



Pedro Tiago de Jesus Viana Nunes Boto

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Gestão de Energia em Redes BT Perante Falha

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

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

Júri

Presidente: Prof. Doutor Nuno Filipe Silva Veríssimo Paulino
Arguente: Prof.^a Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto
Vogal: Prof. Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro, 2021

Gestão de Energia em Redes BT Perante Falha

Copyright © Pedro Tiago de Jesus Viana Nunes Boto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

Aos meus pais, amigos e restante família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todo o corpo docente da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, em particular aos professores do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, pela paciência e disponibilidade durante as ocasiões em que mais precisei.

Gostaria de agradecer ao Professor Pedro Pereira, pela confiança em mim depositada para a realização deste estudo. Obrigado pela disponibilidade e apoio demonstrados no decorrer desta jornada. Dadas as circunstâncias, sei que não foi fácil.

Obrigado aos meus amigos Diogo Ferreira e Rui Martins por tornarem esta parte do meu percurso académico bastante divertida e cheia de momentos que recordarei para sempre. Um dia havemos de ir almoçar ao "Fórum" outra vez.

Obrigado a todos os que integram o meu grupo de amigos (os dois anteriores incluídos, mais uma vez) e com quem interajo regularmente (a ordem da enumeração em nada reflecte a importância de cada um): João Boto, André Palma, Diogo Cunha, João Pedro, Manuel Marabuto, João Tiago e Miguel Eloy. Obrigado por todos os momentos vividos ao longo destes anos (20 anos em alguns casos) e pelo apoio que me deram durante estes anos difíceis. Foram, sem dúvida, uma peça fundamental na manutenção da minha sanidade mental.

Agradeço também a todos os familiares: avós (em primeiro lugar, claro), primos e tios. Agradeço toda a confiança e apoio transmitidos, foram fundamentais, principalmente nos momentos mais difíceis.

Por último, e sem dúvidas os mais importantes, quero agradecer aos meus pais pelo apoio prestado durante todos estes anos e pelos valores transmitidos. Obrigado por me garantirem sempre o acesso à melhor qualidade de ensino.

*"Life is a shipwreck, but we must not forget to sing in the
lifeboats."
-Voltaire*

RESUMO

A rede eléctrica é uma infraestrutura chave para o funcionamento da nossa sociedade. O que era outrora um sistema centralizado e propício à propagação do efeito de pequenas falhas, está agora a tornar-se num sistema descentralizado com Geração Distribuída, destacando-se a utilização de Fontes de Energia Renováveis, não só para aproveitar melhor os recursos locais, mas também para satisfazer as metas de CO_2 . A implementação destas técnicas leva à criação de Micro-redes, nas quais é mais fácil gerir e corresponder a produção de energia às necessidades dos consumidores. Com o intuito de adicionar os consumidores aos modelos de gestão da rede eléctrica, surgiram os programas de Resposta da Procura, nos quais se analisa até que ponto a alteração dos comportamentos de utilização de cargas, Flexibilidade Energética, pode contribuir para a estabilização do estado da rede. A junção de todas estas tecnologias leva à criação de uma rede mais inteligente (*Smartgrid*) e resiliente.

Nesta dissertação propõe-se um modelo de gestão de energia de uma comunidade que se viu subitamente isolada da rede eléctrica, alimentada por um sistema fotovoltaico, incluindo bateria, instalado numa das habitações. Neste modelo considerou-se inicialmente apenas cargas de perfil deslocável e, posteriormente, um consumo base referente à iluminação. O acesso à utilização dos equipamentos teve por base um sistema justo de reservas, permitindo-se o agendamento das cargas de forma manual ou automática. Para proceder à análise de vários cenários de operação, criou-se uma plataforma de simulação.

Os resultados sugerem que é possível operar nas condições indicadas, ainda que com limitações significativas. No entanto, verifica-se que, mediante a realização de alterações quer ao sistema de geração/armazenamento da habitação quer ao número de instalações presentes na comunidade, é possível melhorar de forma considerável a performance do sistema, permitindo, potencialmente, a utilização de um conjunto maior e mais diversificado de cargas.

Palavras-chave: *Smartgrid*; Micro-redes; Geração Distribuída; Flexibilidade Energética; Resposta da Procura; Falhas na Rede Eléctrica; Resiliência.

ABSTRACT

The electric grid is a key infrastructure for the functioning of our society. What was once a centralized system and propitious to the propagation of the effect of small faults, is now becoming a decentralized system with Distributed Generation, highlighting the use of renewable energy sources, not only to make better use of local resources but also to meet the CO_2 targets. The implementation of these techniques leads to the creation of Microgrids, in which it is easier to manage and match energy production to the needs of consumers. To include consumers in the management models of the electricity network, Demand Response programs emerged, in which it is analyzed the extent to which changes in load utilization behaviors, Energy Flexibility, can contribute to the stabilization of the state of the grid. The combination of all these technologies leads to the creation of a smarter and more resilient network.

This dissertation proposes an energy management model for a community that was suddenly isolated from the electric grid, powered by a Photovoltaic, including battery, system installed in one of the houses. In this model, initially it was considered only loads with a shiftable profile and, later, a base consumption referring to lighting. Access to the use of appliances was based on a fair reservation system, allowing the scheduling of loads manually or automatically. To analyze various operating scenarios, a simulation platform was created.

The results suggest that it is possible to operate under the conditions indicated, albeit with great limitations. However, it appears that, by making changes to both the housing generation/storage system and the number of installations in the community, it is possible to considerably improve the system's performance, potentially allowing the use of a larger and more diverse set of loads.

Keywords: Smartgrid; Microgrid; Energy Flexibility; Demand Response; Electric Grid Faults; Resilience.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxiii
Siglas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação e Objectivos do Trabalho	3
1.3 Estrutura do Documento	4
2 Revisão da Literatura	7
2.1 Conceitos Fundamentais	7
2.1.1 Unidade de Geração/Produção	7
2.1.2 Carga	7
2.1.3 Fontes de Energia Renováveis	8
2.1.4 Rede de Baixa Tensão	8
2.2 Falhas na Rede Eléctrica	8
2.2.1 O Conceito de Resiliência	9
2.2.2 Métodos de Mitigação de Falhas	12
2.3 <i>Smartgrids</i> e Micro-redes: O que são, aplicações e técnicas de gestão . . .	13
2.3.1 <i>Smartgrids</i>	13
2.3.2 Micro-redes	17
2.4 Resposta da Procura	21
2.4.1 Flexibilidade Energética	23
2.4.2 Electrodomésticos de Perfil Deslocável: MLR, MSR e MLL	27
2.5 Considerações	31
3 Metodologia	33
3.1 Modelação de Cargas	33
3.2 Construção da Curva de Potência da Instalação Fotovoltaica	34
3.3 Modelação de Baterias para Armazenamento de Energia	36
3.4 Perfil de Carga de uma Entidade e de um Agregado	38

3.5	Flexibilidade Energética de Entidades e de Agregados	40
4	Implementação	43
4.1	Regras e Construção da Comunidade do Problema	43
4.2	Simulador de Consumos Eléctricos	45
4.2.1	Bibliotecas de Python Utilizadas	46
4.2.2	Definições de Simulação	47
4.2.3	Gráficos	51
4.2.4	Reservas Manuais	52
4.2.5	Reservas Automáticas	59
4.2.6	Electrodomésticos	61
4.2.7	Comparação de Simulações	63
4.2.8	Iluminação	64
5	Resultados	65
5.1	Perfil de Potência PV Gerado	65
5.2	Exemplo de Colocação de Reservas Manuais	67
5.3	Análise da Performance dos Cenários de Utilização da Bateria	70
5.3.1	Meses Frios	71
5.3.2	Meses Quentes	73
5.4	Efeito do Método de Colocação das Cargas na Performance do Sistema . .	76
5.5	Efeito da Potência PV vs. Capacidade Energética da Bateria da Instalação na Performance do Sistema	81
5.5.1	Instalação PV	82
5.5.2	Bateria	84
5.6	Cenário de Operação Admitindo Consumo Base Referente à Iluminação .	87
5.7	Cenário Admitindo Sistema de Geração e Armazenamento de Energia em Todas as Habitações	90
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	95
6.1	Conclusão	95
6.2	Trabalhos Futuros	97
	Bibliografia	99
I	PERFIS DE CARGA DA ILUMINAÇÃO E DOS ELECTRODOMÉSTICOS MO- DELADOS	105
II	DADOS PARA CONSTRUÇÃO DO PERFIL DE PRODUÇÃO PV	107
III	DADOS RESULTANTES DO QUESTIONÁRIO REALIZADO	121
IV	GRÁFICOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES REALIZADAS	125

IV.1 Anexos - Análise da Performance dos Cenários de Utilização da Bateria .	125
IV.2 Anexos - Efeito da Potência PV vs. Capacidade Energética da Bateria . . .	129
IV.3 Anexos - Cenário de Operação Admitindo Consumo Base Referente à Ilu- minação	132
IV.4 Anexos - Cenário Admitindo Sistema de Geração e Armazenamento de Energia em Todas as Habitações	134
V ARTIGO CIENTÍFICO ELABORADO NO ÂMBITO DA DISSERTAÇÃO	137

LISTA DE FIGURAS

2.1	Aproximação Triangular da Condição da Rede (adaptado de [8]).	10
2.2	Aproximação Trapezoidal da Condição da Rede (adaptado de [8]).	11
2.3	Aproximação em Escada da Condição da Rede (adaptado de [16]).	12
2.4	Exemplo do esquema de uma <i>Smartgrid</i> (SG).	14
2.5	Exemplos de Geração Distribuída (GD).	16
2.6	Exemplo do diagrama de uma Micro-rede (MR) híbrida com barramento AC e DC (adaptado de [25]).	19
2.7	Exemplo do diagrama de uma Micro-rede (MR) híbrida com um canal AC . .	19
2.8	Exemplo de cargas deslocáveis (adaptado de [40]).	24
2.9	Exemplo de cargas truncáveis (adaptado de [40]).	25
2.10	Representação gráfica da Flexibilidade Energética (FE). (a) diminuição de potência. (b) aumento de potência (adaptado de [44]).	27
2.11	Perfil de potência típico de uma Máquina de Lavar Roupas (adaptado de [45]).	29
2.12	Perfil de potência típico de uma Máquina de Lavar Louça (adaptado de [45]).	30
2.13	Perfil de potência típico de uma Máquina de Secar Roupas (adaptado de [45]).	30
3.1	Modelos para simulação de baterias de armazenamento de energia [52]. . . .	36
3.2	Exemplo de um fluxograma referente ao um processo de adição do perfil de carga de uma carga ao perfil de carga de uma entidade num ponto no tempo escolhido. T_a é a duração do período de análise e T_c é a duração de um ciclo da carga.	39
3.3	Exemplo de curvas de Flexibilidade Energética (FE) de um agregado.	41
4.1	Topologia adoptada na implementação.	44
4.2	Interface da aplicação desenvolvida.	45
4.3	Página de escolha das definições de simulação.	47
4.4	Fluxograma de carregamento de dados no simulador.	50
4.5	Fluxograma de cálculo da potência gerada pela instalação PV.	51
4.6	Exemplo de aplicação de interpolação aos dados obtidos após o cálculo da potência PV.	51
4.7	Página de colocação de reservas manuais.	53
4.8	Fluxograma de adição de consumo eléctrico.	53
4.9	Fluxograma de remoção de consumo eléctrico.	54

4.10 Fluxograma de controlo de carga da bateria.	55
4.11 Fluxograma de validação do perfil de carga da comunidade.	56
4.12 Fluxograma para colocação de uma reserva (simples).	57
4.13 Fluxograma para colocação de uma reserva (completa).	58
4.14 Página de colocação de reservas automáticas.	59
4.15 Fluxograma para colocação de reservas automaticamente.	61
4.16 Página com informação dos electrodomésticos.	61
4.17 Fluxograma para o cálculo da energia.	62
4.18 Perfil de carga da Máquina de Lavar Roupa (MLR).	62
4.19 Perfil de carga da Máquina de Secar Roupa (MSR).	63
4.20 Perfil de carga da Máquina de Lavar Louça (MLL).	63
4.21 Página de comparação de simulações.	63
4.22 Página para adição de iluminação às habitações da comunidade.	64
5.1 Perfil de radiação solar e temperatura obtidos a partir dos dados carregados referentes ao mês de Setembro.	66
5.2 Perfil de potência PV de uma instalação de 4kW e rendimento de 70% para o mês de Setembro.	66
5.3 Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria antes da colocação das reservas número 7 e 8.	68
5.4 Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após a colocação das reservas número 7 e 8, e consequente alteração da hora das reservas número 2 e 3.	69
5.5 Curvas de flexibilidade energética de cada uma das habitações da comunidade.	69
5.6 Perfil de potência PV referente ao mês de Janeiro.	71
5.7 Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Janeiro).	72
5.8 Número de cargas agendadas para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Janeiro).	73
5.9 Perfil de potência PV referente ao mês de Agosto.	74
5.10 Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Agosto).	75
5.11 Número de cargas agendadas para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Agosto).	75
5.12 Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas de acordo com os períodos preferidos e alternativos ("Sim 1").	77
5.13 Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas o mais cedo possível ("Sim 2").	78
5.14 Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas em torno do meio-dia ("Sim 3").	79

5.15	Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas o mais tarde possível ("Sim 4").	79
5.16	Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance dos diferentes modos de agendamento das cargas (Janeiro). .	80
5.17	Número de cargas agendadas para comparação da performance dos diferentes modos de agendamento das cargas (Janeiro).	81
5.18	Perfis de potência das instalações PV simuladas (Janeiro).	82
5.19	Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance das instalações PV simuladas (Janeiro).	83
5.20	Número de cargas agendadas para comparação da performance das instalações PV simuladas (Janeiro).	84
5.21	Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance das baterias simuladas (Janeiro).	85
5.22	Perfis de carga das baterias simuladas.	86
5.23	Número de cargas agendadas para comparação da performance das baterias simuladas (Janeiro).	86
5.24	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria admitindo iluminação e colocando as cargas de acordo com os períodos preferidos de consumo (Janeiro).	88
5.25	Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade admitindo iluminação (Janeiro).	89
5.26	Número de cargas agendadas admitindo iluminação (Janeiro).	90
5.27	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria admitindo geração e armazenamento de energia em todas as habitações e colocando as cargas de acordo com os períodos preferidos de consumo (Janeiro). .	92
5.28	Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade admitindo geração e armazenamento de energia em todas as habitações (Janeiro).	92
IV.1	Perfil de carga da comunidade e perfil de produção PV utilizando o cenário 1 nos meses frios ("Sim 1").	125
IV.2	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 2 nos meses frios ("Sim 2").	126
IV.3	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 3 nos meses frios ("Sim 3").	126
IV.4	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 4 nos meses frios ("Sim 4").	126
IV.5	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 5 nos meses frios ("Sim 5").	127
IV.6	Perfil de carga da comunidade e perfil de produção PV utilizando o cenário 1 nos meses quentes ("Sim 1").	127

IV.7	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 2 nos meses quentes ("Sim 2").	127
IV.8	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 3 nos meses quentes ("Sim 3").	128
IV.9	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 4 nos meses quentes ("Sim 4").	128
IV.10	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 5 nos meses quentes ("Sim 5").	128
IV.11	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a instalação PV de 2kW ("Sim 1").	129
IV.12	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a instalação PV de 4kW ("Sim 2").	129
IV.13	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a instalação PV de 6kW ("Sim 3").	130
IV.14	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 1,5kWh ("Sim 1").	130
IV.15	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 3kWh ("Sim 2").	130
IV.16	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 6kWh ("Sim 3").	131
IV.17	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 9kWh ("Sim 4").	131
IV.18	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 2").	132
IV.19	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 3").	132
IV.20	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 4").	133
IV.21	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 2").	134
IV.22	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 3").	134
IV.23	Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 4").	135
V.1	Artigo científico: "PV Based Load Management System to Mitigate Power Grid Faults".	138

LISTA DE TABELAS

2.1	Exemplos de aplicações de Micro-redes (MRs).	18
4.1	Módulo PV escolhido.	49
5.1	Tabela com as reservas colocadas manualmente.	67
5.2	Número de cargas utilizadas pela comunidade nos meses frios.	71
5.3	Número de cargas utilizadas pela comunidade nos meses quentes.	74
I.1	Perfis de carga dos electrodomésticos modelados	105
I.2	Perfil de carga referente à iluminação de uma habitação.	106
II.1	Dados da Velocidade Média do Vento	107
II.2	Dados de Radiação Solar - Janeiro	108
II.3	Dados de Radiação Solar - Fevereiro	109
II.4	Dados de Radiação Solar - Março	110
II.5	Dados de Radiação Solar - Abril	111
II.6	Dados de Radiação Solar - Maio	112
II.7	Dados de Radiação Solar - Junho	113
II.8	Dados de Radiação Solar - Julho	114
II.9	Dados de Radiação Solar - Agosto	115
II.10	Dados de Radiação Solar - Setembro	116
II.11	Dados de Radiação Solar - Outubro	117
II.12	Dados de Radiação Solar - Novembro	118
II.13	Dados de Radiação Solar - Dezembro	119
III.1	Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Frios I	121
III.2	Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Frios II	122
III.3	Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Frios III	122
III.4	Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Quentes I	122
III.5	Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Quentes II	123
III.6	Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Quentes III	123

SIGLAS

AC	<i>Alternate Current.</i>
ACE	Adição de Consumo Eléctrico.
AFI	<i>Appliance Flexibility Index.</i>
API	<i>Appliance Priority Index.</i>
ASI	<i>Appliance Satisfaction Index.</i>
BT	Baixa Tensão.
CC	Centro de Controlo.
CCB	Controlo de Carga da Bateria.
CE	Comissão Europeia.
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques.</i>
DC	<i>Direct Current.</i>
EDP	Energias de Portugal.
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.
EUA	Estados Unidos da América.
FE	Flexibilidade Energética.
FECR	<i>Federal Energy Regulatory Commission.</i>
FENRs	Fontes de Energia Não Renováveis.
FERs	Fontes de Energia Renováveis.
FIAD	<i>Flexibility Index of Aggregate Demand.</i>
GD	Geração Distribuída.
HPCI	<i>High Power Consumption Index.</i>
MLL	Máquina de Lavar Louça.
MLR	Máquina de Lavar Roupa.

MR	Micro-rede.
MRs	Micro-redes.
MSR	Máquina de Secar Roupas.
PFL	<i>Percentage Flexibility Level.</i>
PSI	<i>Power Similarity Index.</i>
PV	<i>Photovoltaic.</i>
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System.</i>
RCE	Remoção de Consumo Eléctrico.
RF	Radiofrequência.
RP	Resposta da Procura.
SAEs	Sistemas de Armazenamento de Energia.
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition.</i>
SG	<i>Smartgrid.</i>
SGs	<i>Smartgrids.</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação.
TRC	Tentativa de Reserva Completa.
TRS	Tentativa de Reserva Simples.
UE	União Europeia.
UPSs	<i>Uninterrupted Power Supplies.</i>
VEs	Veículos Eléctricos.
VPC	Validação de Perfil de Carga.

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Em 2018, Portugal foi vítima do efeito de vários eventos naturais agravados (tempestades Emma, Gisele e Leslie e incêndio de Monchique). Segundo o Expresso, nesse ano, verificou-se uma degradação da qualidade de serviço da rede eléctrica, levando a um aumento do valor das compensações em 77% face ao ano anterior. Dos 648 mil euros pagos, 491 mil foram dados a clientes de Baixa Tensão (BT) normal, ou seja, clientes domésticos e pequenas empresas [1].

No outro lado do Atlântico, em 2012, nos Estados Unidos da América (EUA), devido ao devastador furacão *Sandy*, mais de 8 milhões de pessoas ficaram sem acesso a electricidade, fruto da inundação de subestações e queda de linhas de transporte, derrubadas por árvores. Este foi o evento que provocou mais danos na rede eléctrica dos EUA, até ao ano de 2018 [2].

O termo rede significa, normalmente, um sistema eléctrico que integra todas, ou algumas, das seguintes operações: produção de electricidade, transporte de electricidade, distribuição de electricidade, e controlo de electricidade [3].

Originalmente, a rede de energia eléctrica foi projectada com o objectivo de movimentar electricidade de forma unidireccional. Isto quer dizer que, esta funcionava "como um rio", ou seja, a produção de energia realizava-se a montante, em unidades de produção grandes e centralizadas. A energia era depois distribuída para jusante, ao longo de vários quilómetros de cabo, até aos consumidores finais, realizando-se a correspondência entre a energia produzida e a pedida pelos consumidores, através de alterações no modo de funcionamento das centrais de produção, ou activação de unidades de emergência, possibilitado pelo pequeno (relativo ao actual) volume de cargas eléctricas conectadas à rede. Este método é ainda hoje utilizado, no entanto, com o aparecimento de novas

formas de produzir energia eléctrica, através de Fontes de Energia Renováveis (FERs), e a necessidade de obedecer a metas estritas de emissões de CO_2 , verifica-se uma alteração na forma como a rede é gerida e controlada. Para além disso, o perfil unidireccional da rede prevê um escalamento dos efeitos de falhas, dado que estes se espalham na direcção dos utilizadores (p.e. uma falha num posto de transformação resulta no corte de energia a todas as cargas a ele ligadas, caso não exista redundância).

Com o objectivo de otimizar a rede eléctrica, reduzindo perdas e descentralizando a gestão/operação, surgiu o conceito das redes inteligentes (*Smartgrids* (SGs)). Estas, aliadas aos constantes avanços tecnológicos, possibilitam a integração de novas formas de gerar energia eléctrica, a partir de FERs. Estas fontes são intrinsecamente imprevisíveis, pois dependem das condições meteorológicas para fornecerem energia suficiente que satisfaça as necessidades de uma sociedade como a nossa; evoluída e regida pela imprescindibilidade de acesso a energia eléctrica. No entanto, este acesso à electricidade não passa apenas por garantir que se tem capacidade de produção para saciar as nossas necessidades, sendo necessário assegurar a entrega da mesma aos consumidores, com a melhor confiabilidade e qualidade possível.

Conceitos como Geração Distribuída (GD) e Micro-redes (MRs) surgem como resposta e ferramenta para melhorar a qualidade do serviço e da energia entregues aos utilizadores, visto que são mais fáceis de controlar, atendendo às condições e necessidades locais, do que uma rede baseada num modelo de produção centralizada. O decréscimo acentuado do preço da electricidade proveniente de FERs, verificado na última década, tem facilitado a implementação e utilização destes sistemas. A tecnologia onde se observou uma redução de custos mais acentuada foi a tecnologia solar *Photovoltaic* (PV), apresentando uma queda de 82% em relação ao ano de 2010 [4]. No sector residencial, por exemplo, esta tecnologia é utilizada para alimentar as habitações dos consumidores, permitindo que estes vendam ou comprem energia à rede, consoante as suas necessidades. Isto provoca uma alteração na forma de gerir a rede, ou seja, esta deixa de ser um sistema unidireccional, passando a ser bidireccional. Devido à natureza das FERs, é necessário implementar novas metodologias de controlo de cargas e de consciencialização dos consumidores, por forma a se aproveitar ao máximo as alturas do dia com maior geração de energia. Surgem assim os conceitos de Resposta da Procura (RP) e Flexibilidade Energética (FE).

A RP prevê a integração dos consumidores na gestão da rede eléctrica da qual fazem parte, através da análise dos seus comportamentos e tipo de cargas eléctricas que utilizam no seu dia a dia, conseguindo uma métrica da FE que estes oferecem. Ou seja, toma partido da disponibilidade dos consumidores para alterarem os seus comportamentos em prol do bom funcionamento da rede e da potência produzida disponível a dada altura do dia. Para se realizarem estes programas, é necessário também entender como funcionam os electrodomésticos e quais os perfis de carga que estes apresentam, bem como estudar potenciais modificações que os tornem mais "inteligentes" e eficientes.

A aplicação destes sistemas à rede visa assim auxiliar a criação de um sistema não só mais robusto, mas também mais resiliente, focando-se tanto na prevenção da ocorrência

de falhas, como também na implementação de medidas de rápida regeneração do serviço após eventos catastróficos.

1.2 Motivação e Objectivos do Trabalho

Como referido na secção anterior, a rede eléctrica encontra-se exposta a várias ameaças que podem comprometer o seu bom funcionamento, resultando em falhas que afectam, na generalidade, drasticamente a população, seja através de uma falha localizada, ou de uma falha em grande escala. Sendo assim, com o acréscimo de novas tecnologias e modos de operação aplicados à rede, pode-se iniciar a incubação de inúmeras metodologias de apoio e fortalecimento, culminando na criação de uma rede mais resiliente.

Posto isto, o objectivo desta dissertação consiste no estudo da viabilidade da utilização de sistemas de autoconsumo (instalação PV mais bateria) para mitigar, de certa forma, os efeitos de uma falha na rede eléctrica, a qual resultou num corte total do fornecimento de energia eléctrica a uma comunidade. Para a concretização deste estudo é necessário realizar as etapas que se apresentam de seguida.

Primeiramente, é preciso caracterizar o sistema de produção/armazenamento de energia e definir quais as cargas que podem ser utilizadas pelos consumidores. Considera-se, numa fase inicial, que apenas uma das habitações da comunidade tem tal sistema e, devido às limitações de potência do sistema de autoconsumo e ao elevado número de cargas presentes numa habitação, apenas se vai estudar o efeito da utilização das seguintes cargas: Máquina de Lavar Roupa (MLR), Máquina de Secar Roupa (MSR) e Máquina de Lavar Louça (MLL). Estas cargas foram escolhidas pela sua flexibilidade, visto permitirem que o seu funcionamento seja previamente agendado e alterado, se necessário, e se o ciclo de funcionamento ainda não tiver começado.

Em segundo lugar, para "popular" esta comunidade fictícia, é necessário realizar um questionário, para perceber os hábitos de cada uma das habitações. A partir deste, é possível identificar quais dos três electrodomésticos abordados estão presentes em cada uma das habitações e quais os períodos horários preferidos e alternativos de utilização de cada um deles.

Depois, é necessário criar um conjunto de regras que permitam a utilização da fonte de energia de uma forma justa para todas as habitações da comunidade. Para tal, propõe-se um sistema baseado na reserva prévia do funcionamento de cada uma das cargas das habitações da comunidade.

De seguida, para simular vários cenários de gestão das necessidades energéticas da comunidade, constrói-se um simulador, para permitir a comparação entre esses diferentes cenários de operação. Para a construção deste serão necessárias metodologias que permitam a representação virtual do funcionamento dos diferentes componentes do sistema: instalação PV, bateria e cargas.

Por fim, começa-se pela análise do sistema em várias alturas do ano (meses frios e meses quentes), da performance de vários métodos de controlo da carga na bateria e do efeito

que a forma como as cargas são colocadas pode ter na performance do sistema. Depois, observa-se qual dos elementos, PV ou bateria, apresentam uma maior influência na performance do sistema. Analisam-se também alguns casos extra de operação, tentando-se perceber que tipo de alterações seriam necessárias fazer à configuração inicial do sistema de geração e de armazenamento de energia para melhorar a utilidade da metodologia desenvolvida. No primeiro caso, considera-se, para além das cargas já mencionadas, um consumo diário base referente à iluminação. No segundo caso, admite-se que todas as habitações têm instalado o sistema de autoconsumo e que estas estão conectadas numa configuração semelhante a uma Micro-rede (MR).

Para concluir esta secção, menciona-se ainda um artigo científico elaborado no âmbito do trabalho desenvolvido na presente dissertação, intitulado de "PV Based Load Management System to Mitigate Power Grid Faults" (anexo V).

1.3 Estrutura do Documento

Para além do presente capítulo introdutório, esta dissertação encontra-se dividida em cinco outros capítulos:

No capítulo 2, Revisão da Literatura, apresentam-se os principais temas com os quais a presente dissertação se relaciona. Em primeiro lugar, em Conceitos Fundamentais, abordam-se algumas definições teóricas utilizadas com frequência ao longo do texto. Depois, em Falhas na Rede Eléctrica, salientam-se as principais causas para essas falhas, apresenta-se o conceito de resiliência e mencionam-se alguns métodos de mitigação de falhas. A seguir, introduzem-se os conceitos de *Smartgrid* (SG) e de MR, identificando-se as suas aplicações e alguns métodos de gestão das mesmas. Por fim, apresenta-se a temática de RP, abordando-se os conceitos de FE e identificando-se três electrodomésticos de perfil deslocável: MLR, MSR e MLL, os quais vão ser utilizados neste trabalho.

No capítulo 3, Metodologia, explicam-se os métodos teóricos adoptados na modelação dos diferentes componentes do sistema proposto (cargas, painel PV e bateria) e as metodologias utilizadas para definir os perfis de carga e as curvas de FE da comunidade.

No capítulo 4, Implementação, apresentam-se as regras utilizadas na gestão das cargas da comunidade, a forma como a comunidade foi "construída" e o simulador desenvolvido para efeitos de simulação de vários cenários de operação. Relativamente ao simulador, serão explicadas as suas principais funcionalidades e como estas foram implementadas.

No capítulo 5, Resultados, são apresentados os resultados de várias simulações que permitem: (1) ilustrar o funcionamento das ferramentas chave do simulador; (2) determinar qual dos cenários de operação da bateria permite obter um melhor aproveitamento da energia disponível; (3) analisar qual das características do sistema provedor de energia, potência PV instalada ou capacidade energética da bateria, tem uma maior influência no número de agendamentos possíveis de realizar dentro do período de análise; (4) analisar qual o impacto da consideração de um consumo base referente à iluminação no número de

reservas que podem ser colocadas; e (5) qual o comportamento do sistema considerando que todas as habitações da comunidade têm instalado um sistema de autoconsumo.

Por último, no capítulo 6, Conclusões e Trabalhos Futuros, apresentam-se não só as conclusões retiradas deste estudo, mas também algumas ideias sobre possíveis desenvolvimentos e melhorias futuras deste tipo de abordagem à mitigação de falhas na rede eléctrica, recorrendo a instalações para autoconsumo presentes nas habitações.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Conceitos Fundamentais

Nesta secção, serão apresentadas as definições teóricas de alguns conceitos que irão ser mencionados com frequência ao longo desta revisão da literatura. Estas definições são as propostas em [3].

2.1.1 Unidade de Geração/Produção

Todos os sistemas eléctricos necessitam de uma ou mais unidades de geração/produção, as quais são fontes de energia eléctrica. Potência *Direct Current* (DC) pode ser fornecida por baterias, células de combustível, ou células PV. Por outro lado, potência *Alternate Current* (AC) é tipicamente fornecida por unidades com um gerador síncrono, cuja rotação do rotor é realizada através de vapor de água superaquecido (queima de combustíveis fósseis como o carvão, gás natural e petróleo), de água (centrais hidroeléctricas) ou de vento (turbinas eólicas).

2.1.2 Carga

Cargas são todos os aparelhos que consomem energia eléctrica para realizar uma função. Estas cargas vão desde electrodomésticos a maquinaria industrial, e são alimentadas pelas unidades de produção através das linhas de transporte de energia eléctrica da rede. À alteração da potência, ou corrente, consumida pelas cargas ao longo do tempo dá-se o nome de perfil de carga.

A potência activa (P) de uma carga individual, de um conjunto de cargas, ou do sistema como um todo é definida por

$$P = S \cos \phi \quad (2.1)$$

onde S é a potência aparente e $\cos \phi$ é o factor de potência.

2.1.3 Fontes de Energia Renováveis

A energia renovável é energia que provem de recursos naturais (luz solar, vento, chuva, marés e calor geotérmico) que são renováveis, ou seja, têm uma taxa de reposição muito mais alta do que a verificada nos recursos não renováveis (combustíveis fósseis). No entanto, estas fontes são diferentes das fontes convencionais, na medida em que são, geralmente, difíceis de prever. Por isso, estão normalmente conectadas aos sistemas de distribuição, e não ao sistema de transporte em si.

A maioria das FERs são originadas de forma directa ou indirecta pelo sol, continuando a ser repostas desde que o sol brilhe. Os exemplos mais utilizados são:

- Solar;
- Vento;
- Água;
- Biomassa;
- Geotérmica.

2.1.4 Rede de Baixa Tensão

A Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) define que a rede de distribuição em BT é a rede que entrega energia eléctrica aos consumidores domésticos e pequenas empresas. Esta rede funciona a 400/230V, e é composta pelas linhas aéreas e cabos enterrados ligados a postos de transformação e às instalações dos consumidores, quer estas sejam de consumo ou de produção. Para além disso, fazem ainda parte da rede de distribuição os equipamentos de comando, protecção e medição (p.e. disjuntores, contadores, etc.) [5].

2.2 Falhas na Rede Eléctrica

Ao fim de séculos de inovação tecnológica, o ser Humano conseguiu criar uma sociedade na qual se consegue, na generalidade, viver de forma segura e confortável, graças às infraestruturas críticas que a suportam. O U.S. Department of Homeland Security identifica 16 sectores críticos, dos quais se destacam: fornecimento e tratamento de águas, telecomunicações, transportes, serviços de emergência e fornecimento de energia [6]. Estas infraestruturas estão actualmente interconectadas, conduzindo à possibilidade de uma pequena falha se propagar [7]. É exemplo deste efeito dominó a dependência que todos os sectores têm da disponibilidade de energia eléctrica, sendo exemplos: a alimentação

de accionamentos de bombagem de água, a alimentação dos circuitos de telecomunicações, a energização de linhas ferroviárias e a alimentação de equipamentos médicos, entre muitos outros.

As principais causas que levam à ocorrência de falhas na rede eléctrica incluem: eventos naturais, erros e ataques. Os eventos naturais são os mais comuns, uma vez que a rede está, tipicamente, exposta aos elementos. Seguem-se as falhas nos equipamentos, erros de operação e contactos acidentais (animais e pessoas). Por fim, os ataques intencionais quer físicos quer informáticos [8]. Com a necessidade de atribuir o máximo de fiabilidade/confiabilidade à rede, esta foi projectada de forma a resistir o melhor possível ao efeito das ameaças mais comuns (vento, chuva, calor, frio, contacto com animais, etc.), no entanto, quando estas ameaças se tornam extremas, sendo exemplo o agravamento dos fenómenos meteorológicos (intempéries), é necessário pensar noutro tipo de soluções. Soluções que visem não só a prevenção da falha através do reforço das infraestruturas da rede, mas também a reposição do normal funcionamento da rede de forma mais rápida. Começou-se assim a fomentar a criação de uma rede resiliente [9].

2.2.1 O Conceito de Resiliência

O conceito de resiliência é definido no dicionário da língua portuguesa Priberam como: "Capacidade de superar, de recuperar de adversidades." [10]. Esta definição, ainda que pequena e simples, é utilizada em inúmeras áreas do conhecimento, revelando-se bastante poderosa quando aplicada para caracterizar corpos, organismos, sistemas e populações.

Quando aplicada ao ramo da psicologia, resiliência apresenta-se como um conceito difícil de definir, surgindo duas ramificações: a resiliência como uma característica pessoal; e a resiliência como um processo. Na primeira, considera-se que esta é a capacidade de um ser humano recuperar, sobreviver, ou adaptar-se a uma variedade de condições adversas. Por outro lado, na segunda, considera-se que a resiliência é um processo dinâmico de adaptação bem-sucedida, não obstante o efeito de eventos adversos e stressantes [11].

No ramo da ecologia, a primeira noção de resiliência surgiu com Holling, em 1973, onde o conceito se refere à capacidade de um sistema se manter no mesmo estado após sofrer uma perturbação. O sistema pode depois ter dois fins: persistência ou probabilidade de extinção [12].

Relativamente ao mundo empresarial, Sheffi caracteriza uma empresa resiliente como aquela que possui a capacidade de se adaptar às consequências de uma falha catastrófica, mantendo-se num estado estável, que permita a continuação normal das actividades [13].

Num contexto de engenharia, a resiliência é a capacidade de um sistema se manter operacional após um evento que o comprometa, com funcionalidades equiparáveis às que tinha anteriormente. Esse mesmo sistema deve ter depois a capacidade de se recuperar e voltar ao estado inicial [8].

Por fim, e tendo em conta todas as definições até aqui mencionadas, o conceito de resiliência pode ser aplicado à rede de distribuição de energia. A rede eléctrica é uma

infraestrutura extremamente importante, sendo esta considerada resiliente se possuir resistência, confiança e a capacidade de se dividir, assegurando a continuidade de serviços (redundância) [14]. Em [15], estudam-se métodos de mitigar o efeito de eventos climáticos extremos na rede eléctrica, definindo-se a resiliência da mesma como a capacidade que esta tem para suportar os efeitos de tais eventos extremos, de se adaptar ao estado em que ficou, e posteriormente se recuperar até ao estado em que se encontrava inicialmente. Para além disso, deve também possuir a habilidade de aprender, para minimizar o efeito de catástrofes semelhantes futuras [16].

Tipicamente, na bibliografia, referem-se dois aspectos para assegurar uma rede resiliente: avaliação e melhoramento. A avaliação consiste no estudo da condição da rede eléctrica, e na identificação dos riscos aos quais está exposta. O melhoramento passa por garantir que se verifica uma maior continuidade de serviço durante uma interrupção, e uma redução do tempo necessário para voltar à normalidade [8].

Consegue-se assim verificar que a definição de resiliência não se altera muito de área para área do conhecimento, adaptando-se e evoluindo conforme a interpretação dos autores de cada estudo. No entanto, apenas uma descrição do grau de resiliência de um sistema, seja ele qual for, acaba por não ser suficiente, visto que não permite visualizar a evolução temporal do estado do sistema perante um evento anormal.

Para satisfazer esta necessidade, em [17], sugere-se uma representação triangular do estado do sistema, figura 2.1. Numa primeira fase (1), o sistema encontra-se num estado de funcionamento normal. Após um evento catastrófico, o sistema degrada-se até ao ponto de degradação máxima (dependente do tipo e gravidade do evento), período 2. Posteriormente, segue-se um período (3) de restauro do sistema até se atingir um nível de funcionamento equiparável ao inicial. Havendo um retorno à normalidade, começa-se um período (4) de reforço e adaptação do sistema, por forma a aumentar a resiliência do mesmo contra eventos futuros semelhantes.

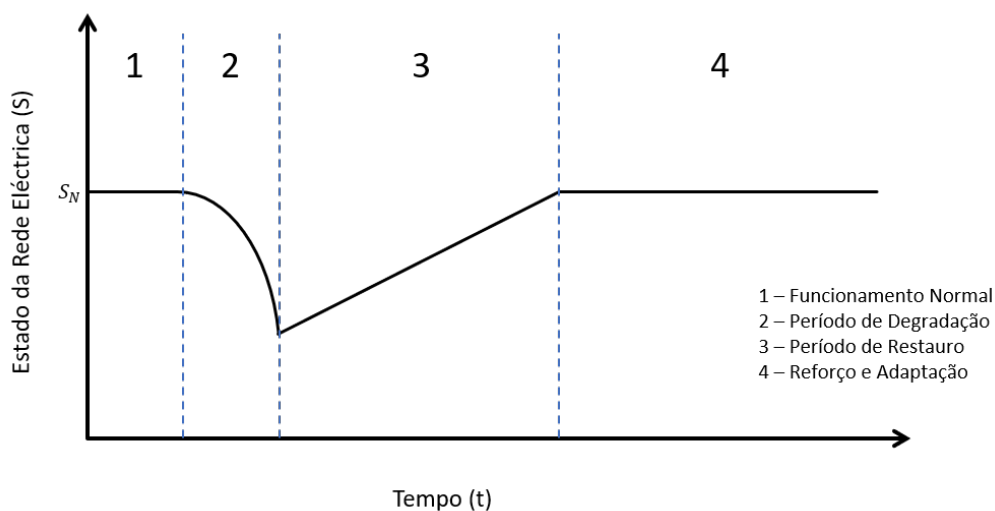


Figura 2.1: Aproximação Triangular da Condição da Rede (adaptado de [8]).

Contudo, o método de representação anterior acaba por não ser suficientemente completo quando aplicado à rede eléctrica, falhando em representar o período de tempo em que a rede se encontra degradada. Assim, em [18], sugere-se uma aproximação trapezoidal, figura 2.2. Neste modelo, verificam-se novamente os dois primeiros períodos (funcionamento normal (1) e degradação (2)), mas é introduzido um outro período (3) antes do começo do restauro do sistema. Neste período (3), o sistema permanece degradado até que sejam activadas medidas que proporcionem um retorno à normalidade. Posteriormente, seguem-se novamente os períodos de restauro (4) e de reforço/adaptação (5). No primeiro, procede-se ao concerto das infraestruturas danificadas (subestações, postes, cabos, etc.), para se conseguir atingir uma posição de estabilidade. Após atingida a normalidade, iniciam-se trabalhos de reforço e adaptação da rede, por forma a mitigar o efeito de catástrofes futuras.

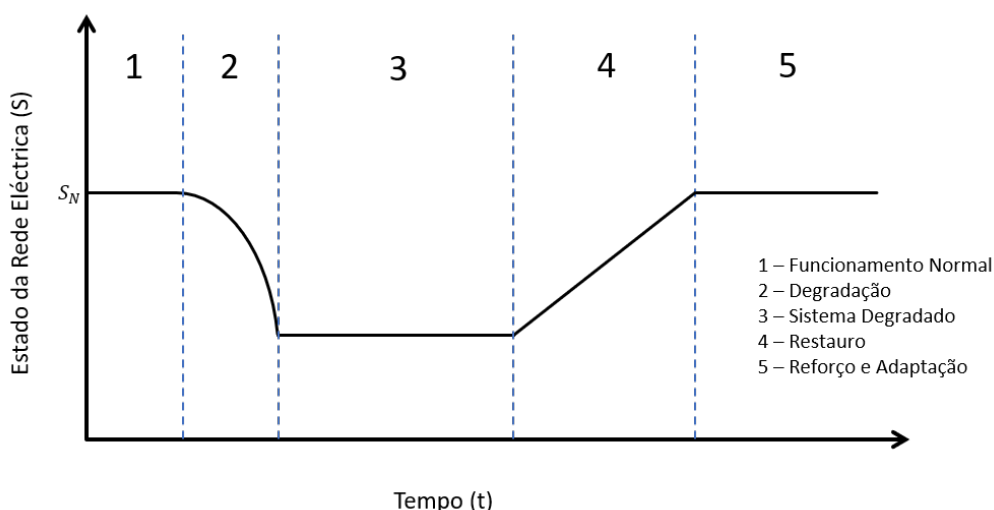


Figura 2.2: Aproximação Trapezoidal da Condição da Rede (adaptado de [8]).

Em [16], defende-se ainda uma outra forma para a curva representativa do estado do sistema (figura 2.3), introduzindo-se um novo período (5), no qual a rede é restaurada até se atingir um nível de serviço satisfatório, próximo do estado original. Posteriormente, são tomadas as medidas que permitam um retorno à normalidade.

O método proposto nesta dissertação procura assim actuar no período 3 das representações trapezoidal e em escada, no qual a rede se encontra degradada, não para promover um início de restauro mais rápido, mas sim um estado de degradação menos elevado, facultando aos utilizadores alguma disponibilidade de serviço.

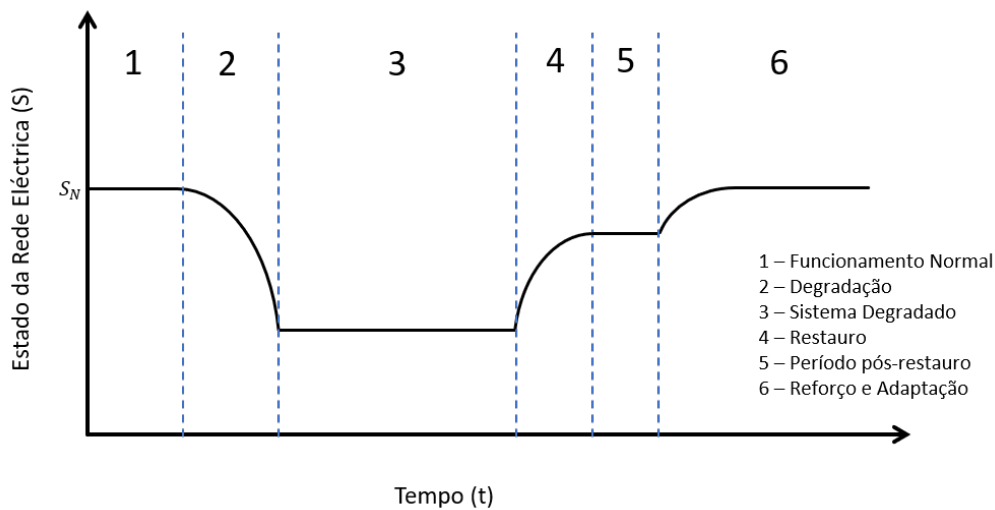


Figura 2.3: Aproximação em Escada da Condição da Rede (adaptado de [16]).

2.2.2 Métodos de Mitigação de Falhas

Existem várias técnicas que permitem tornar uma rede de distribuição de energia mais resiliente. Em [8], faz-se uma revisão da literatura e identificam-se algumas, sendo estas agrupadas em quatro tipos de soluções:

- Prevenção e gestão;
- Monitorização e detecção de falhas;
- Modelação e Simulação;
- Soluções baseadas em SGs e MRs.

A prevenção e gestão toma partido da utilização de técnicas que permitem a identificação de potenciais ameaças (promove a alteração da localização de estruturas da rede: subestações, postes, enterro de troços de cabo, etc.), análise de indicadores de performance (permite detectar problemas) e manutenção/reforço de componentes da rede (permite prevenir a ocorrência de falhas).

Através da monitorização e detecção de falhas é possível observar-se em tempo real a condição da rede e localizar as falhas, permitindo um restauro da rede mais rápido, e aumentando assim a sua resiliência. A monitorização é feita tipicamente por sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA).

A modelação e simulação da rede eléctrica permite, através da simulação de eventos excepcionais (tempestades, ataques terroristas, etc.), perceber os estragos que estes podem causar na sua infraestrutura, detectando-se os locais e equipamentos mais susceptíveis a falhas. Assim, consegue-se diminuir os efeitos das catástrofes e identificar quais as técnicas de mitigação de falhas utilizar em cada local da rede.

As soluções baseadas em SGs e MRs têm uma secção dedicada única e exclusivamente à sua análise, uma vez que é nesse tópico que a solução apresentada nesta dissertação se enquadra.

2.3 *Smartgrids* e Micro-redes: O que são, aplicações e técnicas de gestão

Desde o "boom" tecnológico dos anos 90, tem-se verificado um acréscimo acentuado na utilização de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) na gestão das principais infraestruturas. No caso particular da rede eléctrica, a utilização de TIC permite torná-la mais "inteligente", facilitando a integração de formas mais limpas de produzir energia eléctrica (FERs), sensores e permitindo um outro tipo de relação com os consumidores e micro produtores. Nas próximas secções, 2.3.1 e 2.3.2, explicam-se os conceitos de SGs e MRs respectivamente, mencionando-se também algumas técnicas de gestão das mesmas (secção 2.3.2.1).

2.3.1 *Smartgrids*

À imagem do que acontece com muitos conceitos (p.e. resiliência), não existe ainda uma definição exacta do que é uma SG. Uma possível definição é nos apresentada pelo departamento de energia da Comissão Europeia (CE): “uma rede eléctrica que consegue de uma forma eficiente, no que toca a custos, integrar o comportamento e acções de todos os utilizadores ligados à mesma – produtores, consumidores e aqueles que fazem ambos – para garantir eficiência económica, um sistema de potência com poucas perdas e um fornecimento de energia seguro e com qualidade” [19]. O departamento de energia dos EUA acrescenta ainda a necessidade da utilização de dispositivos sensoriais ao longo das linhas de transporte [20].

De acordo com a Energias de Portugal (EDP), as vantagens que resultam da implementação de uma SG incluem: 1) inovação, através da renovação de tecnologias antigas e automação da gestão da rede; 2) dinâmica, através de uma relação directa entre os micro-produtores e o distribuidor, uma relação mais próxima entre os clientes e os vendedores de energia e uma microprodução mais generalizada; 3) eficiência, através da redução de custos de operação, melhor gestão da rede e maior controlo dos recursos energéticos; 4) sustentabilidade, redução das emissões de CO₂ e protecção ambiental, apostando no uso de FERs; 5) resiliência, utilizando-se os vários sensores instalados ao longo da rede para controlar de forma instantânea o estado de todo o sistema, equilibrar cargas e prevenir falhas antes que estas aconteçam. Estes cinco aspectos permitem a construção de uma rede mais confiável e com melhor qualidade de serviço [21].

As SGs permitem ainda transformar um sistema que era outrora passivo (os utilizadores estavam sujeitos à disponibilidade da produção em grandes centrais eléctricas a montante, que se ajustava consoante as necessidades energéticas da rede como um todo),

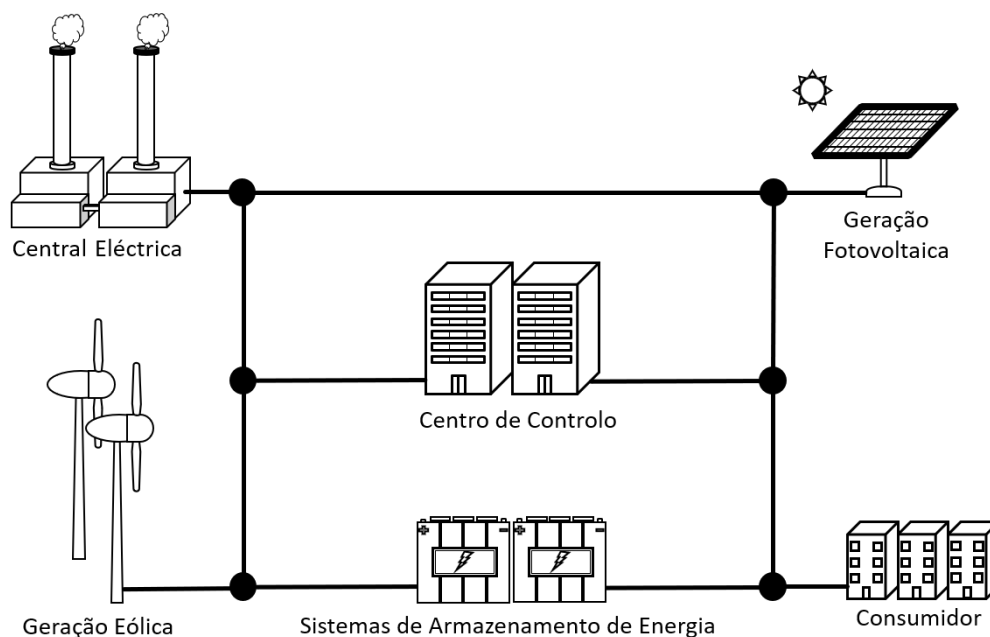


Figura 2.4: Exemplo do esquema de uma *Smartgrid* (SG).

num sistema activo (os utilizadores podem produzir energia para venda e/ou para consumo próprio, promovendo trocas de energia bidireccionais). Para além disso, verifica-se a inserção de GD, FERs, Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) e sistemas de RP, proporcionando ao mesmo tempo a experimentação de novas tecnologias (p.e. novos métodos de armazenamento de energia) [22].

A comunicação entre a SG e os consumidores finais é feita através de uma infraestrutura avançada de medição (*advanced metering infrastructure (AMI)*). Esta tecnologia toma partido da utilização de comunicação *wireless* bidireccional (rede Radiofrequência (RF)), para recolher informação de contadores de electricidade e/ou gás inteligentes, instalados nos edifícios dos utilizadores. Os dados recolhidos são analisados num Centro de Controlo (CC), e utilizados para efeitos de facturação, gestão de falhas, gestão de cargas, e planeamento do sistema de fornecimento [3].

Sendo assim, e resumindo, conseguem-se identificar sete vantagens associadas à implementação de SGs [3]:

1. Participação dos consumidores – Permite e motiva uma participação activa dos consumidores na gestão da rede;
2. Acomodar várias opções de produção – Permite a utilização de todas as opções de produção e armazenamento de energia;
3. Mercado de energia – Permite a criação de novos serviços, produtos e mercados;
4. Potência de elevada qualidade – Permite o fornecimento de energia com a qualidade necessária para uma sociedade baseada em sistemas digitais, computacionais e de

comunicação.

5. Activos optimizados – Permite uma operação mais eficiente, que optimiza tanto a utilização de instrumentos existentes, como a de aparelhos instalados recentemente;
6. Regeneração – Antecipa e responde a distúrbios no sistema;
7. Resistência a ataques – Reage de uma forma resiliente contra ataques e desastres naturais.

Na literatura não há referência quanto às dimensões de uma SG, sendo possível aplicar a qualquer tipo de rede eléctrica. No entanto, quanto maior for a rede, maior vai ser a complexidade dos sistemas associados à sua gestão, devido principalmente ao efeito das FERs na rede. Para combater esse aumento exponencial de complexidade, sugere-se uma subdivisão em parcelas mais pequenas, MRs, as quais vão ser abordadas com mais detalhe na secção 2.3.2, e que permitem um aumento da utilização de GD (secção 2.3.1.1).

2.3.1.1 Geração Distribuída

Ainda que não exista uma definição concreta do que é GD, em [23], o termo refere-se à implementação de unidades produtoras de energia eléctrica, de pequenas (alguns kW) a médias (50MW) potências, SAEs (p.e. térmicas, hídricas, baterias normais, etc.) e de outras estratégias em locais perto das cargas dos consumidores finais. A energia pode ser gerada tanto através de FERs, como através de Fontes de Energia Não Renováveis (FENRs). Os interesses neste processo têm vindo a ganhar cada vez mais relevância, não só devido à sua contribuição para o aumento da confiabilidade da rede e expansão do acesso à energia eléctrica a zonas remotas mais pobres, mas também pelas melhorias significativas ao nível da eficiência (redução de perdas e custos durante o transporte de energia), considerações ambientais e resposta ao aumento do preço dos combustíveis fósseis [3]. Para além disso, não é necessário um grande investimento inicial para começar o desenvolvimento de uma rede com GD.

Assim, as características que permitem identificar GD são:

- pequenas a médias dimensões e distribuídas geograficamente;
- presença de FERs;
- utilização de recursos específicos do local de implementação para produzir energia;
- localizadas perto das cargas que alimentam;
- integração de SAEs e controladores com as unidades de produção.

Dependendo do tipo da unidade de produção, a GD pode ser ligada a vários níveis de tensão, desde baixa a alta. No entanto, ainda que a GD possibilite combater a centralização da produção de energia, algumas complicações emergem, tais como sobrecarga da rede

e transformadores, aumento do risco de sobretensões, e deterioração da qualidade da potência fornecida [24], fruto da imprevisibilidade da quantidade de energia gerada pelas FERs, visto que estas dependem das condições meteorológicas. Para combater a incerteza das FERs, é aconselhada a criação de sistemas híbridos, ou seja, sistemas compostos não só por FERs mas também por SAEs. Para auxiliar em situações de emergência podem-se ainda incluir FENRs, por exemplo geradores diesel [25].

Em [26], é feita a comparação entre a performance de dois métodos muitas vezes utilizados na previsão, num espaço de 24 horas, da potência produzida por sistemas PV. Ambos os métodos são baseados na utilização de redes neuronais treinadas com dados obtidos dos anos anteriores.

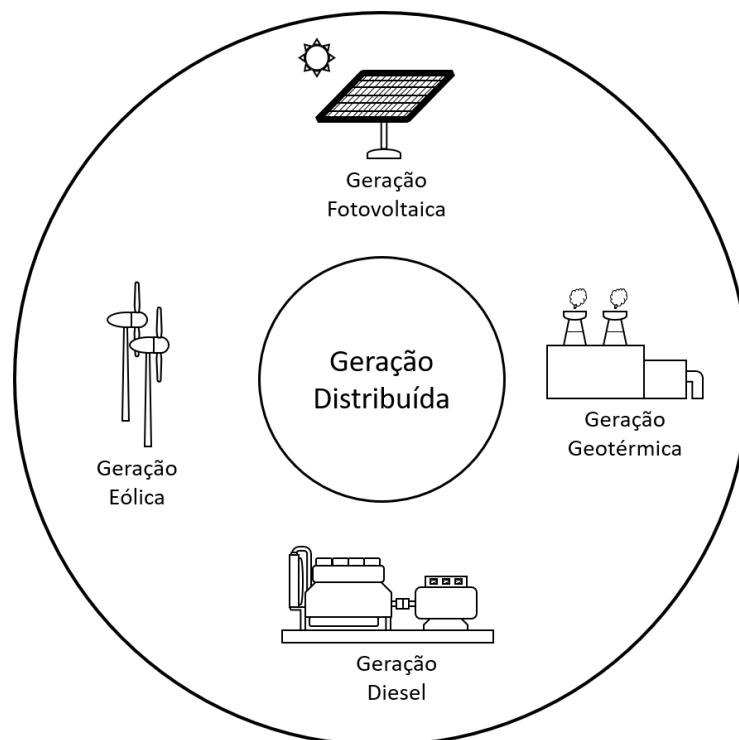


Figura 2.5: Exemplos de Geração Distribuída (GD).

Ao aplicar esta metodologia de produção de energia a um local, é necessário criar uma rede de pequena dimensão que integre todas as unidades de GD, e que possibilite realizar a gestão das mesmas, com base nas necessidades energéticas dos consumidores locais. Surgem assim as MRs.

2.3.2 Micro-redes

O conceito de microgrid, ou em português MR, já não é algo recente, tendo surgido nos finais do século XIX, onde a electrificação de Nova York era feita através de uma rede alimentada por um gerador DC local a carvão. Esta rede eléctrica, criada por Thomas Edison, obedecia a todos os critérios que actualmente permitem identificar uma MR [27].

Apesar de ainda não existir uma definição concreta e standardizada do que é uma MR, o *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ) propõe: “sistemas de distribuição de electricidade que contenham cargas e recursos de energia distribuídos (tais como geração distribuída, dispositivos de armazenamento, ou cargas controláveis), que pode ser operada de uma forma controlada e coordenada, quer esteja ligada à rede de energia principal quer esteja em modo ilha.”. O departamento de energia dos EUA acrescenta ainda que, tem de existir uma delimitação eléctrica clara entre a MR e a rede principal [28].

Com base nas definições anteriores, conseguem-se destacar três aspectos que permitem identificar uma rede como uma MR: 1) identificação clara dos limites eléctricos em relação à rede principal; 2) controlo dos recursos tendo em conta as condições locais, e não as verificadas em outros pontos da rede; e 3) pode operar ligada à rede principal ou em modo ilha (desconectada da rede principal). Para além destes, em [3], destacam-se ainda as seguintes características de uma MR: é vista como um agregado de cargas ou unidades de geração pela rede, tem uma capacidade abaixo de 10MVA e utiliza GD. Nenhuma das definições faz referência às suas dimensões ou às tecnologias utilizadas [29].

As MRs permitem assim aumentar a resiliência da rede de distribuição de energia, uma vez que estas se podem separar da rede principal caso ocorram eventos extremos (tempestades, cortes de energia, etc.), continuando a operar de forma autónoma e prevenindo falhas em cascata [30]. É, no entanto, necessário manter um equilíbrio entre a energia produzida e a consumida, uma vez que a geração renovável (FERs) é muitas vezes imprevisível, podendo variar de forma significativa (p.e. diminuição repentina da velocidade do vento) [25].

O tipo de geração utilizada depende das características ambientais e meteorológicas do local de construção da MR, sendo determinantes para identificar quais as tecnologias a utilizar para fazer a geração e o armazenamento de energia eléctrica. Isto é, não se vai utilizar geração eólica num local onde não há vento com intensidade suficiente, ou utilizar geradores a diesel em zonas com elevada radiação solar¹.

Na tabela 2.1, resumem-se algumas das aplicações das MRs, verificando-se que estas podem ser aplicadas nos mais variadíssimos contextos, desde *Campus Universitários* (*New York University*) a aplicações militares (*Fort Carson*). No entanto, é em zonas remotas e isoladas da rede eléctrica principal, como ilhas (Ilha de *Kythnos*) e pequenas povoações

¹"magnitude que mede a energia por unidade de área de radiação solar incidente em uma superfície colocada em um local e intervalo de tempo bem especificados." [31]

(*Huatacondo*), que as MRs revelam particular utilidade, permitindo o acesso à electricidade em zonas distantes, sem que seja necessário a construção de linhas de transporte de energia eléctrica adicionais [28].

Tabela 2.1: Exemplos de aplicações de Micro-redes (MRs).

Aplicação	País	Ano	Equipamentos
<i>Ilha de Kythnos</i>	Grécia	2001	PV (10kW) 1 Gerador Diesel (5kW) Banco de Baterias (53kWh)
<i>Huatacondo</i>	Chile	2009	PV (22kW) 1 Gerador Diesel (150kW) 1 Turbina Eólica (3kW) Banco de Baterias (170kWh)
<i>New York University</i>	EUA	2011	2 Turbinas a Gás (11MW) 1 Turbina a Vapor (2.4MW) 3 Veículos Eléctricos (VEs)
<i>Fort Carson</i>	EUA	2014	PV (1MW) 3 Geradores Diesel (3MW) 3 VEs

É também importante fazer um levantamento dos custos associados aos equipamentos e tipo/quantidade de cargas que vão ser alimentadas, uma vez que estes aspectos ditam, principalmente, a quantidade e dimensão dos elementos geradores que vão ser colocados na MR. A identificação do tipo de cargas indica-nos se é necessária a utilização de conversores electrónicos de potência AC/DC, ou vice-versa.

A caracterização de uma MR como uma MR híbrida resulta da conjunção de vários elementos de produção e de armazenamento de energia na mesma rede, havendo duas possibilidades para a sua configuração.

Na primeira (figura 2.6), criam-se dois barramentos, um AC e outro DC, interligados por um conversor AC/DC bidireccional, aos quais se ligam as cargas e geradores com o tipo de corrente correspondente. Este tipo de rede permite não só reduzir as perdas de conversão que se verificam ao ligar cargas como VEs, lâmpadas LED e *Uninterrupted Power Supplies* (UPSs) à rede AC normal de BT, mas também eliminar problemas de sincronismo, estabilidade e necessidades de potência reactiva [32].

Na segunda (figura 2.7), utiliza-se um único canal AC, ao qual são ligados todos os dispositivos da rede, podendo ser necessária a utilização de electrónica de potência. Em ambos os casos, a partir do CC, é possível controlar tanto os elementos geradores de energia (p.e. paragem/accionamento da geração não renovável), como os elementos de armazenamento (p.e. carregamento das baterias quando existem recursos renováveis em excesso).

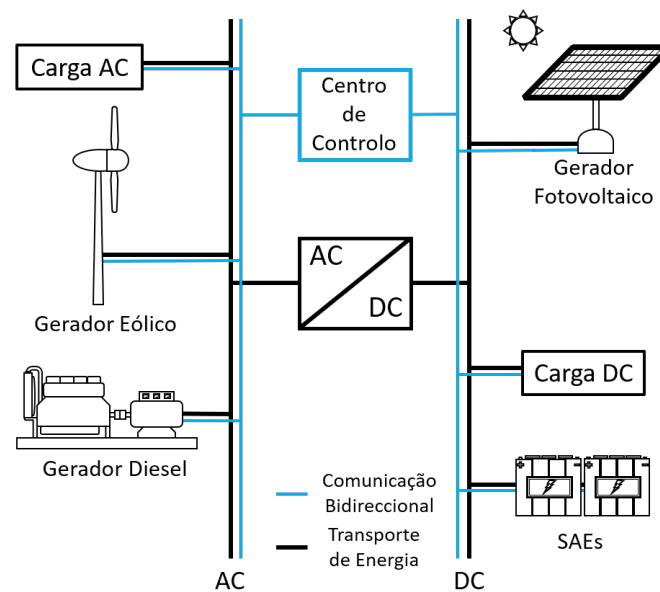


Figura 2.6: Exemplo do diagrama de uma Micro-rede (MR) híbrida com barramento AC e DC (adaptado de [25]).

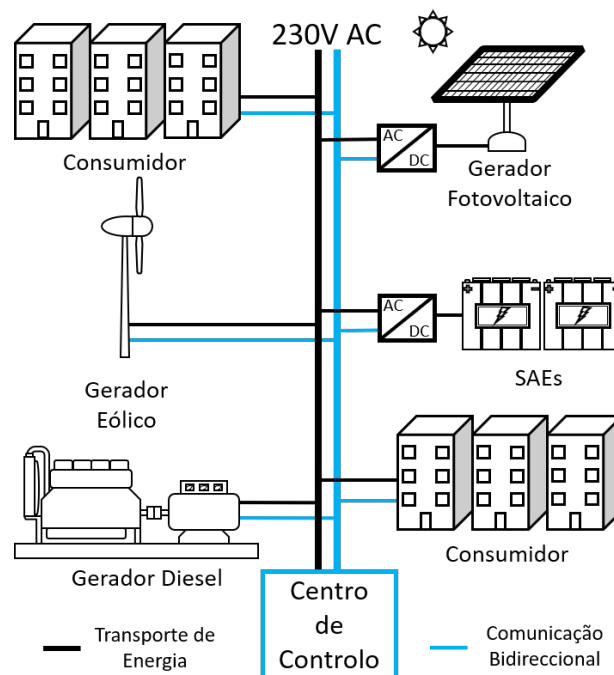


Figura 2.7: Exemplo do diagrama de uma Micro-rede (MR) híbrida com um canal AC

Posto isto, conseguem-se identificar as seguintes vantagens da utilização de MRs para as diferentes entidades que nela participam [3]:

- Serviços de utilidade pública
 - Controlo hierárquico da GD;

- Diminuição das perdas no transporte e aumento da eficiência;
 - Comporta-se como uma carga ou como uma fonte;
 - Sendo mais pequena, e estando mais perto das cargas, consegue-se adaptar a produção às condições e necessidades locais, tornando o sistema mais confiável, e conduzindo a uma respostas às necessidades dos utilizadores mais rápida;
 - Atendendo apenas ao controlo local, tanto o *design* como o planeamento futuro são específicos às entidades presentes na MR.
- Utilizadores
 - Mais fontes de produção;
 - Aumento da confiabilidade através do desacoplamento da rede principal;
 - Aumento da qualidade da potência recebida.
 - Sociedade e ambiente
 - Aumento da utilização de FERs;
 - Redução das emissões;
 - Potencial para o aumento da eficiência de FENRs.

2.3.2.1 Técnicas de gestão de SGs e de MRs

Em [25] e [3], realiza-se uma revisão da literatura no que diz respeito às técnicas de gestão de MRs, explicando-se em detalhe os diferentes métodos utilizados. Estas técnicas surgem aplicando-se o conceito de SG a uma MR, tornando-a capaz de, através das TIC, otimizar a gestão da GD e dos SAEs. Estas técnicas procuram: maximizar a potência gerada num período específico de tempo; minimizar os custos de operação da MR; maximizar a vida útil dos SAEs; e minimizar o impacto ambiental. São destacados vários métodos baseados em:

- programação linear e não-linear;
- meta-heurística;
- técnicas de programação dinâmica;
- sistemas multiagente;
- métodos estocásticos e programação robusta;
- métodos de controlo preditivos;
- inteligência artificial;
- outras técnicas.

2.4 Resposta da Procura

Com o aparecimento das SGs, surgem novas formas de repensar a estrutura e funcionamento da rede eléctrica. Uma das formas que permite a reorganização da rede, como já foi abordado na secção 2.3.2, é a subdivisão desta em partes mais pequenas (MRs), recorrendo a GD controlada localmente. No entanto, a rede como um todo não pode ficar a ser gerida de forma semelhante a um sistema passivo e unidireccional, uma vez que, devido à introdução de FERs, podem-se verificar desigualdades entre a energia produzida e a necessária para alimentar as cargas dos consumidores. Surgem então metodologias como a RP para ajustar estas desigualdades. Para além disso, a RP apresenta ainda outro tipo de vantagens que vão ser exploradas nesta secção.

Este tópico surge na literatura em inglês como: “*Demand Side Management (DSM)*” ou “*Demand Response (DR)*”. Neste texto vai-se utilizar a tradução literal para português de *Demand Response (DR)*, ou seja, Resposta da Procura (RP).

A RP é definida pela *Federal Energy Regulatory Commission (FERC)* dos EUA como sendo: “a alteração do consumo energético por parte dos consumidores da rede, os quais alteram os seus padrões de consumo em resposta a mudanças no preço da electricidade ao longo do tempo, ou para incentivar pagamentos desenhados para induzir redução de consumo de electricidade em períodos com preços de mercado inflacionados, ou quando a confiabilidade do sistema está em risco”. Num estado inicial, os programas de RP eram utilizados para controlar cargas durante picos de consumo nos EUA [33].

Programas dinâmicos de RP foram aceites pela União Europeia (UE) como uma ferramenta estratégica para atingir três principais objectivos: redução das emissões de gases de estufa em 20%, uma vez que, com a eliminação de picos, se evita a activação de unidades de geração alimentadas com combustíveis fósseis; aumento da produção através de FERs em 20%, visto que estes programas facilitam a introdução das mesmas na rede; e aumento da eficiência energética em 20%, mais uma vez, evitando a activação de unidades de geração menos eficientes [34].

Em [35], sugere-se que o controlo de RP pode ser realizado de duas formas: directa ou indirectamente. Na primeira, também conhecida como controlo baseado no preço, toma-se partido das flutuações no preço da electricidade. Esta variação nas tarifas encoraja os consumidores a regular o seu consumo de energia, alterando-o para ocasiões onde o preço da electricidade é mais baixo. Na segunda, também conhecida por controlo baseado em incentivos, os consumidores procedem ao ajuste (redução ou alteração temporal) do consumo de certos equipamentos durante períodos de stress da rede. Ainda que sejam incentivados, a taxa de adesão a este tipo de programas é ainda relativamente baixa, devido principalmente ao receio de perda de conforto. A este tipo de controlo dá-se o nome de controlo manual, visto que os clientes são informados, por exemplo através de um ecrã no contador inteligente, dos preços e necessidades da rede, e decidem se realizam alterações no seu consumo [22].

Um outro tipo de controlo é o controlo automático, onde os consumos dos utilizadores

são alterados automaticamente, de acordo com o combinado no contrato de fornecimento de electricidade [22].

No ano de 2009, iniciou-se um programa (*Linear* [36]) com o objectivo de introduzir programas de RP ao sector residencial, através de soluções para corresponder o consumo eléctrico dos habitantes à produção eólica e solar disponível. O programa teve a duração de cinco anos, e foram utilizados/as:

- 110 casas equipadas com contadores inteligentes;
- 2000 tomadas de medição;
- 94 casas com PV;
- 240 sistemas de gestão de energia caseiros;
- 7 VEs;
- 460 electrodomésticos inteligentes;
- outros.

Neste estudo, destaca-se ainda que este tipo de metodologia tem vindo a ser aplicado cada vez mais no sector industrial, no entanto, o sector residencial tem-se mantido inalterado, uma vez que, neste sector, é necessário manter um nível mínimo de conforto às famílias que queiram participar neste tipo de programas. Ainda que neste sector as fontes de flexibilidade não sejam de grande potência, estas surgem em grandes quantidades.

No estudo do projecto *Linear* introduz-se ainda uma outra forma de controlo da RP. Um sistema automático que utiliza electrodomésticos "inteligentes" em conjunto com um sistema de gestão. Este último liga e desliga os aparelhos automaticamente, consoante o tipo de produção disponível, garantindo sempre o maior conforto possível aos utilizadores. Esta metodologia de controlo, ao contrário do controlo directo (revelou-se demasiado fraco devido à complexidade do esquema de tarifas), teve uma taxa de aceitação elevada, comprovando-se que este tipo de programa é realizável, no entanto, é ainda um sistema caro de implementar.

Resumindo, destacam-se os seguintes objectivos principais da aplicação de programas de RP:

- mitigar os efeitos da inserção de FERs na rede;
- responder ao aumento na utilização de equipamentos eléctricos;
- aumento da confiabilidade e sustentabilidade da rede;
- controlar melhor o preço da energia;
- corresponder o consumo eléctrico com a produção existente (preferencialmente FERs);

- eliminação de picos de consumo.

Por fim, é importante referir ainda que, a alteração temporal do funcionamento das cargas não pode ser feita de forma aleatória, sendo necessário algum cuidado, não só para garantir que os consumidores usufruem do melhor conforto possível, mas também para preservar o bom funcionamento dos aparelhos. Posto isto, é então necessário encontrar uma métrica que permita visualizar até que ponto é possível atrasar, adiantar ou até mesmo eliminar o funcionamento de uma carga. Para isso, surge o conceito de Flexibilidade Energética (FE).

2.4.1 Flexibilidade Energética

O conceito de FE varia consoante o tipo de sector que se está a abordar, não existindo uma definição geral. No caso particular dos edifícios (residenciais ou não), a FE dos mesmos pode ser medida através da habilidade para gerir quer as suas necessidades energéticas, quer a sua capacidade de produção de energia eléctrica, de acordo com as condições climáticas, necessidades dos utilizadores e necessidades da rede [37].

A capacidade de um edifício fornecer FE depende principalmente dos seguintes factores [38]:

- características de construção (p.e. *layout*, área e isolamento);
- tecnologia dos equipamentos (p.e. contadores e electrodomésticos inteligentes, climatização e existência de SAEs);
- sistemas de controlo existentes (p.e. capacidade de responder a sinais externos como preço da electricidade ou factores de CO_2);
- comportamento dos ocupantes e requisitos de conforto (p.e. tempo passado em casa, horário de lavagem de roupa e horário de carregamento de VEs);

Por outro lado, do ponto de vista da rede, a flexibilidade de uma carga eléctrica pode ser caracterizada por três mecanismos [39]:

- deslocação de cargas (*load shifting*), alteração do período de funcionamento de cargas, podendo o funcionamento destas ser adiantado ou atrasado no tempo;
- corte de cargas (*load shaving*), desactivação de cargas durante um período de tempo, sem que seja recuperado o tempo que estas estiveram desligadas;
- aumento de consumo (*valley filling*), activação "forçada" de cargas em períodos de vazio, para aproveitar, sobretudo, produção renovável em excesso.

Torna-se assim necessário encontrar uma classificação para cada tipo de carga. Em [40], sugere-se a divisão do tipo de cargas em: unidades de carga deslocável (*shiftable load*

units), unidades de carga truncável (*curtailable load units*) e unidades de carga inflexível (*inflexible load units*).

Nas unidades de carga deslocável, a energia utilizada mantém-se a mesma, apesar de se escolher outro período de funcionamento. A escolha desse período ocorre de acordo com as necessidades da rede e de conforto do utilizador, sendo que é necessário garantir que o processo está finalizado até um tempo limite. Estas unidades podem ainda ser divididas em: unidades de perfil de carga deslocável e unidades de volume de carga deslocável. Nas primeiras, apenas é possível mover um período de funcionamento estipulado no tempo, uma vez que este não pode ser alterado. São exemplos deste tipo de unidades os electrodomésticos MLR, MSR e MLL, uma vez que têm pré-programados ciclos de funcionamento que não podem ser alterados. Nas segundas, o perfil de carga pode ser alterado, no entanto, tem de se verificar a utilização de um certo volume de energia num período estipulado. São exemplos deste tipo de cargas VEs ou SAEs, visto que, desde que estes se encontrem totalmente carregados no fim do período de tempo estipulado, pode-se parar, e depois retomar, o carregamento quando for mais benéfico.

Unidades de Carga Deslocável

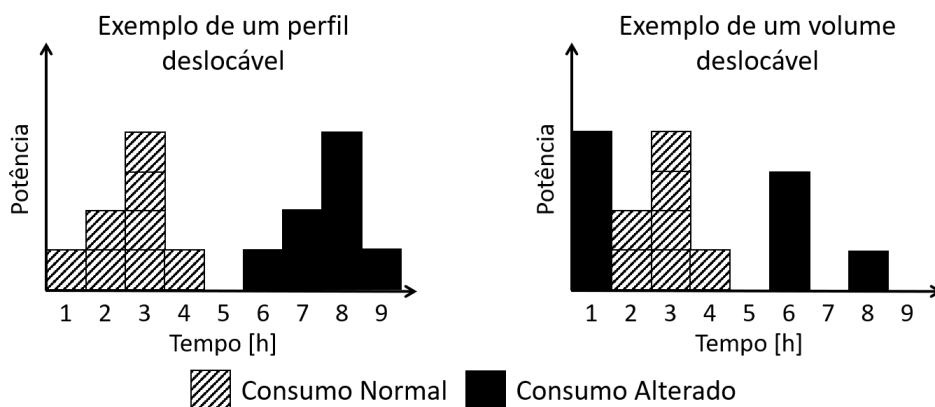


Figura 2.8: Exemplo de cargas deslocáveis (adaptado de [40]).

Por outro lado, nas unidades de carga truncável, não é possível o deslocamento da utilização da carga no tempo sem que este afecte o utilizador, realizando-se uma diminuição da energia consumida quando a unidade está a ser utilizada. À semelhança das cargas anteriores, estas também se dividem em dois tipos: unidades de carga redutível e unidades de carga desconectável. Nas primeiras, a carga pode ser reduzida até certo ponto, não podendo ser completamente desligada. Como exemplo tem-se a redução da intensidade da iluminação. Nas segundas, as unidades podem estar ligadas ou desligadas. São exemplos os aparelhos de climatização, que podem ser desligados durante pequenos períodos sem que causem grande transtorno aos utilizadores [39], e o frigorífico [41].

Por último, as unidades de carga inflexível englobam todas as cargas que podem ser necessárias a qualquer circunstância. Cargas como televisores, computadores e luzes

Unidades de Carga Truncável

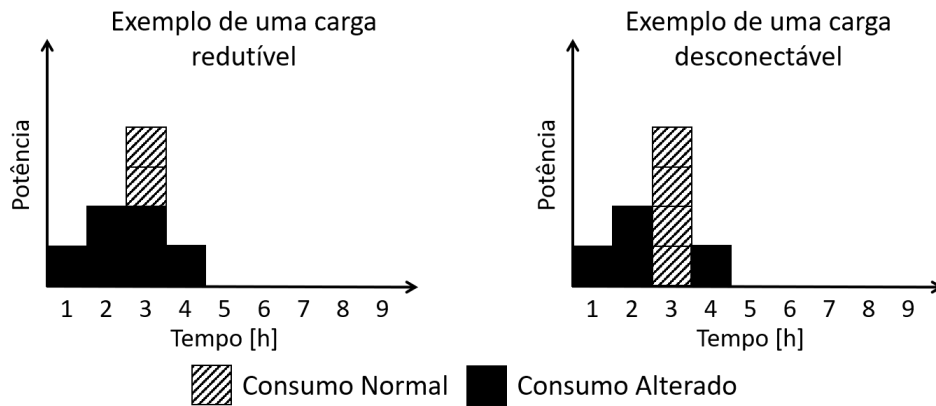


Figura 2.9: Exemplo de cargas truncáveis (adaptado de [40]).

são ligadas apenas quando o utilizador necessita delas, e num mundo ideal, desligadas quando já não são precisas.

Em [42], destaca-se ainda a existência de elementos geradores de energia que sejam pertencentes ao edifício, cujas funções são reduzir a quantidade de energia absorvida da rede e funcionar como um sistema de alimentação de emergência. Estes elementos, principalmente os PV, vão ser de especial importância para o trabalho desenvolvido nesta dissertação, visto que vão funcionar como unidade de emergência não só para o edifício onde estão instalados, mas também para os restantes vizinhos numa urbanização.

Como foi referido no primeiro parágrafo desta secção, ainda não existe uma definição normalizada do que é FE, e muito menos indicadores que permitam identificar a FE de determinadas cargas, ou grupo de cargas, pelo que cada autor acaba ou por sugerir os seus próprios indicadores, ou por utilizar os que considera mais correctos. Sendo assim, de seguida, apresentam-se alguns indicadores de FE.

Em [43], apresenta-se uma nova definição matemática para a FE relativa a um agregado de cargas, sendo esta baseada nas propriedades estatísticas das variações de consumo do agregado, e em estudos realizados sobre os padrões e variações temporais de vários agregados residenciais. Os dados utilizados neste estudo são provenientes de questionários realizados aos utilizadores. Deste modelo resultam dois indicadores de flexibilidade:

- *Flexibility Index of Aggregate Demand* (FIAD) – Indica a flexibilidade de um agregado de utilizadores relativamente à probabilidade de haver um aumento, ou diminuição, de procura energética;
- *Percentage Flexibility Level* (PFL) – Indica a percentagem de FE disponível para RP.

Por outro lado, em [35], propõe-se um sistema de RP que utilize um esquema de recompensa ao utilizador. Neste modelo, os prémios para cada utilizador são baseados na sua disponibilidade para participar no esquema, tornando-se um incentivo diferente dos

mais comuns, baseados no preço da electricidade. Para além disso, os autores identificam benefícios de eliminação de picos e melhorias no perfil de tensão na rede. À semelhança do artigo referido no parágrafo anterior [43], é importante começar por fazer um questionário que englobe todos os utilizadores, por forma a saber até que ponto estes estão dispostos a participar no programa. Neste questionário, os utilizadores indicam a prioridade e flexibilidade de cada electrodoméstico, e em que período do dia é que estes podem funcionar. Esta informação é depois utilizada para definir cinco indicadores:

- *Appliance Priority Index* (API) – valor definido pelo utilizador que dita a ordem de prioridade de operação das cargas;
- *Appliance Flexibility Index* (AFI) – mede a capacidade para um ajuste temporal de consumo de cada equipamento, dependendo inteiramente das suas características;
- *Appliance Satisfaction Index* (ASI) – indica quão perto um equipamento está do seu ponto limite de operação (calculado a cada 4 minutos);
- *Power Similarity Index* (PSI) – representa quão perto uma carga está do valor total de energia que é necessário ajustar;
- *High Power Consumption Index* (HPCI) – identifica a casa que está a consumir mais energia quando é necessário efectuar um ajuste de carga.

Em [44], propõe-se uma representação gráfica da FE. Esta não é, no entanto, indicada para realizar o agendamento do funcionamento de cargas, visto que esta ferramenta nos indica o potencial para se realizar FE, tendo em conta que a FE está toda disponível, e é utilizada, num ponto específico no tempo. Neste método, identificam-se duas curvas que definem o limite de flexibilidade dos electrodomésticos: E_{max} (consumo de energia o mais cedo possível) e E_{min} (consumo de energia o mais tarde possível). Explicam-se ainda dois cenários de utilização desta técnica. No primeiro, figura 2.10 (a), no qual se realiza uma diminuição de potência, pode-se calcular o valor da potência que se vai diminuir (P_{dec}), através da diferença entre a potência que se iria consumir (P_{ref}) e a potência que se vai utilizar (P). No segundo, figura 2.10 (b), no qual se realiza um aumento de potência, pode-se calcular o valor da potência que se vai aumentar (P_{inc}), através da diferença entre a potência que se vai utilizar (P) e a potência que iria ser consumida (P_{ref}). Em ambos os casos, ΔT representa o tempo até que a flexibilidade dos aparelhos seja totalmente utilizada, indicando, em conjunto com o aumento (P_{inc}) e diminuição (P_{dec}) de potência, uma medida do potencial de flexibilidade de um grupo de electrodomésticos.

Por último, para se colocar em prática estes modelos, é necessário estudar cada um dos aparelhos domésticos individualmente. Isto implica saber como funcionam e que perfil de carga possuem. No âmbito do modelo proposto nesta dissertação, vão ser abordados apenas três electrodomésticos de perfil deslocável: MLR, MSR e MLL, também conhecidos na literatura por "*wet appliances*".

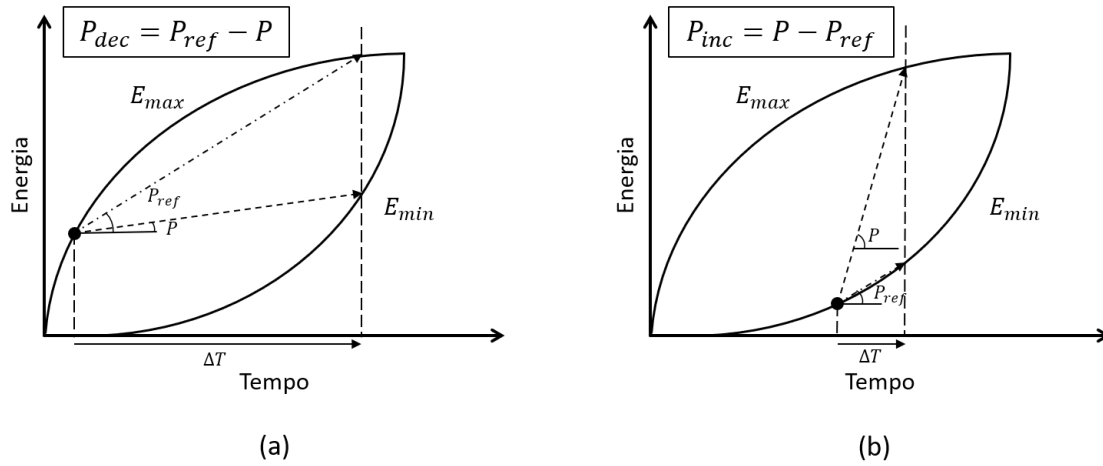


Figura 2.10: Representação gráfica da Flexibilidade Energética (FE). (a) diminuição de potência. (b) aumento de potência (adaptado de [44]).

2.4.2 Electrodomésticos de Perfil Deslocável: MLR, MSR e MLL

Actualmente, fruto do desenvolvimento tecnológico e aparecimento das SGs, são necessários perfis de consumo mais detalhados, para construir programas de RP o mais optimizados possível. Em [34], propõe-se um sistema que permite analisar o consumo e perfil energético de todos os modos de operação de alguns aparelhos domésticos. Para além disso, demonstra-se ainda o potencial dos mesmos para RP.

Apesar de se continuar numa rota de avanço tecnológico, os custos ainda relativamente elevados dos sistemas de medição tornam a implementação da solução anterior ainda um pouco irrealista, pelo que nesta dissertação serão utilizados perfis provenientes de estimativas e médias de consumo. Sendo assim, esta secção vai ter por base os perfis e explicação dos vários electrodomésticos apresentados num relatório realizado no âmbito do projecto “Smart-A” [45]. Embora relativamente antigo (2008), apresenta previsões para os consumos dos electrodoméstico entre 2020 e 2030, pelo que se pode considerar actual à data da escrita deste documento.

2.4.2.1 Factores que influenciam o consumo energético dos electrodomésticos

A alteração do consumo energético encontra-se directamente relacionado com o perfil de potência do mesmo. De seguida, apresentam-se os principais factores que contribuem para tal alteração:

- condições ambientais – em zonas com temperatura ambiente mais baixa é necessário activar a resistência de aquecimento de água durante mais tempo, uma vez que a temperatura inicial da água é mais baixa, logo é necessária mais energia para elevar a temperatura da água à pretendida;

- frequência de operação – habitações com mais pessoas utilizam os electrodomésticos mais frequentemente, o que conduz a um consumo energético mais elevado;
- tipo de programa seleccionado – dependendo do ciclo seleccionado, este pode ser mais breve ou mais moroso, sendo que quanto mais durar o ciclo, mais energia vai ser consumida. Para além disso, no caso das MLR, existem ciclos que utilizam água aquecida e outros que usam água à temperatura ambiente;
- eficiência do aparelho – quanto maiores as perdas energéticas existentes no aparelho (p.e. accionamentos electromecânicos com baixo rendimento), maior terá de ser a energia fornecida para se realizar o trabalho pretendido;
- carga – em máquinas com motores eléctricos, quanto maior for a carga, por exemplo no tambor (MLR e MSR), maior terá de ser a energia fornecida para se desenvolver o binário necessário para o rodar. Para além disso, influencia a quantidade de água que vai ser utilizada, o que afecta, por sua vez, o tempo de aquecimento da mesma.

Grande parte da energia consumida neste tipo de electrodomésticos é utilizada para realizar o aquecimento da água, pelo que, recorrendo a máquinas que utilizem água pré aquecida por um sistema externo (p.e. caldeira, termo-acumulador a gás, painéis solares, etc.), pode resultar numa redução significativa no consumo eléctrico [46].

Para além dos factores anteriores, e querendo-se fazer uma análise mais rigorosa, pode-se ainda considerar o período de *standby*, período no qual a máquina está pronta para começar uma operação pré-programada. Como a quantidade de energia utilizada neste período é muito baixa relativamente à utilizada no ciclo de funcionamento, esta pode ser desprezada quando o número de cargas é reduzido, como é o caso do cenário desta dissertação.

2.4.2.2 Máquina de Lavar Roupa (MLR)

O perfil de potência típico de uma MLR pode ser dividido em cinco períodos, sendo que a duração ou repetição destes períodos depende do ciclo de funcionamento escolhido na máquina.

No período 1, ocorrem vários períodos intercalados de passagem da roupa por água à temperatura ambiente e de rotação do tambor. Nesta etapa, a energia consumida é principalmente utilizada para accionar o sistema de bombagem de água e o motor conectado ao tambor.

De seguida, verifica-se um período de aquecimento da água até se atingir uma das temperaturas típicas: 30, 40, 60 ou 90 ° C. Estas dependem dos programas escolhidos na máquina. Este período pode ainda ser dividido em dois períodos distintos. O primeiro, período 2 no gráfico da figura 2.11, destina-se ao aquecimento da água desde a temperatura ambiente, até à temperatura final pretendida. Depois, para manter a água à temperatura desejada, é necessário realizar mais um período de aquecimento, período 3 no gráfico. No

entanto, como a temperatura inicial da água é mais alta do que a verificada no período 2, não é necessário utilizar tanta energia para a elevar de volta à temperatura pretendida. Nestas duas fases, a energia consumida verifica-se na energia dissipada na resistência de aquecimento da água e, mais uma vez, no accionamento do sistema de bombagem de água e do motor.

No período 4, verificam-se fases sucessivas de passagem da roupa por água aquecida e de rotação do tambor. À semelhança do que acontece no período 1, a energia é utilizada para accionar o sistema de bombagem de água e o motor.

Por fim, no período 5, realiza-se uma série de fases de rotação do tambor a alta velocidade, para retirar grande parte da água da roupa. Aqui, a energia é gasta principalmente pelo motor, uma vez que se aumenta a potência fornecida ao mesmo, por forma a aumentar a velocidade de rotação.

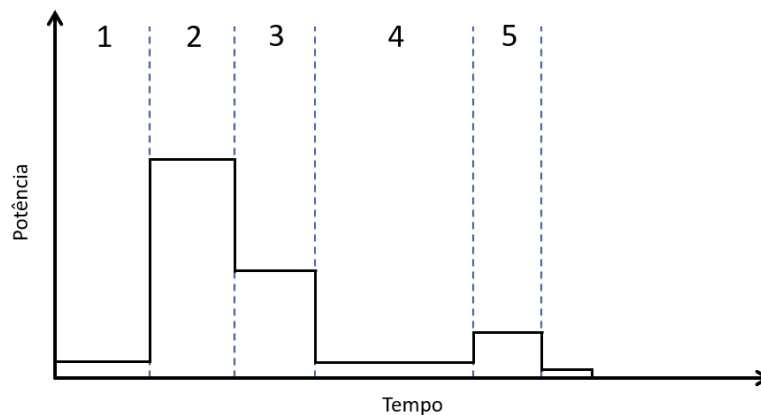


Figura 2.11: Perfil de potência típico de uma Máquina de Lavar Roupa (adaptado de [45]).

2.4.2.3 Máquina de Lavar Louça (MLL)

O perfil de potência de uma MLL divide-se em cinco períodos, sendo que a duração ou repetição destes períodos depende do ciclo de funcionamento escolhido na máquina.

Primeiramente, período 1 do gráfico da figura 2.12, passa-se a louça por água à temperatura ambiente. A energia consumida é utilizada principalmente para alimentar os sistemas de bombagem e os accionamentos electromecânicos utilizados para rodar os braços aspersores de água.

Posteriormente, ocorre o período 2, no qual se procede ao aquecimento da água. Este é feito por uma resistência eléctrica, tal como acontece nas máquinas abordadas anteriormente. Para além da energia dissipada na resistência, é necessário continuar a alimentar os sistemas referidos no ponto anterior.

No período 3, acontece o mesmo que no período 1, no entanto, utiliza-se a água previamente aquecida no período 2.

Por fim, realiza-se um período que pode ser dividido em duas fases, períodos 4 e 5 do gráfico da figura 2.12. No período 4, a água é aquecida a uma temperatura normalmente

superior à utilizada na lavagem, para armazenar calor suficiente na louça para facilitar o processo de secagem. Pode, no entanto, ser necessário realizar pequenos períodos de aquecimento para acelerar o processo de secagem. A energia é, mais uma vez, utilizada na alimentação do elemento resistivo, no sistema de bombagem de água e nos motores ligados aos braços aspersores.

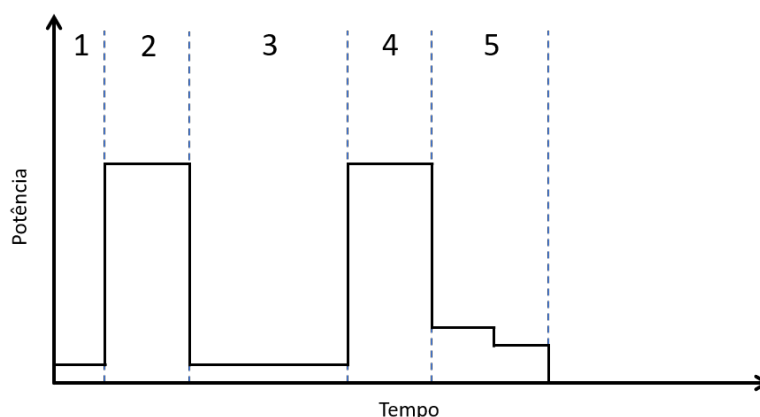


Figura 2.12: Perfil de potência típico de uma Máquina de Lavar Louça (adaptado de [45]).

2.4.2.4 Máquina de Secar Roupa (MSR)

O perfil de potência típico de uma MSR divide-se em apenas um período (1), sendo que a duração ou repetição deste depende do ciclo de funcionamento escolhido no aparelho. Neste, o tambor roda continuamente, enquanto se faz passar ar pela roupa ainda húmida. Este ar é aquecido por uma resistência, e tem por objectivo retirar a humidade da roupa, sendo que este é depois extraído da máquina através de um sistema de ventilação ou condensado num permutador de calor. Neste tipo de máquinas, a energia é principalmente utilizada para alimentar a resistência de aquecimento, o motor ligado ao tambor e o sistema de ventilação.

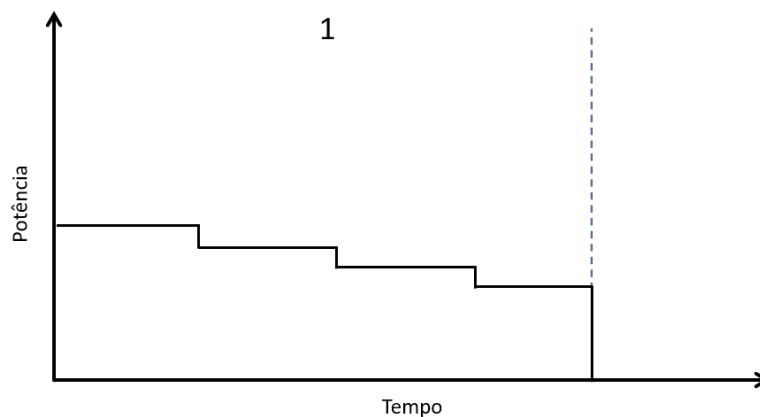


Figura 2.13: Perfil de potência típico de uma Máquina de Secar Roupa (adaptado de [45]).

2.5 Considerações

Concluindo este capítulo, torna-se aparente que a manutenção da rede como um sistema baseado na centralização da produção e da sua gestão não promove, nem assegura, um desenvolvimento sustentável. As grandes centrais de produção de energia são, na sua grande maioria, ainda alimentadas com combustíveis fósseis. Caso as metas de poluição não sejam cumpridas pode-se vir a verificar um aumento da ocorrência de eventos climáticos extremos e um acréscimo da sua violência. Estes eventos extraordinários são a principal causa para a ocorrência de falhas na rede eléctrica.

A incorporação de novas tecnologias na rede permite torná-la cada vez mais inteligente (SG), proporcionando a introdução de novas formas de produzir (FERs) e armazenar energia (SAEs), e permitindo a criação de novas formas de a gerir, tais como os programas de RP. A subdivisão da rede em partes mais pequenas (MRs) facilita a introdução de todas estas tecnologias e metodologias, pois o controlo passa a ser feito tendo em conta as necessidades locais. Para além disso, passa-se a usufruir da possibilidade de isolar certas partes da rede, por forma a impedir a propagação do efeito de falhas.

Todas estas alterações permitem não só tornar a rede mais resiliente aos danos causados por eventos climáticos extraordinários, mas também auxiliam no que toca ao cumprimento das metas de poluição impostas, possibilitando, de certa forma, reduzir a frequência e magnitude desses eventos extremos.

METODOLOGIA

Neste capítulo apresentam-se as diferentes metodologias utilizadas para simular matematicamente o funcionamento dos diferentes componentes que integram o sistema a apresentar no capítulo da implementação.

3.1 Modelação de Cargas

Existem diversos métodos utilizados para modelar o funcionamento de cargas e de conjuntos de cargas. Em [47], realiza-se uma revisão de diferentes métodos que permitem estudar o comportamento eléctrico de vários tipos/conjuntos de cargas, como estas interagem com várias estratégias de controlo e de RP e as consequências dos mesmos para novos conceitos de operação da rede.

Posto isto, nesta dissertação, a modelação do funcionamento das cargas realizou-se seguindo um modelo discreto, através dos dados referentes aos perfis de carga dos electrodomésticos abordados, considerando como referência os dados obtidos em [45]. Ainda que o artigo previamente referido apenas mencione cargas de utilização maioritariamente doméstica, isso não inviabiliza a aplicação deste tipo de modelo num outro contexto (p.e. industrial).

Através do perfil de carga obtido (P^C), conseguem-se identificar e calcular três parâmetros relevantes que permitem rapidamente identificar o tipo de carga que se está a analisar, bem como o modo de funcionamento em que esta se encontra. Estes parâmetros são:

- tempo de ciclo (T_c) – tempo decorrido entre o início e o fim do funcionamento da carga;
- potência máxima – valor máximo do perfil de carga do dispositivo;

- energia por ciclo (E^C) – energia utilizada pela carga num ciclo de funcionamento, obtido integrando o perfil de carga do dispositivo (3.1).

$$E^C = \sum_{n=1}^{T_c} P^C(n) \Delta T \quad (3.1)$$

É importante referir que estes parâmetros podem-se alterar drasticamente não só quando se consideram diferentes tipos de cargas, mas também quando se analisa uma carga com diferentes modos e programas de funcionamento.

3.2 Construção da Curva de Potência da Instalação Fotovoltaica

A previsão da energia produzida por uma instalação PV pode ser realizada de diferentes formas. Em [48], realiza-se a comparação entre diferentes modelos físicos utilizados para modelar o comportamento das células PV. Estes podem apresentar diferentes tipos de complexidade e precisão, que variam consoante o número de parâmetros que são necessários para os definir. Por norma, quanto maior a precisão do modelo, maior será a complexidade, o número de parâmetros e o poder computacional necessário para o executar.

Para além dos modelos físicos anteriores, uma metodologia generalista pode ser adoptada no cálculo da potência disponibilizada por uma instalação PV, utilizando apenas os dados fornecidos pelas fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes. Esta é baseada na metodologia utilizada pelo software de simulação e gestão de MRs HOMER Pro ([49]), que nos apresenta duas opções: uma desprezando o efeito da temperatura, utilizada quando se pretende realizar uma análise menos detalhada, e outra considerando o efeito da temperatura, para situações onde se pretende um grau de rigor um pouco mais exigente.

Na primeira opção, o valor da potência disponibilizada pelo painel PV num dado instante de tempo obtém-se através da expressão:

$$P_{PV}(t) = Y_{PV} \times \eta(t) \times \left(\frac{\overline{G}_T(t)}{\overline{G}_{T_{STC}}} \right), \forall t \quad (3.2)$$

Onde

Y_{PV} – Potência nominal instalada (soma das potências nominais de todos módulos)
(W)

$\eta(t)$ – Rendimento dos painéis PV (%)

$\overline{G}_T(t)$ – Radiação solar incidente no painel PV no instante de tempo t (kW/m^2)

$\overline{G}_{T_{STC}}$ – Radiação incidente no painel PV em condições de teste standard ($1\text{kW}/\text{m}^2$)

3.2. CONSTRUÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA DA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

Por outro lado, na segunda opção, é necessário adicionar à expressão anterior a parcela responsável pela alteração da potência disponibilizada pelos módulos PV devido ao efeito da temperatura das células dos mesmos, resultando a equação:

$$P_{PV}(t) = Y_{PV} \times \eta(t) \times \left(\frac{\overline{G}_T(t)}{\overline{G}_{T_{STC}}} \right) \times \left[1 + \alpha_P (T_C(t) - T_{C_{STC}}) \right], \forall t \quad (3.3)$$

Onde

Y_{PV} – Potência nominal instalada (soma das potências nominais de todos módulos) (W)

$\eta(t)$ – Rendimento dos painéis PV (%)

$\overline{G}_T(t)$ – Radiação solar incidente no painel PV no instante de tempo t (kW/m^2)

$\overline{G}_{T_{STC}}$ – Radiação incidente no painel PV em condições de teste standard ($1\text{kW}/\text{m}^2$)

α_P – Coeficiente de perdas por efeito da temperatura ($\%/^{\circ}\text{C}$)

$T_C(t)$ – Temperatura das células no instante de tempo t ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{C_{STC}}$ – Temperatura das células em condições de teste standard (25°C)

Na eventualidade de se utilizar o método anteriormente referido, é ainda necessário calcular a temperatura da célula T_C , a qual pode ser obtida através de vários métodos presentes na literatura. Esses métodos são abordados e comparados em [50], resultando que o método que permite obter um erro relativo à temperatura medida mais baixo (aproximadamente 5%) é o de Duffie and Beckman, pelo que será este o utilizado para realizar o cálculo deste parâmetro. É importante ainda referir que, segundo os autores do método, o método de montagem dos painéis PV tem de ser igual ao utilizado nos testes realizados em condições normais de operação, caso contrário, os resultados serão incorrectos [51]. Sendo assim, a expressão que permite calcular a temperatura das células é:

$$T_C(t) = T_a(t) + \left[\left(\frac{\overline{G}_T(t)}{\overline{G}_{T_{NOCT}}} \right) \times \left(\frac{9,5}{5,7 + 3,8V_v} \right) \times (T_{C_{NOCT}} - T_{a_{NOCT}}) \times \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha} \right) \right], \forall t \quad (3.4)$$

Onde

$T_a(t)$ – Temperatura ambiente no instante de tempo t ($^{\circ}\text{C}$)

$\overline{G}_T(t)$ – Radiação solar incidente no painel PV no instante de tempo t (kW/m^2)

$\overline{G}_{T_{NOCT}}$ – Radiação incidente no painel PV no teste em condições normais de operação ($0,8\text{kW}/\text{m}^2$)

$T_{C_{NOCT}}$ – Temperatura das células no teste em condições normais de operação ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{a_{NOCT}}$ – Temperatura ambiente no teste em condições normais de operação (20°C)

η_c – Eficiência de conversão de radiação incidente em energia eléctrica do módulo (%)

$\tau\alpha$ – Produto transmitância-absorbância efectivo (0,9)

V_v – Velocidade do vento (m/s)

3.3 Modelação de Baterias para Armazenamento de Energia

Existem vários tipos de modelos utilizados para simular o comportamento de uma bateria [52], considerando modelos de menor precisão, como é o caso do modelo "Reservatório de Energia", até aos mais exactos, tais como os modelos baseados em simulações electroquímicas detalhadas. À medida que a precisão do modelo vai aumentando, verifica-se um acréscimo significativo na complexidade computacional necessária para o executar (figura 3.1).

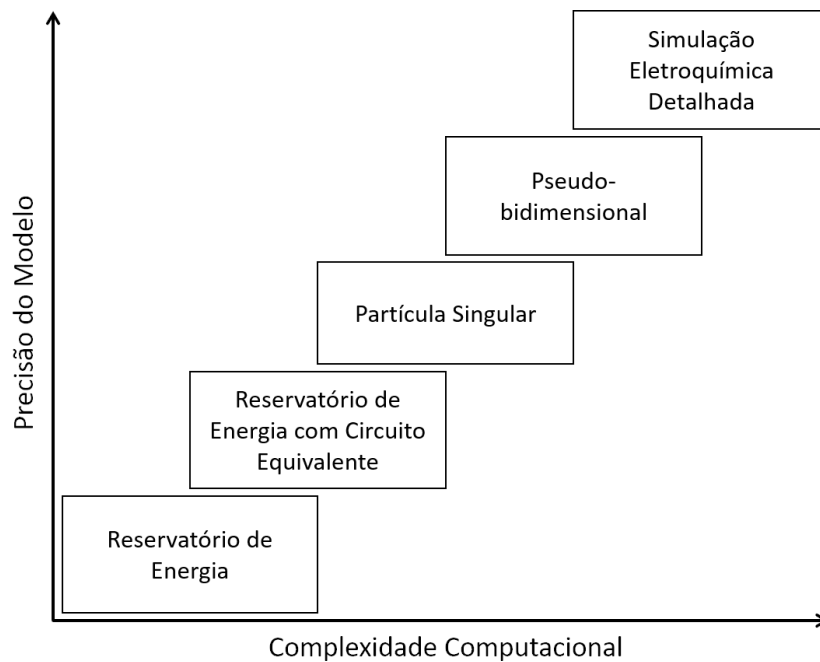


Figura 3.1: Modelos para simulação de baterias de armazenamento de energia [52].

Para manter o nível de rigor utilizado nos modelos apresentados nas secções anteriores, nesta dissertação, utilizou-se um modelo da bateria que pode ser caracterizado como um modelo de "Reservatório de Energia". Apesar de simples, revelou-se bastante útil, visto que, utilizando apenas as características dos equipamentos comumente fornecidas pelos fabricantes, o que o torna menos preciso, permite demonstrar o conceito de armazenamento de energia verificado numa bateria.

Antes de apresentar o modelo em si, é necessário definir a seguinte componente, representada na expressão 3.5. Esta permite calcular a potência líquida do sistema num instante de tempo t ($P(t)$), dada pela diferença entre a potência do gerador e a potência necessária para consumo nesse mesmo instante de tempo t ($P^G(t)$ e $P^C(t)$ respectivamente). Se este elemento for positivo, verifica-se excesso de produção de energia, sendo esta veiculada para a bateria. Pelo contrário, se for negativo, verifica-se um consumo de energia maior do que a que se está a produzir, pelo que é necessário retirar energia da bateria, permitindo assim o bom funcionamento das cargas ligadas ao sistema.

$$\Delta P(t) = P^G(t) - P^C(t), \forall t \quad (3.5)$$

Sendo assim, é agora possível apresentar o modelo que permite realizar a simulação da bateria [53], o qual pode ser definido pela expressão matemática:

$$E^b(t) = E^b(t-1) + \left(\eta_c^b \Delta P(t) \Delta T b_c + \frac{\Delta P(t) \Delta T}{\eta_d^b} b_d \right), \forall t \quad (3.6)$$

Onde

$E^b(t)$ – Energia na bateria no instante de tempo t (kWh)

$E^b(t-1)$ – Energia na bateria no instante de tempo $t-1$ (kWh)

η_c^b – Rendimento do processo de carga da bateria (%)

η_d^b – Rendimento do processo de descarga da bateria (%)

b_c – Sinal de carregamento da bateria (0 ou 1)

b_d – Sinal de descarregamento da bateria (0 ou 1)

$\Delta P(t)$ – Potência líquida do sistema no instante de tempo t (kW)

ΔT – Resolução temporal (horas)

No entanto, para simular o bom funcionamento da bateria, é ainda necessário considerar o seguinte conjunto de condições: condições de potência, condições de energia e condições de carga/descarga.

Com as condições de potência (3.7) garante-se que a potência aos terminais da bateria não ultrapassa o valor de potência de carga nominal para o qual esta foi projectada ($P_{c,max}^b$). O mesmo acontece para a situação de descarga, sendo necessário garantir que a potência pedida pela instalação não excede a potência nominal de descarga da bateria ($P_{d,max}^b$). É comum que algumas baterias possam operar acima da sua potência nominal durante alguns segundos, sem que isso reduza significativamente o seu tempo de vida. Essa funcionalidade não é considerada neste modelo.

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P(t) \leq P_{c,max}^b, \forall t \\ 0 \leq |\Delta P(t)| \leq P_{d,max}^b, \forall t \end{cases} \quad (3.7)$$

Relativamente às condições de energia, apresentadas em 3.9, estas são impostas para garantir que a energia presente na bateria se mantém dentro dos limites de energia mínima (E_{min}^b) e máxima (E_{max}^b). À semelhança das condições anteriores, estas procuram simular uma forma de protecção da bateria. A drenagem da energia da bateria por completo pode resultar em danos permanentes, pelo que, tipicamente, se define o limite mínimo de utilização entre 30% e 50% da capacidade máxima da bateria, para se prevenir danos por excesso de descarga [49]. Da mesma forma, para o limite superior, apenas é necessário garantir que a energia na bateria não ultrapassa a sua capacidade máxima.

$$\begin{cases} E_{min}^b \leq E^b(t) \leq E_{max}^b, \forall t \\ E^b(-1) = E_{inicial}^b \end{cases} \quad (3.8)$$

Por fim, no que toca às condições de carga e descarga, estas são utilizadas para garantir que a bateria não se encontra a carregar e a descarregar no mesmo instante de tempo. Para isso, consideram-se dois sinais: b_c e b_d . O primeiro indica se a bateria está a carregar, tomando o valor de 1 quando a potência líquida do sistema ($\Delta P(t)$) é positiva. Por outro lado, o segundo, indica se a bateria está a descarregar, tomando o valor de 1 quando a energia líquida do sistema é negativa.

$$\begin{cases} b_c + b_d = 1, b \in \{0, 1\} \\ b_c = 1, \text{ se } \Delta P(t) > 0, \forall t \\ b_d = 1, \text{ se } \Delta P(t) < 0, \forall t \end{cases} \quad (3.9)$$

3.4 Perfil de Carga de uma Entidade e de um Agregado

O perfil de carga é uma representação das necessidades energéticas de uma entidade durante um período de análise definido. Neste pode estar apenas representada a contribuição de uma única carga ou de um conjunto de cargas, associadas a essa entidade. Neste contexto, uma entidade representa um consumidor final de energia eléctrica, podendo este ser de qualquer tipo: doméstico, industrial, agrícola, etc. Um agregado é definido como sendo um conjunto de entidades, como por exemplo uma comunidade. Sendo assim, nesta secção, apresentam-se os métodos necessários para adicionar/remover a contribuição das diferentes cargas de uma entidade ao seu perfil de carga.

Para aplicar estes métodos é necessário garantir que se verificam duas condições. A primeira condição está relacionada com a necessidade de se conhecer o perfil de carga de cada uma das cargas presentes numa entidade, devendo este estar bem definido para todos os modos de funcionamento de cada carga. Dependendo do nível de rigor do estudo, os perfis podem ser definidos directamente dos resultados de medições experimentais ou como aproximações/generalizações dos anteriores, tal como referido na secção 3.1. Na segunda condição, é necessário garantir que o perfil de carga está definido com uma resolução temporal igual à resolução adoptada no perfil de carga da entidade.

Posto isto, a "adição" de uma carga ao perfil de carga de uma entidade pode ser expressa matematicamente através da expressão 3.10. Desta resulta que o novo valor da potência da entidade num dado instante de tempo t ($P^{C'}(t)$) é igual à soma algébrica entre o seu valor actual $P^C(t)$, antes da adição da contribuição da carga, e o valor de potência da carga $P^c(k)$.

$$P^{C'}(t) = P^C(t) + P^c(k), \forall t, k \in \{0, T_{ciclo}\} \quad (3.10)$$

Da mesma forma que se adiciona uma carga a um perfil de carga, também se pode retirar a sua contribuição, caso esta tenha sido considerada por engano ou se pretenda testar o efeito desta em vários períodos dentro do período de análise. Sendo assim, a expressão desta operação (3.11) adopta uma forma semelhante à anterior, no entanto, em vez de se realizar a soma, subtrai-se o valor de potência da carga ao perfil de carga da entidade. É importante ainda referir que, nesta situação, é necessário verificar se a contribuição da carga já tinha sido previamente adicionada ao perfil de carga da entidade, com início de ciclo no instante de tempo t .

$$P^{C'}(t) = P^C(t) - P^c(k), \forall t, k \in \{0, T_{ciclo}\} \quad (3.11)$$

Em baixo, apresenta-se um exemplo de um algoritmo de aplicação desta metodologia, referente ao processo de adição.

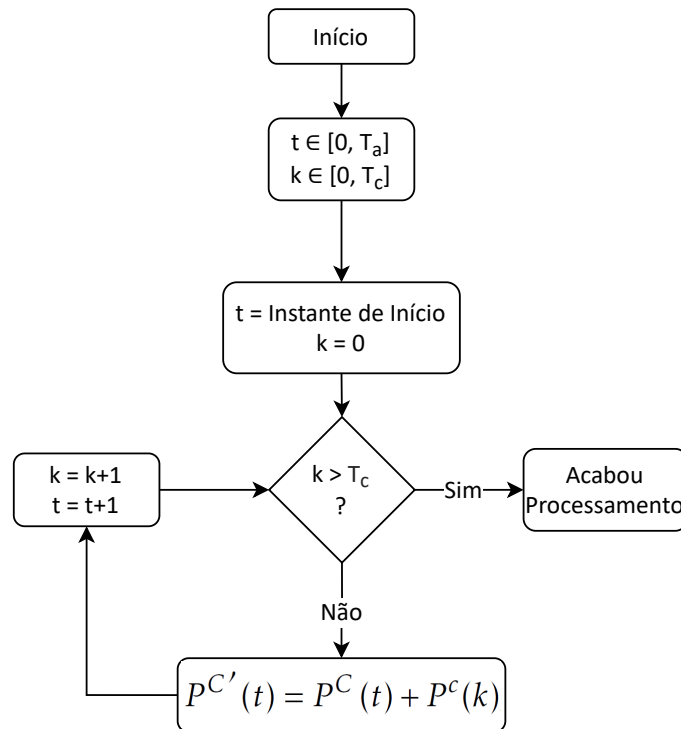


Figura 3.2: Exemplo de um fluxograma referente ao um processo de adição do perfil de carga de uma carga ao perfil de carga de uma entidade num ponto no tempo escolhido. T_a é a duração do período de análise e T_c é a duração de um ciclo da carga.

Para calcular o perfil de carga de um agregado utiliza-se a expressão apresentada de seguida (3.12), da qual resulta que o valor de potência de um agregado ($P^A(t)$), em

qualquer instante de tempo t , é igual à soma da potência de todas as entidades a ele pertencentes, nesse mesmo instante t .

$$P^A(t) = \sum_{n=1}^{n_{Cargas}} P_n^C(t) \quad \forall t \quad (3.12)$$

Por fim, para concluir esta secção, apresenta-se uma metodologia que pode ser utilizada para verificar a validade de um perfil de carga, definida pelas condições apresentadas em baixo (3.13). Esta pode tanto ser aplicada a uma entidade como a um agregado.

$$\begin{cases} P^C(t) < P^G(t) + P^B(t), P^C \text{ é válido } \forall t \\ P^C(t) > P^G(t) + P^B(t), P^C \text{ é inválido } \forall t \end{cases} \quad (3.13)$$

3.5 Flexibilidade Energética de Entidades e de Agregados

A definição de FE das cargas adoptada é semelhante ao índice de flexibilidade (AFI) utilizado em [35], já mencionado na secção 2.4.1. No entanto, em vez de se considerar apenas um período preferido de funcionamento para cada uma das carga, considera-se ainda um período alternativo, o qual não pode ter nenhuma parte contida no período preferido e vice-versa. É importante ainda referir que, em situação de utilização desta metodologia, deverá ser procurada, primeiro, a possibilidade da colocação do funcionamento da carga dentro do período preferido e, só depois, se deverá recorrer ao período alternativo.

Primeiramente, calcula-se o índice de flexibilidade associado a uma carga individual (IF^C). Este vai representar até que ponto o funcionamento dessa carga pode ser alterado, adiantado ou atrasado, dentro do período de análise (T_a), conjugando a contribuição do período preferido ($[t_{min}^P, t_{max}^P]$) e do período alternativo ($[t_{min}^A, t_{max}^A]$). Repare-se que $IF^C = 0$ corresponde a uma flexibilidade nula, pelo que a carga tem de começar o seu funcionamento, obrigatoriamente, num ponto específico dentro do período de análise. Por outro lado, $IF^C = 1$ corresponde a uma flexibilidade total dentro do período de análise, pelo que a carga pode ser colocada a funcionar em qualquer instante de tempo dentro desse mesmo período. A equação para calcular IF^C é:

$$\begin{cases} IF^C = \frac{(t_{max}^P - t_{min}^P) + (t_{max}^A - t_{min}^A)}{T_a} \\ T_a \geq (t_{max}^P - t_{min}^P) + (t_{max}^A - t_{min}^A) \end{cases} \quad (3.14)$$

Depois de calculado o IF^C de cada carga presente numa entidade, pode-se calcular o índice de flexibilidade médio ($\overline{IF}$) dessa mesma entidade. Esta ferramenta permite comparar diferentes entidades, para se perceber qual delas é mais, ou menos, flexível energeticamente.

$$\overline{IF} = \frac{\sum_{k=0}^{n_{Cargas}} IF_k^C}{n_{Cargas}} \quad (3.15)$$

Para concluir esta secção, apresenta-se uma forma de calcular uma curva de FE de uma entidade. A mesma lógica pode ser aplicada numa situação referente a um agregado.

Uma curva de FE, tal como apresentado na secção 2.4.1, representa a acumulação de energia utilizada por uma entidade/agregado ao longo do tempo, podendo esta ser calculada através da expressão:

$$\begin{cases} E(t) = E(t-1) + P(t)\Delta T, \forall t \\ E(-1) = E(0) = 0 \text{ kWh} \end{cases} \quad (3.16)$$

Onde

$E(t)$ – Energia utilizada até ao instante de tempo t (kWh)

$E(t-1)$ – Energia utilizada até ao instante de tempo anterior a t (kWh)

$P(t)$ – Potência no instante de tempo t (kW)

ΔT – Resolução temporal (horas)

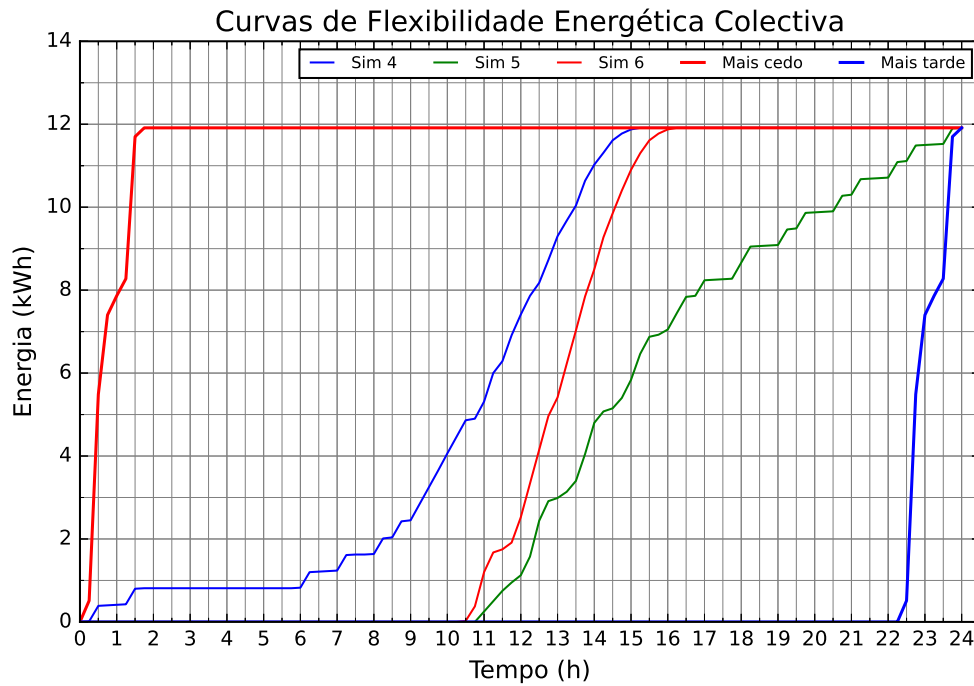


Figura 3.3: Exemplo de curvas de Flexibilidade Energética (FE) de um agregado.

Na figura 3.3 encontra-se um exemplo das curvas de FE de um agregado. As curvas "Sim 4", "Sim 5" e "Sim 6" representam vários cenários de utilização das cargas do agregado durante o período de simulação, no que diz respeito à hora em que cada uma das cargas é activada. Na simulação 4 verifica-se que as cargas foram activadas durante o período compreendido entre as 00:15 e as 15:00 horas. Na simulação 5 observa-se que as cargas foram activadas entre as 10:45 e as 24:00 horas. Por último, na simulação 6 verifica-se que as cargas foram colocadas a operar entre as 10:30 e as 16:00 horas. Nesta

última simulação verifica-se que se atingiu o máximo de energia consumida mais rapidamente do que o verificado nas restantes simulações, indicando que um maior número de cargas foi colocado a operar em simultâneo. Estas curvas encontram-se definidas dentro da área compreendida entre a curva de activação de todas as cargas do agregado o mais cedo possível (a vermelho e traço grosso) e o mais tarde possível (a azul e traço grosso). Estes resultados são semelhantes ao conceito apresentado na figura 2.10.

IMPLEMENTAÇÃO

Uma vez que o tema desta dissertação depende inteiramente da realização da simulação de vários cenários, optou-se pela construção de um simulador. Neste capítulo, será explicada a forma como este foi implementado.

4.1 Regras e Construção da Comunidade do Problema

Tal como referido em secções anteriores, o foco desta dissertação foi o estudo da gestão de energia de uma pequena comunidade (7 habitações) que se viu, subitamente, sem acesso à energia disponibilizada pela rede BT. Esta comunidade teve de satisfazer as suas necessidades energéticas através de um sistema de geração PV, considerando ainda um sistema de armazenamento de energia (bateria), instalado numa das habitações. Devido ao elevado número e tipo de cargas presentes numa habitação, apenas se considerou, numa primeira instância, que cada uma das habitações podia activar as seguintes cargas: MLR, MSR e MLL. Depois, analisou-se também o caso em que se considerou, adicionalmente, um consumo base referente à iluminação.

Para além de se ter considerado um número reduzido de cargas em cada uma das habitações, foi adicionalmente estabelecido um conjunto de regras de modo a limitar, ainda mais, o consumo de energia, para garantir que todas as habitações conseguiram colocar as suas cargas a funcionar. As regras foram as seguintes:

- cada habitação só pode colocar uma reserva para cada um dos electrodomésticos seleccionados, mesmo que esta não possua algum deles;
- as reservas são colocadas no dia anterior, para se gerar e validar uma previsão de consumo eléctrico do dia seguinte;

- a reserva pode ser realizada para qualquer hora do dia (de 15 em 15 minutos), dependendo do cenário de utilização da bateria e da potência disponível;
- caso não seja possível efectuar uma reserva, se se verificar conflito com consumo de outras habitações já agendado, é possível verificar se alguma delas está disposta a alterar a hora do seu consumo, ou até mesmo removê-lo;
- para cada electrodoméstico consideram-se dois períodos de funcionamento: preferido e alternativo. Em ocasiões onde o consumo é colocado automaticamente, tenta-se, primeiro, reservar dentro do período preferido e, depois, no alternativo.

Para "popular" esta comunidade fictícia, realizou-se um questionário a 7 pessoas, no qual se solicitava a seguinte informação referente aos hábitos que permitem caracterizar cada uma das habitações:

- frequência de utilização de cada um dos aparelhos nos meses frios (Novembro a Abril);
- frequência de utilização de cada um dos aparelhos nos meses quentes (Maio a Outubro);
- período preferido de utilização de cada um dos electrodomésticos nos meses quentes e frios;
- período alternativo de utilização de cada um dos electrodomésticos nos meses quentes e frios;

É importante referir que, por exemplo, nos meses quentes, a frequência de utilização de electrodomésticos tais como a MSR foi bastante reduzida ou até mesmo nula. Por isso, nas habitações onde se verifique uma frequência de utilização nula, considerou-se que a habitação não tem esse electrodoméstico.

Conclui-se esta secção com a topologia de alto nível do sistema eléctrico simulado (4.1), e que foi implementado de acordo com as metodologias apresentadas no capítulo anterior. Para simplificar, a contribuição do rendimento dos conversores electrónicos de potência foi considerada no rendimento da instalação PV e da bateria.

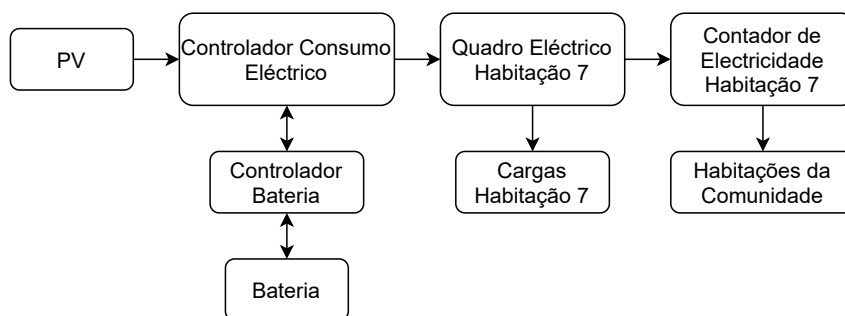


Figura 4.1: Topologia adoptada na implementação.

4.2 Simulador de Consumos Eléctricos

Para simular diferentes cenários de operação do consumo eléctrico da comunidade, optou-se pela construção de uma plataforma de simulação em Python. Este simulador divide-se em nove partes principais:

- Definições de Simulação;
- Gráficos;
- Reservas Manuais;
- Reservas Automáticas;
- Electrodomésticos;
- Comparação de Simulações;
- Iluminação;
- Tabela de Reservas e Informação Referente às Habitações;
- Gráficos de Visualização Imediata.

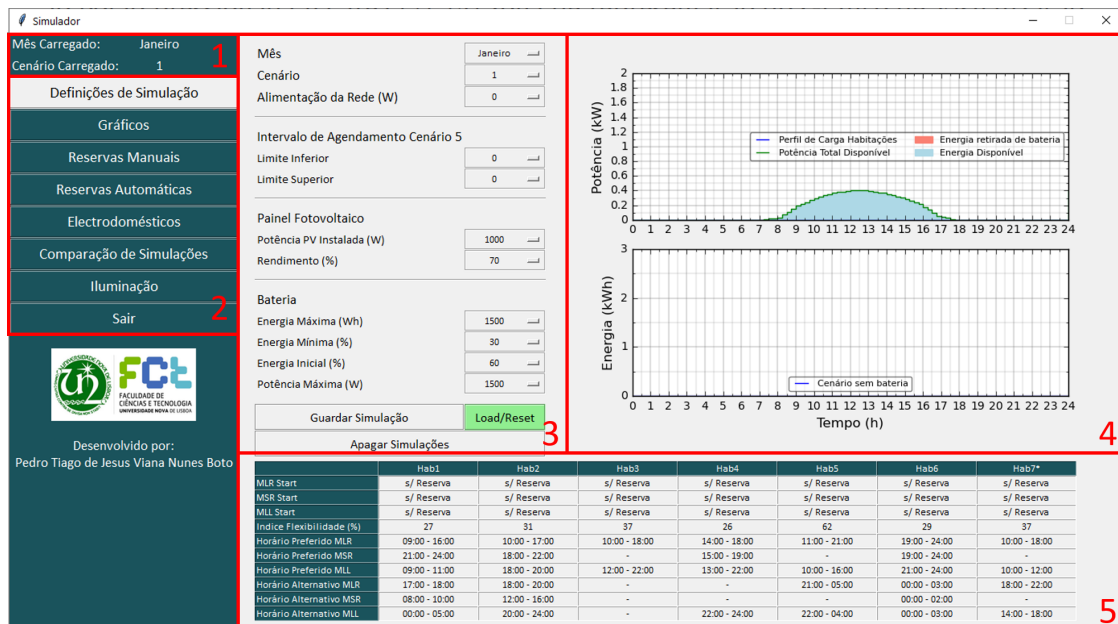


Figura 4.2: Interface da aplicação desenvolvida.

A interface da aplicação apresenta 5 partes distintas, identificadas na figura 4.2: (1) indicação do mês e do cenário escolhidos; (2) botões que permitem escolher as diferentes páginas da aplicação (cada uma destas páginas será abordada em maior detalhe mais à frente); (3) zona onde é apresentada a página de funcionalidades referente ao botão

pressionado na área (2); (4) zona de representação do Gráfico de Visualização Imediata, onde é possível visualizar em tempo real as alterações realizadas ao perfil de carga da comunidade e ao perfil energético da bateria, resultantes da colocação das reservas; (5) zona de representação da Tabela de Reservas e Informação Referente às Habitações, na qual é possível visualizar em tempo real os períodos preferidos e alternativos para a colocação de cada uma das cargas das habitações, a hora das reservas colocadas e o índice de FE de cada uma das habitações. Os elementos dos pontos 4 e 5 são actualizados sempre que uma ou mais reservas são colocadas com sucesso.

Antes de passar às próximas secções, é importante referir que se adoptou uma resolução temporal de 15 minutos, não só porque se considerou um período de análise de um dia (24 horas), mas também porque os dados utilizados para a construção dos perfis de carga dos electrodomésticos utilizados tinham essa mesma resolução. Alguns dos dados carregados no simulador apresentavam uma resolução temporal de 1 hora, pelo que estes necessitaram de ser convertidos/modificados, processo que será explicado posteriormente.

4.2.1 Bibliotecas de Python Utilizadas

Nesta sub-secção apresentam-se as bibliotecas de Python que desempenharam um papel significativo na implementação do simulador. O conjunto de funcionalidades que estes oferecem tornam não só o processo de desenvolvimento de aplicações desta natureza mais simples, mas também permitem uma visualização dos resultados mais intuitiva e apelativa.

O primeiro módulo a ser destacado é o NumPy. Este é dos principais módulos de Python utilizados na realização de computação científica, revelando-se bastante útil na realização de operações entre matrizes de dados, tais como perfis de carga.

O segundo módulo destacado é o Matplotlib. Esta biblioteca apresenta uma enorme quantidade de opções no que toca à representação gráfica de dados. Estas opções, por sua vez, possuem um elevado número de configurações que podem ser alteradas para se obter qualquer tipo de gráfico que se pretenda. Para além disso, apresentam também a capacidade de serem incorporadas em aplicações.

O terceiro e último módulo é o Tkinter. Este disponibiliza-nos um conjunto de ferramentas que permitem a construção de interfaces gráficas. O facto de ser a ferramenta standard do Python para o efeito, implica que esta apresenta algumas limitações quando comparada com outras opções mais recentes, tais como o Kivy e o PyQT.

4.2.2 Definições de Simulação

Nesta página é possível escolher valores para os diferentes parâmetros que definem as condições de simulação. Estes parâmetros serão explicados de seguida, correspondendo cada um deles a uma das letras a vermelho da figura que se segue (figura 4.3).

Mês	Janeiro	a
Cenário	1	b
Alimentação da Rede (W)	0	c
Intervalo de Agendamento Cenário 5 d		
Limite Inferior	0	
Limite Superior	0	
Painel Fotovoltaico e		
Potência PV Instalada (W)	1000	
Rendimento (%)	70	
Bateria f		
Energia Máxima (Wh)	1500	
Energia Mínima (%)	30	
Energia Inicial (%)	60	
Potência Máxima (W)	1500	
Guardar Simulação h		Load/Reset g
Apagar Simulações		

Figura 4.3: Página de escolha das definições de simulação.

4.2.2.1 Escolha do Mês (a)

Permite seleccionar o conjunto de dados referentes à radiação solar, temperatura e velocidade do vento do mês seleccionado. Estes são, posteriormente, carregados no simulador, para construir a curva de potência da instalação PV.

Os dados de radiação solar e temperatura foram obtidos através da plataforma *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) utilizando os seguintes parâmetros:

- Denominação: dados de radiação média diária (*average daily irradiance data*);
- Latitude (graus decimais): 38,895;
- Longitude (graus decimais): -8,218;
- Ângulo de inclinação (graus): 35;
- Azimute (graus): 0;

- Base de Dados: SARAH;
- Data de actualização dos dados: 15/10/2019.

Os dados da velocidade do vento foram obtidos a partir da plataforma do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), introduzindo os seguintes parâmetros:

- Estação: 20I/01G (Pavia);
- Parâmetros com Dados: Velocidade do vento média diária;
- Período de Análise: de 01/01/2019 a 31/12/2019.

Para além disso, a escolha do mês permite ainda seleccionar os dados referentes aos hábitos de cada uma das habitações da comunidade, visto que se realiza a distinção entre meses frios e meses quentes, pois a utilização de certos electrodomésticos depende da altura do ano.

4.2.2.2 Escolha do Cenário (b)

Permite escolher o cenário de utilização da bateria que vai ser considerado durante a simulação. Os períodos em que a bateria pode descarregar dependem do cenário seleccionado. Por outro lado, a bateria pode carregar em qualquer altura do período de simulação, aumentando a sua carga quando existe excesso de produção em relação ao consumo.

Cenário 1

Este cenário permite simular o caso onde apenas se tem acesso ao sistema de produção PV, não sendo permitida a utilização da bateria. Visto que não é possível a utilização de energia proveniente da rede, a colocação de reservas fora da curva PV não é permitida. Para além disso, a colocação de reservas dentro da curva PV fica condicionada pela habilitade de o sistema fornecer potência suficiente que possibilite o bom funcionamento dos equipamentos dos consumidores.

Cenário 2

Com este cenário procura-se simular a situação em que se tem acesso ao sistema de produção e armazenamento completo, PV mais bateria. A bateria só pode ser utilizada para auxiliar a instalação PV a satisfazer as necessidades energéticas da comunidade dentro dos limites da curva PV. Sendo assim, à semelhança do que acontecia no cenário anterior, apenas é admitida a colocação de reservas dentro dos limites da curva PV.

Cenário 3

Neste cenário, à semelhança do cenário anterior, dispõe-se do sistema de produção e armazenamento completo, no entanto, a bateria apenas pode ser utilizada para satisfazer

necessidade energéticas fora dos limites da curva PV. Dentro da curva PV obtém-se um comportamento semelhante ao verificado no cenário 1, estando a colocação de reservas limitada pela capacidade da instalação PV fornecer potência suficiente à comunidade.

Cenário 4

Neste cenário, tal como nos dois cenários anteriores, cenário 2 e 3, tem-se acesso à instalação completa, PV mais bateria. No entanto, esta última pode agora ser utilizada em qualquer altura do dia, permitindo satisfazer necessidades energéticas dentro e fora da curva PV.

Cenário 5

Neste último cenário pretende-se criar um comportamento um pouco diferente dos cenários anteriores, onde se ia verificando um aumento gradual da frequência de utilização da bateria. Neste, adopta-se uma configuração do sistema de produção e armazenamento idêntica à utilizada nos cenários 2, 3 e 4, no entanto, o período onde é permitida a utilização da bateria é agora variável. Os limites deste período são definidos em (d) da figura 4.3.

4.2.2.3 Escolha da Potência PV Instalada (e)

Nesta secção é possível escolher a potência da instalação PV e o seu rendimento. Este rendimento permite simular o efeito das perdas nos condutores, perdas por obstrução total ou parcial dos painéis e perdas associadas aos conversores electrónicos de potência.

É possível escolher uma combinação das seguintes opções:

- Potência PV: 2000W, 4000W, 6000W e 28000W;
- Rendimento: 60%, 70%, 80%, 90% e 100%.

Relativamente aos restantes parâmetros que foram necessários para construir o perfil de produção da instalação PV, segundo os modelos apresentados no capítulo da metodologia (secção 3.2), estes foram configurados directamente na aplicação, não podendo ser alterados pelo utilizador, e foram obtidos através de uma pesquisa não exaustiva de várias opções presentes no mercado. Optou-se por modelar o módulo PV com as características presentes na tabela 4.1, retiradas da ficha técnica do fabricante.

Tabela 4.1: Módulo PV escolhido.

Modelo	SHARP ND-Q250F7
Tipo	Policristalino
Potência Nominal (W)	250W
Eficiência de Conversão (η_c)	15,3%
Temperatura da Célula ($T_{C_{NOCT}}$)	47,5°C
Coeficiente de Potência da Temperatura (α_p)	-0,485%/°C

4.2.2.4 Escolha da Bateria Instalada (f)

Nesta secção é possível escolher os parâmetros da bateria que vão ser utilizados para implementar, segundo o modelo já apresentado na secção 3.3, o seu sistema de gestão.

É possível escolher uma combinação das seguintes opções:

- Energia máxima: 1500Wh, 3000Wh, 6000Wh, 9000Wh e 21000Wh;
- Energia mínima (percentagem do valor máximo): 30%, 40%, 50%;
- Energia inicial (percentagem do valor máximo): 30%, 60%, 80% e 100%;
- Potência Máxima (carga/descarga): 1500W, 3000W, 10500W.

À semelhança do que foi feito na secção anterior, referente à instalação PV, realizou-se uma pesquisa não exaustiva das várias opções presentes no mercado para auxiliar na escolha dos valores apresentados em cada um dos parâmetros referidos anteriormente.

4.2.2.5 Botão de *Load/Reset* (g)

Este botão desempenha um papel fundamental na operação do simulador, permitindo reconfigurá-lo para o modo de operação determinado pelas definições escolhidas (anteriormente abordadas). Na figura seguinte, é possível visualizar a sequência que é executada.

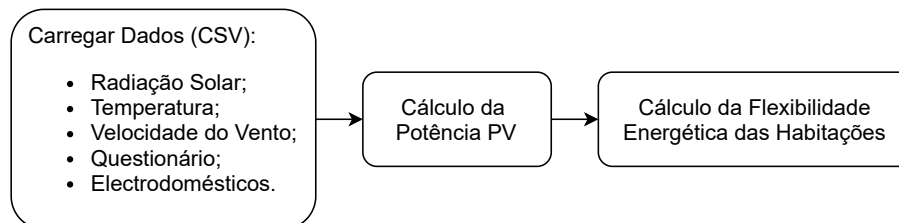


Figura 4.4: Fluxograma de carregamento de dados no simulador.

Na primeira etapa, carregam-se no simulador os dados referentes à radiação solar, temperatura, velocidade do vento, aos dados de hábitos dos habitantes resultantes do questionário realizado e aos perfis de carga de um ciclo de funcionamento de cada um dos electrodomésticos. Estes encontram-se em ficheiros CSV, permitindo, se necessário, adicionar dados, como por exemplo, adicionar mais habitações ou mais tipos ou modos de funcionamento de electrodomésticos.

No segundo passo, calcula-se uma previsão da potência gerada pela instalação PV. A função responsável por este cálculo implementa-se a partir do fluxograma representado na figura 4.5, onde a temperatura das células ($T_C(t)$) e a potência ($P_{PV}(t)$) são obtidos, para todas as horas presentes no período de análise (T_a), recorrendo aos métodos já apresentados em 3.2.

No entanto, visto que se pretende uma resolução de 15 minutos, para comportar a resolução temporal dos perfis de carga dos electrodomésticos, é necessário realizar uma

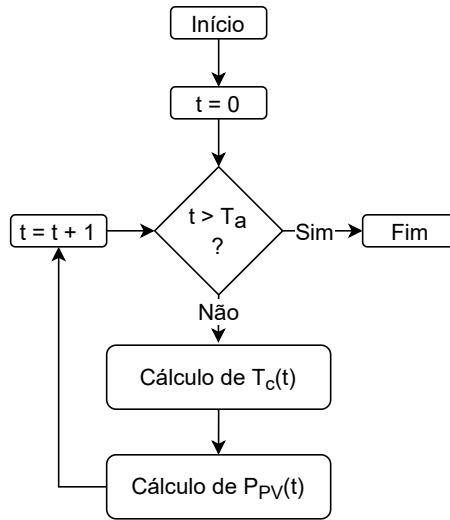


Figura 4.5: Fluxograma de cálculo da potência gerada pela instalação PV.

interpolação linear (equação (4.1)) aos dados obtidos no cálculo anterior, pois estes apresentam uma resolução de 1 hora, à semelhança dos dados da radiação solar e temperatura nele utilizados.

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (4.1)$$

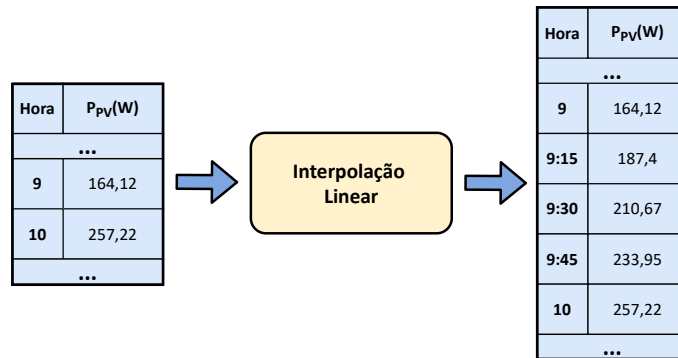


Figura 4.6: Exemplo de aplicação de interpolação aos dados obtidos após o cálculo da potência PV.

Na terceira e última etapa, calcula-se a FE média de cada uma das habitações da comunidade a partir dos dados resultantes do questionário, carregados na primeira etapa, e utilizando a metodologia já apresentada na secção 3.5. Este parâmetro vai permitir identificar quais as habitações mais e menos flexíveis da comunidade.

4.2.3 Gráficos

Nesta página é possível escolher visualizar diferentes gráficos que permitem representar os resultados gerados pela aplicação. Estes vão ser fundamentais para comparar a performance dos diferentes cenários no capítulo seguinte.

As opções de escolha são as seguintes:

- Perfil de Radiação Solar – possibilita visualizar o perfil de temperatura média diária e de radiação solar média diária directa, difusa e global (soma da directa e difusa) do mês seleccionado na página de Definições de Simulação (4.2.2);
- Perfil de Potência PV – permite visualizar o perfil de potência média diária da instalação PV antes e depois de ser aplicada uma interpolação linear à primeira curva, já referido na secção anterior;
- *Home Plot* – permite visualizar em maior detalhe os gráficos destacados na secção 4 da figura 4.2 referentes ao perfil da instalação PV, ao perfil de carga da comunidade e ao perfil de energia na bateria;
- Perfil de Flexibilidade Energética Diário Singular – permite visualizar as curvas de FE de cada uma das habitações da comunidade no mesmo gráfico. Estas são desenhadas dentro da área compreendida entre a curva de activação de todas as cargas da habitação com o maior número de electrodomésticos o mais cedo possível e o mais tarde possível;
- Perfil de Flexibilidade Energética Diário Total – permite visualizar a curva de FE da comunidade, calculada recorrendo ao método já apresentado no capítulo da metodologia (3.5). Esta é traçada dentro da área compreendida entre a curva de activação de todas as cargas da comunidade o mais cedo possível e o mais tarde possível;
- Número de Utilizações Diárias p/Electrodoméstico – permite visualizar o número de reservas colocadas de cada um dos electrodomésticos.

4.2.4 Reservas Manuais

As reservas manuais permitem fazer o agendamento do início do funcionamento dos electrodomésticos de cada uma das habitações da comunidade para a hora seleccionada.

Na figura seguinte, figura 4.7, apresenta-se a página referente a esta funcionalidade. Em (a) é possível alterar a habitação, em (b) escolhe-se o electrodoméstico que se pretende agendar e em (c) selecciona-se a hora para a qual se pretende colocar a reserva (em intervalos de 15 minutos). Ao carregar no botão "Sugerir Hora"(d) obtém-se uma lista das horas que estão disponíveis para reserva do electrodoméstico seleccionado na caixa de texto (g). Os botões "Adicionar Consumo" (e) e "Remover Consumo" (f) servem para colocar uma reserva e remover uma reserva respectivamente.

Nas secções que se seguem será explicada a forma como cada uma das funcionalidades anteriores foi implementada, através das metodologias já apresentadas na secção 3.4 do capítulo da metodologia, começando-se pelas ferramentas mais simples, as quais integram as mais complexas, apresentadas por último.

Numero Habitação: 1

Electrodoméstico: MLR

Hora da Reserva: 00:00

Sugerir Hora

Adicionar Consumo

Remover Consumo

Horas Sugeridas

- 10:30
- 10:45
- 11:00
- 11:15
- 11:30
- 11:45
- 12:00

Figura 4.7: Página de colocação de reservas manuais.

4.2.4.1 Adição de Consumo Eléctrico (ACE)

A adição da contribuição de uma carga ao perfil de carga da comunidade é feita através de uma função construída a partir do fluxograma apresentado em baixo (figura 4.8). Dada a hora da reserva, em quartos de hora, soma-se o valor de potência da carga ($P^c(k)$) ao valor de potência da comunidade no instante de tempo t ($P^C(t)$). Esta operação é realizada para todos os pontos do perfil de carga do electrodoméstico até que k seja maior que a duração de um ciclo de funcionamento do mesmo (T_C).

Esta função será representada nos algoritmos que se seguem através de um bloco denominado ACE.

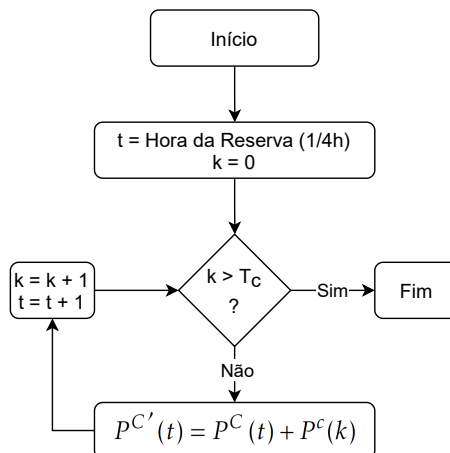


Figura 4.8: Fluxograma de adição de consumo eléctrico.

4.2.4.2 Remoção de Consumo Eléctrico (RCE)

A remoção da contribuição de uma carga ao perfil de carga da comunidade é feita através de uma função implementada a partir do fluxograma representado na figura 4.9. Este apresenta um funcionamento semelhante ao apresentado anteriormente, no entanto, em vez de se somar o valor de potência da carga ao da comunidade subtrai-se.

Esta função será representada nos algoritmos que se seguem através de um bloco denominado RCE.

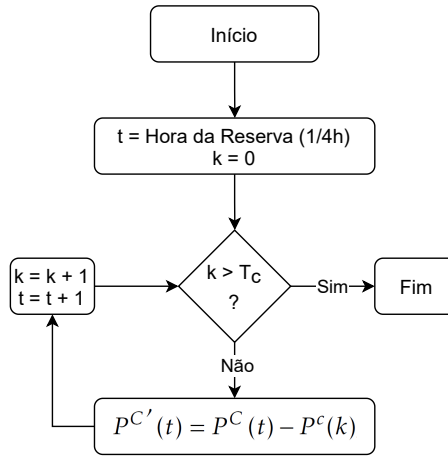


Figura 4.9: Fluxograma de remoção de consumo eléctrico.

4.2.4.3 Controlo de Carga da Bateria (CCB)

O controlo de carga da bateria é feito através de uma função implementada a partir do fluxograma representado na figura 4.10. Neste, analisa-se se as trocas de energia realizadas entre a bateria e o restante sistema (gerador PV e comunidade) não violam os parâmetros e condições definidas nas definições de simulação (4.2.2.4).

Analisando o valor de potência líquida do sistema ($\Delta P(t)$), visto da perspectiva da bateria, dado pela diferença entre a potência do gerador e a potência de carga da comunidade, conseguem-se identificar três situações: (1) a bateria mantém a sua carga, (2) a bateria carrega e (3) a bateria descarrega.

Na primeira situação, com $\Delta P(t) = 0$, o valor de energia na bateria no instante de tempo t é igual ao nela presente no instante anterior $t-1$ e o instante de tempo t é validado.

Na segunda situação, com $\Delta P(t) > 0$, verifica-se excesso de produção em relação às necessidades energéticas da comunidade, pelo que se tenta veicular esse excedente para a bateria. No entanto, se $\Delta P(t)$ exceder o valor de potência de carregamento nominal da bateria (P_c), "corta-se" parte da potência em excesso, igualando-se $\Delta P(t)$ a P_c . Por fim, se se prever que a energia da bateria no instante t (ΔE) vai ultrapassar a sua capacidade máxima (E_{Max}^B), limita-se a carga da mesma ao seu valor máximo. Por outro lado, se a situação anterior não se verificar, o valor de energia na bateria no instante de tempo t ($E^B(t)$) toma o previsto. Em ambas as situações o instante de tempo t é validado.

Na terceira situação, com $\Delta P(t) < 0$, verifica-se excesso de consumo em relação à produção, pelo que é necessário veicular energia da bateria para o sistema. No entanto, se $|\Delta P(t)|$ exceder o valor de potência de descarga nominal da bateria (P_d), o instante de tempo t é imediatamente invalidado. Por outro lado, se a situação anterior não se verificar, realiza-se a previsão para a energia da bateria no instante de tempo t (ΔE). Se se prever que a energia da bateria vai descer a baixo do limite mínimo definido (E_{Min}^B), invalida-se o instante de tempo t . Caso contrário, iguala-se o valor de energia na bateria no instante de tempo t ($E^B(t)$) ao valor obtido na previsão e valida-se o instante de tempo t .

Por último, os dois sinais F_c e F_d representam o sinal de carga e descarga respectivamente. Estes servem para adaptar o algoritmo aos diferentes cenários de operação da bateria, já apresentados anteriormente.

Esta função será representada nos algoritmos que se seguem através de um bloco denominado de CCB.

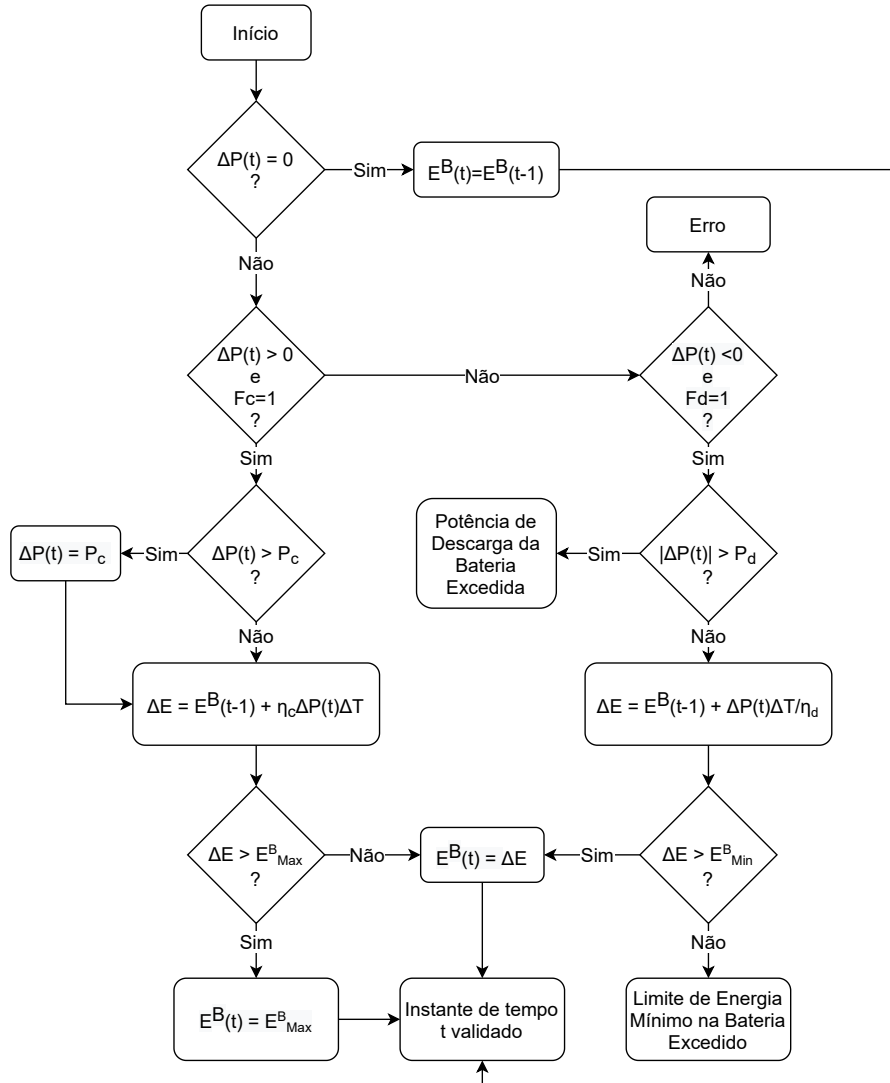


Figura 4.10: Fluxograma de controlo de carga da bateria.

4.2.4.4 Validação de Perfil de Carga (VPC)

A validação do perfil de carga da comunidade é implementada a partir do fluxograma representado na figura 4.11. Neste, verifica-se, para cada ponto dentro do período de análise (T_a), se a potência de carga da comunidade ultrapassa o valor de potência combinada do sistema de produção PV e da bateria. Se em algum desses instantes de tempo se verificar essa situação, o perfil é invalidado. Caso contrário, é validado.

Esta função será representada nos algoritmos que se seguem através de um bloco denominado de VPC.

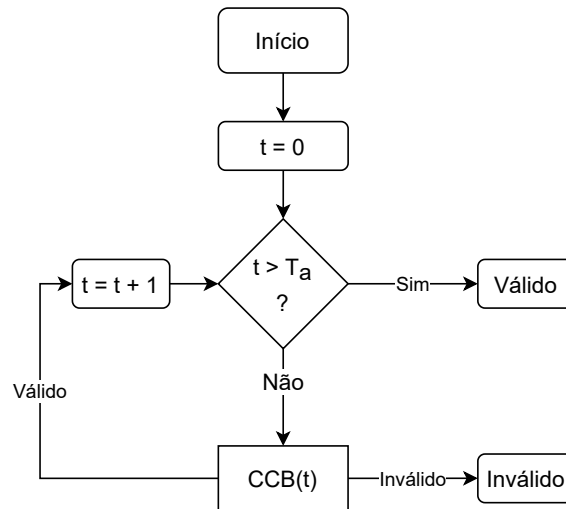


Figura 4.11: Fluxograma de validação do perfil de carga da comunidade.

4.2.4.5 Tentativa de Reserva Simples (TRS)

Este algoritmo, representado na figura 4.12, é a forma mais simples de colocação de uma reserva de consumo de uma carga. Neste, verifica-se se a habitação que está a tentar colocar a reserva tem o electrodoméstico que está a tentar reservar e se este já tem alguma hora agendada dentro do período de simulação, visto que, tal como já referido, só é permitida uma reserva para cada um dos electrodomésticos das habitações da comunidade. Se essa habitação não tiver esse electrodoméstico ou se esse electrodoméstico já tiver um agendamento colocado a tentativa de reserva falha, não sendo esta colocada. Por outro lado, se a situação contrária à anterior se verificar, utiliza-se o algoritmo ACE (na Hora Escolhida para a reserva) para adicionar a contribuição dessa carga ao perfil da comunidade. Posteriormente, valida-se o perfil de carga da comunidade, recorrendo ao algoritmo VPC, para garantir que a energia gerada/armazenada pelo sistema é suficiente para satisfazer as necessidades da comunidade. Se o VPC validar o novo perfil da comunidade a reserva é colocada. Por outro lado, se o VPC invalidar o novo perfil de carga da comunidade, utiliza-se o algoritmo RCE para remover a contribuição da carga, voltando as necessidades energéticas da comunidade ao estado em que se encontravam antes da adição da

mesma, e a reserva não é colocada.

Esta função será representada nos próximos algoritmos através de um bloco denominado de TRS.

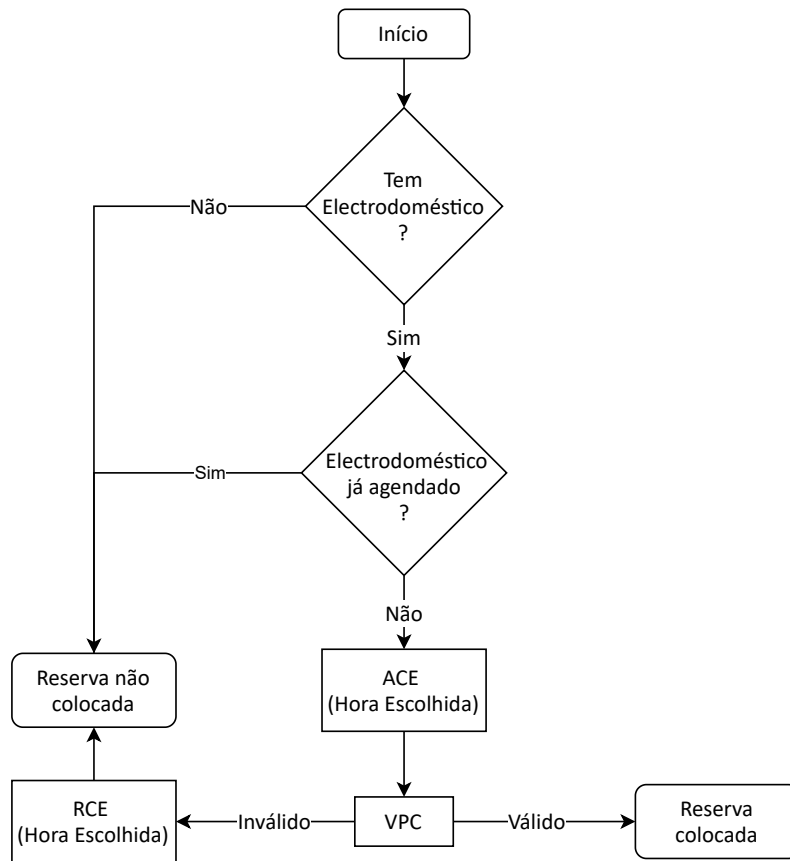


Figura 4.12: Fluxograma para colocação de uma reserva (simples).

4.2.4.6 Tentativa de Reserva Completa (TRC)

Esta função, implementada a partir do algoritmo representado na figura 4.13, é uma versão mais completa da apresentada anteriormente (TRS). Nesta, no entanto, verifica-se o motivo pelo qual a reserva não pode ser colocada, para além das restrições de potência já verificadas pelo VPC.

Em primeiro lugar, verifica-se se existe alguma/as carga/as, de outra habitação, com uma reserva colocada próxima da hora para a qual se está a tentar colocar a reserva. Se existir, é provável que a alteração da hora da reserva de uma dessas cargas permita a colocação da nova carga. Se, pelo contrário, não existir nenhuma carga em conflito, a tentativa de reserva é imediatamente invalidada.

Depois de identificadas as cargas em conflito, "pergunta-se" à respectiva habitação se pretende alterar o seu consumo. Se uma delas aceitar tal alteração, a sua carga é removida do perfil de comunidade, recorrendo à função RCE.

Posteriormente, procura-se reagendar a carga a alterar para uma hora dentro do seu período preferido de funcionamento. Caso não seja possível colocar nesse período, procura-se uma hora de reserva dentro do período de funcionamento alternativo.

Por fim, resultam duas situações possíveis: (1) na eventualidade de não ser possível colocar o consumo em nenhum dos períodos definidos, volta-se a colocar a carga na sua posição original e avança-se para a próxima habitação com uma carga em conflito, repetindo-se este processo até se esgotarem as opções de troca, situação na qual a tentativa de reserva da carga inicial é dada como inválida; (2) se for possível colocar o consumo em um dos períodos definidos, realiza-se o agendamento das duas cargas.

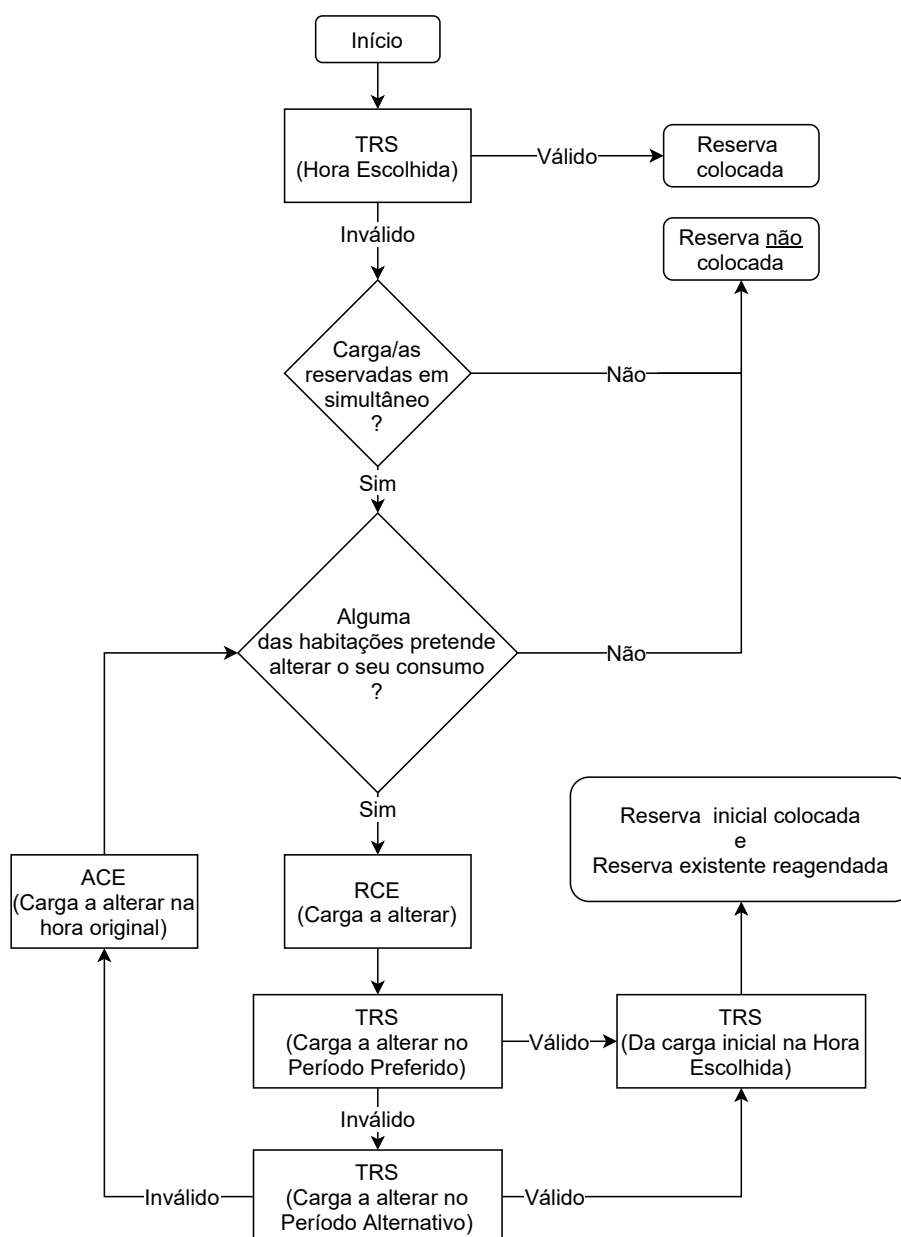


Figura 4.13: Fluxograma para colocação de uma reserva (completa).

4.2.5 Reservas Automáticas

Esta funcionalidade permite realizar o agendamento dos equipamentos dos utilizadores de uma forma automática, sem que estes tenham de colocar cada uma das reservas individualmente. Enquanto o modo de consumo não for activado, representado junto da letra (c) da figura 4.14, todas as reservas são colocadas dentro dos períodos de utilização preferidos e alternativos de cada uma das cargas de cada uma das habitações. Se isso não for possível, a reserva não é colocada.

Sendo assim, existem três componentes que podem alterar a forma como esta funcionalidade opera, alterando a quantidade de reservas que podem ser colocadas dentro do período de análise. Estas componentes são: (a) ordem das habitações, (b) ordem dos electrodomésticos e (c) ignorar períodos de reserva preferidos e alternativos.

Figura 4.14: Página de colocação de reservas automáticas.

A primeira componente permite definir a ordem pela qual as habitações colocam as suas reservas, sendo possível escolher uma de seis opções:

- Flexibilidade Decrescente – Começa-se por agendar as cargas das habitações com maior FE;
- Flexibilidade Crescente – Começa-se por agendar as cargas das habitações com menor FE;
- Número de Habitação Decrescente – Começa-se por agendar as cargas das habitações com número de identificação maior;
- Número de Habitação Crescente – Começa-se por agendar as cargas das habitações com número de identificação menor;
- Dono Primeiro – Começa-se por agendar as cargas da habitação com o sistema de produção/armazenamento de energia, sendo que, depois desta, agenda-se por ordem crescente do número de identificação;

- Aleatório – A ordem das habitações é escolhida aleatoriamente.

A segunda componente permite definir a ordem pela qual as cargas são colocadas, sendo possível escolher uma de seis opções:

- MLR Primeiro – Começa-se por agendar as MLR, depois as MSR e por fim as MLL;
- MSR Primeiro – Começa-se por agendar as MSR, depois as MLR e por fim as MLL;
- MLL Primeiro – Começa-se por agendar as MLL, depois as MLR e por fim as MSR;
- Utilização Mais Frequente – Realizam-se as reservas por ordem decrescente de utilização, começando-se pela carga com maior frequência de utilização e acabando com a de utilização menos frequente, neste caso, MLL e MSR respectivamente;
- Utilização Menos Frequente – Realizam-se as reservas por ordem crescente de utilização, começando-se pela carga de menor frequência de utilização e acabando com a de utilização mais frequente, neste caso, MSR e MLL respectivamente;
- Aleatório – A ordem das cargas é escolhida aleatoriamente.

A terceira e última componente permite ignorar os períodos de reserva preferidos e alternativos, sendo possível escolher uma de três opções:

- Mais Cedo – Tenta-se realizar o agendamento das cargas o mais cedo possível dentro do período de análise;
- Meio – Tenta-se realizar o agendamento das cargas a partir do meio do período de análise;
- Mais Tarde – Tenta-se realizar o agendamento das cargas o mais tarde possível dentro do período de análise.

Para concluir, na figura 4.15, observa-se a forma como esta funcionalidade é executada, podendo-se destacar quatro fases. Na primeira, Fase 0, efectua-se o cálculo das listas que permitem definir a ordem da colocação das reservas, conforme o que foi seleccionado nos parâmetros anteriores, as quais são representadas a amarelo. Nas fases seguintes (Fase 1, Fase 2 e Fase 3) realizam-se as reservas sequencialmente, recorrendo ao algoritmo TRS, já abordado na secção anterior. Se uma reserva não for viabilizada, passa-se à seguinte. A mudança de fase marca a mudança do electrodoméstico que está a ser agendado. Por fim, é importante referir que, à excepção do que acontece quando se escolhe o modo aleatório, a ordem pela qual se realizam as reservas das habitações é igual em cada uma das fases.

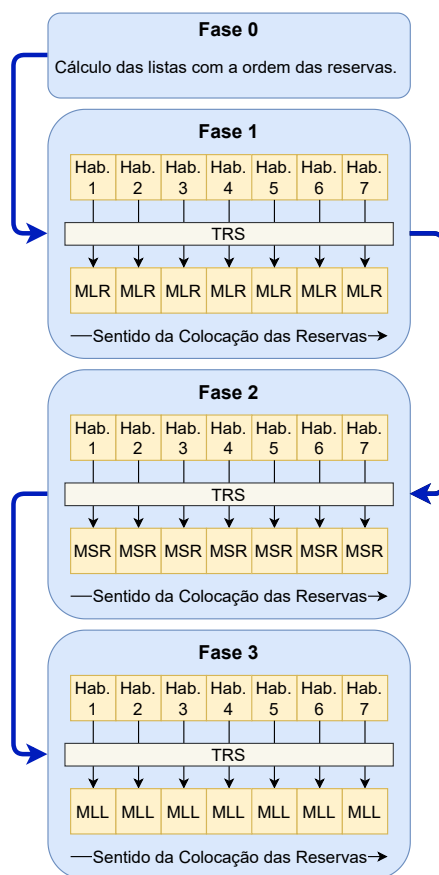


Figura 4.15: Fluxograma para colocação de reservas automaticamente.

4.2.6 Electrodomésticos

Nesta página da aplicação, imagem 4.16, é possível visualizar os parâmetros relevantes e os perfis de carga de cada um dos electrodomésticos modelados.

Máquina de Lavar Roupa (MLR)	
Tempo de ciclo: 1.75 h	Perfil de Potência
Energia por ciclo: 712.5 Wh	
Potência máxima: 1200.0 W	
Máquina de Secar Roupa (MSR)	
Tempo de ciclo: 1.75 h	Perfil de Potência
Energia por ciclo: 1237.5 Wh	
Potência máxima: 1000.0 W	
Máquina de Lavar Louça (MLL)	
Tempo de ciclo: 1.75 h	Perfil de Potência
Energia por ciclo: 812.5 Wh	
Potência máxima: 1500.0 W	

Figura 4.16: Página com informação dos electrodomésticos.

O tempo de ciclo e a potência máxima encontram-se recorrendo a uma função básica de Python que permite encontrar o valor máximo de um conjunto de dados. Relativamente ao tempo de ciclo, este é o maior valor encontrado no vector de dados referente ao tempo. Por outro lado, a potência máxima resulta do maior valor do vector de dados com a evolução temporal da potência do aparelho ao longo de um ciclo de funcionamento.

A energia utilizada por ciclo calcula-se através de uma função desenvolvida com base no fluxograma apresentado em baixo (figura 4.17), o qual utiliza a metodologia apresentada na secção 3.1 do capítulo da metodologia.

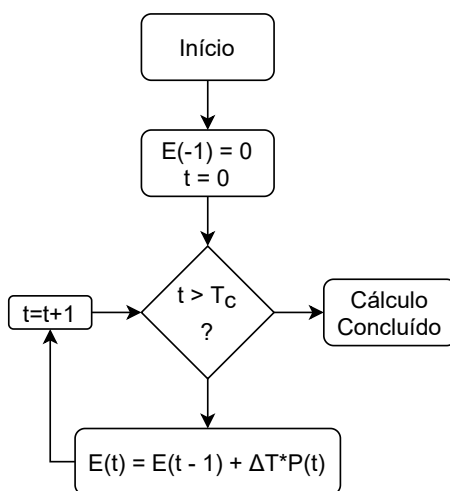


Figura 4.17: Fluxograma para o cálculo da energia.

Por fim, como já mencionado, é possível visualizar o perfil de carga de cada um dos electrodomésticos, os quais são apresentados de seguida, nas figuras 4.18, 4.19 e 4.20. Os dados utilizados para gerar estes perfis são os apresentados na secção de anexos I.

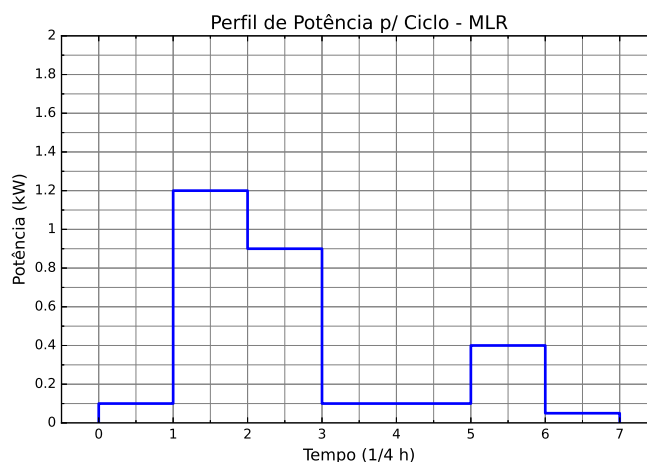


Figura 4.18: Perfil de carga da Máquina de Lavar Roupa (MLR).

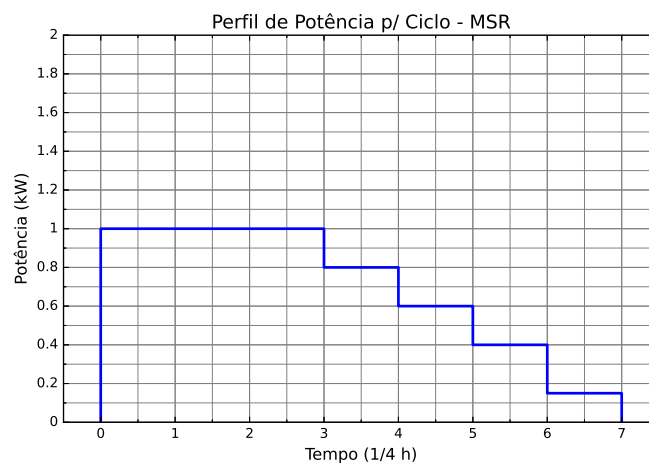


Figura 4.19: Perfil de carga da Máquina de Secar Roupa (MSR).

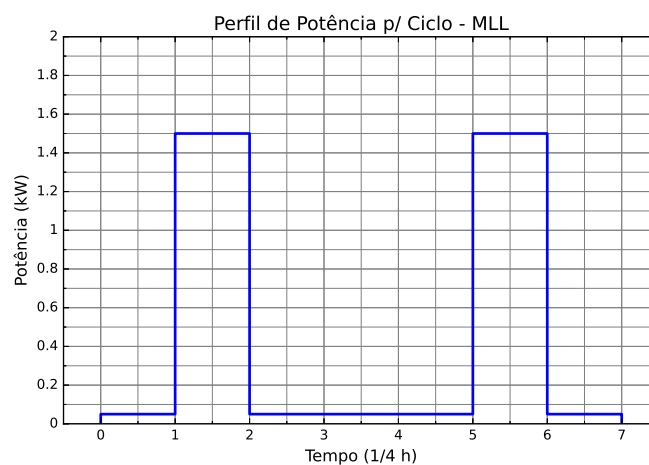


Figura 4.20: Perfil de carga da Máquina de Lavar Louça (MLL).

4.2.7 Comparação de Simulações

Esta funcionalidade permite realizar a comparação entre resultados de várias simulações que foram guardadas através do botão "Guardar", (h) da figura 4.3. Em baixo apresenta-se a página referente a esta funcionalidade.

Nº Simulações a

Perfil de Flexibilidade Energética Diário Total

Perfil de Potência Diário Total

Número de Utilizações Diárias p/ Electrodoméstico

Perfil de carga da bateria

Figura 4.21: Página de comparação de simulações.

Em (a) introduz-se a sequência com o número das simulações que se pretendem comparar. Por exemplo, caso se tencione comparar as simulações 1, 2 e 3, introduz-se a sequência "1,2,3". A ordem da sequência não importa, sendo importante apenas que as simulações existam e que não sejam utilizados caracteres estranhos (diferentes da virgula e algarismos).

É possível realizar a comparação entre:

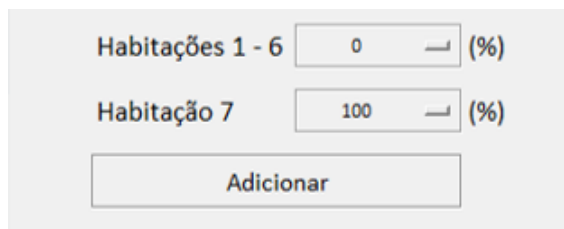
- Perfis de Flexibilidade Energética Diários Totais;
- Perfis de Potência Diários Totais;
- Número de Utilizações Diárias p/Aparelho;
- Perfis de Carga da Bateria.

4.2.8 Iluminação

Nesta página da aplicação é possível adicionar um consumo base à comunidade, referente ao consumo eléctrico relacionado com a iluminação de cada uma das habitações, sendo possível simular diferentes coeficientes de utilização desse consumo.

A instalação provedora de energia pertence à habitação 7, por isso, o seu coeficiente de utilização encontra-se destacado das restantes habitações da comunidade. O valor deste coeficiente varia entre 0% e 100%, em incrementos de 20%. O perfil diário de iluminação considerado para uma habitação é o apresentado em [54] e encontra-se na secção de anexos I. Ao consumo de cada uma das habitações é adicionado o perfil de carga da iluminação multiplicado pelo respectivo coeficiente de utilização.

É importante referir que esta funcionalidade apenas pode ser utilizada se o cenário de utilização de bateria for o cenário 4, pois este é o único cenário que permite a utilização da bateria em qualquer altura do dia. Para além disso, é necessário garantir que a bateria escolhida tem uma capacidade energética e energia inicial grandes o suficiente para suportar este consumo adicional.



Habitações 1 - 6	0	(%)
Habitação 7	100	(%)
Adicionar		

Figura 4.22: Página para adição de iluminação às habitações da comunidade.

RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados das simulações de vários cenários de operação obtidos a partir do simulador apresentado no capítulo anterior. Em cada uma das secções que se seguem serão indicadas as definições de simulação que foram utilizadas em cada um dos cenários, escolhidas de forma a representar da melhor forma uma situação real.

5.1 Perfil de Potência PV Gerado

Esta secção permite visualizar o perfil de potência PV da instalação presente na comunidade. Este perfil, como já explicado anteriormente, é calculado através dos métodos presentes na secção 3.2. Deste modo, para a obtenção destes resultados, foram considerados os dados de radiação solar e temperatura referentes ao mês de Setembro e, para além disso, admitiu-se que a habitação fornecedora de energia tem uma instalação PV de 4kW com um rendimento de 70%.

Na figura 5.1 encontram-se representadas as curvas referentes à radiação solar global, directa e difusa. A radiação global resulta da soma algébrica entre o valor da radiação directa e da radiação difusa em cada um dos pontos. Para além disso, é possível visualizar a evolução do valor da temperatura ambiente ao longo do dia.

Na figura 5.2 observa-se a curva de potência PV obtida após a aplicação dos métodos de cálculo apresentados na secção 3.2, representada pela linha vermelha. Esta apresenta uma resolução temporal de uma hora, a qual não é compatível com a resolução temporal utilizada nos perfis de carga dos electrodomésticos considerados. Para contornar esse obstáculo, realizou-se uma interpolação linear, resultando uma curva de potência PV "manipulada", representada a azul.

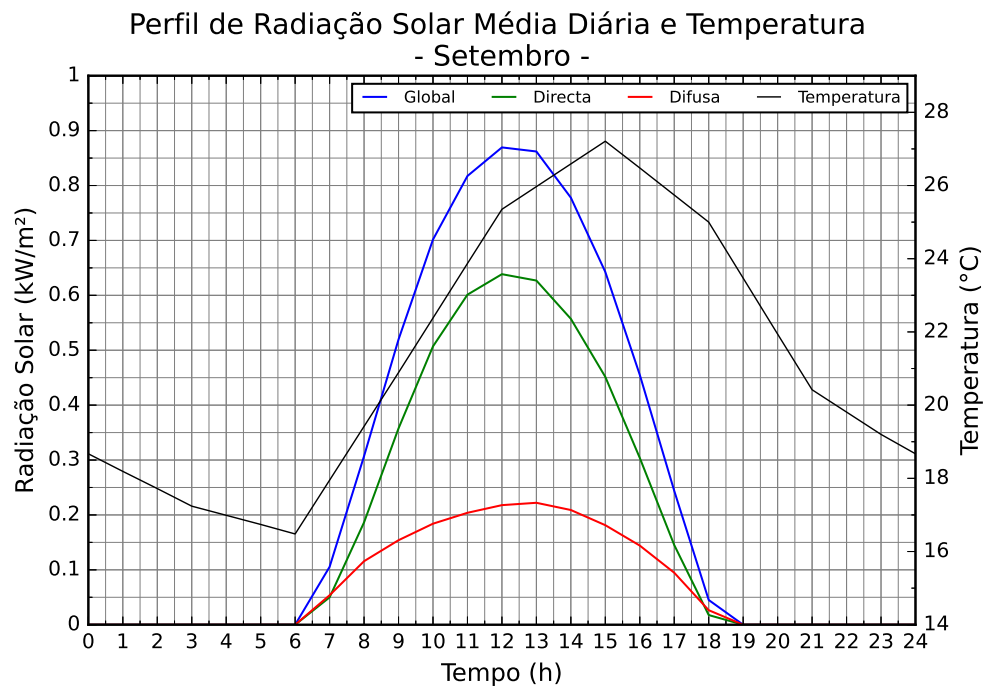


Figura 5.1: Perfil de radiação solar e temperatura obtidos a partir dos dados carregados referentes ao mês de Setembro.

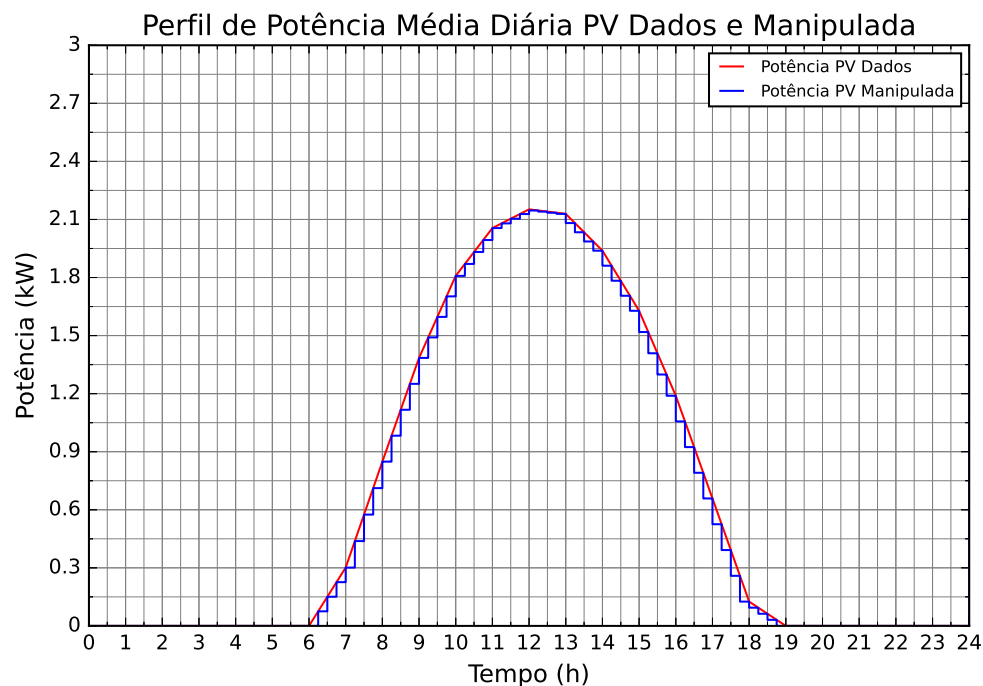


Figura 5.2: Perfil de potência PV de uma instalação de 4kW e rendimento de 70% para o mês de Setembro.

5.2 Exemplo de Colocação de Reservas Manuais

Nesta secção apresenta-se um exemplo de colocação das reservas de uma forma manual, permitindo visualizar algumas situações onde reservas entram em conflito e a consequente necessidade de realizar a alteração das mesmas.

As definições de simulação utilizadas nesta secção são:

- Mês: Novembro;
- Cenário: 3;
- Instalação PV:
 - Potência Instalada: 4kW;
 - Rendimento: 70%.
- Bateria:
 - Energia Máxima: 3kWh;
 - Energia Mínima: 30%;
 - Energia Inicial: 60%;
 - Potência Máxima: 1,5kW.

Na tabela 5.1 encontram-se as reservas colocadas por cada uma das habitações. Estas foram geradas aleatoriamente para simular uma situação real de utilização da aplicação. É importante lembrar que, a hora reservada por cada uma das habitações não tem, necessariamente, de estar contida nem no período de utilização preferido nem no alternativo de cada um dos electrodomésticos. No entanto, na eventualidade de se realizar uma alteração de uma hora já agendada, esta tem de ser reagendada para uma hora dentro desses períodos.

Tabela 5.1: Tabela com as reservas colocadas manualmente.

Ordem	Habituação	Carga Agendada	Hora Reserva (Original)	Em Conflito Com (Reserva)	Hora Reserva (Nova)
1 ^a	3	MLL	17:45	-	-
2 ^a	5	MLL	10:30	-	11:15
3 ^a	6	MLR	19:15	-	00:00
4 ^a	7	MLL	11:45	-	-
5 ^a	1	MLR	10:00	-	-
6 ^a	2	MSR	13:15	-	-
7 ^a	2	MLR	10:30	2	-
8 ^a	4	MLR	20:00	3	-

Analisando em maior detalhe a tabela anterior, verifica-se que até à sexta reserva não houve conflitos entre agendamentos previamente realizados. Isto pode-se dever a duas

hipóteses: (1) o baixo número de cargas agendadas leva a que a potência e energia disponibilizados pelo sistema são suficientes para satisfazerem as necessidades energéticas da comunidade; (2) o início do funcionamento de cada uma das cargas encontra-se, por mera coincidência, disposto de forma a produzir um perfil de carga da comunidade cujo pico de potência e necessidades energéticas não ultrapassam, em nenhum ponto do tempo, as capacidades do sistema fornecedor de energia.

Na figura 5.3, apresentada em baixo, pode-se observar o estado do sistema após a colocação da sexta reserva. Uma vez que o cenário de utilização da bateria utilizado na realização desta simulação é o cenário 3, verifica-se que a bateria apenas é utilizada para suportar a utilização de cargas fora da curva PV. A metodologia de controlo da bateria assegura que a sua carga se encontra dentro dos parâmetros definidos previamente. Para além disso, nota-se que, dentro do período definido entre os limites da curva PV, os valores de potência do perfil de carga da comunidade não ultrapassam os valores previstos de produção PV.

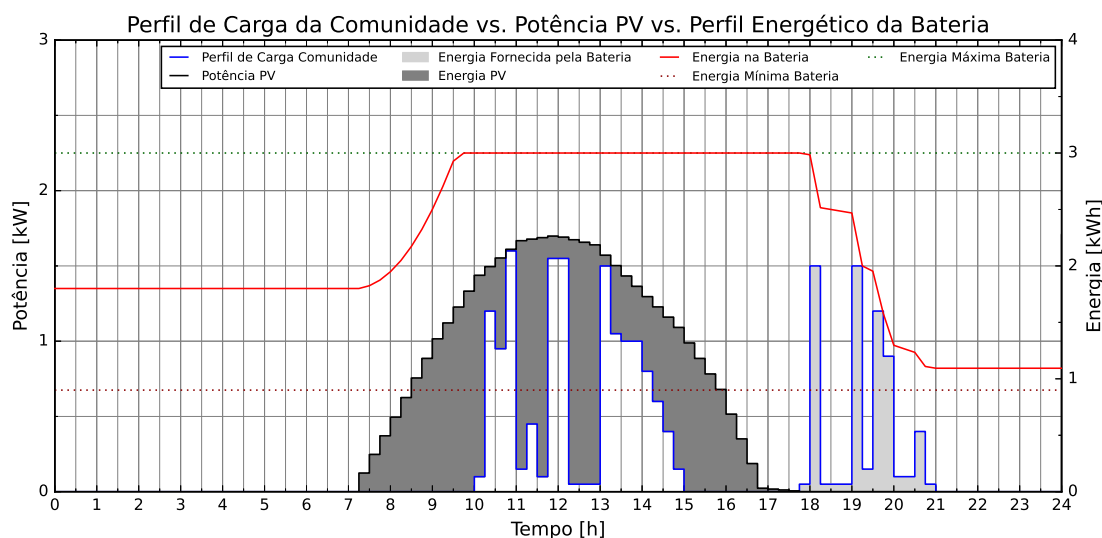


Figura 5.3: Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria antes da colocação das reservas número 7 e 8.

Na figura 5.4 observa-se o estado do sistema após a colocação das reservas número 7 e 8. A reserva da MLR pertencente à habitação 6, colocada para as 19:15, foi reagendada para as 00:00 e a reserva da MLL pertencente à habitação 5, colocada para as 10:30, foi reagendada para as 11:15. Relativamente ao perfil de carga da bateria, verifica-se que a colocação de uma carga antes do limite mínimo da curva PV produz um atraso no instante em que a bateria atinge a sua carga máxima. Se o número de reservas colocadas dentro dos limites da curva PV fosse grande o suficiente, poder-se-ia verificar que a bateria nunca chegaria à sua carga máxima, o que iria, por sua vez, comprometer a quantidade de cargas que seriam possíveis de colocar após o limite máximo da curva PV.

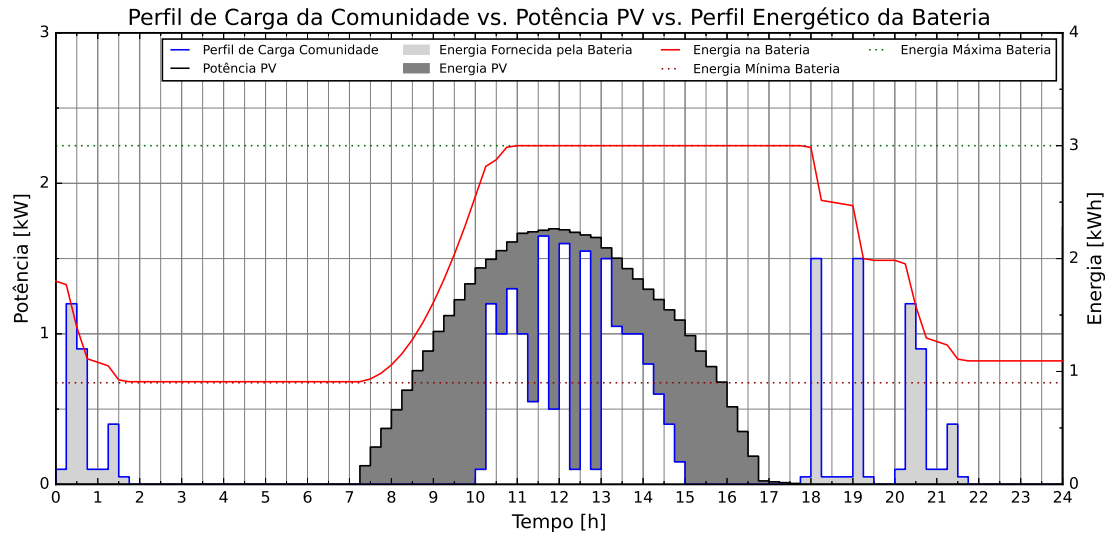


Figura 5.4: Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após a colocação das reservas número 7 e 8, e consequente alteração da hora das reservas número 2 e 3.

As curvas de FE singular, representadas na figura 5.5, mostram que a quantidade de cargas reservadas é bastante inferior à quantidade presente na comunidade, uma vez que a energia consumida por cada habitação é bastante inferior ao limite máximo definido pela activação das três cargas em estudo o mais cedo possível no dia (a vermelho e traço grosso). Neste gráfico, é também possível identificar onde existe uma maior concentração de cargas activas e a que habitação pertence cada uma delas.

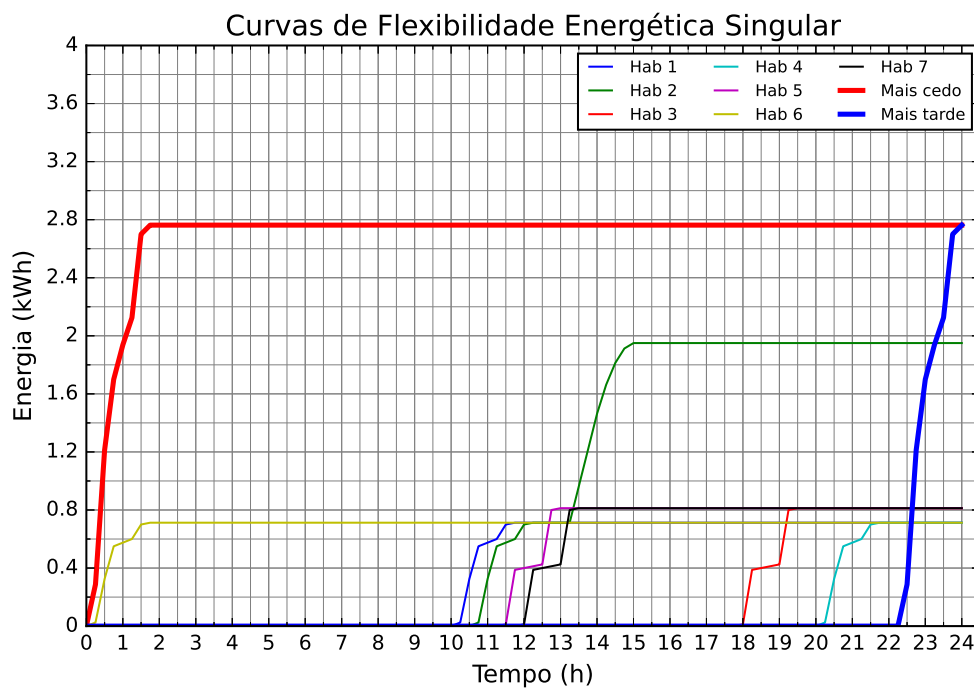


Figura 5.5: Curvas de flexibilidade energética de cada uma das habitações da comunidade.

5.3 Análise da Performance dos Cenários de Utilização da Bateria

Nesta secção procede-se à comparação da performance dos diferentes cenários de utilização da bateria. A principal métrica utilizada para realizar essa comparação é a verificação de qual dos cenários resulta num maior aproveitamento da energia disponibilizada pelo sistema, analisando as curvas de FE da comunidade e o número de reservas colocadas com sucesso, produzidas por cada um dos cenários.

Antes de se avançar para a comparação dos cenários, é ainda necessário apresentar as definições de simulação que foram escolhidas:

- Limites Cenário 5: [12:00, 21:00];
- Instalação PV:
 - Potência Instalada: 4kW;
 - Rendimento: 70%.
- Bateria:
 - Energia Máxima: 3kWh;
 - Energia Mínima: 30%;
 - Energia Inicial: 60%;
 - Potência Máxima: 1,5kW.

Visto que, para efeitos de consistência, estas simulações foram produzidas utilizando a função de colocação de reservas automaticamente, foi necessário escolher quais os parâmetros que se utilizaram nessa funcionalidade.

- Ordem Habitação: Flexibilidade Crescente – Procura-se colocar em primeiro lugar as cargas das habitações que apresentam um índice de FE mais baixo, uma vez que as habitações com índices mais elevados apresentam uma maior flexibilidade na colocação dos seus consumos;
- Ordem Electrodomésticos: Utilização Mais Frequente – Procura-se colocar em primeiro lugar as cargas de utilização mais frequente;
- Consumo: Não utilizado – Uma vez que não é utilizado, procura-se sempre realizar o agendamento das cargas dentro dos períodos preferidos ou alternativos de cada um dos electrodomésticos das habitações.

Sendo assim, de seguida, realiza-se a análise para os meses frios e para os meses quentes. A fim de representar os meses frios escolheram-se os dados referentes ao mês de Janeiro, visto ser o mês que apresenta temperaturas mais baixas. Por outro lado, para representar os meses quentes, escolheram-se os dados referentes ao mês de Agosto, visto ser o mês que apresenta as temperaturas mais altas.

5.3.1 Meses Frios

Os meses frios são caracterizados pela elevada ocorrência de dias enublados e alta probabilidade de chuva. O solstício de inverno leva a uma exposição solar durante o dia mais curta. Isto traduz-se numa baixa intensidade da radiação solar incidente nos painéis PV, o que, por sua vez, resulta numa produção de energia e valores de potência mais baixos. Para além disso, as temperaturas baixas levam à necessidade de utilizar electrodomésticos tais como a MSR, para realizar a secagem da roupa mais rapidamente.

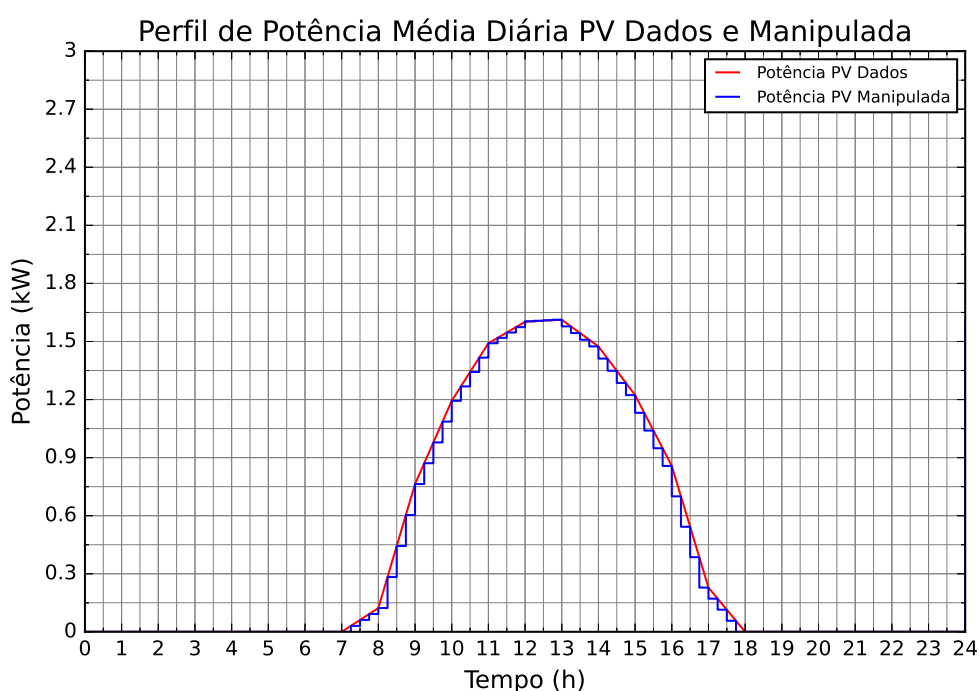


Figura 5.6: Perfil de potência PV referente ao mês de Janeiro.

A partir dos dados resultantes do questionário realizado aos habitantes da comunidade, foi possível construir a tabela seguinte, tabela 5.2, referente aos meses frios.

Tabela 5.2: Número de cargas utilizadas pela comunidade nos meses frios.

Carga	MLR	MSR	MLL	Total
Quantidade	7	4	7	18

A figura 5.7, apresentada de seguida, permite visualizar as curvas de FE colectiva da comunidade para cada um dos cenários, as quais estão definidas entre a curva de colocação de todas as 18 cargas da comunidade o mais cedo possível, a vermelho e traço mais grosso, e a colocação de todas as 18 cargas da comunidade o mais tarde possível, a azul e traço mais grosso. É importante relembrar que, a colocação das cargas previamente referidas é realizada considerando uma situação normal de operação, na qual a comunidade ainda se encontra conectada à rede de distribuição de energia. Cada simulação

corresponde à simulação de um cenário, pelo que a "Sim 1" corresponde ao cenário 1, a "Sim 2" corresponde ao cenário 2 e assim sucessivamente.

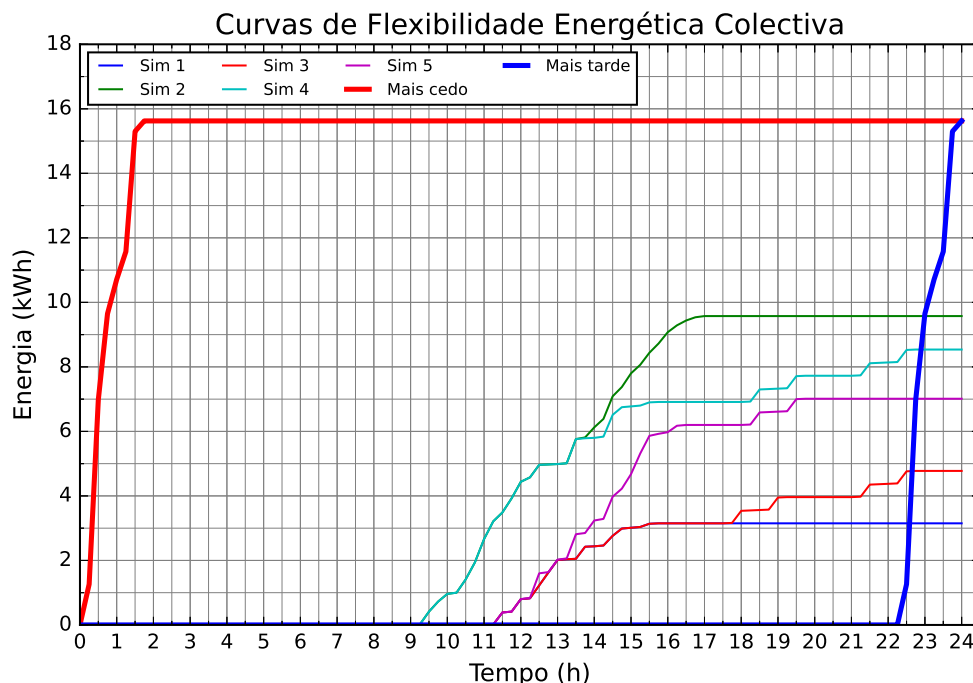


Figura 5.7: Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Janeiro).

Na figura 5.8 observa-se o número de reservas colocadas para cada um dos electrodomésticos em cada uma das simulações realizadas. A correspondência entre o número da simulação e o número do cenário mantém-se igual à previamente mencionada.

No pior caso dos meses frios verifica-se que os cenários com melhor performance são aqueles onde a bateria pode ser utilizada para auxiliar a instalação PV a satisfazer as necessidades energéticas dentro dos limites definidos pela curva PV (figura 5.6). Apesar do cenário 2 possibilitar a reserva de um maior e mais diversificado número de cargas, o cenário 4 permite o agendamento de um maior número de cargas com uma frequência de utilização mais elevada. Sendo assim, se o objectivo for maximizar a energia utilizada, deve-se considerar a utilização do cenário 2. Por outro lado, se o objectivo for a maximização do número de reservas de cargas utilizadas com maior frequência, deve-se utilizar o cenário 4. Para além disso, estes cenários permitem a colocação de cargas mais cedo, pois a bateria consegue auxiliar o sistema PV nesse período com valores de potência e geração de energia mais baixos. Relativamente ao cenário 5, realizando ajustes ao intervalo de operação da bateria, pode-se criar um cenário de funcionamento semelhante aos dois cenários mencionados anteriormente, pelo que a sua utilização também pode ser considerada. Por outro lado, verifica-se que a impossibilidade da utilização da bateria para auxiliar a instalação PV, dentro dos limites da curva, resulta numa quantidade de cargas

agendadas bastante reduzida, pelo que a utilização dos cenários 1 e 3 é desaconselhada.

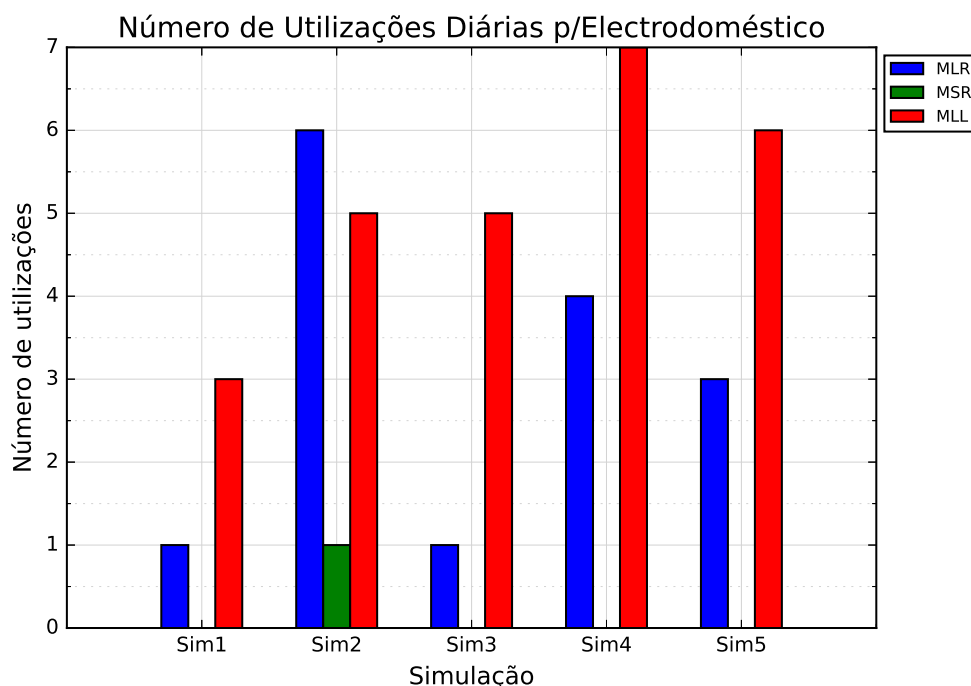


Figura 5.8: Número de cargas agendadas para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Janeiro).

No anexo 4, em IV.1, é possível visualizar os gráficos obtidos referentes ao perfil de carga da comunidade e de energia na bateria para cada uma das simulações realizadas nesta secção.

5.3.2 Meses Quentes

Os meses quentes são caracterizados por reduzida nebulosidade, e consequente ausência de chuva. O solstício de verão leva a uma exposição solar durante o dia mais duradoura. Isto traduz-se na incidência nos painéis PV de valores de radiação solar mais altos e durante mais tempo, o que, por sua vez, conduz à geração de um maior volume de energia e à obtenção de valores de potência mais elevados. Para além disso, as temperaturas altas possibilitam a rápida secagem da roupa ao ar livre, pelo que as MSR apenas são utilizadas em caso de emergência, ou podem até mesmo não ser utilizadas de todo.

Os fenómenos apresentados anteriormente podem ser visualizados através da figura seguinte, figura 5.9, observando-se que o perfil de produção PV da instalação tem não só um valor máximo mais alto, quando comparado ao verificado na figura 5.6, referente aos meses frios, mas apresenta também um alargamento da curva, significando que a instalação PV, nos meses quentes, começa a produzir energia mais cedo, e continua essa produção até mais tarde.

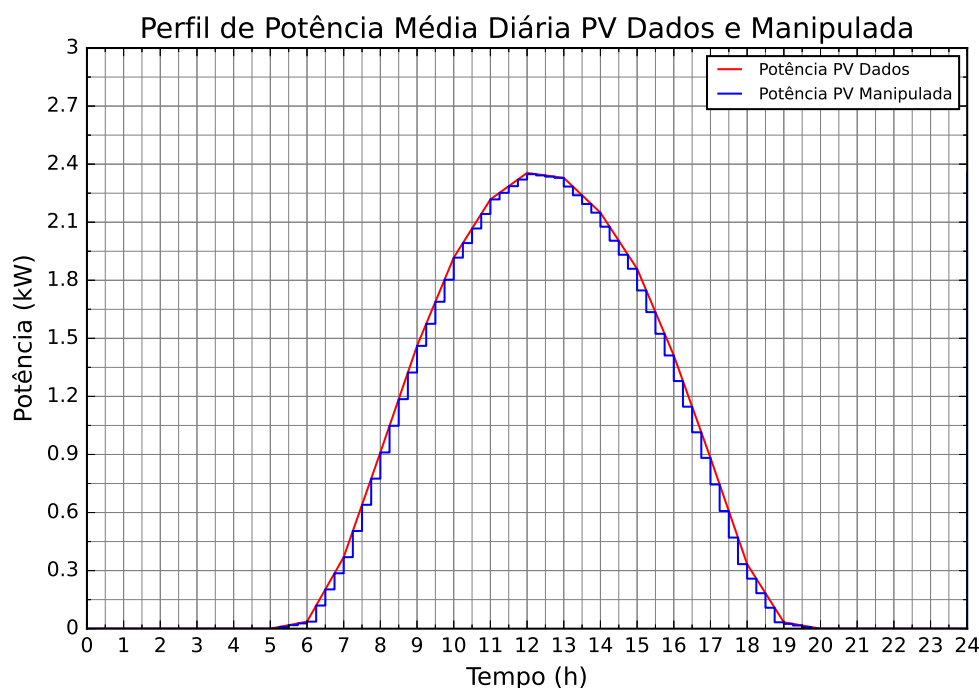


Figura 5.9: Perfil de potência PV referente ao mês de Agosto.

A partir dos dados resultantes do questionário realizado aos habitantes da comunidade, foi possível construir a tabela seguinte, tabela 5.3, referente aos meses quentes. Algumas habitações indicaram que não utilizam MSR durante este período, pelo que se considerou que essas cargas não existiam de todo na comunidade. Por isso, o número total de cargas na comunidade apresenta um valor mais baixo relativamente ao verificado no ponto anterior.

Tabela 5.3: Número de cargas utilizadas pela comunidade nos meses quentes.

Carga	MLR	MSR	MLL	Total
Quantidade	7	1	7	15

Na figura 5.10 encontram-se representadas as curvas de FE colectiva da comunidade para cada um dos cenários. Estas estão definidas, à semelhança das apresentadas no ponto anterior, entre a curva de colocação de todas as 15 cargas da comunidade o mais cedo possível, a vermelho e traço grosso, e a colocação de todas as 15 cargas o mais tarde possível, a azul e traço grosso. Devido ao menor número de cargas, o valor máximo de ambas as curvas é mais baixo do que o obtido no ponto anterior. A correspondência cenário-simulação mantém-se igual à previamente indicada, e é possível visualizar os gráficos obtidos referentes ao perfil de carga da comunidade e de energia na bateria, para cada uma das simulações realizadas nesta secção, no anexo IV.1.

A figura 5.11 apresenta o número de reservas colocadas com sucesso para cada um dos electrodomésticos em cada uma das simulações realizadas.

5.3. ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS CENÁRIOS DE UTILIZAÇÃO DA BATERIA

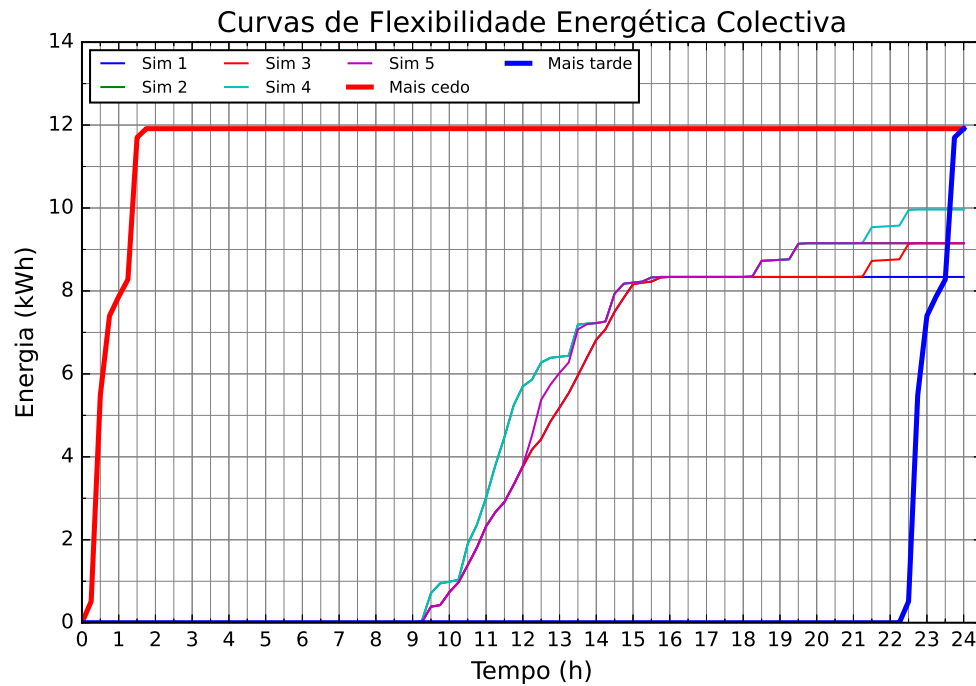


Figura 5.10: Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Agosto).

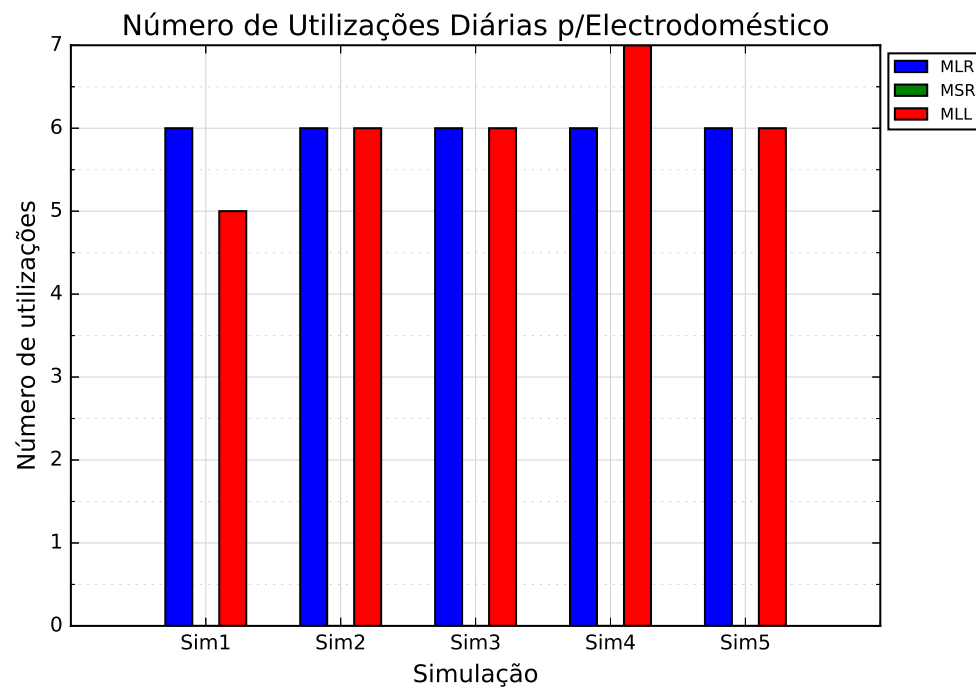


Figura 5.11: Número de cargas agendadas para comparação da performance dos diferentes cenários de operação da bateria (Agosto).

No melhor caso dos meses quentes verifica-se que os cenários que apresentam uma performance melhor são aqueles onde a utilização da bateria é admitida. Tanto para efeitos da maximização na energia utilizada como para efeitos de maximização do número de reservas de cargas de utilização mais frequente deve ser utilizado o cenário 4. Os cenários 2, 3 e 5 permitem atingir um número de reservas idêntico, no entanto, relativamente ao cenário 5, alterando o intervalo de operação da bateria, é possível igualar a performance do cenário 4.

Concluindo, observa-se que os cenários apresentam comportamentos bastante diferentes quando utilizados durante os meses frios e os meses quentes. A primeira diferença a destacar é a quantidade de reservas possíveis de colocar com sucesso. Durante o pior caso dos meses frios, Janeiro, consegue-se atingir um máximo de apenas 67% de agendamentos, ao passo que, no melhor caso dos meses quentes, Agosto, consegue-se atingir um máximo de 87% de agendamentos. Estas percentagens são calculadas relativamente ao número de cargas total considerado em cada mês. A análise do melhor e pior caso de cada um destes períodos permite determinar que, durante os restantes meses do ano, se conseguem atingir percentagens de agendamento entre os valores já indicados. A segunda diferença é a variação verificada nas curvas de FE. Na análise referente ao mês de Janeiro, as curvas apresentam formas bastante diferentes. Os baixos valores de potência do perfil de produção PV levam a que, nos cenários onde a utilização da bateria não é admitida dentro da curva PV, a activação das cargas tem de ser colocada mais tarde do que nos cenários onde é permitida. Por outro lado, na análise referente ao mês de Agosto, as curvas apresentam formas bastante semelhantes. A ocorrência de valores de potência mais altos mais cedo permite a activação da primeira carga colocada no mesmo instante de tempo em todos os cenários de utilização da bateria.

5.4 Efeito do Método de Colocação das Cargas na Performance do Sistema

Nesta secção realiza-se a comparação entre a performance obtida utilizando diferentes formas de agendamento das cargas da comunidade. À semelhança do que já foi feito anteriormente, a principal métrica utilizada para realizar esta comparação é a verificação de qual dos cenários resulta num maior aproveitamento da energia disponibilizada pelo sistema. Para além da análise das curvas de FE colectivas da comunidade e do número de reservas colocadas com sucesso, resultantes de cada uma das simulações, observa-se também a natureza do perfil de carga da comunidade gerado por cada um dos modos de operação considerados.

Antes de proceder à comparação, é necessário apresentar as definições de simulação utilizadas. Estas simulações foram realizadas utilizando o cenário 4 de operação da bateria, visto ser o cenário que apresentou a melhor performance na secção anterior. Relativamente ao mês, consideraram-se os dados referentes a Janeiro, pois os resultados obtidos

5.4. EFEITO DO MÉTODO DE COLOCAÇÃO DAS CARGAS NA PERFORMANCE DO SISTEMA

no extremo mínimo de produção de energia podem ser perpetuados para os restantes meses, onde a produção de energia é mais elevada. As restantes definições de simulação foram as seguintes:

- Instalação PV:
 - Potência Instalada: 4kW;
 - Rendimento: 70%.
- Bateria:
 - Energia Máxima: 3kWh;
 - Energia Mínima: 30%;
 - Energia Inicial: 60%;
 - Potência Máxima: 1,5kW.

Tal como na secção anterior, estas simulações foram realizadas recorrendo à ferramenta de colocação de reservas automaticamente, por isso, é necessário identificar as definições relevantes nela utilizadas. No que toca à ordem das habitações e dos electrodomésticos, optou-se, mais uma vez, por se utilizar a colocação das reservas por ordem crescente de flexibilidade e de utilização mais frequente, respectivamente. Para efeitos de comparação, variou-se a forma como as cargas foram colocadas, ou seja, primeiro, realizaram-se as reservas respeitando os períodos preferidos e alternativos de utilização dos electrodomésticos, depois, os agendamentos foram colocados ignorando tais períodos, tentando-se reservar as cargas o mais cedo possível, o mais tarde possível e do meio do dia para fora. A quantidade de cargas considerada foi a já apresentada na tabela 5.2.

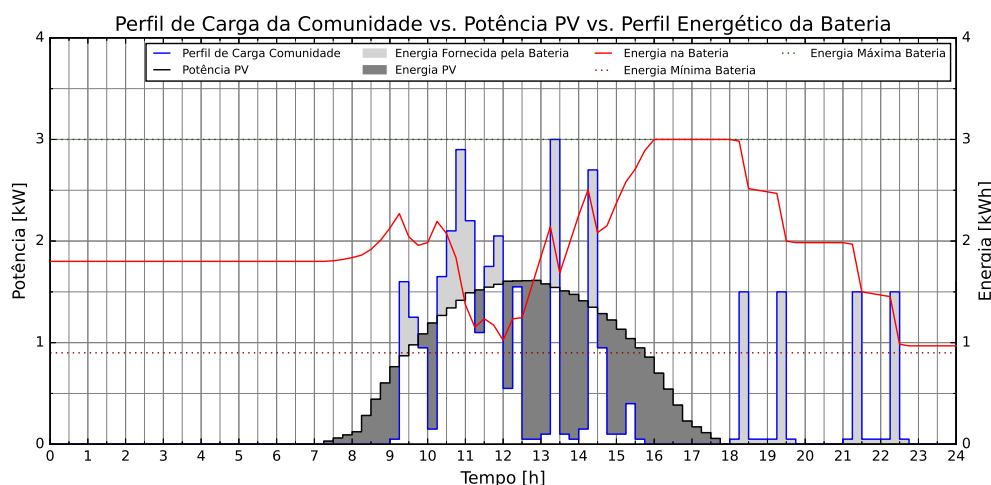


Figura 5.12: Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas de acordo com os períodos preferidos e alternativos ("Sim 1").

Na figura 5.12 encontram-se representados os resultados obtidos agendando as cargas respeitando os períodos preferidos e alternativos de funcionamento. Picos de potência surgem nos períodos onde existe um maior número de cargas activas em simultâneo. Para além disso, analisando o perfil de energia na bateria, observa-se que entre as 16 e as 18 horas a bateria encontra-se totalmente carregada. Uma vez que este período ocorre quando ainda existe produção de energia a partir da instalação PV, verifica-se que esta não está a ser aproveitada.

Na figura 5.13 observam-se os resultados obtidos procedendo ao agendamento das cargas o mais cedo possível, ignorando os períodos preferidos e alternativos de cada uma das cargas. Verifica-se, desde logo, que o perfil de carga da comunidade se torna mais uniforme em relação ao caso anterior, apresentando picos de potência com menos frequência e menor intensidade. Analisando o perfil de energia na bateria, verifica-se que este método de colocação das cargas resulta numa descarga quase total da bateria antes que a instalação PV consiga produzir energia suficiente para a carregar. Para além disso, a elevada concentração de cargas colocadas dentro da curva PV leva a que a energia na bateria ao longo do dia toma valores muito próximos do mínimo admitido, impossibilitando o agendamento de cargas para o fim do dia.

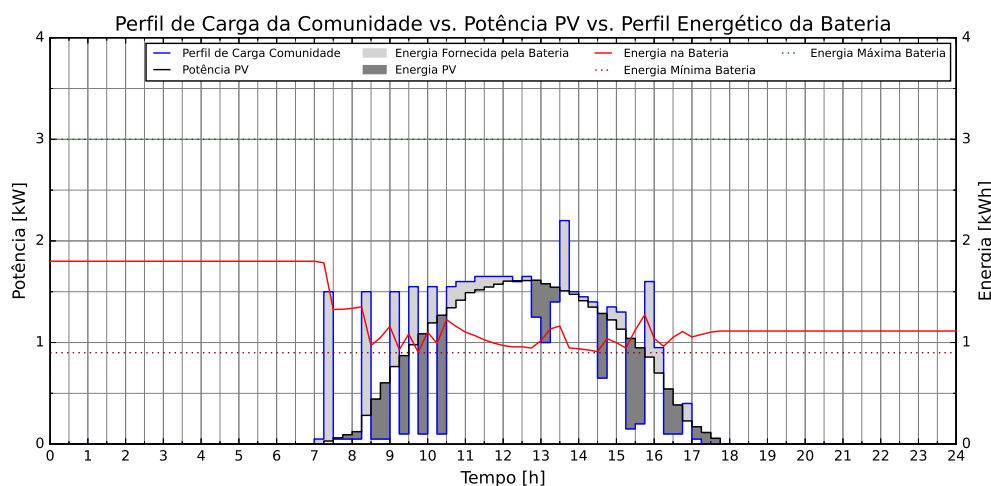


Figura 5.13: Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas o mais cedo possível ("Sim 2").

Na figura seguinte, figura 5.14, representam-se os resultados obtidos realizando o agendamento das cargas do meio do dia para fora. Analisando o perfil de carga da comunidade, observa-se a existência de picos de potência de maior intensidade, fruto da colocação de cargas em torno de um só ponto no tempo. A existência destes picos pode reduzir drasticamente a vida útil da bateria, pois o perfil de energia na bateria apresenta declives bastante acentuados, ainda que estes não violem as condições nominais de operação. Para além disso, tal como acontece no caso anterior, a grande concentração de cargas dentro da curva PV impossibilita que a bateria atinja carga suficiente para permitir a

5.4. EFEITO DO MÉTODO DE COLOCAÇÃO DAS CARGAS NA PERFORMANCE DO SISTEMA

colocação de agendamentos mais tarde.

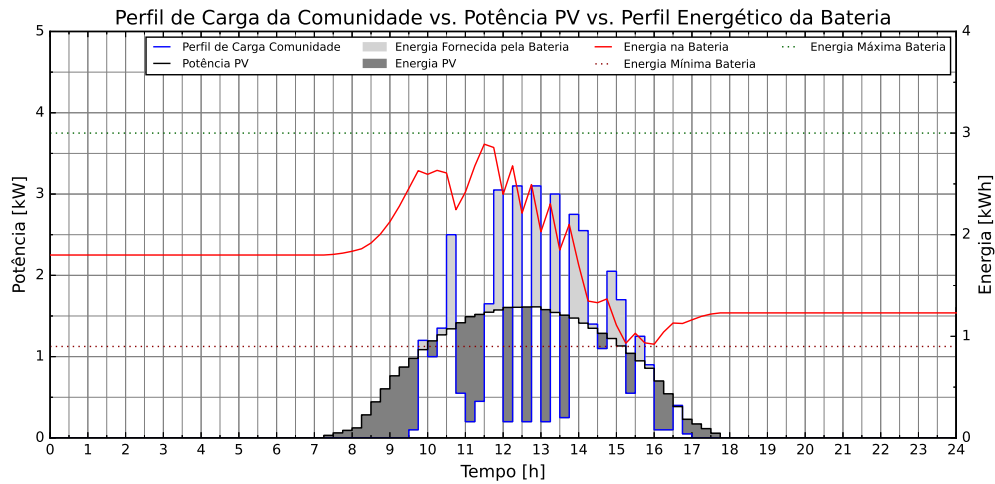


Figura 5.14: Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas em torno do meio-dia ("Sim 3").

Na figura 5.15 podem-se observar os resultados obtidos após a colocação das cargas o mais tarde possível. Como fruto desta ordem de colocação das cargas, resulta um perfil de carga da bateria com valores mais altos ao longo do dia, pois é necessário manter a energia na bateria num nível que permita o funcionamento das cargas colocadas mais tarde, fora da curva PV. Para isso, é necessário garantir que, dentro da curva PV, os picos de potência sejam de baixa intensidade e de curta duração. Para além disso, é importante, também, assegurar a existência de "bolsos" de energia que permitam esses períodos de carregamento, identificados no gráfico a cinzento escuro.

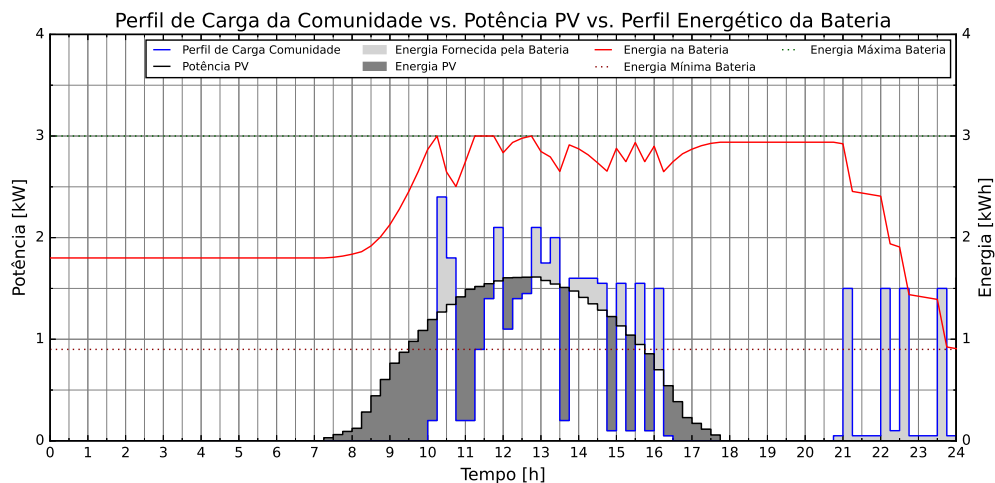


Figura 5.15: Perfil de carga da comunidade e perfil energético da bateria após o agendamento das cargas o mais tarde possível ("Sim 4").

Por fim, nas figuras seguintes, figura 5.16 e figura 5.17, encontram-se representadas as curvas de FE e o número de cargas agendadas das diferentes simulações realizadas, respectivamente. A correspondência entre o número da simulação e a natureza da mesma foi realizada de tal forma que, à "Sim 1" corresponde a colocação das reservas respeitando os períodos preferidos e alternativos, à "Sim 2" corresponde o agendamento das cargas o mais cedo possível, à "Sim 3" corresponde a reserva das cargas em torno do meio dia e, por fim, à "Sim 4" corresponde a colocação das cargas o mais tarde possível. Observa-se que a colocação das cargas o mais cedo possível permite maximizar não só a utilização da energia disponível, mas também a quantidade de reservas colocadas. Por outro lado, ao colocar as cargas respeitando os períodos preferidos e alternativos, obtêm-se valores dos indicadores previamente referidos mais baixos. A utilização desta última pode ser justificada se permitir proporcionar um maior nível de conforto aos habitantes de comunidade. Identifica-se, ainda, um período dentro da curva PV, definido pelo intervalo de tempo [7:15, 15:30], onde se conseguem definir os limites de operação do sistema aplicando estas definições de operação, percebendo-se que as curvas de FE da comunidade se encontram definidas dentro da área compreendida entre a curva da colocação das cargas o mais cedo possível (a verde e traço fino) e o mais tarde possível (a azul claro e traço fino).

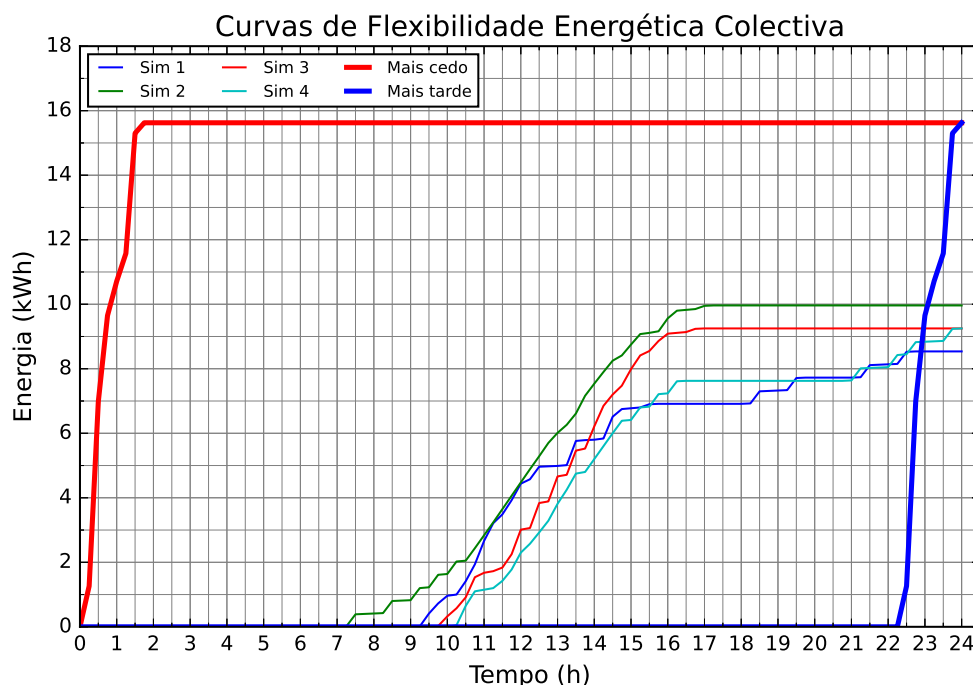


Figura 5.16: Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance dos diferentes modos de agendamento das cargas (Janeiro).

5.5. EFEITO DA POTÊNCIA PV VS. CAPACIDADE ENERGÉTICA DA BATERIA DA INSTALAÇÃO NA PERFORMANCE DO SISTEMA

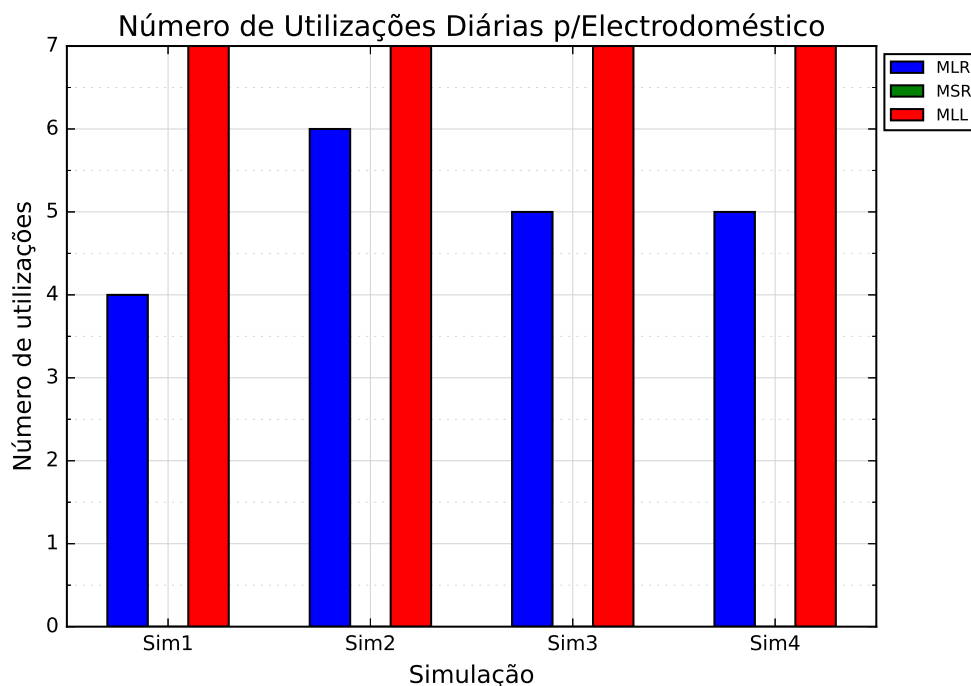


Figura 5.17: Número de cargas agendadas para comparação da performance dos diferentes modos de agendamento das cargas (Janeiro).

5.5 Efeito da Potência PV vs. Capacidade Energética da Bateria da Instalação na Performance do Sistema

Nesta secção procede-se à análise da importância da potência PV e da capacidade da bateria instalados na habitação provedora de energia, com o objectivo de perceber qual dos dois componentes tem maior influência na performance do sistema de gestão de reservas das cargas da comunidade.

Relativamente às definições de simulação, considerou-se o cenário 4 de gestão da bateria, visto ser o que apresentou melhor performance na secção 5.3. Utilizaram-se, mais uma vez, os dados referentes ao mês de Janeiro, pois os resultados obtidos no extremo mínimo de produção de energia propagam-se para os restantes meses, nos quais a produção de energia é mais elevada. Devido ao mês escolhido, voltou-se a considerar que a comunidade tem a quantidade de cargas presentes na tabela 5.2. Quanto às especificações da instalação PV e da bateria, estas serão apresentadas nas respectivas subsecções, uma vez que, para se simular o primeiro elemento foi necessário fixar as especificações do segundo, e vice-versa.

À semelhança da secção anterior, as simulações foram realizadas recorrendo à funcionalidade de colocação das reservas de forma automática, pelo que é necessário identificar as definições aí utilizadas. Relativamente à ordem das habitações e dos electrodomésticos, optou-se por manter as definições utilizadas na secção anterior, para efeitos de

consistência nos resultados obtidos. É, no entanto, importante referir que, as cargas foram colocadas ignorando os períodos preferidos e alternativos de colocação de reservas indicados pelos habitantes no questionário realizado. Como tal, o método de colocação das reservas utilizado foi a tentativa de agendamento o mais cedo possível, pois foi o método que apresentou melhores resultados na secção anterior.

5.5.1 Instalação PV

A dimensão da instalação PV tem um impacto directo na quantidade de energia que é convertida a partir da radiação solar em energia eléctrica, algo que se torna evidente analisando a metodologia utilizada para a construção do perfil de potência PV, já apresentada em 3.2, e que pode ser visualizado na figura 5.18.

As especificações da bateria utilizadas nesta análise mantêm-se iguais às já utilizadas nas secções anteriores, e são:

- Energia Máxima: 3kWh;
- Energia Mínima: 30%;
- Energia Inicial: 60%;
- Potência Máxima: 1,5kW.

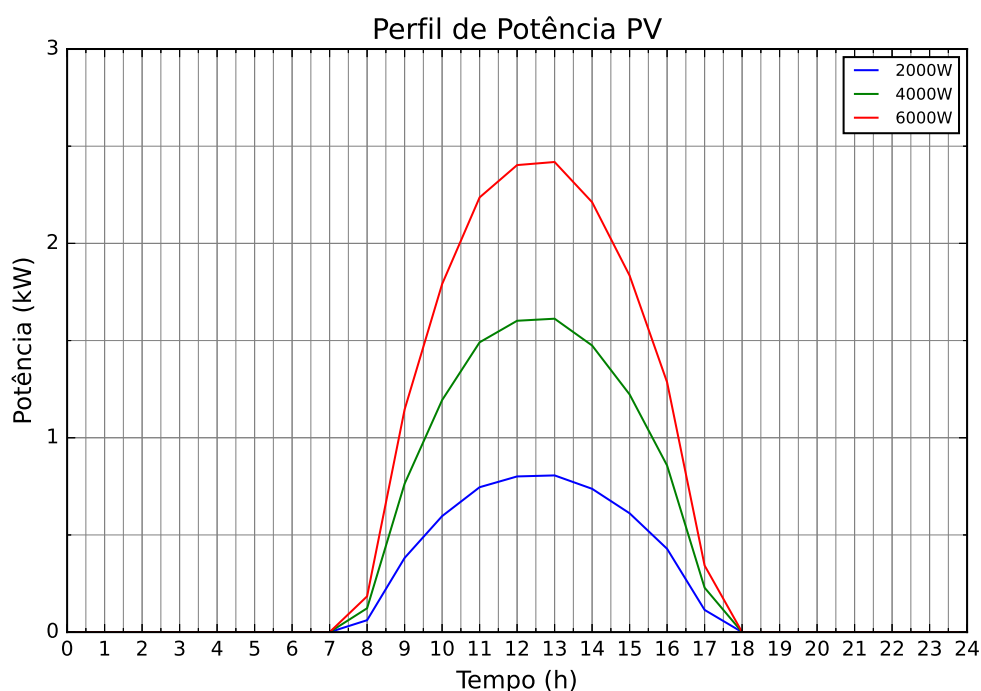


Figura 5.18: Perfis de potência das instalações PV simuladas (Janeiro).

5.5. EFEITO DA POTÊNCIA PV VS. CAPACIDADE ENERGÉTICA DA BATERIA DA INSTALAÇÃO NA PERFORMANCE DO SISTEMA

Relativamente às especificações da instalação PV, optou-se por manter constante o parâmetro referente ao rendimento, igual a 70%, variando-se o valor da potência instalada: 2000W, 4000W e 6000W.

A correspondência entre o número da simulação e o valor da potência instalada foi realizada de tal forma que, à "Sim 1" corresponde a instalação de 2kW, à "Sim 2" corresponde a instalação de 4kW e à "Sim 3" corresponde a instalação de 6kW.

Nas figuras seguintes, figura 5.16 e figura 5.17, encontram-se representadas as curvas de FE e o número de cargas agendadas das diferentes simulações realizadas, respectivamente. Observa-se que, quanto maior a potência instalada, maior é a quantidade de reservas que podem ser realizadas. Para além disso, na primeira figura, é possível visualizar, através do declive de cada uma das curvas, que o aumento da potência instalada permite agendamentos para horas muito próximas, ou até mesmo simultâneas, de um maior número de cargas. A curva da "Sim 1", a azul e traço fino, apresenta um declive mais baixo, indicando uma menor concentração de cargas. Por outro lado, a curva da "Sim 3", a vermelho e traço fino, apresenta um declive mais alto, indicando uma maior concentração de cargas. Para além disso, o aumento da potência instalada provoca um aumento dos valores de potência disponíveis mais cedo, e mais tarde, na curva PV, fenómeno verificado na figura 5.18, o que, por sua vez, possibilita a colocação de um maior número de cargas nessas extremidades da curva.

Os gráficos obtidos referentes ao perfil de carga da comunidade e de energia na bateria para cada uma das simulações realizadas nesta secção encontram-se no anexo IV.2.

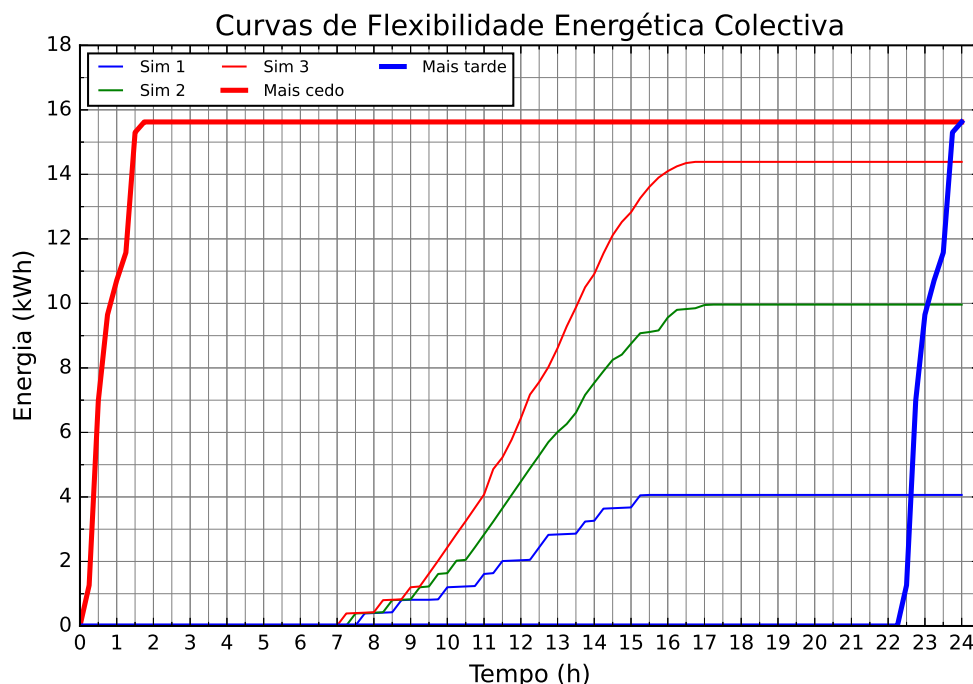


Figura 5.19: Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance das instalações PV simuladas (Janeiro).

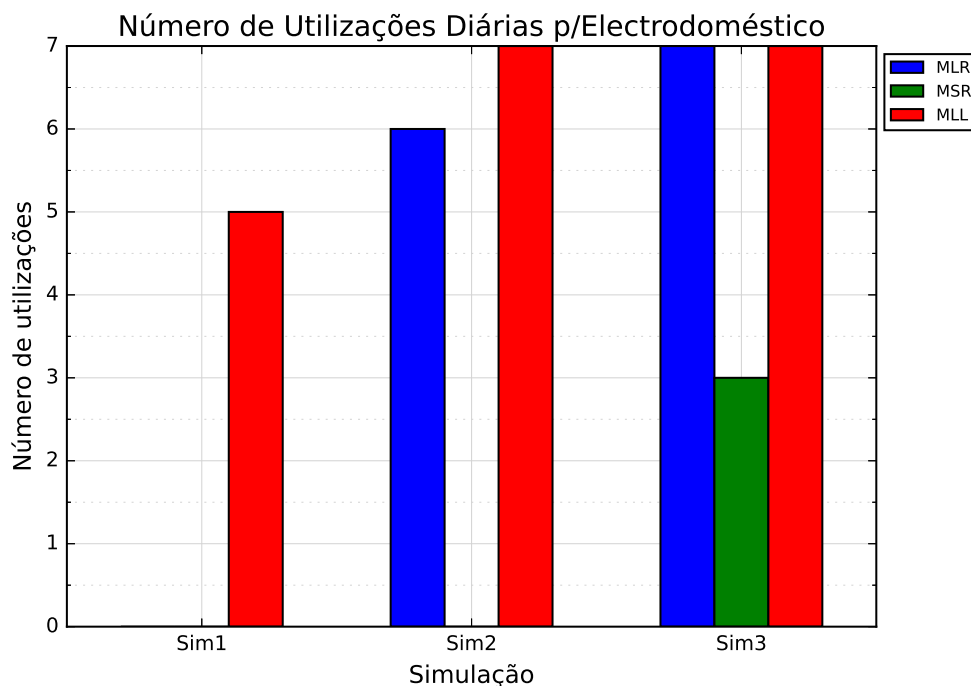


Figura 5.20: Número de cargas agendadas para comparação da performance das instalações PV simuladas (Janeiro).

5.5.2 Bateria

A capacidade da bateria tem um efeito directo na quantidade de energia que pode ser armazenada a partir da instalação PV, algo que torna este elemento bastante importante neste tipo de sistemas, principalmente num contexto onde não existe energia suplementar, proveniente da rede eléctrica.

Para efeitos de simulação, apenas se variou o valor da capacidade energética da bateria, mantendo-se constantes os seguintes parâmetros:

- Instalação PV:
 - Potência Instalada: 4kW;
 - Rendimento: 70%.
- Bateria:
 - Energia Mínima: 30%;
 - Energia Inicial: 60%;
 - Potência Máxima: 1,5kW.

A correspondência entre o número da simulação e o valor da capacidade energética da bateria simulada realizou-se de tal forma que, à "Sim 1" corresponde a bateria de 1,5kWh,

5.5. EFEITO DA POTÊNCIA PV VS. CAPACIDADE ENERGÉTICA DA BATERIA DA INSTALAÇÃO NA PERFORMANCE DO SISTEMA

à "Sim 2" corresponde a bateria de 3kWh, à "Sim 3" corresponde a bateria de 6kWh e, por fim, à "Sim 4" corresponde a bateria de 9kWh.

Analisando a figura 5.21, na qual se encontram representadas as curvas de FE das simulações realizadas, observa-se que a capacidade energética da bateria não permite um aumento significativo da quantidade de energia que pode ser utilizada pela comunidade. No período definido pela curva PV, observam-se declives muito semelhantes nas curvas obtidas, indicando que, nesse período, a capacidade energética da bateria não tem grande influência na quantidade de reservas que podem aí ser colocadas.

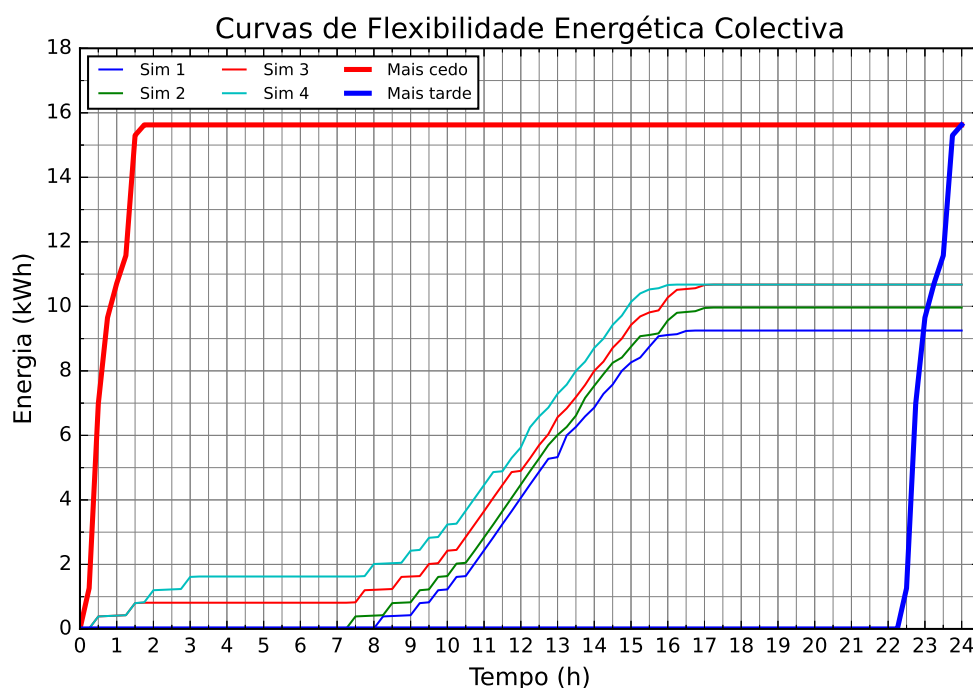


Figura 5.21: Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade para comparação da performance das baterias simuladas (Janeiro).

Na figura 5.22 é possível visualizar que o aumento de energia no sistema, referido anteriormente, se deve ao facto de se considerar a energia inicial da bateria, às 00:00 horas, como função da sua capacidade máxima, ou seja, no caso da bateria de menor capacidade, a energia inicial da mesma é 900Wh, valor que corresponde a 60% do valor máximo. O mesmo acontece para a bateria com maior capacidade energética, a qual permite uma energia inicial de 5400Wh. Tal como referido anteriormente, os agendamentos, dentro da curva PV, são realizados de forma semelhante, independentemente da capacidade energética da bateria, algo que se torna evidente pelo comportamento semelhante que as quatro baterias simuladas apresentam no período previamente referido, oscilando a sua energia em torno de um valor muito próximo do mínimo permitido para cada uma delas, carregando quando existe consumo inferior e descarregando quando existe consumo superior à produção.

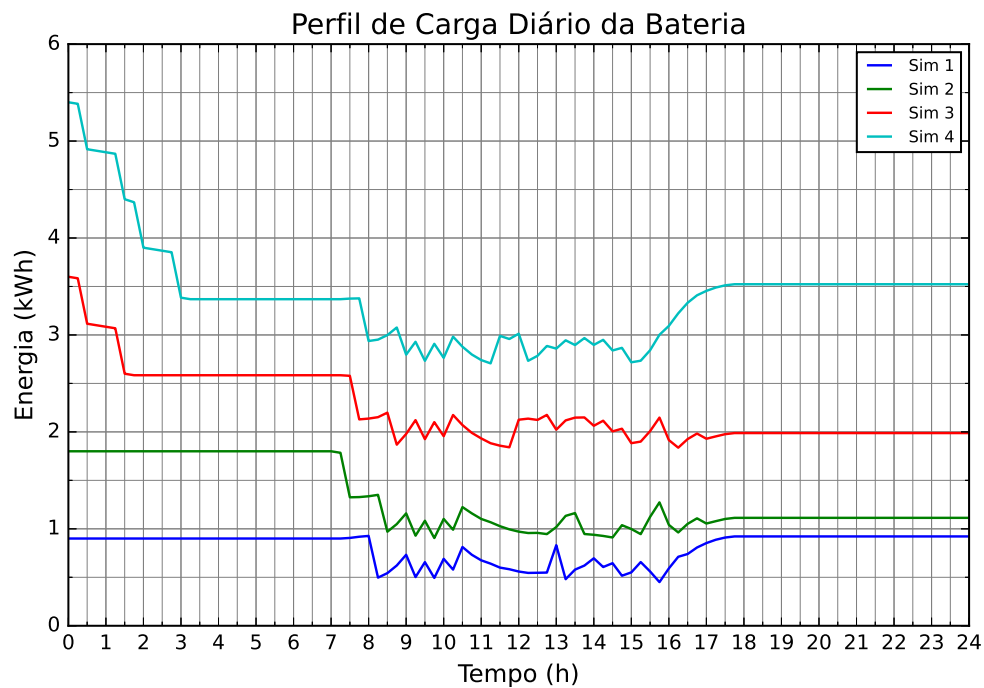


Figura 5.22: Perfis de carga das baterias simuladas.

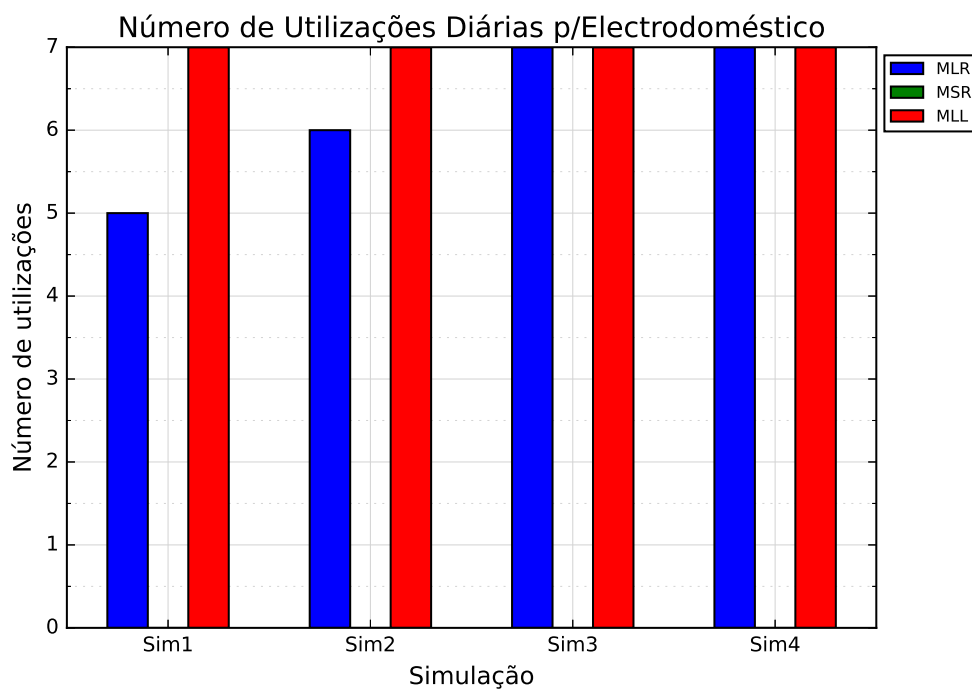


Figura 5.23: Número de cargas agendadas para comparação da performance das baterias simuladas (Janeiro).

Mais uma vez, observando a figura 5.23, verifica-se que o aumento da capacidade energética da bateria não tem um impacto muito significativo no número de reservas que podem ser colocadas durante o período de simulação.

Concluindo esta secção, constata-se que o aumentando do valor da potência PV instalada permite obter melhorias mais significativas na quantidade de reservas que se podem realizar no período de simulação, quando comparado à situação onde se procede ao aumento da capacidade energética da bateria, uma vez que, esta última, é, maioritariamente, utilizada como apoio ao excesso de consumo dentro da curva PV. No entanto, uma bateria com uma capacidade maior permite a colocação de um maior número de cargas fora da curva, obtendo-se uma maior flexibilidade, e um maior volume de energia no sistema no momento em que ocorre a separação da comunidade da rede.

5.6 Cenário de Operação Admitindo Consumo Base Referente à Iluminação

Nesta secção apresenta-se um exemplo de operação do sistema admitindo que, antes de realizar o agendamento de qualquer electrodoméstico, é adicionado ao perfil de carga de cada uma das habitações da comunidade o consumo energético referente à iluminação ao longo do período de simulação.

O cenário de operação da bateria utilizado foi o cenário 4, visto ser o cenário que permite uma utilização da bateria ao longo do período de simulação mais liberal. Nos restantes cenários, devido às restrições de consumo impostas, haveria a necessidade de cortar o consumo de energia para iluminação em certos períodos do dia.

Mais uma vez, os dados utilizados para a construção da curva PV foram os referentes ao mês de Janeiro e as definições utilizadas na ferramenta de colocação das reservas de forma automática foram: "Flexibilidade Crescente" para as habitações e "Utilização Mais Frequente" para os electrodomésticos. Relativamente ao modo como as cargas são colocadas, optou-se por realizar três simulações. À primeira, "Sim 1", corresponde a colocação das cargas de acordo com os períodos preferidos e alternativos dos habitantes, à segunda, "Sim 2", corresponde a colocação das cargas o mais cedo possível, à terceira simulação, "Sim 3", corresponde a colocação das cargas do meio do dia para fora e, por fim, à quarta simulação, "Sim 4", corresponde a colocação das cargas o mais tarde possível.

Relativamente às definições de simulação referentes à instalação PV, estas mantiveram-se iguais às já utilizadas anteriormente, com uma potência instalada de 4kW e um rendimento de 70%. Por outro lado, para comportar estas novas necessidades energéticas, fruto do consumo antes do limite mínimo da curva PV ser superior a 0kW, foi necessário aumentar a capacidade energética da bateria, para se contar com uma energia inicial no sistema mais elevada. Sendo assim, as definições da bateria são as seguintes:

- Energia Máxima: 6kWh;

- Energia Mínima: 30%;
- Energia Inicial: 60%;
- Potência Máxima: 3kW.

Na figura seguinte, figura 5.24, observam-se os resultados obtidos na primeira simulação. Considerou-se que a habitação 7, na qual está instalado o sistema gerador de energia, podia utilizar 100% da iluminação e que as restantes habitações apenas podiam utilizar 40%. A necessidade de suportar este consumo adicional fora da curva PV leva a que, no período inicial do dia, a energia na bateria desça gradualmente até um valor próximo do mínimo admitido. Até ao ponto em que a bateria começa a carregar não é possível agendar cargas. Dentro da curva PV já é possível realizar o agendamento de cargas, no entanto, é necessário garantir a existência de períodos de carregamento da bateria suficientes para suportar o consumo energético da iluminação e de cargas agendadas no fim do dia.

Os mesmos valores para os coeficientes de utilização da iluminação de cada uma das habitações foram utilizados nas restantes simulações realizadas nesta secção. Em IV.3 encontram-se os resultados mais detalhados obtidos para as restantes simulações realizadas para esta secção.

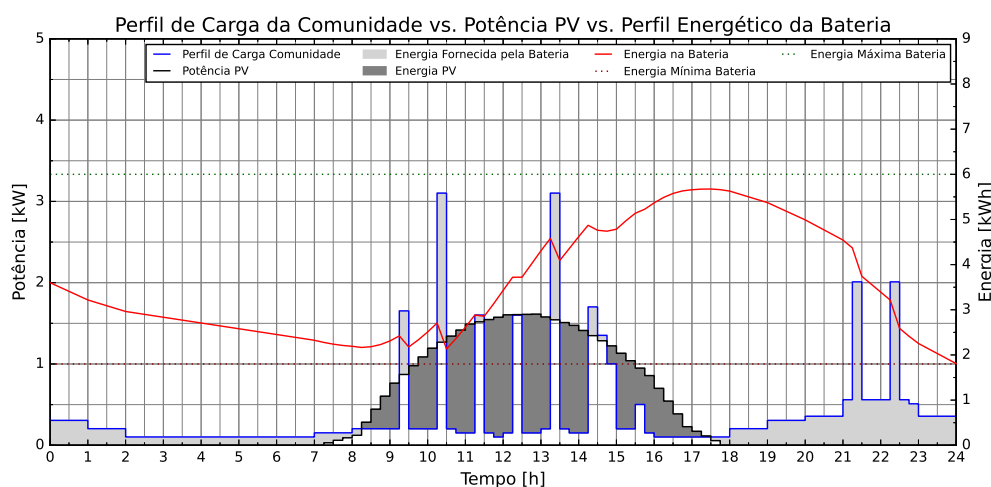


Figura 5.24: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria admitindo iluminação e colocando as cargas de acordo com os períodos preferidos de consumo (Janeiro).

Na figura 5.25 encontram-se representadas as curvas de FE de cada uma das simulações realizadas. Através destas, consegue-se identificar o período onde é possível realizar o agendamento de cargas, definido entre a curva da colocação das cargas o mais cedo possível, a verde e traço fino, e a curva da colocação das cargas o mais tarde possível, a azul claro e traço fino. Devido às restrições de potência e energia disponível, não é possível satisfazer todas as necessidades energéticas da comunidade, visto que, o valor da energia utilizada até ao fim do período de simulação, em cada uma das simulações realizadas,

5.6. CENÁRIO DE OPERAÇÃO ADMITINDO CONSUMO BASE REFERENTE À ILUMINAÇÃO

é muito inferior ao determinado para uma situação normal de operação, verificado nas curvas com traço mais grosso. A situação normal de operação diz respeito à utilização dos electrodomésticos modelados e não à utilização da iluminação, mantendo-se esta com os valores mencionados previamente.

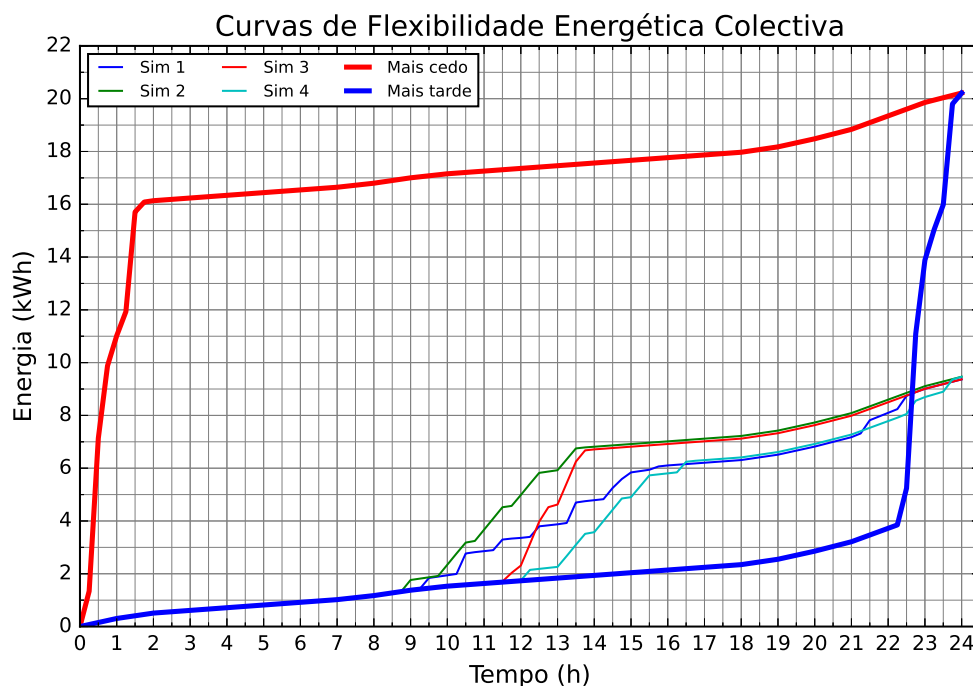


Figura 5.25: Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade admitindo iluminação (Janeiro).

Na figura 5.26 verifica-se que o número de agendamentos colocados é bastante reduzido, quando comparado aos casos analisados em secções anteriores, mesmo aumentando a capacidade energética da bateria. No entanto, ainda que o número de reservas seja mais reduzido, verifica-se que as cargas utilizadas mais frequentemente foram agendadas na sua totalidade na segunda e na quarta simulação. Esta troca da possibilidade de agendar cargas de utilização menos frequente pelo acesso a iluminação ao longo do dia, ainda que mais reduzida em algumas habitações, pode resultar num aumento do conforto proporcionado aos habitantes de comunidade.

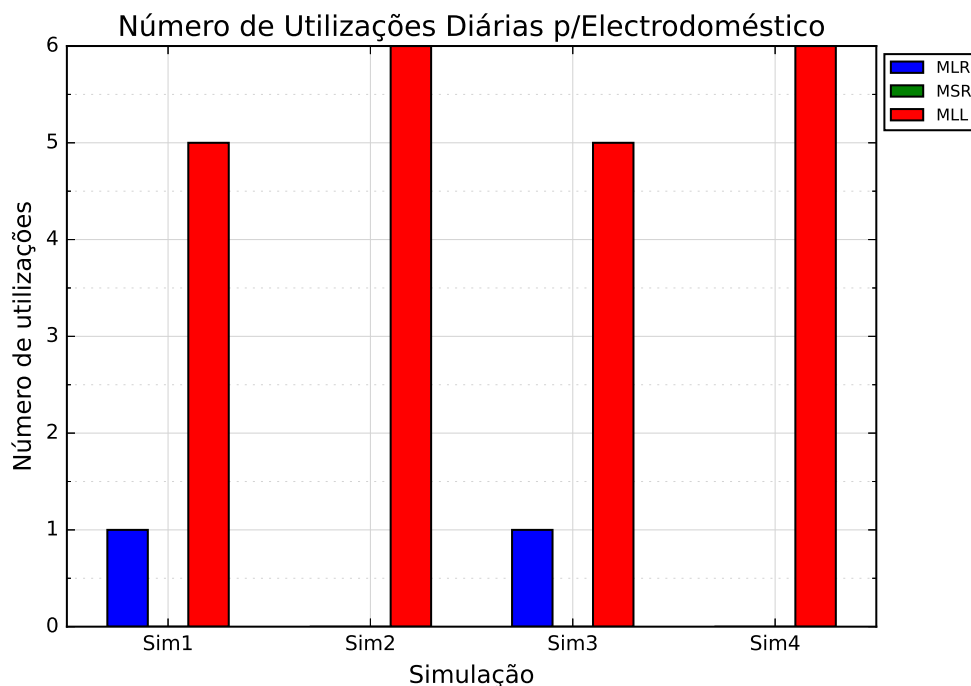


Figura 5.26: Número de cargas agendadas admitindo iluminação (Janeiro).

5.7 Cenário Admitindo Sistema de Geração e Armazenamento de Energia em Todas as Habitações

Na presente secção, explora-se um cenário de operação no qual todas as habitações da comunidade têm um sistema de geração e de armazenamento de energia eléctrica, admitindo-se, para efeitos de simplificação, que todas as instalações são iguais.

As características de uma instalação foram as já utilizadas nas secções anteriores, ou seja, uma potência PV instalada de 4kW e 70% de rendimento, e uma bateria com uma capacidade energética de 3kWh, energia mínima igual a 30% da capacidade máxima, energia inicial igual a 60% da capacidade máxima e potência máxima de carga/descarga de 1,5kW.

Sendo assim, as definições de simulação utilizadas, e que permitiram representar a comunidade como um todo, são:

- Mês: Janeiro
- Cenário: 4
- Instalação PV:
 - Potência Instalada: 28kW;
 - Rendimento: 70%.

5.7. CENÁRIO ADMITINDO SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM TODAS AS HABITAÇÕES

- Bateria:
 - Energia Máxima: 21kWh;
 - Energia Mínima: 30%;
 - Energia Inicial: 60%;
 - Potência Máxima: 10,5kW.

Utilizou-se novamente o cenário 4 de operação da bateria, não só por ser o cenário que permitiu obter melhores resultados, como determinado nas secções anteriores, mas também por ser o cenário que permitiu considerar um consumo diário base referente à iluminação, possibilitado por uma utilização da bateria mais liberal ao longo do período de simulação.

Uma vez que, neste cenário de operação, todas as habitações da comunidade possuíam um sistema provedor de energia, admitiu-se um coeficiente de utilização da iluminação de 100% para todas as habitações.

As definições utilizadas na ferramenta de colocação das reservas de forma automática foram: "Flexibilidade Crescente" para as habitações e "Utilização Mais Frequente" para os electrodomésticos. Relativamente ao modo como as cargas foram colocadas, optou-se por realizar quatro simulações. À primeira, "Sim 1", corresponde a colocação das cargas de acordo com os períodos preferidos e alternativos dos habitantes, à segunda, "Sim 2", corresponde a colocação das cargas o mais cedo possível, à terceira simulação, "Sim 3", corresponde a colocação das cargas do meio do dia para fora e à quarta simulação, "Sim 4", corresponde a colocação das cargas o mais tarde possível.

Na figura 5.27 observam-se os resultados obtidos para a primeira simulação. Analisando o perfil da energia nas baterias, verifica-se que o facto de permanecer no seu valor máximo durante um período de tempo alargado indica que a energia a ser gerada, a cinzento escuro, durante esse período, é muito superior à que está a ser consumida pela comunidade, a branco e cinzento claro, percebendo-se que, nestas condições de funcionamento, e apenas considerando as cargas abordadas neste estudo, esta é a configuração que permite satisfazer todas as necessidades energéticas da comunidade.

Na figura seguinte, podem-se observar as curvas de FE da comunidade, obtidas para cada uma das simulações realizadas nesta secção. Primeiramente, verifica-se que, em todas as simulações, foi possível satisfazer totalmente as necessidades energéticas da comunidade, indicando que todas as reservas foram colocadas com sucesso. Para além disso, o alargamento da distância entre a curva de colocação das cargas o mais cedo possível, a verde e traço fino, e a curva de colocação das cargas o mais tarde possível, a azul claro e traço fino, indica um aumento significativo na FE, quando comparado aos resultados obtidos nas secções anteriores, resultando numa maior liberdade na activação das cargas.

Em IV.4, encontram-se os resultados mais detalhados obtidos para as restantes simulações realizadas para esta secção.

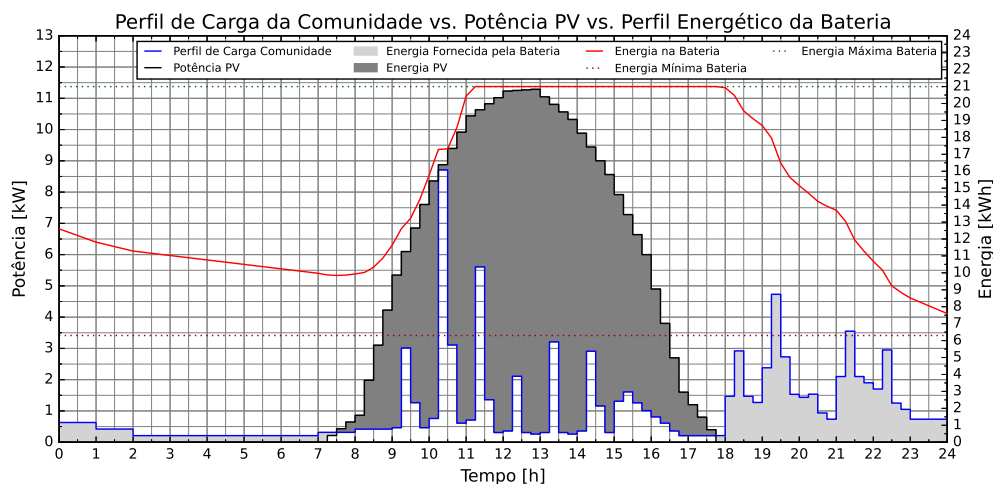


Figura 5.27: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria admitindo geração e armazenamento de energia em todas as habitações e colocando as cargas de acordo com os períodos preferidos de consumo (Janeiro).

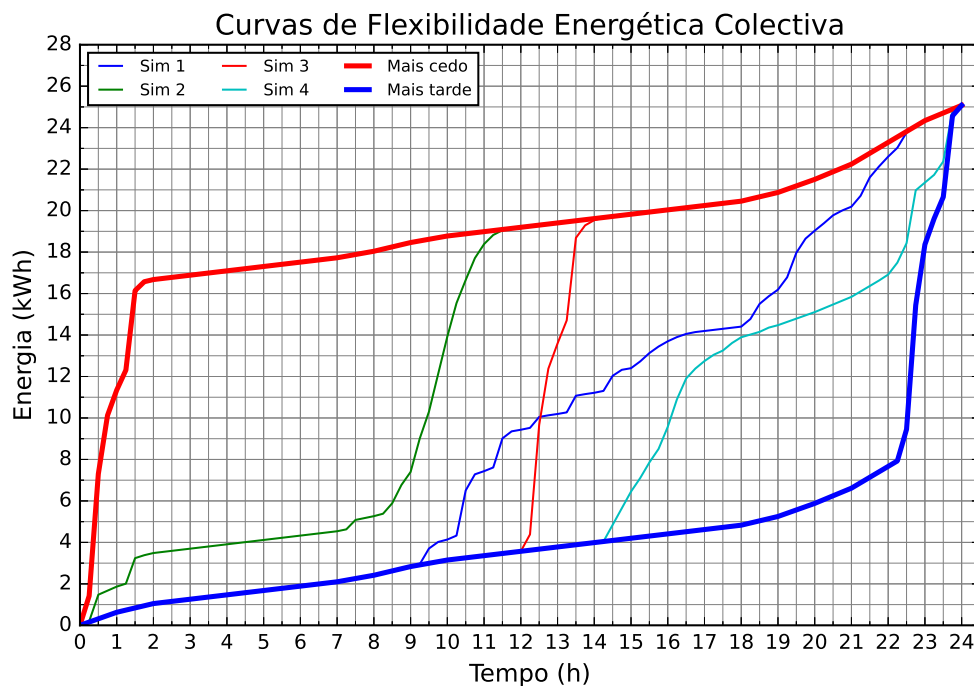


Figura 5.28: Curvas de flexibilidade energética colectiva da comunidade admitindo geração e armazenamento de energia em todas as habitações (Janeiro).

5.7. CENÁRIO ADMITINDO SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM TODAS AS HABITAÇÕES

Estes resultados eram expectáveis, visto que, essencialmente, cada uma das habitações fica responsável por satisfazer as suas necessidades energéticas. No entanto, ao se possibilitar que as habitações possam realizar trocas energéticas entre si, na prática criando uma MR, é possível assegurar que esta comunidade, neste cenário de operação, consegue um nível de conforto e operabilidade muito próximos do verificado quando conectada à rede eléctrica. Apesar de ser possível uma utilização mais liberal da energia, é necessário manter um sistema de controlo de consumo, para assegurar, principalmente nos períodos unicamente dependentes da energia na bateria, que os limites de potência e de energia gerada/armazenada não são ultrapassados.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusão

A rede eléctrica é ainda um sistema conservador, baseado principalmente na centralização da geração de energia e no movimento da mesma de forma unidireccional, tornando-a propícia à propagação do efeito de falhas.

Com o objectivo de promover uma alteração do paradigma anteriormente referido, começaram-se a procurar novas soluções de operação, possibilitadas pelos avanços tecnológicos verificados, principalmente, nas áreas das TIC e dispositivos de sensorização. Uma dessas soluções foi a transformação da rede numa SG. No entanto, uma só rede, gerida por um centro de controlo único, é muito difícil de concretizar, devido à enorme complexidade do sistema, pelo que surgem soluções que visam dividir a rede em partes mais pequenas (MRs), com produção de energia perto do local de consumo (GD). Esta metodologia permite não só reduzir a complexidade, mas também aumentar a eficiência do sistema, visto que, estando a produção perto do local de consumo, elimina-se grande parte das perdas durante o transporte e consegue-se adaptar a forma de produção de energia à zona e necessidades dos consumidores locais.

Para além das técnicas referidas anteriormente, procura-se, cada vez mais, incluir o consumidor na gestão da rede. Para isso, surgiram os métodos de RP, com os quais se procura balancear a energia produzida com a consumida pelos utilizadores, tentando-se aproveitar ao máximo a disponibilidade de FERs. Para tal, é necessário estudar os comportamentos dos consumidores, e perceber até que ponto estes estão dispostos a alterar os seus comportamentos de utilização de energia eléctrica (FE).

Existem vários electrodomésticos que podem fornecer mais FE que outros, sendo importante estudar os diferentes tipos de cargas e perfis de consumo dos mesmos. Neste trabalho, abordaram-se principalmente: a MLL, a MLR e a MSR. A flexibilidade destes é

nos dada pela quantidade de horas que o período do seu funcionamento pode ser atrasado ou adiantado.

Toda esta evolução da rede eléctrica permite a implementação de metodologias como a apresentada nesta dissertação. A utilização de electrodomésticos e contadores inteligentes é essencial para assegurar o bom funcionamento do sistema, garantindo sempre potência e energia suficientes para o bom funcionamento das cargas dos utilizadores. Para além disso, o facto de poderem ser controlados remotamente permite uma integração mais fácil com o centro de controlo, garantindo que o consumo vai ser o mais próximo do previsto.

Verificou-se que o período do ano tem um grande impacto na performance do sistema proposto. Nos meses mais frios, os baixos valores de radiação solar levam a uma produção de energia e valores de potência PV mais baixos ao longo do dia, resultando na possibilidade da colocação de um número mais reduzido de agendamentos. Por outro lado, nos meses quentes, onde se verificam valores de radiação solar mais altos, obtêm-se valores de energia e potência gerados pela instalação PV mais elevados, o que, por sua vez, resulta na possibilidade da colocação de um maior número de agendamentos.

Relativamente ao modo de operação da bateria, os resultados sugerem que esta deve ser operada da forma mais liberal possível, ou seja, permitindo que esta seja utilizada sempre que necessária, carregando quando existe produção de energia superior ao consumo e descarregando sempre que o oposto se verifique. A bateria deverá operar sempre dentro dos valores nominais especificados pelo fabricante, garantindo a protecção do equipamento. Para além disso, verificou-se que, principalmente nos meses frios, a utilização deste equipamento permite obter resultados substancialmente melhores, algo que se torna evidente pelos fracos resultados obtidos pelo cenário 1.

No que toca ao método de colocação das reservas, é possível seguir dois caminhos: (1) colocação das reservas manualmente e (2) colocação das reservas automaticamente. Na primeira hipótese, cria-se uma plataforma onde os utilizadores realizam os seus agendamentos. Na eventualidade de existirem conflitos nos agendamentos, os utilizadores podem pedir uns aos outros para alterarem a hora das suas reservas. Na segunda hipótese, os agendamentos são realizados automaticamente. Para maximizar o nível de conforto tenta-se colocar as reservas dentro dos períodos preferidos e alternativos de utilização de cada uma das cargas de cada uma das habitações. No entanto, verificou-se que métodos de colocação das cargas de uma forma sequencial e ordenada, tais como a colocação das cargas o mais cedo possível, permitem obter números de agendamentos mais elevados e, no geral, um maior aproveitamento da energia produzida.

Em relação à contribuição de cada um dos elementos de produção e armazenamento de energia para a performance do sistema, verificou-se que a instalação PV influencia drasticamente o número de agendamentos que podem ser colocados, principalmente se estes forem colocados dentro do período definido pela sua curva de produção de energia. Por outro lado, a bateria não proporciona uma alteração muito significativa no número de reservas que podem ser colocadas. Essa alteração depende principalmente da quantidade de energia que esta permite adicionar ao sistema quando se verifica o isolamento da rede.

No entanto, esta permite adicionar uma maior flexibilidade ao sistema, possibilitando a colocação de reservas fora da curva PV, nos períodos sem sol.

Analisou-se, também, um cenário onde é permitida a utilização de iluminação ao longo do dia. Os resultados revelaram que, sacrificando a colocação de algumas reservas dos electrodomésticos previamente referidos, principalmente nos períodos fora da curva PV, e utilizando níveis de iluminação mais reduzidos, é possível, mediante o aumento da capacidade energética da bateria, assegurar que a comunidade pode operar nestas condições.

No último caso, procedeu-se à simulação de um cenário no qual se considera que todas as habitações da comunidade possuem um sistema de produção e de armazenamento de energia eléctrica. Verificou-se que, adoptando esta configuração, é possível satisfazer na totalidade as necessidades energéticas resultantes da utilização das cargas abordadas neste estudo, de todas as habitações. Para além disso, observou-se também um aumento substancial na potencialidade para FE, fruto do aumento do período temporal onde as cargas podem ser colocadas a operar.

Por fim, ainda que neste estudo não tenha sido feita uma análise considerando todas as cargas presentes numa habitação, constata-se que, perante uma situação em que se verifique um corte total do acesso à energia eléctrica proveniente da rede de distribuição, é possível satisfazer algumas das necessidades energéticas da comunidade. Torna-se evidente que, face aos resultados obtidos, através da construção, ou modificação, de comunidades de modo a conferir-lhes a capacidade para se isolarem da rede, criando um ecossistema semelhante a uma MR, e controlando-as segundo os hábitos dos seus habitantes, é possível aumentar o nível de resiliência da rede eléctrica, permitindo que, numa situação de falha, o nível de degradação verificado no período 3 dos gráficos referentes à representação do estado da rede (2.2.1), aplicado, no entanto, apenas a esta comunidade, seja mais baixo, visto se verificar uma disponibilidade de serviço parcial.

6.2 Trabalhos Futuros

Em primeiro lugar, sugere-se a extensão deste estudo a um conjunto maior e mais diversificado de cargas. Para além disso, para simular uma situação de operação o mais próxima da habitual, para cada uma das habitações, devem-se considerar, também, os vários modos de funcionamento de cada uma das cargas.

Depois, propõe-se a análise do comportamento do sistema utilizando métodos de previsão das condições meteorológicas relevantes para o estudo e modelos que permitam simular cada um dos elementos do sistema (PV, bateria, cargas, conversores electrónicos de potência, etc.) mais precisos.

Em terceiro lugar, sugere-se a identificação de equipamentos, presentes no mercado ou não, que permitam a implementação deste sistema numa situação real. Em caso de inexistência de algum elemento essencial para a sua concretização, motiva-se o desenvolvimento e construção do mesmo.

Depois, havendo identificado a viabilidade da implementação de um modelo como este, propõe-se a sua aplicação a uma situação real e consequente estudo dos resultados obtidos, tal como já foi feito em outros projectos identificados nesta dissertação.

Por último, caso os resultados derivados da proposta apresentada no parágrafo anterior se revelem animadores, sugere-se o estudo da possibilidade de criar todo um ecossistema de MRs com esta configuração, e analisar os impactos que isso provoca na rede, não só ao nível do aumento da resiliência, mas também no que toca aos efeitos verificados na qualidade da energia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Prado. *Expresso _ Falhas na rede elétrica fizeram disparar compensações aos consumidores para recorde de oito anos*. 2019. URL: <https://expresso.pt/economia/2019-10-16-Falhas-na-rede-eletrica-fizeram-disparar-compensacoes-aos-consumidores-para-recorde-de-oito-anos>.
- [2] K. Amadeo. *Hurricane Sandy: Facts, Damage, Economic Impact*. 2018. URL: <https://www.thebalance.com/hurricane-sandy-damage-facts-3305501>.
- [3] J. Zhu. *Optimization of Power System Operation: Second Edition*. Wiley-IEEE Press, 2015. DOI: 10.1002/9781118887004.
- [4] International Renewable Energy Agency. *Renewable Power Generation Costs in 2019*. 2020.
- [5] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. *Guia sobre a Distribuição de Energia Elétrica em Baixa Tensão*. 2018.
- [6] Department Homeland Security. *Critical Infrastructure Sectors*. 2014. URL: <http://www.dhs.gov/critical-infrastructure-sectors>.
- [7] M. Ouyang, L. Dueñas-Osorio e X. Min. “A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems”. Em: *Structural Safety* 36-37 (2012), pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.strusafe.2011.12.004. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.12.004>.
- [8] A. Mar, P. Pereira e J. F. Martins. “A Survey on Power Grid Faults and Their Origins: A Contribution to Improving Power Grid Resilience”. Em: *Energies* 12.24 (2019). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12244667. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/24/4667>.
- [9] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella e N. D. Hatziargyriou. “Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies”. Em: *Proceedings of the IEEE* 105.7 (2017), pp. 1202–1213. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2691357.
- [10] Dicionário Priberam da Língua Portuguesa. *Consulte o significado / definição de resiliência no Dicionário Priberam da Língua Portuguesa*. 2013. URL: <https://dicionario.priberam.org/resiliência>.

- [11] J. Y. Pan e C. L. W. Chan. “Resilience: A new research area in positive psychology”. Em: *Psychologia* 50.3 (2007), pp. 164–176. DOI: 10.2117/psysoc.2007.164.
- [12] C. S. Holling. “Resilience and Stability of Ecological Systems”. Em: *Source: Annual Review of Ecology and Systematics* 4.1973 (1973), pp. 1–23. URL: <http://www.jstor.org/stable/2096802>.
- [13] S. Saoji. *The Resilient Enterprise, a Book Review*. 2012. URL: <https://husdal.com/2007/12/12/book-review-the-resilient-enterpriseovercoming-vulnerability-for-competitive-advantage/>.
- [14] Cabinet Office. *Keeping the Country Running: Natural Hazards and Infrastructure*. 2011.
- [15] F. H. Jufri, J.-S. Kim e J. Jung. “Analysis of Determinants of the Impact and the Grid Capability to Evaluate and Improve Grid Resilience from Extreme Weather Event”. Em: *Energies* 10.11 (2017). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10111779. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1779>.
- [16] M. Panteli e P. Mancarella. “The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience”. Em: *IEEE Power and Energy Magazine* 13.3 (2015), pp. 58–66. DOI: 10.1109/MPE.2015.2397334.
- [17] M. Bruneau, S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O’Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace e D. von Winterfeldt. *A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities*. 2003. DOI: 10.1193/1.1623497. URL: <https://doi.org/10.1193/1.1623497>.
- [18] M. Panteli, P. Mancarella, D. N. Trakas, E. Kyriakides e N. D. Hatziargyriou. “Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 32.6 (2017), pp. 4732–4742. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2664141.
- [19] European Commission. *EYE@RIS3 - Smart Specialisation Platform*. 2016. URL: <http://s3platform.jrc.ec.europa.eu/>.
- [20] U.S. Department of Energy. *What Is the Smart Grid?* URL: https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/.
- [21] EDP. *Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede de Distribuição*. 2016.
- [22] N. Hatziargyriou. *Microgrids: Architectures and Control*. Wiley-IEEE Press, 2013. DOI: 10.1002/9781118720677.
- [23] R. Dorf. “Systems, Controls, Embedded Systems, Energy, and Machines”. Em: 1ª ed. CRC Press, 2006. DOI: 10.1201/9781420037043.
- [24] P. S. Revuelta, S. P. Litrán e J. P. Thomas. *Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality*. 2015. DOI: 10.1016/C2014-0-02915-2.

- [25] Y. E. García Vera, R. Dufo-López e J. L. Bernal-Agustín. “Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources: A Literature Review”. Em: *Applied Sciences* 9.18 (2019). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app9183854. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/18/3854>.
- [26] A. Nespoli, E. Ogliari, S. Leva, A. Massi Pavan, A. Mellit, V. Lughi e A. Dolara. “Day-Ahead Photovoltaic Forecasting: A Comparison of the Most Effective Techniques”. Em: *Energies* 12.9 (2019). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12091621. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/9/1621>.
- [27] G. Wolf. *A Short History: The Microgrid*. 2017. URL: <http://www.tdworld.com/digital-innovations/short-history-microgrid>.
- [28] BERKELEY LAB. *Microgrid Definitions | Building Microgrid*. 2019. URL: <https://building-microgrid.lbl.gov/microgrid-definitions>.
- [29] A. Hirsch, Y. Parag e J. Guerrero. “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90 (2018), pp. 402–411. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830128X>.
- [30] Z. Li, M. Shahidehpour, F. Aminifar, A. Alabdulwahab e Y. Al-Turki. “Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience”. Em: *Proceedings of the IEEE* 105.7 (2017), pp. 1289–1310. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2685558.
- [31] O. Planas. *O que é irradiação solar?* 2019. URL: <https://pt.solar-energia.net/que-e-energia-solar/radiacao-solar/irradiacao-solar>.
- [32] E. S. N. P. Raju e T. Jain. “Hybrid AC / DC micro grid : An overview”. Em: October. 2013, p. 6. DOI: 10.13140/2.1.1847.8081.
- [33] Federal Energy Regulatory Commission. *Reports on Demand Response and Advanced Metering*. URL: <https://www.ferc.gov/industries-data/electric/power-sales-and-markets/demand-response/reports-demand-response-and>.
- [34] F. Issi e O. Kaplan. “The Determination of Load Profiles and Power Consumptions of Home Appliances”. Em: *Energies* 11.3 (2018). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en11030607. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/607>.
- [35] C. Vivekananthan, Y. Mishra, G. Ledwich e F. Li. “Demand Response for Residential Appliances via Customer Reward Scheme”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.2 (2014), pp. 809–820. DOI: 10.1109/TSG.2014.2298514.
- [36] Linear Consortium. *Demand Response for Families: Linear Report*. 2014.
- [37] IEA EBC Annex 67. *Energy Flexible Buildings*. 2014. URL: www.iea-ebc.org/projects/ongoing-projects/ebc-annex-67/.

- [38] R. G. Junker, A. G. Azar, R. A. Lopes, K. B. Lindberg, G. Reynders, R. Relan e H. Madsen. “Characterizing the energy flexibility of buildings and districts”. Em: *Applied Energy* 225 (2018), pp. 175–182. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.037>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191830730X>.
- [39] K. B. Lindberg. “Impact of Zero Energy Buildings on the Power System - A study of load profiles , flexibility and system investments”. Tese de doutoramento. Norwegian University of Science e Technology, 2017. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2450566>.
- [40] S. O. Ottesen e A. Tomasgard. “A stochastic model for scheduling energy flexibility in buildings”. Em: *Energy* 88 (2015), pp. 364–376. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.049>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215006301>.
- [41] J. Pedro Pereira Neves. “Estudo da Agregação da Flexibilidade em Habitações-O Frigorífico como Caso de Estudo”. Tese de mestrado. NOVA School of Science e Technology | FCT NOVA, 2016. URL: <http://hdl.handle.net/10362/31860>.
- [42] F. Mancini, G. Lo Basso e L. De Santoli. “Energy Use in Residential Buildings: Characterisation for Identifying Flexible Loads by Means of a Questionnaire Survey”. Em: *Energies* 12.11 (2019). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12112055. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2055>.
- [43] I. A. Sajjad, G. Chicco e R. Napoli. “Definitions of Demand Flexibility for Aggregate Residential Loads”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 7.6 (2016), pp. 2633–2643. DOI: 10.1109/TSG.2016.2522961.
- [44] R. D’hulst, W. Labeeuw, B. Beusen, S. Claessens, G. Deconinck e K. Vanthournout. “Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium”. Em: *Applied Energy* 155 (2015), pp. 79–90. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.101>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915007345>.
- [45] T. J. Lui., W. Stirling e H. O. Marcy. “Get Smart”. Em: *IEEE Power and Energy Magazine* 8.3 (2010), pp. 66–78. DOI: 10.1109/MPE.2010.936353.
- [46] Direção Geral de Energia e Geologia. *Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencial*. 2004.
- [47] D. P. Chassin. “Electrical Load Modeling and Simulation”. Em: *High Performance Computing in Power and Energy Systems*. Ed. por S. K. Khaitan e A. Gupta. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 281–334. ISBN: 978-3-642-32683-7. DOI: 10.1007/978-3-642-32683-7_10. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32683-7_10.

-
- [48] A. Dolara, S. Leva e G. Manzolini. “Comparison of different physical models for PV power output prediction”. Em: *Solar Energy* 119 (2015), pp. 83–99. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15003254>.
- [49] Homer Energy. *HOMER® Pro Version 3.7 User Manual*. 2016. URL: <http://www.homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf>.
- [50] R. L. Yang, G. M. A. Tiepolo, A. A. Tonolo, J. Urbanetz Junior e M. B. d. Souza. “Photovoltaic Cell Temperature Estimation for a Grid-Connect Photovoltaic Systems in Curitiba”. Em: *Brazilian Archives of Biology and Technology* 62 (2019). ISSN: 1516-8913. URL: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132019000200215&nrm=iso.
- [51] J. A. Duffie (Deceased), W. A. Beckman e N. Blair. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. 5ª ed. Wiley, 2020. DOI: 10.1002/9781119540328.
- [52] D. M. Rosewater, D. A. Copp, T. A. Nguyen, R. H. Byrne e S. Santoso. “Battery Energy Storage Models for Optimal Control”. Em: *IEEE Access* 7 (2019), pp. 178357–178391. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2957698.
- [53] D. T. Nguyen e L. B. Le. “Optimal Bidding Strategy for Microgrids Considering Renewable Energy and Building Thermal Dynamics”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.4 (2014), pp. 1608–1620. DOI: 10.1109/TSG.2014.2313612.
- [54] M. Gonçalves. “Estudo da flexibilidade energética através da gestão temporal de cargas térmicas”. Tese de mestrado. NOVA School of Science e Technology | FCT NOVA, 2016. URL: <http://hdl.handle.net/10362/19182>.



PERFIS DE CARGA DA ILUMINAÇÃO E DOS ELECTRODOMÉSTICOS MODELADOS

Tabela I.1: Perfis de carga dos electrodomésticos modelados

Tempo (1/4h)	Potência (W)		
	MLR	MSR	MLL
0	0	0	0
0	100	1000	50
1	100	1000	50
1	1200	1000	1500
2	1200	1000	1500
2	900	1000	50
3	900	1000	50
3	100	800	50
4	100	800	50
4	100	600	50
5	100	600	50
5	400	400	1500
6	400	400	1500
6	50	150	50
7	50	150	50
7	0	0	0

ANEXO I. PERFIS DE CARGA DA ILUMINAÇÃO E DOS ELECTRODOMÉSTICOS MODELADOS

Tabela I.2: Perfil de carga referente à iluminação de uma habitação.

Tempo (h)	Potência (W)
0	90.0
1	60.0
2	30.0
3	30.0
4	30.0
5	30.0
6	30.0
7	45.0
8	60.0
9	45.0
10	30.0
11	30.0
12	30.0
13	30.0
14	30.0
15	30.0
16	30.0
17	30.0
18	60.0
19	90.0
20	105.0
21	150.0
22	150.0
23	105.0
24	105.0

A N E X O

DADOS PARA CONSTRUÇÃO DO PERFIL DE PRODUÇÃO PV

Tabela II.1: Dados da Velocidade Média do Vento

Mês	Velocidade Média do Vento (m/s)
Janeiro	0.90
Fevereiro	0.75
Março	0.89
Abril	1.04
Maio	1.40
Junho	1.54
Julho	1.54
Agosto	1.55
Setembro	1.13
Outubro	1.00
Novembro	1.18
Dezembro	0.93

Tabela II.2: Dados de Radiação Solar - Janeiro

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m^2)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	8.41
1	0	0	0	8.18
2	0	0	0	7.94
3	0	0	0	7.7
4	0	0	0	7.53
5	0	0	0	7.36
6	0	0	0	7.19
7	0	0	0	7.56
8	40.74	28.42	12.02	7.92
9	261.32	176.84	82.01	8.28
10	420.33	293.63	122.22	9.61
11	537.39	378.31	153.05	10.93
12	585.21	412.01	166.48	12.25
13	591.05	414.13	170.1	12.75
14	537.6	375.25	156.29	13.24
15	440.62	303.97	131.92	13.74
16	301.23	205.25	93.14	12.75
17	77.49	54.64	22.31	11.77
18	0	0	0	10.79
19	0	0	0	10.15
20	0	0	0	9.51
21	0	0	0	8.87
22	0	0	0	8.69
23	0	0	0	8.51
24	0	0	0	8.41

Tabela II.3: Dados de Radiação Solar - Fevereiro

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m ²)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	8.37
1	0	0	0	8.1
2	0	0	0	7.82
3	0	0	0	7.54
4	0	0	0	7.35
5	0	0	0	7.15
6	0	0	0	6.96
7	0	0	0	7.62
8	119.8	72.76	45.78	8.27
9	330.78	214.56	112.32	8.93
10	515.1	355.15	153.65	10.27
11	627.25	429.31	189.99	11.61
12	680.87	472.58	199.6	12.94
13	695	484.75	201.37	13.43
14	622.04	421.02	193.06	13.92
15	526.4	351.47	168.34	14.4
16	374.8	243.48	126.83	13.55
17	191.31	118.76	70.51	12.69
18	0.71	0	0.7	11.83
19	0	0	0	10.93
20	0	0	0	10.03
21	0	0	0	9.13
22	0	0	0	8.9
23	0	0	0	8.67
24	0	0	0	8.37

Tabela II.4: Dados de Radiação Solar - Março

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m^2)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	10.34
1	0	0	0	10
2	0	0	0	9.67
3	0	0	0	9.33
4	0	0	0	9.1
5	0	0	0	8.86
6	0	0	0	8.63
7	30.92	12.42	17.95	9.71
8	212.92	120	89.74	10.79
9	394.65	240.15	148.66	11.87
10	552.23	351.04	193.06	13.07
11	676.59	439.77	226.91	14.27
12	717.27	469.18	237.52	15.47
13	735.57	474.26	250.48	16.04
14	669.06	428.41	230.81	16.61
15	572.01	360.61	203	17.18
16	411.9	245.15	160.65	16.52
17	233.67	126.67	103.52	15.86
18	48.12	19.89	27.44	15.2
19	0	0	0	13.98
20	0	0	0	12.76
21	0	0	0	11.54
22	0	0	0	11.17
23	0	0	0	10.8
24	0	0	0	10.34

Tabela II.5: Dados de Radiação Solar - Abril

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m^2)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	12.25
1	0	0	0	11.89
2	0	0	0	11.53
3	0	0	0	11.18
4	0	0	0	10.96
5	0	0	0	10.75
6	6.76	0	6.62	10.54
7	118.92	49.88	66.45	12
8	307.46	175.41	126.43	13.46
9	478.17	293	176.96	14.92
10	616.04	391.87	213.9	15.92
11	712.53	456.17	244.63	16.92
12	737.89	466.26	259.51	17.92
13	742.92	475.23	255.52	18.37
14	679.13	419.97	247.9	18.82
15	570.82	341.34	219.84	19.28
16	429.88	244.62	177.77	18.73
17	267.36	146.34	116.02	18.19
18	83.75	29.03	52.73	17.65
19	0.61	0	0.59	16.28
20	0	0	0	14.91
21	0	0	0	13.54
22	0	0	0	13.11
23	0	0	0	12.69
24	0	0	0	12.25

Tabela II.6: Dados de Radiação Solar - Maio

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m^2)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	14.52
1	0	0	0	14.08
2	0	0	0	13.64
3	0	0	0	13.2
4	0	0	0	13.12
5	0	0	0	13.03
6	38.3	0	37.51	12.94
7	163.77	71.23	88.37	14.6
8	344.85	198.4	139.33	16.27
9	515.69	322.05	183.88	17.93
10	650.29	412.25	226.25	19.04
11	759.44	502.63	243.36	20.15
12	816.95	552.07	250.55	21.26
13	794.7	522.89	257.82	21.79
14	731.49	473.43	245.02	22.31
15	611.62	383.91	216.49	22.84
16	467.14	281.02	177.07	22.25
17	287.75	153.11	128.39	21.67
18	108.58	34.52	70.84	21.09
19	18.56	0	18.17	19.54
20	0	0	0	17.99
21	0	0	0	16.44
22	0	0	0	15.86
23	0	0	0	15.27
24	0	0	0	14.52

Tabela II.7: Dados de Radiação Solar - Junho

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m ²)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	17.66
1	0	0	0	17.14
2	0	0	0	16.61
3	0	0	0	16.09
4	0	0	0	16.06
5	0	0	0	16.03
6	48.46	0	47.46	16
7	166.95	70.68	91.59	17.71
8	348.15	199.34	141.12	19.42
9	522.87	338.4	174.05	21.14
10	672.8	458.99	201.11	22.41
11	789.68	551.65	223.55	23.68
12	849.06	597.61	236.05	24.95
13	834.18	581.61	237.41	25.67
14	779.84	539.34	226.13	26.4
15	667.64	446.52	208.4	27.13
16	506.2	327.34	168.58	26.52
17	322.88	187.58	127.85	25.91
18	132.07	49.39	78.5	25.31
19	38.51	0	37.71	23.62
20	0	0	0	21.93
21	0	0	0	20.24
22	0	0	0	19.39
23	0	0	0	18.55
24	0	0	0	17.66

Tabela II.8: Dados de Radiação Solar - Julho

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m^2)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	19.44
1	0	0	0	18.8
2	0	0	0	18.16
3	0	0	0	17.52
4	0	0	0	17.37
5	0	0	0	17.23
6	37.13	0	36.36	17.08
7	146.33	60.6	81.59	18.87
8	332.61	200.4	124.92	20.66
9	537.53	376.39	150.57	22.44
10	714.86	530.57	171.03	24.06
11	862.9	662.92	184.46	25.68
12	947.08	748.15	182.14	27.3
13	951.11	748.92	185.32	28.31
14	887.24	691.05	180.24	29.31
15	757.36	579.79	163.51	30.32
16	570.37	415.73	143.37	29.67
17	358.14	237.24	112.88	29.02
18	148.69	71.75	72.31	28.37
19	37.82	0	37.03	26.43
20	0	0	0	24.49
21	0	0	0	22.55
22	0	0	0	21.52
23	0	0	0	20.48
24	0	0	0	19.44

Tabela II.9: Dados de Radiação Solar - Agosto

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m ²)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	19.96
1	0	0	0	19.34
2	0	0	0	18.71
3	0	0	0	18.09
4	0	0	0	17.84
5	0	0	0	17.58
6	12.49	0	12.23	17.33
7	130.15	56.97	69.99	19.1
8	330.95	204.2	120.3	20.86
9	549.78	388.74	151.25	22.62
10	745.29	559.98	172.62	24.34
11	885.66	684.19	186.72	26.06
12	957.95	750.28	191.88	27.77
13	951.99	738.59	197.69	28.75
14	874.43	668.19	191.66	29.73
15	748.33	564.37	171.19	30.7
16	552.23	394.68	147.66	30.04
17	334.96	216.8	111.52	29.38
18	123.01	55.72	64.03	28.72
19	11.9	0	11.65	26.8
20	0	0	0	24.87
21	0	0	0	22.95
22	0	0	0	21.97
23	0	0	0	20.99
24	0	0	0	19.96

Tabela II.10: Dados de Radiação Solar - Setembro

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m ²)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	18.67
1	0	0	0	18.19
2	0	0	0	17.72
3	0	0	0	17.24
4	0	0	0	16.99
5	0	0	0	16.74
6	0	0	0	16.48
7	105.47	49.86	53.74	17.95
8	307.21	186.55	115.74	19.42
9	519.63	357.66	153.97	20.89
10	701.66	507.02	184.04	22.38
11	817.37	601.2	203.89	23.87
12	869.41	638.52	217.83	25.35
13	861.99	626.92	222.11	25.97
14	777.87	557.19	208.95	26.59
15	642.58	451.48	181.32	27.21
16	455.18	303.91	144.19	26.48
17	243.86	145.14	94.73	25.74
18	45.07	17.63	26.47	25
19	0	0	0	23.47
20	0	0	0	21.94
21	0	0	0	20.42
22	0	0	0	19.81
23	0	0	0	19.2
24	0	0	0	18.67

Tabela II.11: Dados de Radiação Solar - Outubro

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m ²)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	16.3
1	0	0	0	16
2	0	0	0	15.71
3	0	0	0	15.41
4	0	0	0	15.2
5	0	0	0	14.98
6	0	0	0	14.76
7	45.26	23.92	20.77	15.79
8	249.59	150.2	96.23	16.82
9	429.03	278.03	145.38	17.85
10	603.44	413.29	182.16	19.09
11	681.27	470.16	201.97	20.33
12	711.54	484.57	217.34	21.56
13	698.15	475.62	213.12	21.93
14	600.42	399.5	192.84	22.3
15	491.37	318.82	166.05	22.67
16	314.95	193.76	117.14	21.61
17	116.97	64.8	50.75	20.55
18	0.03	0	0.03	19.49
19	0	0	0	18.68
20	0	0	0	17.87
21	0	0	0	17.06
22	0	0	0	16.76
23	0	0	0	16.46
24	0	0	0	16.3

Tabela II.12: Dados de Radiação Solar - Novembro

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m ²)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	11.55
1	0	0	0	11.31
2	0	0	0	11.06
3	0	0	0	10.82
4	0	0	0	10.66
5	0	0	0	10.5
6	0	0	0	10.33
7	0	0	0	11.01
8	169.63	108.64	59.44	11.69
9	357.43	239.4	114.23	12.37
10	519.66	359.82	153.97	13.54
11	613.97	431.69	175.12	14.71
12	634.35	441.57	185.27	15.88
13	607.78	416.85	183.73	16.19
14	499.01	331.66	161.5	16.49
15	394.26	256.28	133.59	16.8
16	239.33	153.39	83.63	15.8
17	7.77	4.34	3.36	14.79
18	0	0	0	13.78
19	0	0	0	13.17
20	0	0	0	12.56
21	0	0	0	11.95
22	0	0	0	11.76
23	0	0	0	11.57
24	0	0	0	11.55

Tabela II.13: Dados de Radiação Solar - Dezembro

Tempo (h)	Radiação Solar (W/m^2)			Temperatura (°C)
	Global	Directa	Difusa	
0	0	0	0	9.24
1	0	0	0	9.01
2	0	0	0	8.78
3	0	0	0	8.55
4	0	0	0	8.41
5	0	0	0	8.26
6	0	0	0	8.11
7	0	0	0	8.53
8	63.43	44.86	18.15	8.95
9	288.45	196.46	89.4	9.37
10	444.42	311.53	128.39	10.66
11	560.46	402.7	151.82	11.96
12	609.01	437.99	164.41	13.25
13	593.89	424.17	163.29	13.69
14	516.8	364.89	146.48	14.14
15	415.25	289.02	122.2	14.59
16	252.95	174.14	76.82	13.51
17	0.39	0	0.38	12.43
18	0	0	0	11.35
19	0	0	0	10.82
20	0	0	0	10.3
21	0	0	0	9.78
22	0	0	0	9.61
23	0	0	0	9.44
24	0	0	0	9.24

A N E X O

DADOS RESULTANTES DO QUESTIONÁRIO REALIZADO

Tabela III.1: Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Frios I

Habitação	Utilizações Semanais	MLR			
		Período Preferido		Período Alternativo	
		Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)	Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)
1	5	9	16	17	18
2	1	10	17	18	20
3	2	10	18	0	0
4	2	14	18	0	0
5	6	11	21	21	5
6	2	19	0	0	3
7	4	10	18	18	22

Tabela III.2: Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Frios II

Habitação	MSR				
	Utilizações Semanais	Período Preferido		Período Alternativo	
		Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)	Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)
1	3	21	0	8	10
2	1	18	22	12	16
3	0	0	0	0	0
4	2	15	19	0	0
5	0	0	0	0	0
6	3	19	0	0	2
7	0	0	0	0	0

Tabela III.3: Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Frios III

Habitação	MLL				
	Utilizações Semanais	Período Preferido		Período Alternativo	
		Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)	Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)
1	7	9	11	0	5
2	4	18	20	20	0
3	3	12	22	0	0
4	3	13	22	22	0
5	7	10	16	22	4
6	3	21	0	0	3
7	3	10	12	14	18

Tabela III.4: Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Quentes I

Habitação	MLR				
	Utilizações Semanais	Período Preferido		Período Alternativo	
		Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)	Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)
1	5	9	16	17	18
2	2	10	17	18	20
3	3	10	18	0	0
4	2	14	18	0	0
5	6	11	21	21	5
6	3	19	0	0	3
7	5	10	18	18	22

Tabela III.5: Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Quentes II

Habitação	Utilizações Semanais	MSR			
		Período Preferido		Período Alternativo	
		Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)	Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	1	19	0	0	2
7	0	0	0	0	0

Tabela III.6: Dados Resultantes do Questionário Realizado - Meses Quentes III

Habitação	Utilizações Semanais	MLL			
		Período Preferido		Período Alternativo	
		Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)	Limite Inferior (h)	Limite Superior (h)
1	7	9	11	0	5
2	4	18	20	20	0
3	3	12	22	0	0
4	3	13	22	22	0
5	7	10	16	22	4
6	3	21	0	0	3
7	3	10	12	14	18

GRÁFICOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

IV.1 Anexos - Análise da Performance dos Cenários de Utilização da Bateria

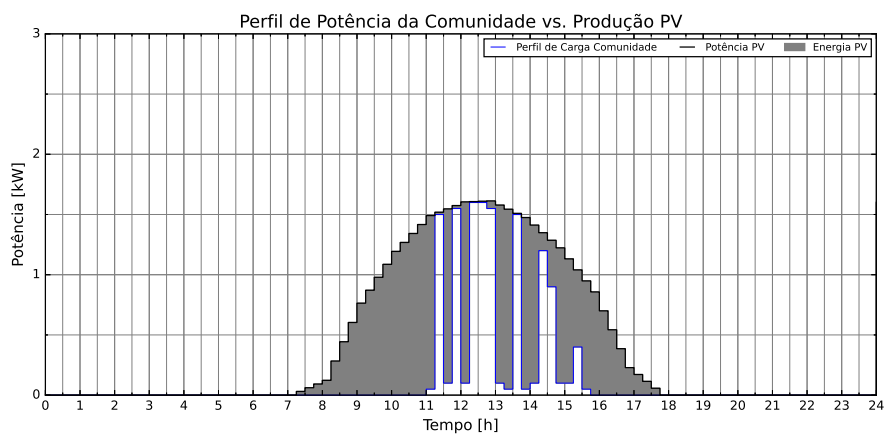


Figura IV.1: Perfil de carga da comunidade e perfil de produção PV utilizando o cenário 1 nos meses frios ("Sim 1").

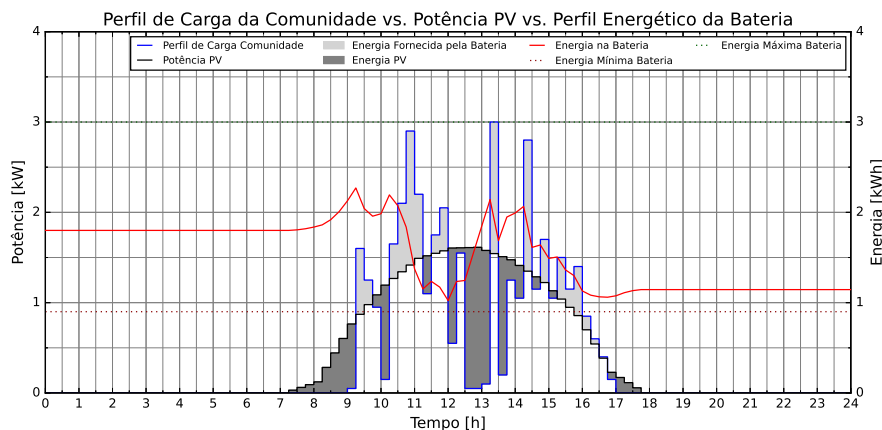


Figura IV.2: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 2 nos meses frios ("Sim 2").

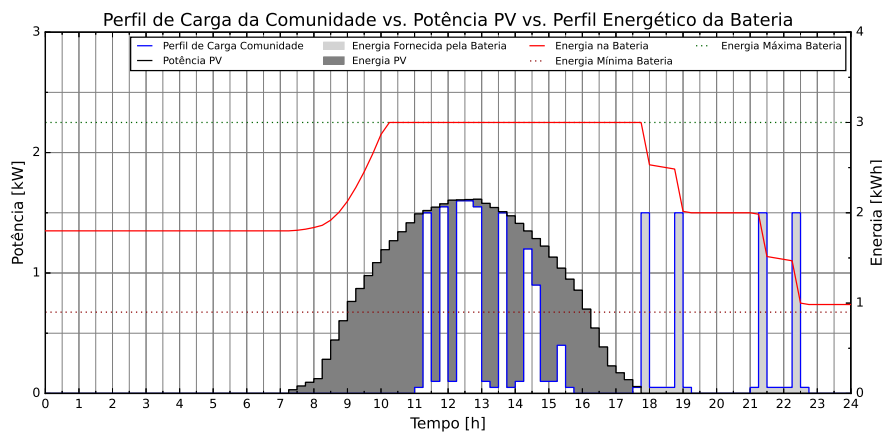


Figura IV.3: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 3 nos meses frios ("Sim 3").

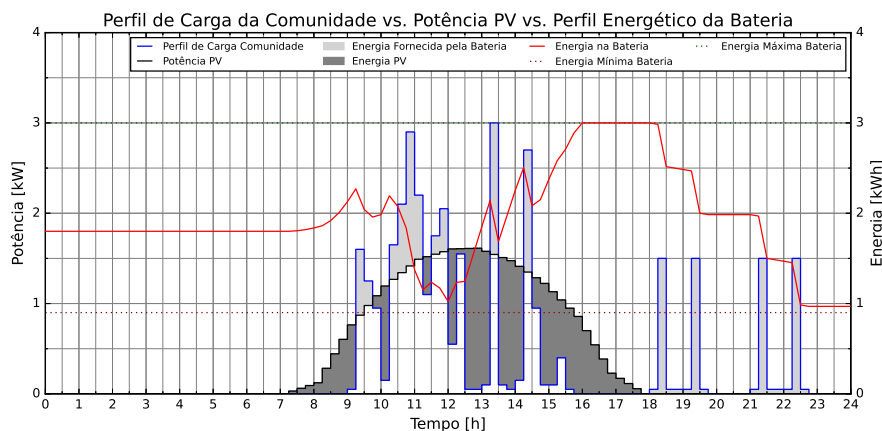


Figura IV.4: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 4 nos meses frios ("Sim 4").

IV.1. ANEXOS - ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS CENÁRIOS DE UTILIZAÇÃO DA BATERIA

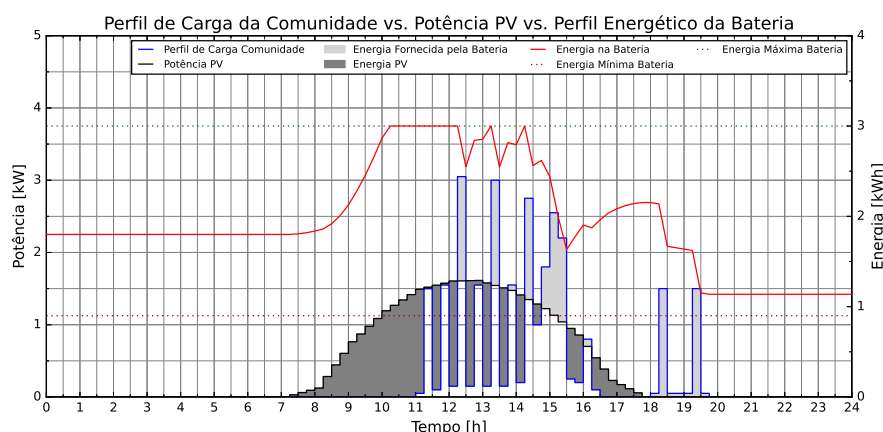


Figura IV.5: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 5 nos meses frios ("Sim 5").

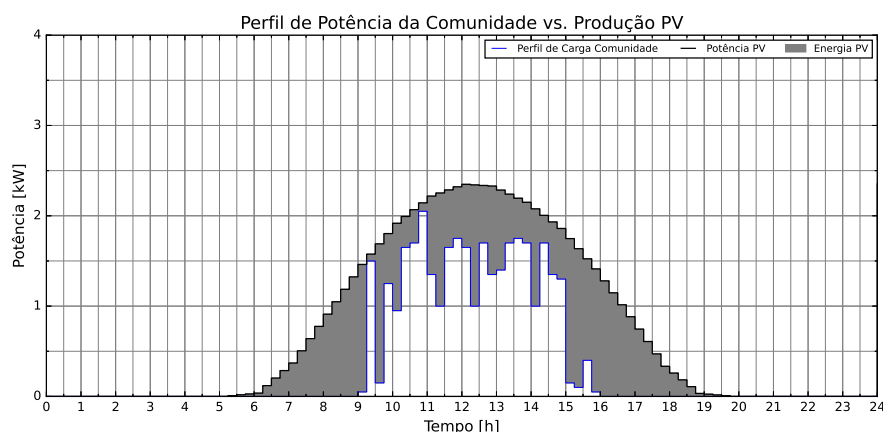


Figura IV.6: Perfil de carga da comunidade e perfil de produção PV utilizando o cenário 1 nos meses quentes ("Sim 1").

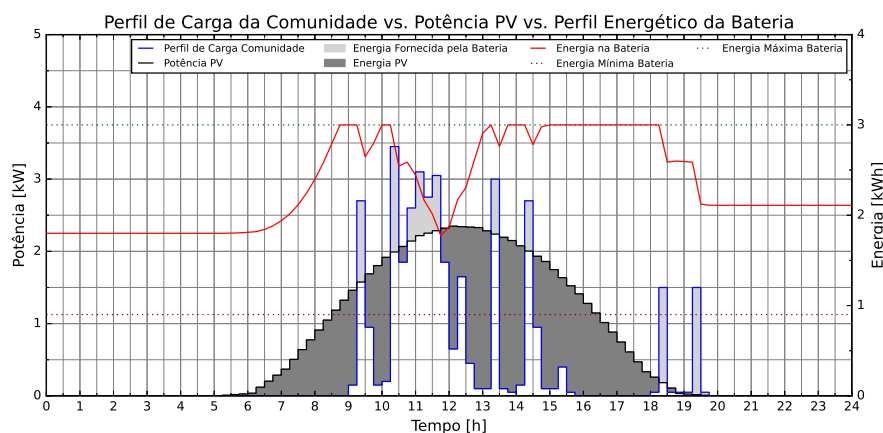


Figura IV.7: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 2 nos meses quentes ("Sim 2").

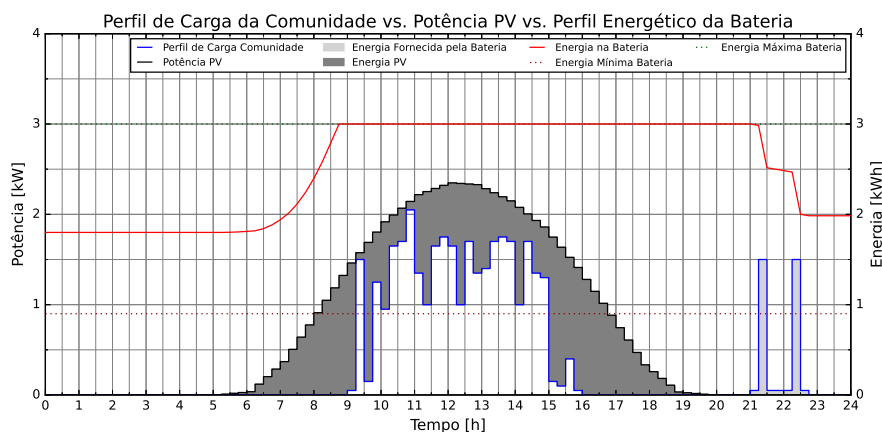


Figura IV.8: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 3 nos meses quentes ("Sim 3").

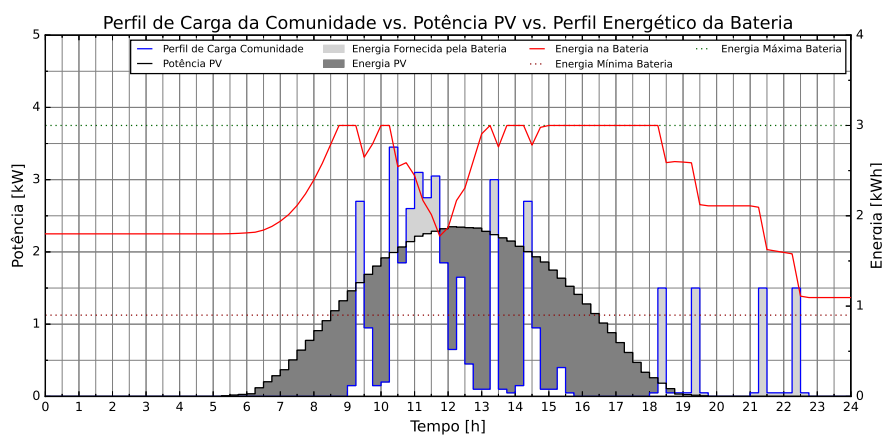


Figura IV.9: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 4 nos meses quentes ("Sim 4").

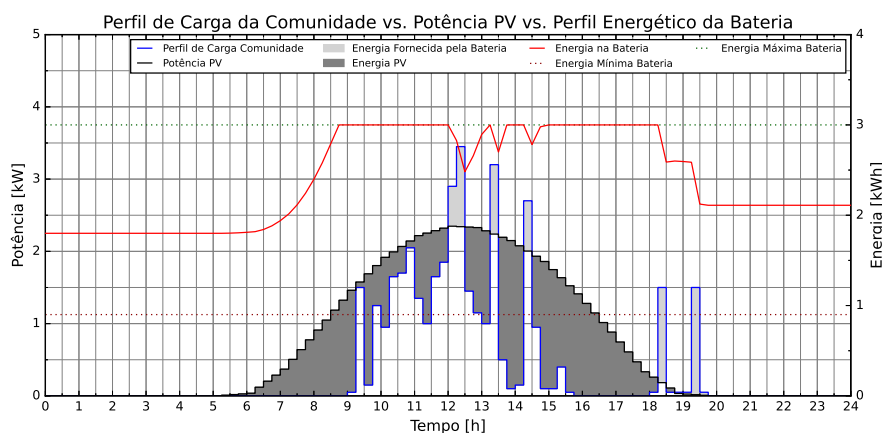


Figura IV.10: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria utilizando o cenário 5 nos meses quentes ("Sim 5").

IV.2 Anexos - Efeito da Potência PV vs. Capacidade Energética da Bateria

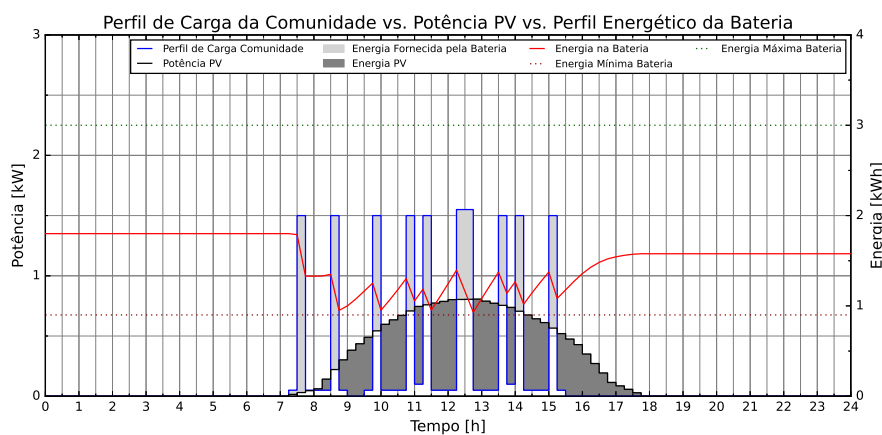


Figura IV.11: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a instalação PV de 2kW ("Sim 1").

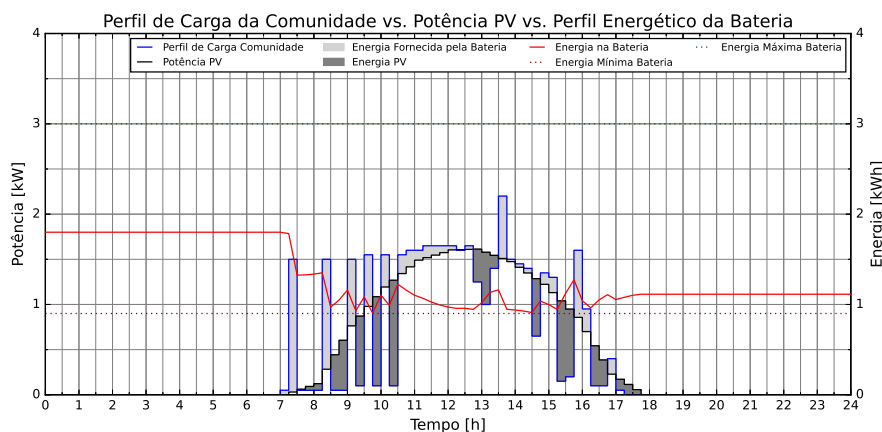


Figura IV.12: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a instalação PV de 4kW ("Sim 2").

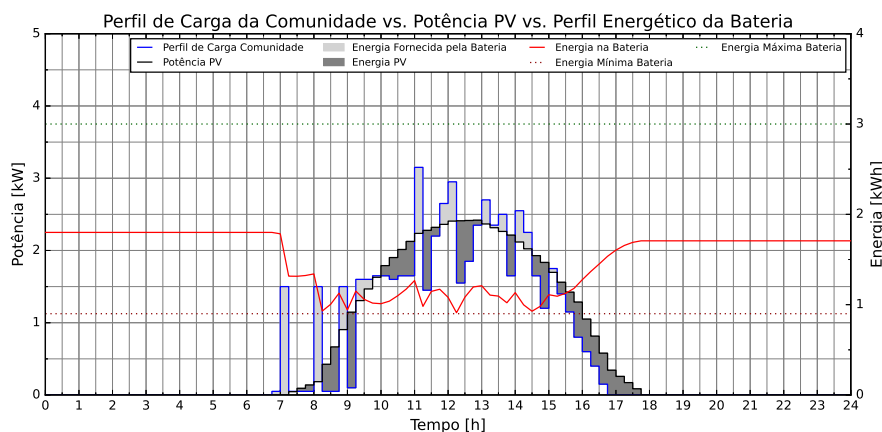


Figura IV.13: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a instalação PV de 6kW ("Sim 3").

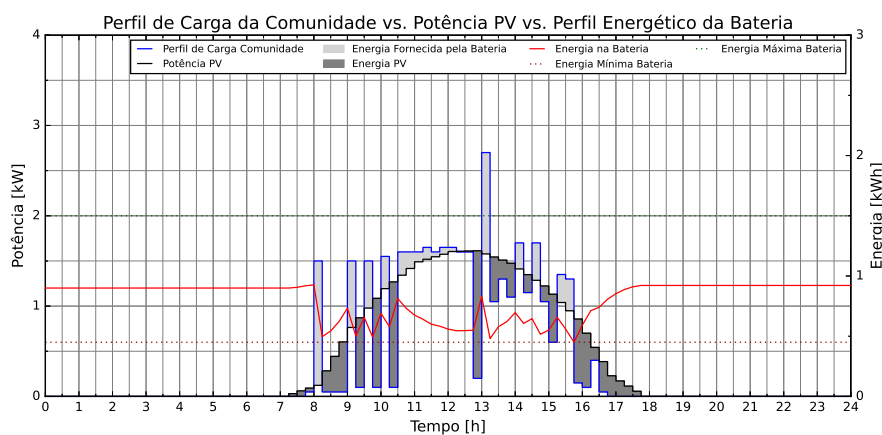


Figura IV.14: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 1,5kWh ("Sim 1").

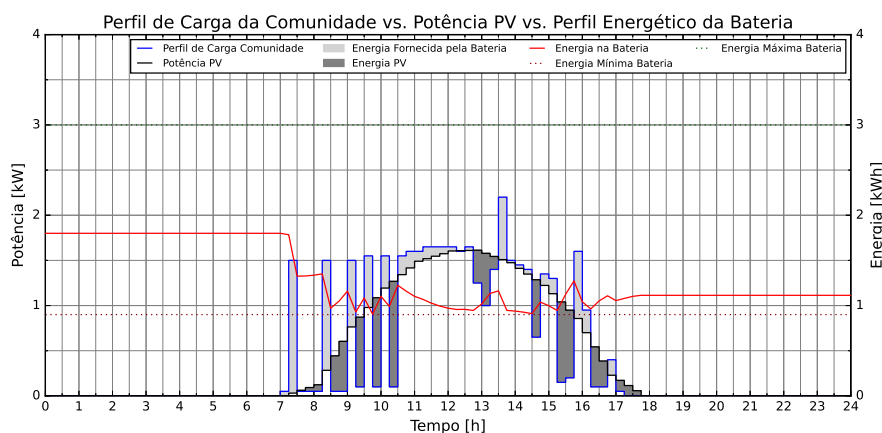


Figura IV.15: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 3kWh ("Sim 2").

IV.2. ANEXOS - EFEITO DA POTÊNCIA PV VS. CAPACIDADE ENERGÉTICA DA BATERIA

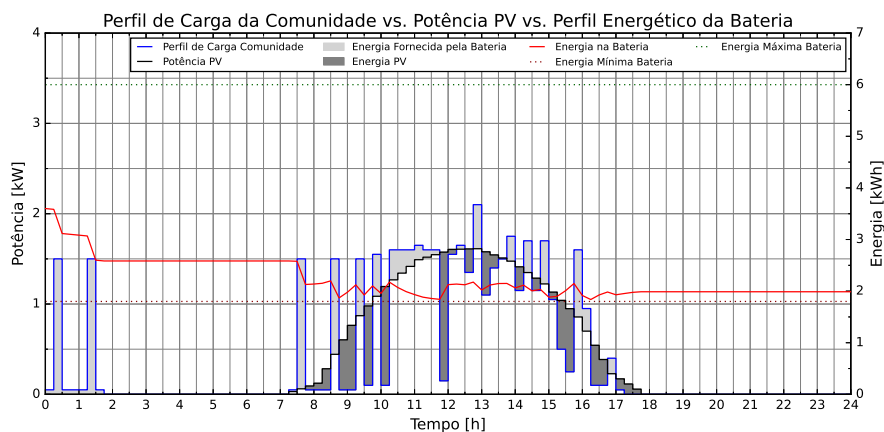


Figura IV.16: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 6kWh ("Sim 3").

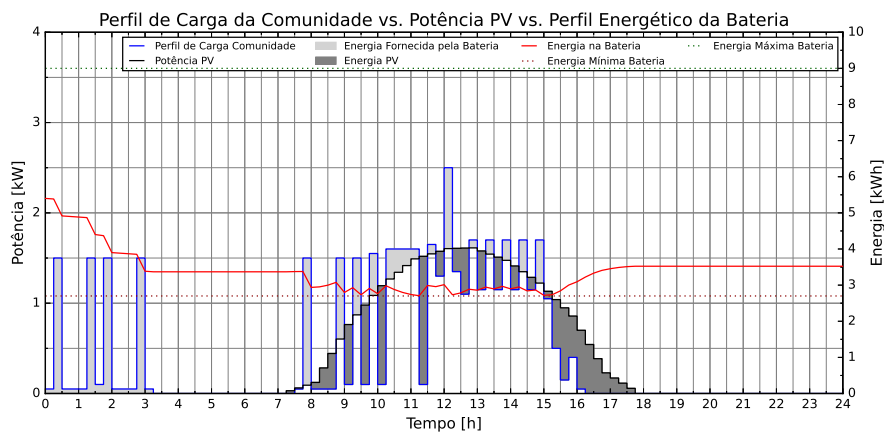


Figura IV.17: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria para a bateria de 9kWh ("Sim 4").

IV.3 Anexos - Cenário de Operação Admitindo Consumo Base Referente à Iluminação

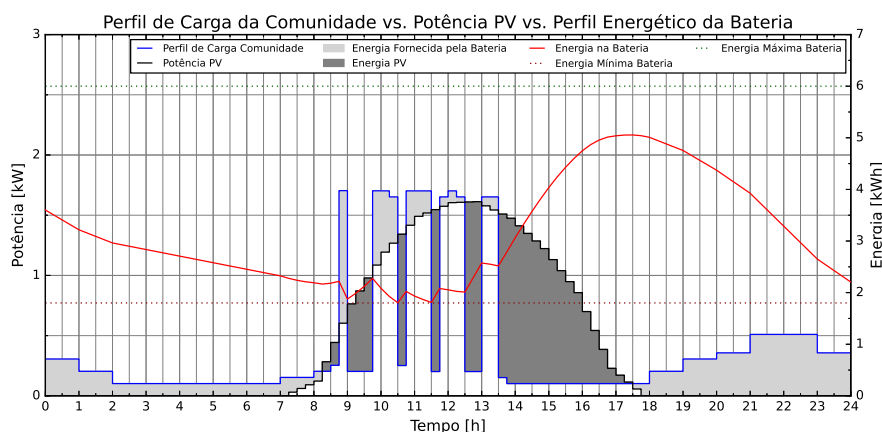


Figura IV.18: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 2").

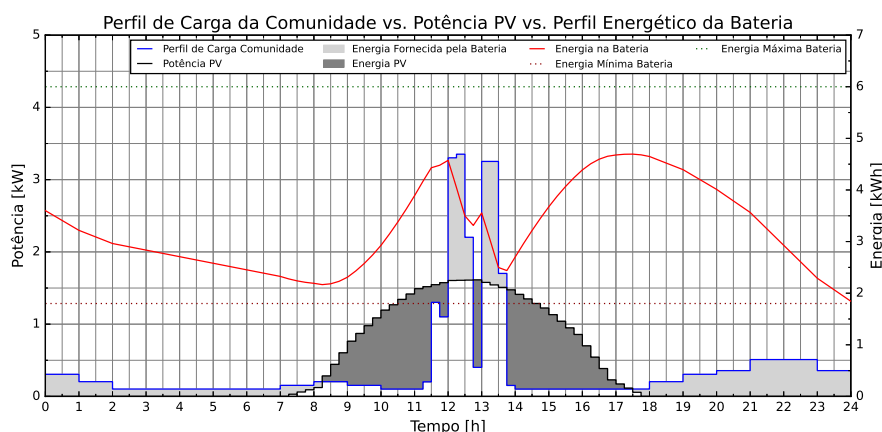


Figura IV.19: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 3").

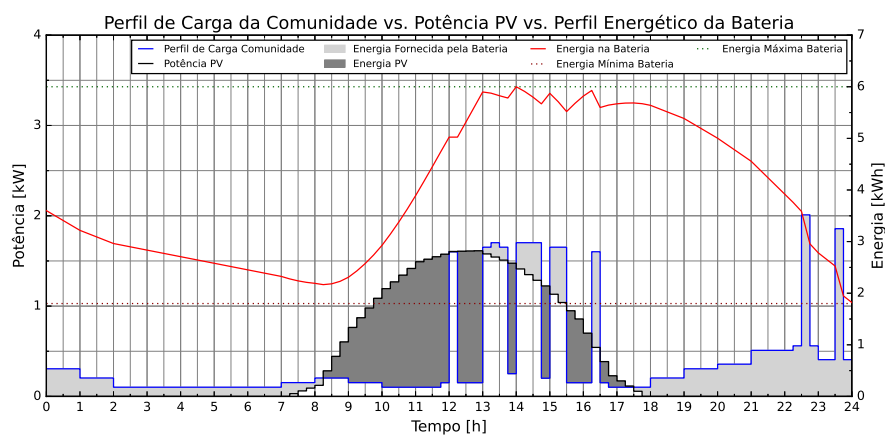


Figura IV.20: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 4").

IV.4 Anexos - Cenário Admitindo Sistema de Geração e Armazenamento de Energia em Todas as Habitações

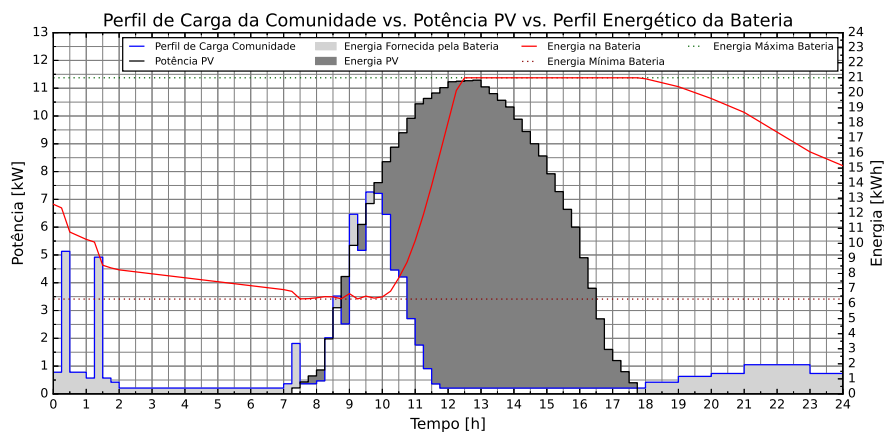


Figura IV.21: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 2").

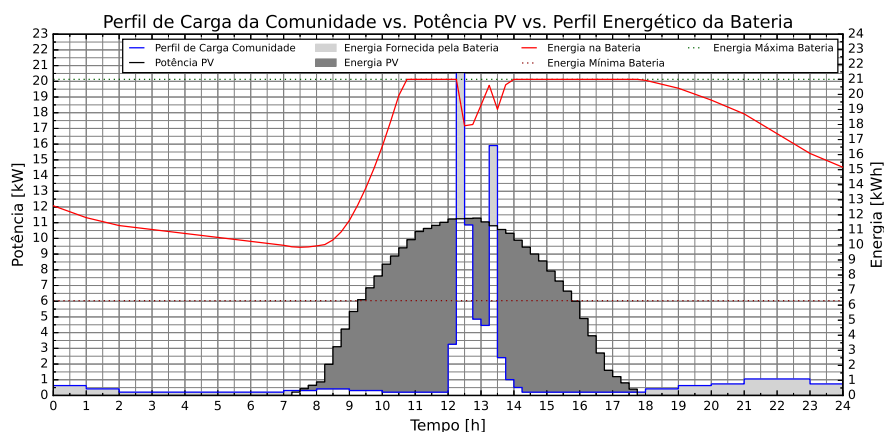


Figura IV.22: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 3").

IV.4. ANEXOS - CENÁRIO ADMITINDO SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM TODAS AS HABITAÇÕES

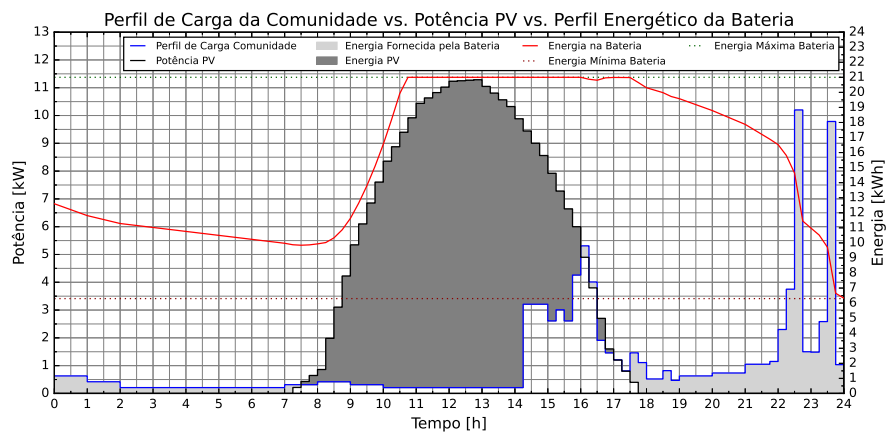


Figura IV.23: Perfil de carga da comunidade, perfil de produção PV e perfil de carga na bateria. ("Sim 4").



**ARTIGO CIENTÍFICO ELABORADO NO
ÂMBITO DA DISSERTAÇÃO**

PV Based Load Management System to Mitigate Power Grid Faults

Pedro Boto

Department of Electrical and Computer Engineering
NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA
Caparica, Portugal
p.boto@campus.fct.unl.pt

Pedro Pereira

Department of Electrical and Computer Engineering
NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA
Centre of Technology and Systems | CTS-UNINOVA
Caparica, Portugal
pmrp@fct.unl.pt

Abstract—The grid is an extremely important infrastructure of our society. Once centralized and vulnerable to the propagation of the effects of faults, is now being decentralized through Distributed Generation, Microgrids and the smart capabilities of the technologies used. Demand Response programs that include the consumer in the management process try to take advantage of the Energy Flexibility of grid users to make the grid more stable and more efficient. These initiatives have one common objective, the creation of a more resilient grid. In this paper, a methodology for simulating various scenarios of operation of a small community isolated from the main grid is presented. One PV system and one battery are considered for each of the simulated households. Only shiftable load profile units and a daily based consumption related to lighting were considered. Results suggest that the simulated community can operate under the established conditions. However, a large volume of energy had to be curtailed, indicating that a larger number and diversity of loads can be considered in further studies.

Index Terms—Distributed Generation, Microgrids, Smartgrids, Demand Response, Energy Flexibility, Resilience

I. INTRODUCTION

Extreme weather events are the lead cause for the degradation of the electric grid's state, followed by equipment failure, operation errors and accidental contacts (animals and people) and, finally, intentional attacks (physical and virtual) [1]. This degradation can have a tremendous impact on the lives of populations across the globe: in 2012 the East Coast of the United States of America (USA) was devastated by the hurricane Sandy, causing more than 8 million people to be without access to energy provided by the grid, as substations were flooded and power lines were taken down [2]; in 2018 Portugal was struck by a multitude of storms (Emma, Gisele and Leslie) and a forest fire, increasing the amount of compensations paid to consumers by the service provider by 77% [3]. As such, solutions that aim not only to prevent faults by reinforcing the infrastructure but also to restore the operation state to a satisfactory level are key to the development of a more resilient power grid [4].

In this paper, it is studied the feasibility of using self-consumption systems (PV installation plus battery) to mitigate, to a certain extent, the effects of a mains failure, which resulted in a total cut in supply of electricity to a community. There were only considered shiftable load profile appliances (Washing Machine (WM), Tumble Dryer (TD) and Dishwasher

(DW)) and a set base consumption for lighting (equal in every household). In this work, it was considered that the appliances could be controlled remotely, enabling the scheduling of their operation within the analyzed time window. The scheduling of appliances was done through algorithms implemented with the methodologies explained in this paper, and were, in its turn, controlled by a set of rules, to prevent system over usage by some users, and Energy Flexibility (EF) indices, computed to find the households that provided more flexibility to the system. The data used to calculate these indices resulted from a short, but very useful, survey and was also used to determine if the appliances were present in the analyzed dwellings.

II. LITERATURE REVIEW

A. Resilience

The concept of resilience can be applied to the many areas of knowledge (ecology, psychology, physics, engineering etc.), and means, in general: "the quality of being able to return quickly to a previous good condition after problems" [5]–[8]. The electric grid is the center piece of a modern, digitalized, and industrialized society, hence it is important to equip it with the proper means to be resilient. The grid is considered resilient if it is resistant to attacks (like the ones mentioned previously), reliable, and can be divided to assure the continuity of service to the consumers (redundancy) [9]. The grid's resilience can be represented graphically, enabling the visualization of its degradation state across an analysis period. A triangular approximation (a) can be considered: (1) the system is operating normally; (2) a catastrophic event occurs, causing the system's state to decay; (4) period of restoration; (6) normal operating state is achieved, and the process of reinforcement and adaptation is initiated [10]. The previously mentioned method can be further enhanced: (b) a period (4) representative of a degraded system is considered before the restoration period; (c) a period (5), placed between the periods of restoration and reinforcement/adaptation, representing a post restoration state [11], [13]. Various techniques to increase the resiliency level of the electric grid are studied in [1], which can be placed into one of four groups: prevention and management, monitorization and fault detection, simulation and modeling, and solutions based on Smart Grids (SG) and

Figura V.1: Artigo científico: "PV Based Load Management System to Mitigate Power Grid Faults".