feira

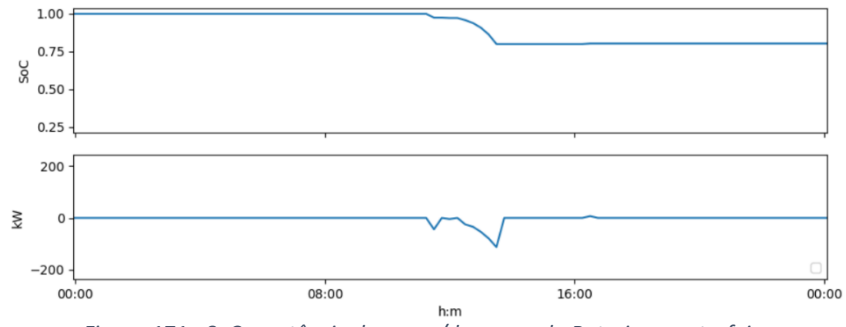


Figura 171 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quarta-feira

Quinta-feira:

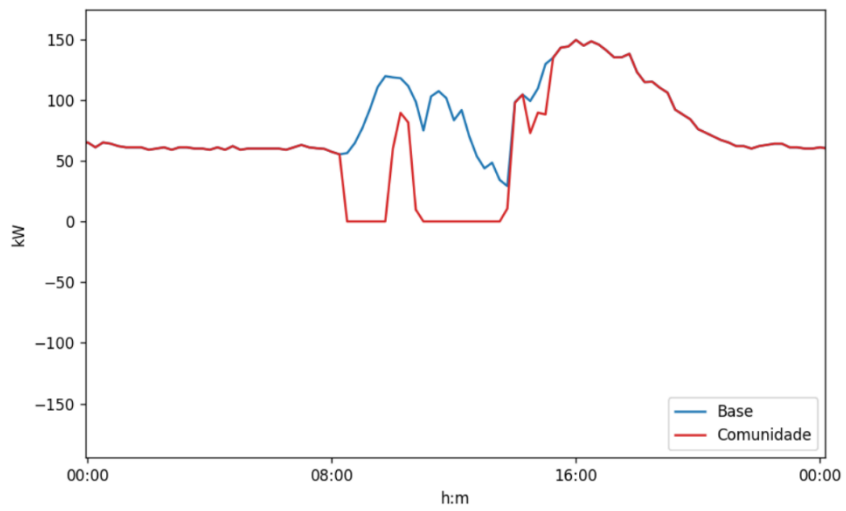


Figura 172 - Procura de energia líquida no Edifício 1, quinta-feira

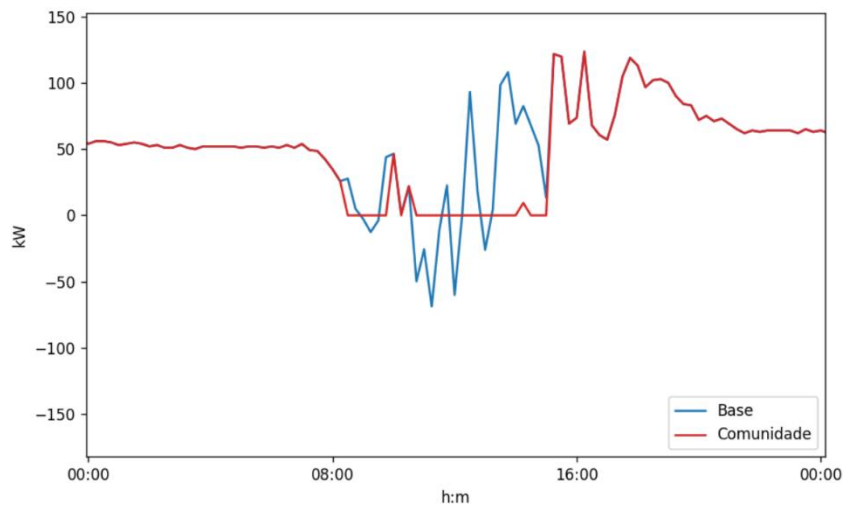


Figura 173 - Procura de energia líquida no Edifício 2, quinta-feira

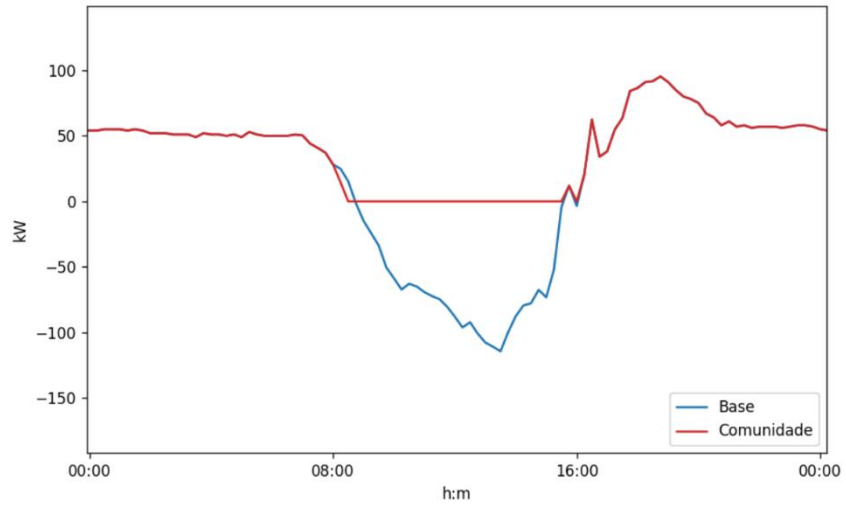


Figura 174 - Procura de energia líquida no Edifício 3, quinta-feira

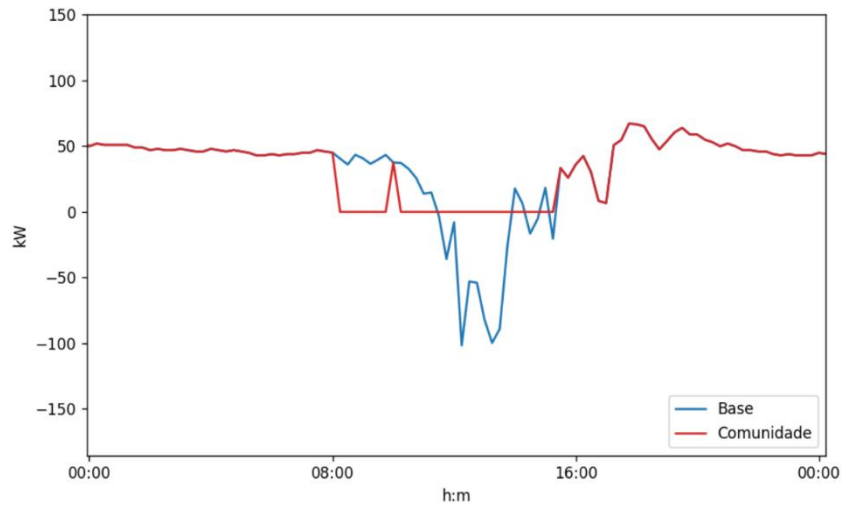


Figura 175 - Procura de energia líquida no Edifício 4, quinta-feira

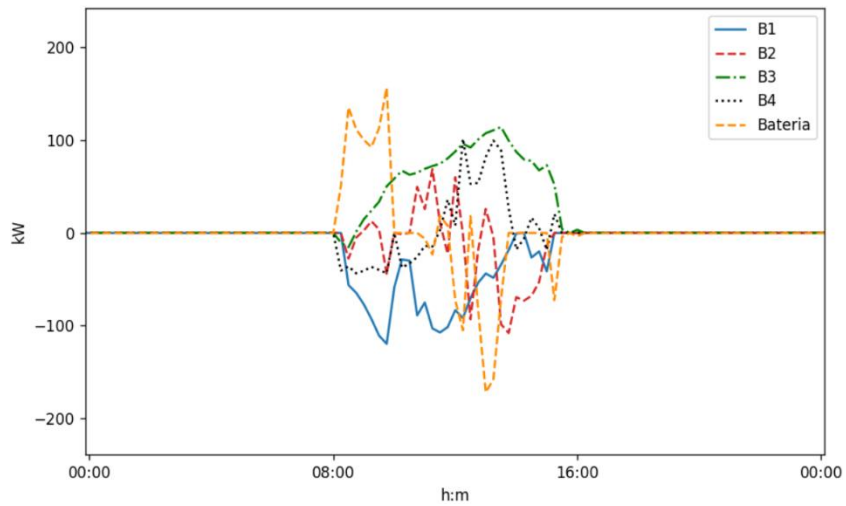


Figura 176 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, quinta-feira

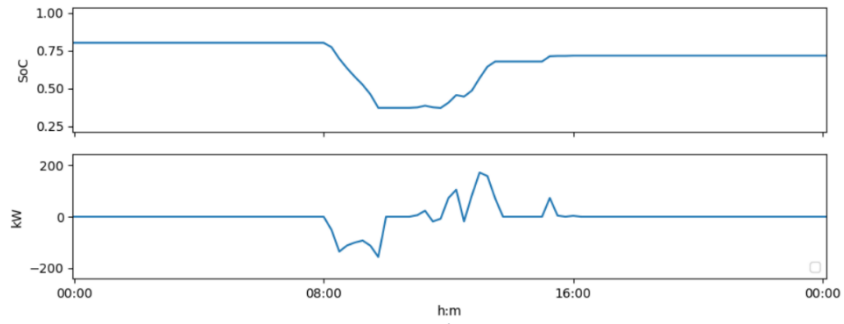


Figura 177 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quinta-feira

Sexta-feira:

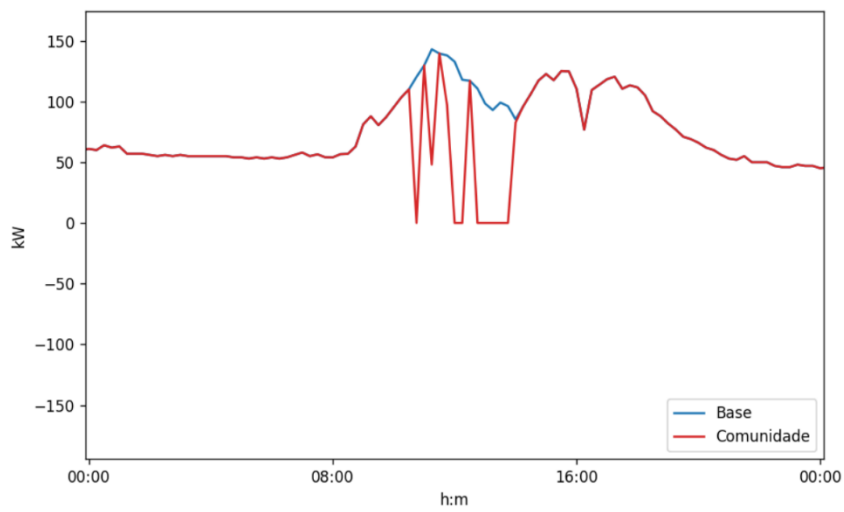


Figura 178 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sexta-feira

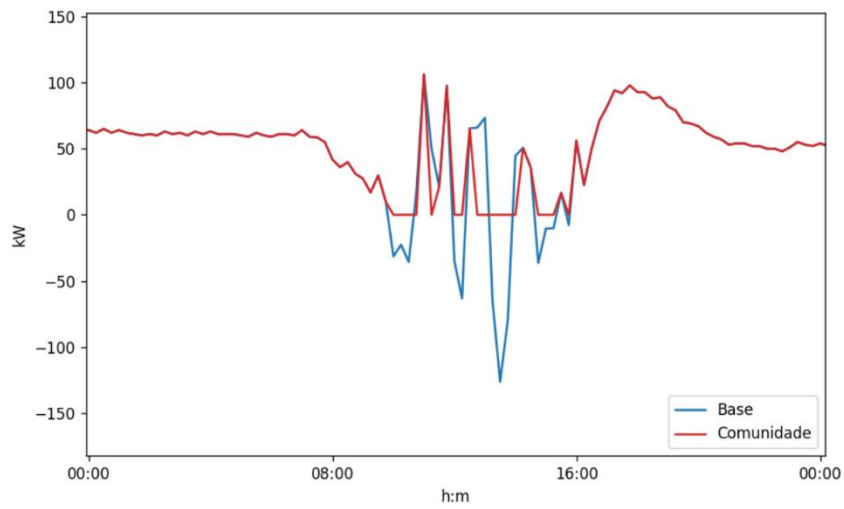


Figura 179 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sexta-feira

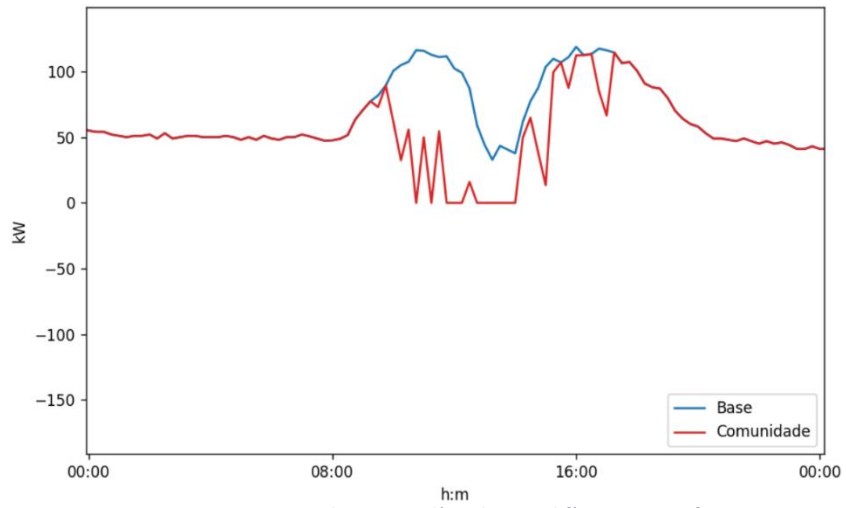


Figura 180 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sexta-feira

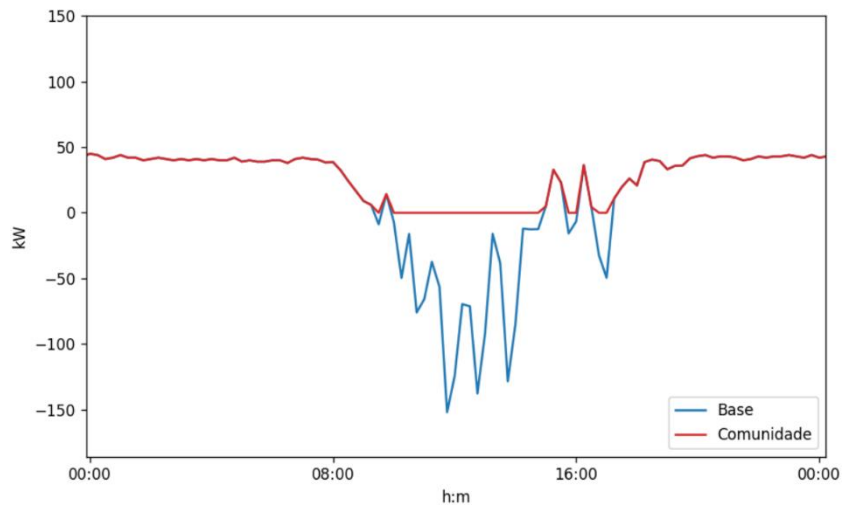


Figura 181 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sexta-feira

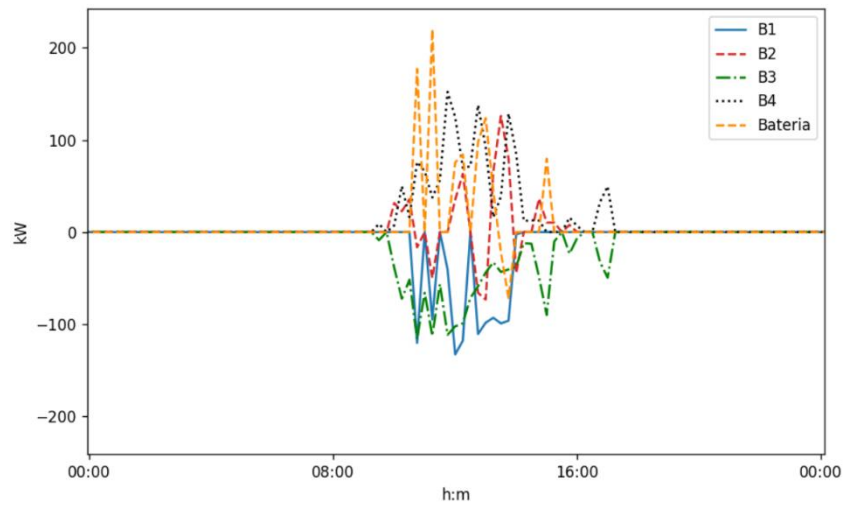


Figura 182 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, sexta-feira

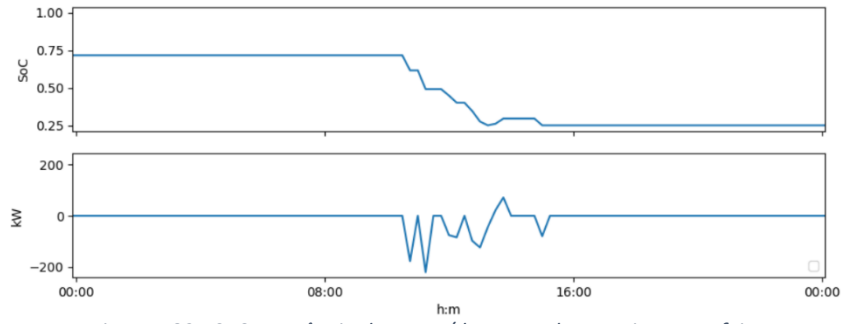


Figura 183 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sexta-feira

Sábado:

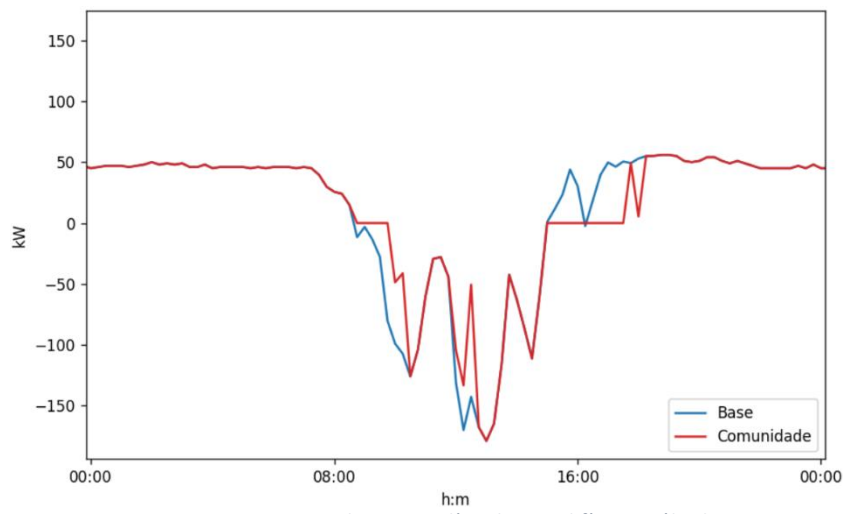


Figura 184 - Procura de energia líquida no Edifício 1, sábado

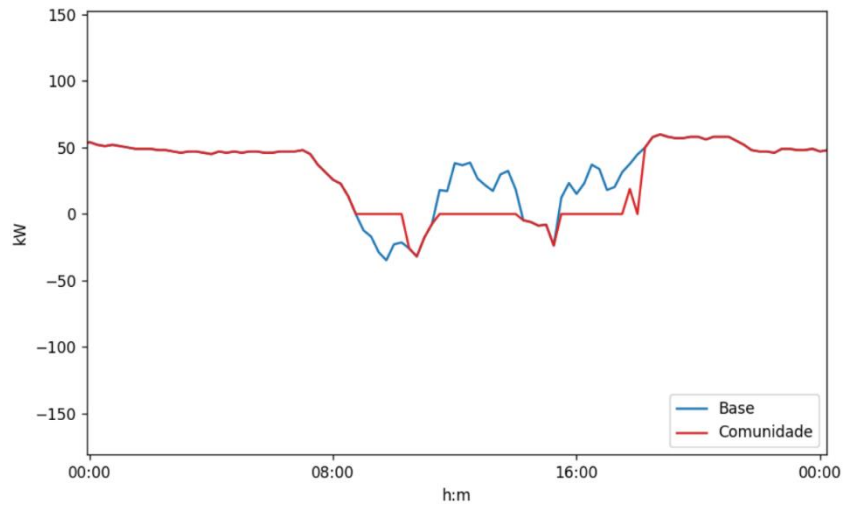


Figura 185 - Procura de energia líquida no Edifício 2, sábado

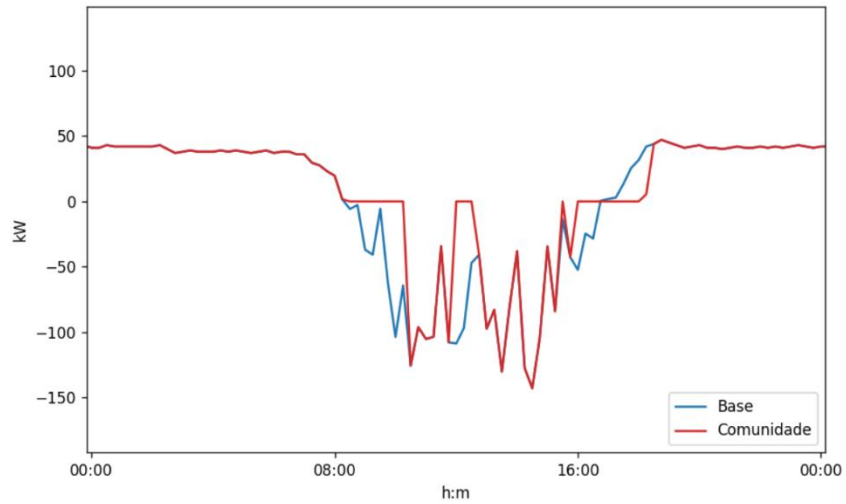


Figura 186 - Procura de energia líquida no Edifício 3, sábado

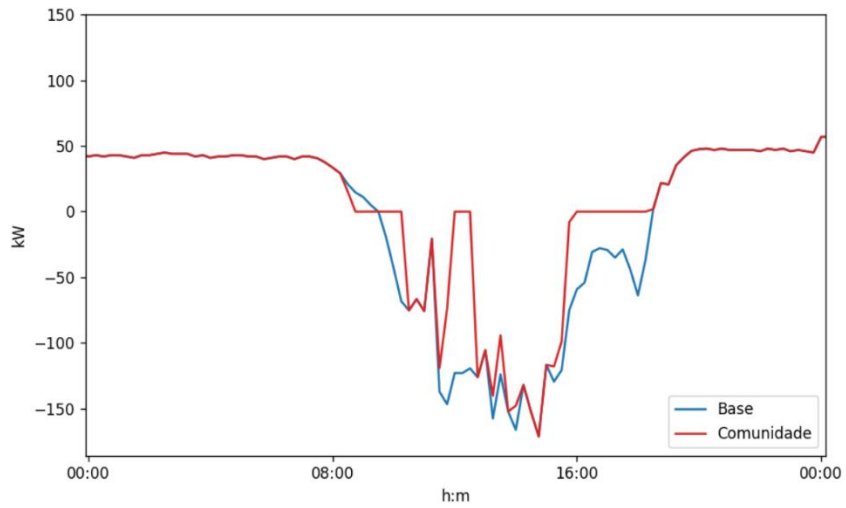


Figura 187 - Procura de energia líquida no Edifício 4, sábado

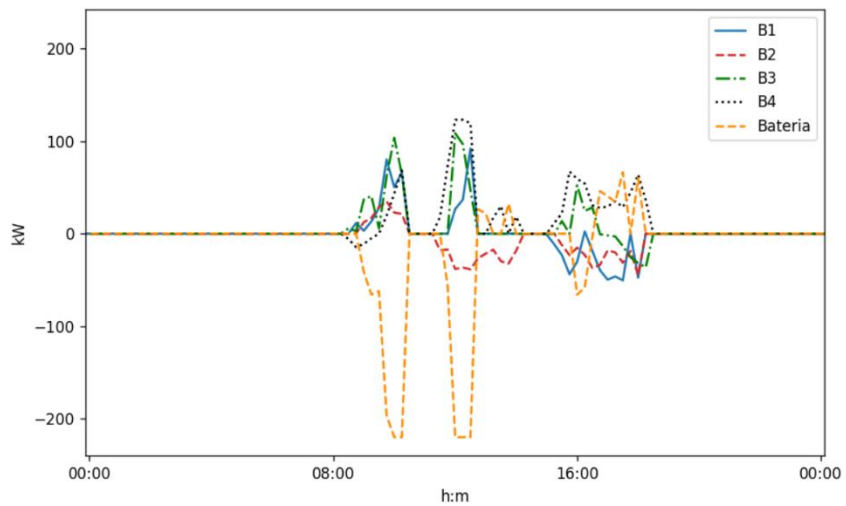


Figura 188 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, sábado

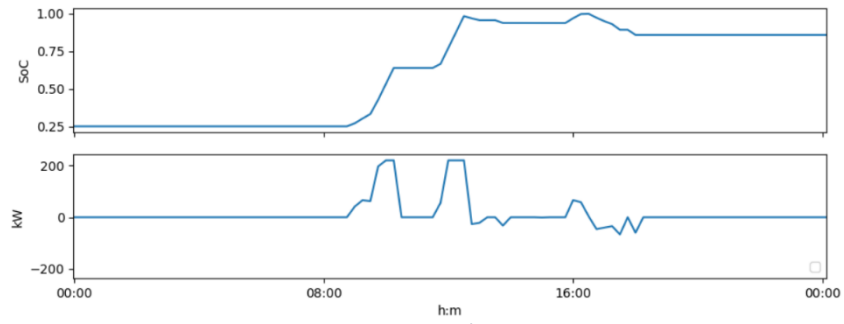


Figura 189 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sábado

Domingo:

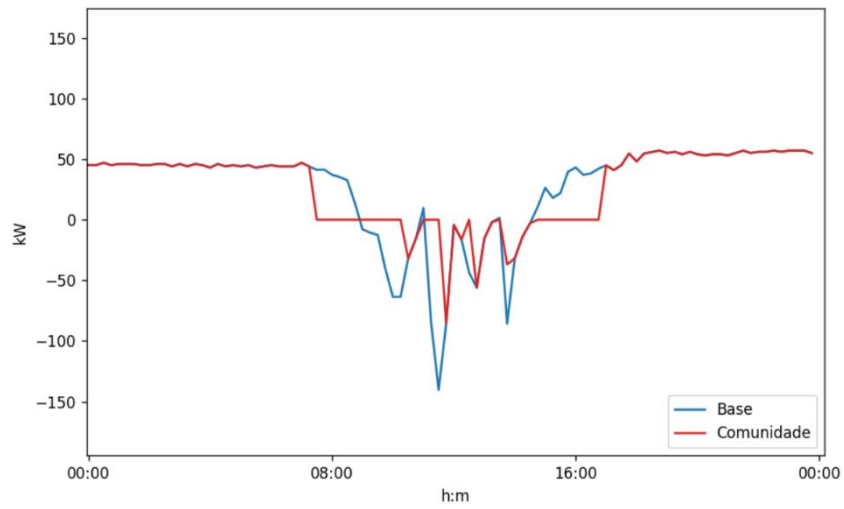


Figura 190 - Procura de energia líquida no Edifício 1, domingo

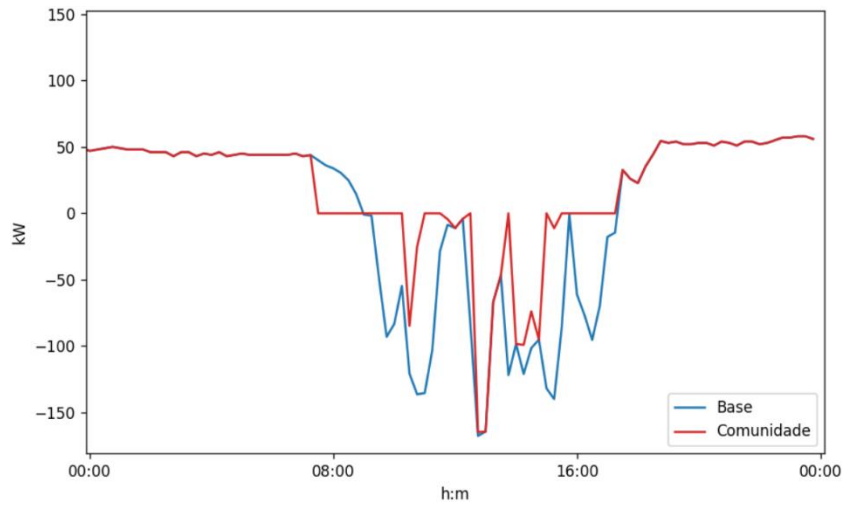


Figura 191 - Procura de energia líquida no Edifício 2, domingo

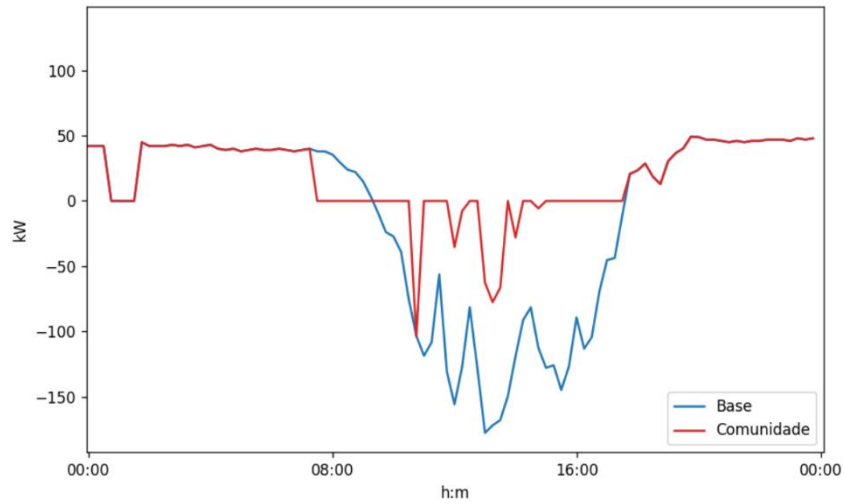


Figura 192 - Procura de energia líquida no Edifício 3, domingo

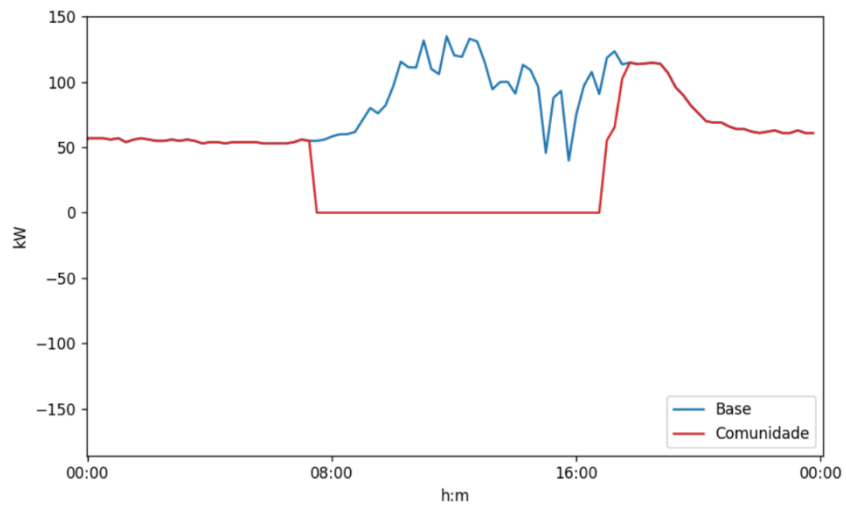


Figura 193 - Procura de energia líquida no Edifício 4, domingo

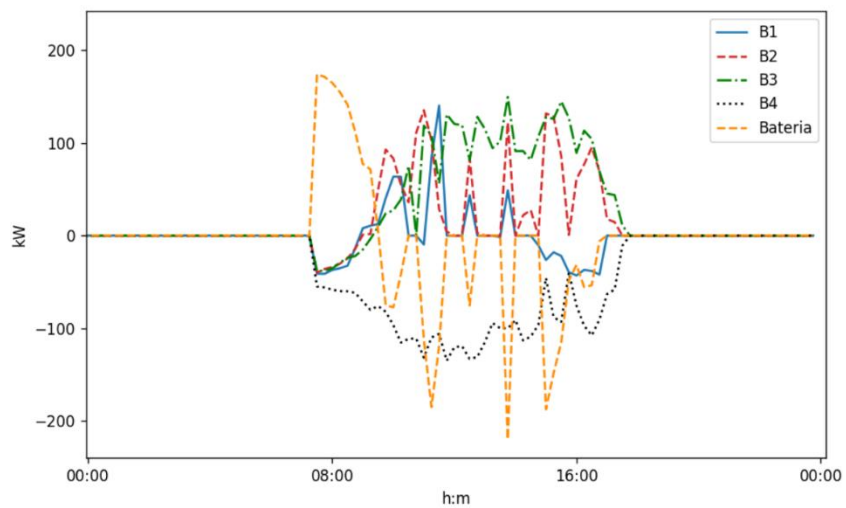


Figura 194 - Fluxo de Potências entre cada Edifício (e Bateria) e a Comunidade, domingo

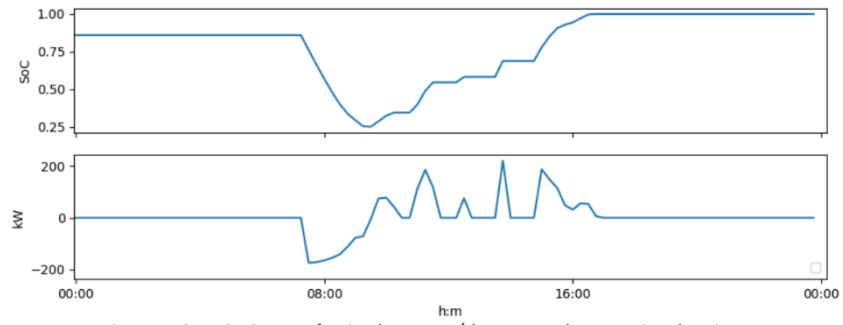


Figura 195 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, domingo

Comportamento da Bateria (com DoD máximo igual a 0,9)

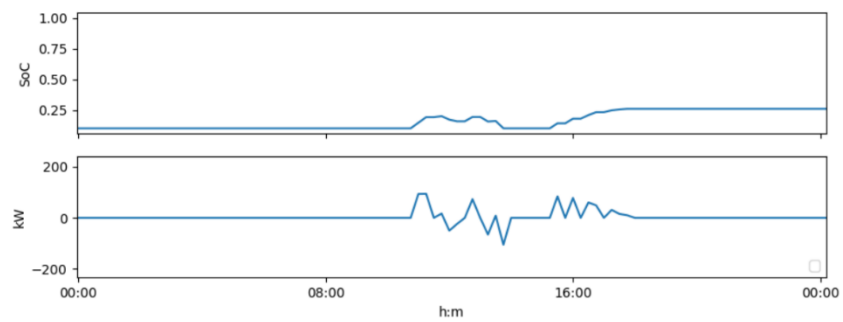


Figura 196 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, segunda-feira

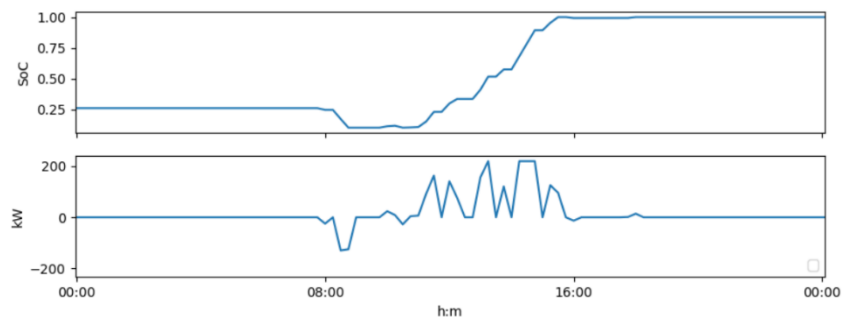


Figura 197 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, terça-feira

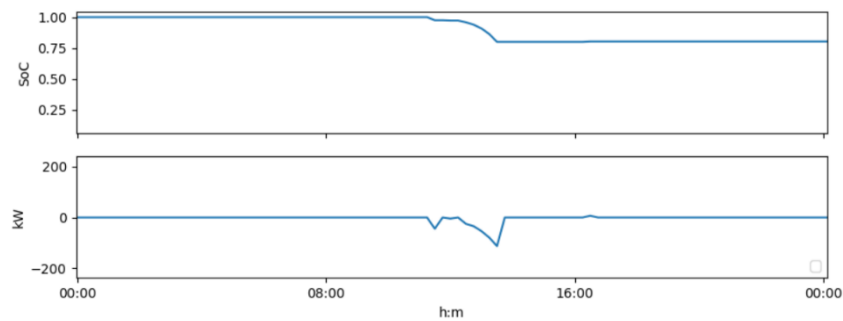


Figura 198 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quarta-feira

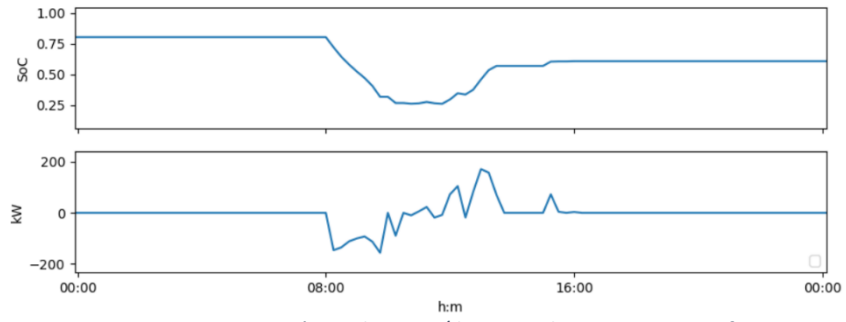


Figura 199 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, quinta-feira

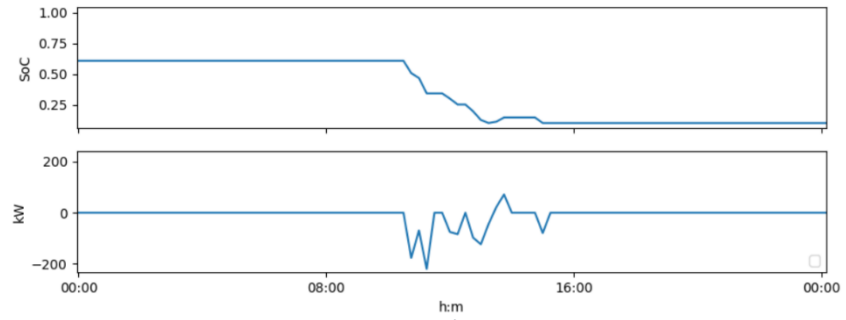


Figura 200 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sexta-feira

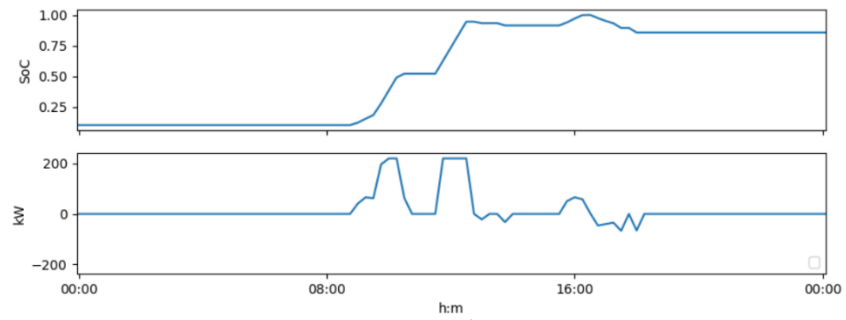


Figura 201 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, sábado

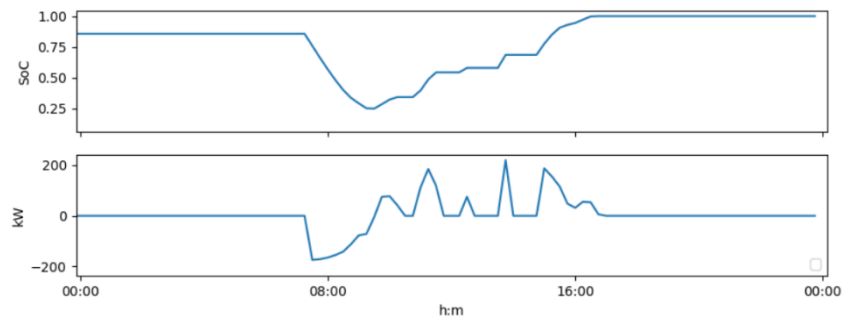


Figura 202 - SoC e potência de carga/descarga da Bateria, domingo