

# Gestão Colaborativa em Micro-Redes Inteligentes

Rafael António Vieira da Silva

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em:

Energias Renováveis e Eficiência Energética

Trabalho realizado sob a orientação de:

Professora Doutora Ângela Paula Ferreira

Professor Doutor Paulo Leitão

**Bragança, outubro de 2014**

# Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o devido reconhecimento e agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Leitão, pelas elevadas capacidades científicas que me tentou incutir, pela disponibilidade demonstrada e pelo tempo dispensado em prol deste projeto, pelas orientações e análises críticas.

À minha orientadora, Professora Doutora Ângela Paula Ferreira, pelas capacidades científicas que me tentou incutir, pelo acompanhamento, orientação e análises críticas sempre muito frontais, mas fundamentalmente pela motivação e confiança que depositou em mim desde que começamos a trabalhar em conjunto.

À direção da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, por todos os meios disponibilizados para a concretização deste projeto.

Ao pessoal do Laboratório de Controlo, Automação e Robótica (LCAR) pela amizade e palavras de incentivo, sobretudo ao Adriano Ferreira pelo incansável auxílio, desejo-te a melhor sorte e felicidade no teu caminho rumo ao Doutoramento.

Aos meus amigos de longa data pela confiança e palavras de incentivo, pelo braço estendido quando mais precisei, e sobretudo pela amizade de sempre.

Aos amigos de Bragança pela amizade e companheirismo verdadeiro, por todos os momentos, e sobretudo por me fazerem acreditar em mim e nas minhas capacidades. Não vos esquecerei, boa sorte a todos!

À minha família que sempre se sacrificou tanto, e que me apoiou e incentivou para me poder proporcionar um futuro melhor.

À minha namorada, Rosário Franco, pelo companheirismo, amor, incentivo, carinho e apoio que sempre demonstraste. Muito daquilo que sou hoje, e do que serei na vida foi obtido graças a ti, e por ti.

# Dedicatória

*À minha mãe e aos meus irmãos  
que têm sido um pilar essencial desde sempre!  
Ao meu padrasto por tudo aquilo que me proporcionou!  
A todos aqueles que partilharam comigo,  
ao longo da minha vida, alegrias e tristezas,  
sorrisos e lágrimas, euforias e decepções!  
À minha namorada,  
por tudo aquilo que representa!  
A todos aqueles que lutam por um sonho,  
e que a cada dia encaram a vida como um desafio aliciante e bonito!*

# Resumo

O contínuo crescimento do consumo energético mundial obriga à implementação de novas e eficazes políticas energéticas, direcionadas para o desenvolvimento sustentável, no qual a eficiência energética e as fontes renováveis de energia assumem um papel de destaque. Neste contexto, surgem as redes elétricas inteligentes, *Smart Grids*, além das Micro-Redes (MR), que se apresentam como uma alternativa credível às redes convencionais de distribuição de energia.

Uma MR consiste numa rede de distribuição de baixa tensão que pode operar interligada à rede de média tensão, ou em modo isolado, e que integra pequenas unidades de geração de energia, em conjunto com dispositivos de armazenamento de energia e cargas, que se pretendem controláveis, podendo ser implementadas estratégias e mecanismos de controlo inteligentes, suportados por uma infraestrutura de comunicação.

A gestão de MR pode ser efetuada com base em entidades de *software* autónomas e cooperativas, que atuam como representantes de alguém ou de algo, os agentes. A aplicação de estratégias e mecanismos de otimização do funcionamento de uma MR pressupõe uma série de interações entre os diversos agentes autónomos, para que a energia disponível seja gerida do melhor modo possível.

Ao longo do presente trabalho foi modelada e testada uma micro-rede, supostamente explorada nos modos de funcionamento normal e crítico, com duas estratégias de operação: uma básica e outra inteligente, com otimização e gestão dos processos da MR (deslastre, escalonamento e priorização de cargas, além de previsão da produção e de gestão do carregamento das baterias).

Para emular o comportamento da MR nas condições descritas, foi utilizada uma plataforma de modelação e simulação baseada em agentes, o Repast 2.1. Dos resultados obtidos às simulações efetuadas, constata-se que a dotação de inteligência no controlo da MR permite obter consideráveis reduções no consumo de energia e nos encargos associados (cerca de 17% de redução nos encargos), além de assegurar o fornecimento das cargas críticas do melhor modo possível, quando a MR opera isoladamente, incrementando a sustentabilidade energética desta.

**Palavras-Chave:** Redes Elétricas Inteligentes, Micro-redes, Agentes, Previsão, Repast 2.1

# Abstract

The continuous growth of the world energy consumption requires the implementation of new and effective energy policies, aimed to sustainable development, where the energy efficiency and the renewable energy sources play a crucial role. In this context emerge the Smart Grids and the Micro-Grids (MR), presenting themselves as a credible alternative to the conventional distribution power grids.

A MR consists of a low-voltage distribution grid which can operate interconnected to the medium-voltage grid, or in island mode, integrating small power generation units, in combination with energy storage devices and loads, which are intended to be controllable, in which could be implemented strategies and mechanisms for intelligent control, supported by a communication infrastructure.

The management of MR can be carried out based on autonomous and cooperative entities, acting as representatives of someone or something, the agents. The utilization of strategies and mechanisms for optimizing the operation of a MR involves a series of interactions between the different autonomous agents, to manage the available energy in the best possible way.

Throughout this work, it had been modulated and tested a micro-grid, supposedly explored in normal and critical operating modes, including two strategies: a basic and other intelligent, contemplating optimization and management proceedings of the MR (load shedding, load dispatch by prioritization assignment, in addition to production forecasting and also battery charging management.

To emulate the behavior of the MR in the described conditions, a modeling and agent-based simulation framework was used, the Repast 2.1. The results obtained for the simulations performed, indicate that the provision of intelligence in the MR control enables significant energy consumption and associated costs reductions (about 17% reduction in costs), besides ensuring the supply of critical loads in the best possible way, when the MR operates in island mode, increasing their sustainability.

**Keywords:** Smart Grids, Micro-grids, Agents, Forecasting, Repast 2.1.

## Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Estrutura do Documento .....	3
2	Tendências e Desafios nos Sistemas Elétricos de Energia.....	5
2.1	Arquitetura dos Sistemas Elétricos de Energia.....	5
2.2	Micro-Redes.....	8
2.2.1	Sistemas Ligados à Rede versus Sistemas Isolados .....	9
2.2.2	Distribuição em Corrente Alternada <i>versus</i> Corrente Contínua.....	11
2.2.3	Desafios e Desenvolvimentos Futuros .....	13
2.3	Smart Grids .....	14
2.3.1	Conservation Voltage Reduction.....	16
2.3.2	Projetos de Smart Grids.....	18
2.4	Sistemas Multiagentes para Gestão e Otimização em Micro-Redes .....	21
2.4.1	Conceitos Básicos de Sistemas Multiagentes.....	22
2.4.2	Sistemas Multiagente nas <i>Smart Grids</i> .....	24
2.4.3	Projetos de Sistemas Multiagente nas <i>Smart Grids</i> .....	26
2.4.3.1	CRISP: Distributed Intelligence in Critical Infrastructure for Sustainable Power.....	26
2.4.3.2	Multi-Agent Smart Grid Management System .....	27
2.4.3.3	Intelligent Distributed Autonomus Power Systems.....	28
2.4.3.4	EcoGrid.....	29
2.4.3.5	More Microgrids .....	29
2.4.3.6	GridAgents.....	29
2.4.3.7	MASGrid.....	29
2.5	Síntese.....	31
3	Arquitetura do Sistema Multiagente .....	32
3.1	Identificação dos Agentes e dos seus Atributos.....	32

3.1.1	Agentes Produtores.....	32
3.1.2	Agentes Consumidores.....	34
3.1.3	Agentes de Armazenamento de Energia.....	35
3.2	Estratégias e Mecanismos de Cooperação.....	38
3.2.1	Estratégia Básica para o Modo Normal.....	38
3.2.1.1	Solicitação do Fornecimento de Energia.....	39
3.2.1.2	Alocação da Energia Excedente.....	41
3.2.2	Estratégia Inteligente para o Modo Normal.....	42
3.2.3	Estratégia Básica para o Modo Crítico.....	44
3.2.4	Estratégia Inteligente para o Modo Crítico.....	45
3.2.4.1	Estabelecimento de Cargas Críticas.....	47
3.2.4.2	Deslastre de Cargas.....	48
3.2.4.3	Escalonamento de Cargas.....	50
3.3	Síntese.....	50
4	Caso de Estudo.....	52
4.1	Arquitetura da Micro-Rede em Estudo.....	52
4.1.1	Diagramas de Cargas.....	53
4.1.2	Unidades de Microgeração.....	55
4.1.3	Unidades de Armazenamento.....	57
4.2	Síntese.....	64
5	Implementação e Validação do Modelo Baseado em Agentes.....	66
5.1	Implementação em Repast.....	66
5.1.1	Interação Base do Sistema.....	69
5.1.2	Gestão e Otimização da Micro-Rede no Modo Normal.....	69
5.1.3	Funcionamento Isolado/Crítico.....	73
5.1.3.1	Previsão da Produção e do Consumo.....	75
5.1.3.2	Priorização de Cargas.....	76
5.1.3.3	Deslastre de Cargas.....	76
5.1.3.4	Escalonamento de Cargas.....	77

5.1.3.5	Modelo para <i>Forecasting</i> .....	78
5.2	Análise de Resultados .....	78
5.2.1	Estratégia Básica no Modo Normal.....	79
5.2.2	Estratégia Básica no Modo Crítico/Emergência.....	82
5.2.3	Estratégia Inteligente no Modo Normal .....	83
5.2.4	Estratégia Inteligente no Modo Crítico/Emergência .....	85
5.2.5	Análise Comparativa entre as Estratégias Testadas no Modo Normal.....	87
5.2.6	Análise Comparativa entre as Estratégias Testadas no Modo Crítico/Emergência.....	87
5.2.7	Alocação dos Consumos em Horário Diferente no Modo Normal .....	88
5.2.8	Inclusão da Técnica de CVR nos Modos de Funcionamento .....	90
5.2.9	<i>Forecasting</i> no Modo Crítico .....	92
5.3	Síntese .....	96
6	Conclusões .....	98
6.1	Conclusões Gerais.....	98
6.2	Desenvolvimentos Futuros.....	100
7	Bibliografia.....	101
8	Anexos.....	105
	Anexo A : Sistemas de Armazenamento de Energia .....	105

## Índice de Figuras

Figura 2.1- Organização convencional dos Sistemas Elétricos de Energia.....	6
Figura 2.2-Organização atual dos Sistemas Elétricos de Energia .....	6
Figura 2.3- Futuro das Micro-redes.....	8
Figura 2.4- Configuração básica de uma Micro-rede com possibilidade de ligação à rede. ....	11
Figura 2.5-a) Configuração típica da geração distribuída em LVDC. b) Configuração típica da geração distribuída em LVAC. ....	12
Figura 2.6- Modelo conceitual do NIST para as SG. ....	15
Figura 2.7-Regulação de tensão baseada no CVR.....	18
Figura 2.8- Projetos de Smart Grids até ao ano de 2012: a) nos Estados Unidos; b) fora dos Estados Unidos.....	19
Figura 2.9- Arquitetura técnica multinível do InovGrid.....	21
Figura 2.10- Representação de um agente típico.....	23
Figura 2.11- Modelação de uma <i>Smart Grid</i> com base em agentes.....	25
Figura 2.12- Arquitetura do <i>Multi-Agent Smart Grid Management System</i> .....	27
Figura 2.13- Arquitetura do IDAPS. ....	28
Figura 2.14- Tecnologia SMA no âmbito do projeto MASGrid. ....	30
Figura 3.1- Aquisição e processamento de dados meteorológicos para previsão da produção, por parte dos agentes produtores. ....	33
Figura 3.2- Algoritmo de gestão da procura de energia, por parte dos agentes consumidores. ....	35
Figura 3.3- Algoritmo do processo de carga das baterias, por parte dos agentes de armazenamento. ....	36
Figura 3.4- Algoritmo do processo de descarga das baterias, por parte dos agentes de armazenamento. ....	37
Figura 3.5- Interação entre os agentes consumidores e os agentes restantes, para supressão das necessidades e fornecimento de energia. ....	39
Figura 3.6- Interação entre os agentes produtores e os agentes armazenadores, para alocação da energia proveniente das unidades de geração de energia controladas pelos agentes produtores. ....	41

Figura 3.7 -Mecanismo simplificado de carga das baterias em período económico, implementado nos agentes de armazenamento de energia. ....	43
Figura 3.8- Conjuntos de comportamentos e interações desencadeados nos agentes consumidores, quando é detetada uma falha na ligação à rede. ....	45
Figura 3.9- Algoritmo da sequência de ações no modo de emergência, por parte dos agentes consumidores. ....	46
Figura 3.10- Algoritmo do processo de deslastre de cargas, implementado nos agentes consumidores. ....	49
Figura 3.11- Mecanismo de escalonamento de cargas, embebido nos agentes consumidores. ....	50
Figura 4.1- Micro-Rede de estudo. ....	53
Figura 4.2- Diagrama de cargas discriminativo da habitação 1. ....	54
Figura 4.3- Diagrama de cargas discriminativo da habitação 2. ....	54
Figura 4.4- Diagrama de cargas discriminativo da habitação 3. ....	54
Figura 4.5- Curva de produção típica de um painel fotovoltaico em Bragança. ....	55
Figura 4.6- Curva de produção de um aerogerador, e velocidade do vento em Bragança. ....	56
Figura 4.7- Curva de potência do aerogerador horizontal de 3 pás, com potência nominal de 3 kW. ....	56
Figura 4.8- Variação da capacidade de bateria de chumbo-ácido, com o tempo de descarga. ....	58
Figura 4.9- Tempo de descarga de uma bateria de chumbo-ácido, em função da corrente de descarga. ....	58
Figura 4.10- Tensão de uma célula e de uma bateria de ácido-chumbo durante a etapa de descarga. ....	59
Figura 4.11- Tensão numa célula e na bateria de ácido-chumbo durante a etapa de carga. ....	59
Figura 4.12- Tempo de carga e descarga de uma bateria de ácido-chumbo, para uma corrente constante de carga e descarga, de 45 A. ....	61
Figura 4.13- Energia na carga, e energia útil, numa bateria de ácido-chumbo, em função do estado de carga. ....	62

Figura 4.14- Características de carga da corrente, potência e intervalo de tempo, para o Veículo Elétrico.....	63
Figura 5.1- <i>Layout</i> da interface <i>UserObserver</i> .....	68
Figura 5.2- Excerto de código para a realização da solicitação de carga antecipada das baterias.....	71
Figura 5.3- Excerto de código para a realização da solicitação de carga do EV por parte do consumidor 3. ....	72
Figura 5.4- Excerto de código da função <i>Calculation ()</i> do <i>AuxiliarAgent</i> .....	74
Figura 5.5- Excerto de código para o cálculo da previsão do consumo para a habitação 3 usando médias móveis. ....	75
Figura 5.6- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, no modo normal de operação. ....	79
Figura 5.7- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Básica, no modo normal de operação.....	81
Figura 5.8- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, em modo crítico/emergência.....	82
Figura 5.9- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Básica, em modo crítico/emergência.....	83
Figura 5.10- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Inteligente, no modo normal de operação. ....	84
Figura 5.11- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Inteligente, em modo crítico/emergência. ....	86
Figura 5.12- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Inteligente, em modo crítico/emergência. ....	86
Figura 5.13- Comparação do total de consumo e da energia armazenada, para as Estratégias Básica e Inteligente, no modo crítico/emergência. ....	88
Figura 5.14- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, no modo normal de operação, com deslocamento de algum consumo para o período fora de vazio. ....	89

Figura 5.15- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, no modo normal de operação, com deslocamento de algum consumo para o período de vazio.....	89
Figura 5.16- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Inteligente com a inclusão de <i>forecasting</i> para a produção, em modo crítico/emergência. ....	93
Figura 5.17- Curva potência adotada, e potência prevista para unidade a fotovoltaica (PV) da MR e para o aerogerador (WT), num dia típico de Verão. ....	94
Figura 5.18- Curva de potência adotada, e potência prevista para a unidade fotovoltaica da MR, num dia típico de Inverno com influência da nebulosidade. ....	94
Figura 5.19- Variação da energia disponibilizada para os agentes consumidores num dia típico de Inverno: a) sem previsão meteorológica; b) com previsão meteorológica. ....	95

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Comparação entre redes convencionais e as redes elétricas inteligentes ....	14
Tabela 3.1- Modos de operação definidos para a Micro-Rede.....	38
Tabela 3.2- Esquemas de deslastre de cargas críticas do sistema. ....	47
Tabela 4.1- Limite máximo da potência de carga e descarga em função do SOC.....	60
Tabela 4.2- Características do EV.....	62
Tabela 4.3- Variação da energia de carga e da energia útil com o estado de carga da bateria do Veículo Elétrico.....	64
Tabela 5.1- Diversos agentes intervenientes na gestão da MR.....	67
Tabela 5.2- Sequência na solicitação de fornecimento de energia por parte dos consumidores.....	70
Tabela 5.3- Conjunto de cargas em determinado período do dia, aquando do funcionamento em rede isolada.....	76
Tabela 5.4- Esquemas de deslastre de cargas do sistema.....	77
Tabela 5.5- Resultados da simulação da Estratégia Básica, no modo normal de operação, para os agentes consumidores, para o período de 1 ano.....	80
Tabela 5.6- Resultados da simulação da Estratégia Básica, no modo normal de operação, para os agentes Produtores, para o período de 1 ano.....	80
Tabela 5.7- Resultados da simulação da Estratégia Básica no modo normal, para os agentes de armazenamento, para o período de 1 ano.....	81
Tabela 5.8- Resultados da simulação da Estratégia Inteligente, no modo normal de operação, para os agentes consumidores, para o período de 1 ano.....	83
Tabela 5.9- Resultados da simulação da Estratégia Inteligente, no modo normal de operação, para os agentes Produtores, para o período de 1 ano.....	84
Tabela 5.10- Resultados da simulação da Estratégia Inteligente, no modo normal de operação, para os agentes armazenadores de energia, para o período de 1 ano.....	85
Tabela 5.11- Comparação dos resultados obtidos para as Estratégias Básica e Inteligente no modo normal.....	87
Tabela 5.12- Resultados dos dois conjuntos adicionais de simulações, no modo normal de operação, para os agentes consumidores, para o período de 1 ano.....	90
Tabela 5.13- Comparação das Estratégias de funcionamento definidas, com a inclusão da técnica de CVR na Estratégia Inteligente, para o modo normal.....	91

Tabela 5.14- Comparação do consumo nas duas estratégias do modo crítico, com a inclusão da técnica de CVR na Estratégia Inteligente.....	92
--	----

# Abreviaturas

AC	Corrente Alternada ( <i>Alternate Current</i> )
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CVR	<i>Conservation Voltage Reduction</i>
DC	Corrente Contínua ( <i>Direct Current</i> )
DOD	Capacidade de Descarga ( <i>Depth of Discharge</i> )
EV	Veículo Elétrico ( <i>Electrical Vehicle</i> )
GD	Geração Distribuída
IEA	Agência Internacional de Energia ( <i>International Energy Agency</i> )
IEEE	<i>Institute of Eletrical and Eletronics Enginners</i>
LVAC	<i>Low Voltage Alternate Current</i>
LVDC	<i>Low Voltage Direct Current</i>
MAT	Muito Alta Tensão
MG	Microgeração
MR	Micro-Rede
MSBA	Modelação e Simulação Baseada em Agentes
MT	Média Tensão
Repast	<i>Recursive Porous Agent Simulation Toolkit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SG	<i>Smart Grids</i>
SMA	Sistema Multiagente
SOC	Estado de Carga ( <i>State of Charge</i> )
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação

# Símbolos

$A$	Área varrida pelas pás do aerogerador [ $\text{m}^2$ ]
$C/ C_{bat}$	Capacidade da bateria [Ah]
$C_N$	Capacidade nominal da bateria [Ah]
$DOD_{m\acute{a}x}$	Profundidade máxíma de descarga da bateria [%]
$E$	Energia [Wh]
$E_c$	Energia total na bateria na carga [Wh]
$E_{carga}$	Energia de carga da bateria num dado intervalo [Wh]
$E_{Cou}$	Eficiência de Coulomb [%]
$E_D$	Energia total na bateria na descarga [Wh]
$E_{di\acute{a}rio}$	Consumo diário de energia [Wh]
$E_V$	Eficiência da Tensão [%]
$H$	Período nominal de descarga da bateria [horas]
$I$	Corrente atual de descarga da bateria [A]
$i_{bat}$	Corrente atual da bateria [A]
$I_C$	Corrente da bateria na carga [A]
$IC$	Intervalo de carga da bateria [horas]
$I_D$	Corrente da bateria na descarga [A]
$ID$	Intervalo de descarga da bateria [horas]
$I_{m\acute{a}x}$	Corrente máxíma da bateria no intervalo de carga/descarga [A]
$K$	Número de Peukert
$P_{carga}$	Potência de carga da bateria num dado intervalo [W]
$P_{des}$	Potência atual de descarga da bateria [W]
$P_{m\acute{a}x}$	Potência máxíma de carga/descarga da bateria [W]
$P_{m\acute{e}d}$	Potência média de descarga da bateria [W]
$P_t$	Potência debitada pelo aerogerador [W]
$T$	Período da <i>Absorption Charge</i> [horas]
$t$	Período de descarga da bateria [horas]
$T_C$	Tempo de carga da bateria [horas]
$T_D$	Tempo de descarga da bateria [horas]
$v$	Velocidade do vento [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$v_{bat}$	Tensão atual da bateria [V]
$V_C$	Tensão da bateria na carga [V]
$V_D$	Tensão da bateria na descarga [V]
$V_{méd}$	Tensão média da bateria no intervalo de carga/descarga [V]
$V_{min}$	Tensão final de descarga da bateria [V]
$V_{nom}$	Tensão nominal da bateria [V]
$V_{Sistema}$	Tensão DC da Micro-Rede [V]
$\varepsilon_P$	Poupança de energia ativa [%]
$\varepsilon_V$	Redução de tensão [%]
$\rho_{ar}$	Massa volúmica do ar [Kg.m <sup>-3</sup> ]
$\eta_{bat}$	Eficiência da bateria [%]
$\eta_{inversor,cabos}$	Rendimento global do sistema [%]
$\eta_t$	Rendimento do aerogerador [%]



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

A partir da crise petrolífera da década de 70 do século passado, a maioria dos países ocidentais iniciou uma viragem nas suas políticas energéticas, tendo em conta o aumento gradativo do controle sobre a produção de petróleo e *deficit* de oferta, assim como as questões de índole ambiental que começaram a surgir, em função dos crescentes níveis de poluição verificados. Neste contexto, não basta mudar as fontes de produção de energia convencionais normalmente utilizadas (carvão, petróleo, gás natural), para fontes renováveis, é preciso também utilizar de uma forma racional a energia que é produzida, surgindo assim o conceito de eficiência energética, que se relaciona diretamente com questões como a sustentabilidade e a racionalização da energia.

A integração de pequenas fontes de produção dispersa levou a alterações na tradicional arquitetura das redes de energia, criando uma necessidade de adaptação das redes, para o novo cenário de descentralização e sustentabilidade. As redes inteligentes proporcionam uma integração de unidades de geração distribuída proporcionando um modo de funcionamento mais sustentável, e um maior controlo sobre a rede, elevando deste modo os níveis de qualidade de serviço e de eficiência energética. Também neste âmbito surgem as Micro-Redes, MR, que se assumem normalmente como pequenas redes de baixa tensão, onde coexistem pequenos e médios consumidores, além de sistemas distribuídos de microgeração e, frequentemente, unidades de armazenamento de energia.

A alteração do paradigma energético é um fato incomensurável, assistindo-se ao emergir de modernas tecnologias de controlo dos fluxos de energia, e também de informação, contemplando várias pequenas unidades distribuídas de geração de energia. Esta revolução, não só ao nível da arquitetura das redes de energia, mas também da possibilidade de bidirecionalidade dos fluxos de energia e informação levantam questões pertinentes, que merecem especial atenção.

A otimização dos processos de controlo e de gestão das micro-redes pode trazer benefícios efetivos à operação do sistema, através do recurso a um conjunto de estratégias e mecanismos, que visem gerir do modo mais eficiente a energia disponível, em função do modo de operação da MR.

Uma MR pode operar em dois modos distintos:

- Normal, quando se encontra ligada à rede de média tensão, a montante;
- Isolada, quando projetada para alimentar zonas remotas ou em modo crítico (ou de emergência) em caso de colapso parcial ou generalizado da rede de MT.

A gestão pretendida para as micro-redes, pode ser efetuada, entre outras, com base em entidades de *software* autónomas e cooperativas, que atuam como representantes de alguém ou de algo, os agentes. Nesta abordagem, a aplicação das estratégias e mecanismos de otimização do funcionamento de uma MR pressupõe uma série de interação entre os diversos agentes autónomos, para gerir da melhor forma possível a energia disponível, surgindo o conceito de sistema multiagente.

A implementação de um sistema multiagente para gestão de processos de uma micro-rede requer a utilização de uma plataforma adequada para esse efeito, como é o caso do Repast 2.1, um ambiente de modelação e simulação baseado em agentes, que comporta uma série de bibliotecas especialmente escritas para esse efeito, utilizando uma conjunto de linguagens de programação, incluindo *Java* e *C#*.

O ponto fulcral do trabalho efetuado assenta na implementação de estratégias de gestão e otimização do funcionamento de uma micro-rede, para os dois modos de funcionamento estipulados para a MR (normal ou crítico), de forma a apurarem-se os possíveis benefícios associados à dotação de inteligência nos sistemas de controlo das MR.

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo delineado no início da realização deste trabalho, consistia no desenvolvimento de estratégias inteligentes para otimizar o processo de gestão em MR, através da criação de mecanismos adequados para o controlo de cargas. No decorrer do trabalho foram surgindo outros objetivos interligados ao objetivo principal, nomeadamente:

- Compreensão da temática das redes elétricas inteligentes e das MR, com todas as suas funções típicas e tecnologias associadas;

- Determinação de um modelo de gestão das baterias, por forma a utilizar algoritmos para os processos de carga e descarga, que vão de encontro às limitações inerentes a estes processos;
- Implementação de *forecasting* e avaliação do seu potencial, enquanto mecanismo de determinação dos níveis expetáveis de produção de energia, e comparativamente à utilização de registos históricos para previsão da produção;
- Verificação da eficiência económico-energética proporcionada pela dotação de inteligência no processo de gestão das MR, em modo normal;
- Analisar a sustentabilidade proporcionada à MR, pelas estratégias e mecanismos desenvolvidos, aquando da operação da MR, em modo crítico.

### **1.3 Estrutura do Documento**

Além do capítulo inicial onde é introduzido o tema de análise da dissertação, bem como os objetivos subjacentes à sua realização, é efetuada a estruturação do relatório. O presente trabalho é composto por mais cinco capítulos, por um tópico final onde é apresentada na bibliografia a documentação seguida, e que serviu como base para a construção do presente documento, e por um anexo onde são explorados os sistemas de armazenamento de energia, sobretudo as baterias.

No segundo capítulo são apresentadas as tendências e desafios dos sistemas elétricos de energia, sendo explicitada a pragmática que induziu à alteração na arquitetura das redes elétricas, bem como as condicionantes que levaram ao surgimento das MR. As MR começam por ser caracterizadas, apresentando-se os benefícios associados à sua criação e à sua utilização em locais isolados, discutindo-se também a sua aplicação a sistemas de corrente alternada e de corrente contínua, além dos desafios e entraves que se colocam à sua proliferação. Um dos elementos constituintes mais importantes das micro-redes são os seus sistemas de armazenamento de energia, que são devidamente introduzidos e caracterizados no Anexo A. A inclusão de várias micro-redes nos sistemas elétricos de energia é prevista segundo a temática das Smart Grids, subtópico apresentado ainda no capítulo 2. Na parte final do capítulo são introduzidos os sistemas multiagente, que permitem a dotação de inteligência, além do controlo dos diversos elementos constituintes das redes elétricas inteligentes.

O capítulo 3 apresenta a arquitetura adotada para o sistema multiagente que permitirá controlar o funcionamento de uma qualquer rede de estudo, onde são apresentados os diversos tipos de agentes utilizados (explicitando-se os seus

comportamentos e atributos), das estratégias (básica e inteligente) e mecanismos de operação passíveis de serem implementados (priorização, deslastre, escalonamento, *forecasting*, etc.).

No capítulo 4 é reportada a arquitetura da MR que serviu de base para implementação das estratégias e mecanismos adotados, que foram apresentados no capítulo 3, caracterizando-se e apresentando-se o comportamento dos diversos elementos constituintes da rede de estudo, mais precisamente os perfis de consumo dos utilizadores, a produção registada nas unidades de microgeração, bem como o comportamento e características dos elementos fixos de armazenamento (baterias) e do veículo elétrico existente.

O capítulo 5 é dedicado à implementação da micro-rede de estudo na plataforma de modelação e simulação baseada em agentes escolhida, mais precisamente no Repast 2.1. Neste ponto apresenta-se a arquitetura do modelo criado na plataforma seleccionada, consoante as necessidades e condicionantes do caso de estudo, tendo em consideração as estratégias e mecanismos com que se pretendeu dotar o sistema criado. Ainda no capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos para as diversas conjugações entre as estratégias de funcionamento, e os mecanismos de gestão e otimização considerados em cada caso, consoante o nível de inteligência que se pretende implementar, apresentando-se as devidas conclusões relativamente à redução no consumo de energia e conseqüente benefício económico, associados à utilização de estratégias e mecanismos mais refinados de controlo e otimização dos elementos constituintes da MR.

No último capítulo são apresentadas e discutidas as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido, apontando-se possíveis desenvolvimentos futuros com base na dissertação aqui apresentada.

## 2 Tendências e Desafios nos Sistemas Elétricos de Energia

Durante vários anos assistiu-se à expansão das redes elétricas, sobretudo em zonas mais desenvolvidas e industrializadas, onde a eletricidade deixou de ser considerado um bem precioso, passando a assumir-se como uma necessidade fundamental. Contudo, as crescentes inovações tecnológicas que aumentaram a dependência energética da sociedade, a necessária redução da dependência dos combustíveis fósseis e as questões de índole ambiental, conduziram à necessidade de apostar na geração distribuída de energia, iniciando-se uma mudança do paradigma energético e da arquitetura das redes elétricas, surgindo assim o conceito micro-rede e de rede elétrica inteligente.

Ao longo deste capítulo serão explorados, ainda que não exaustivamente, os aspetos conceptuais afins às micro-redes, MR, e às redes elétricas inteligentes, *Smart Grids*, nomeadamente o processo e condicionantes da transição das redes convencionais para as redes atuais dotadas de inteligência, além das principais características e benefícios inerentes a cada um destes conceitos.

A introdução de inteligência nas redes elétricas, que constitui um passo fulcral na transição para a arquitetura moderna e flexível das redes, pode ser intermediada por entidades de *software*. Assim, na secção 2.4 é apresentada uma solução que permite a gestão e otimização baseada em multiagentes, que é a ferramenta adotada no presente trabalho, e que de modo cooperativo permite controlar, supervisionar, e manipular as novas redes de energia, bem como os seus intervenientes.

### 2.1 Arquitetura dos Sistemas Elétricos de Energia

Durante várias décadas, a produção de eletricidade foi assegurada por grandes centrais termoelétricas, a gás e carvão, hidroelétricas e, num contexto mundial, também por centrais nucleares. Esta produção centralizada, e deslocalizada dos centros de consumo conduziu à criação de redes de transporte de energia com uma grande extensão, em Alta Tensão (AT) e Muito Alta Tensão (MAT), numa arquitetura emalhada com fluxos de potência unidirecionais, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Atualmente assiste-se a uma alteração do paradigma energético, em grande parte potenciada pela massificação das tecnologias de conversão de energia baseadas em fontes renováveis e também pela proliferação de sistemas de conversão eletrónica de energia que permitem a exploração destes sistemas de forma eficiente.

O crescente aumento das emissões de gases de efeito de estufa, e a conjuntura socioeconómica atual “obrigam” à remodelação do paradigma energético e constituem um grande foco de ação dos países mais industrializados, onde se incluem os membros da União Europeia, que criou uma série de metas ambiciosas para curto-médio prazo [1].

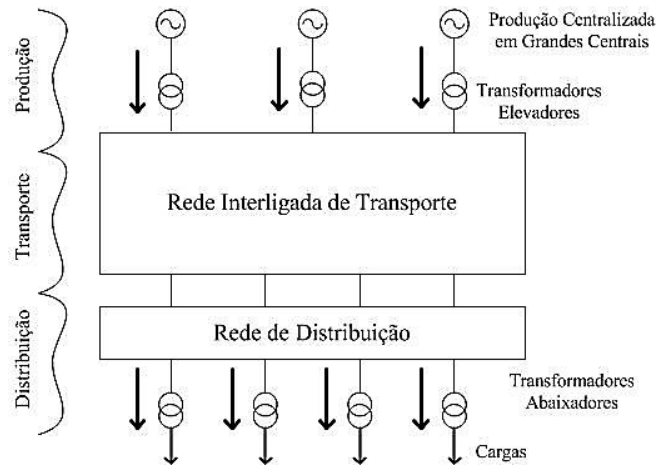


Figura 2.1- Organização convencional dos Sistemas Eléctricos de Energia. (Adaptado de [2])

No contexto apresentado, emerge a chamada Geração Distribuída (GD), baseada no aproveitamento local de fontes renováveis como o sol, o vento ou a biomassa (com base em tecnologias apropriadas), ou com recurso a pequenos sistemas convencionais a gás ou *diesel*. A proliferação dos pequenos sistemas locais de produção de energia cria a necessidade de alteração da arquitetura das redes elétricas de energia, num cenário de produção dispersa (Figura 2.2), em que os fluxos de energia podem ser bidirecionais. Nesta nova configuração, as unidades de produção de eletricidade encontram-se diretamente ligadas à rede de Baixa Tensão (BT) ou de Média Tensão (MT).

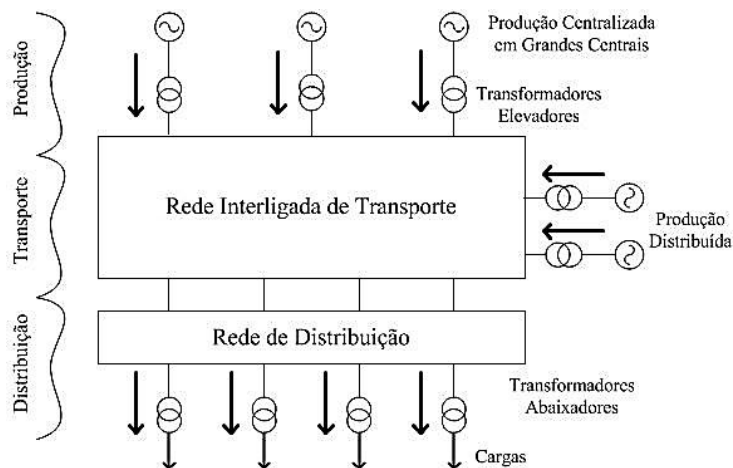


Figura 2.2- Organização atual dos Sistemas Eléctricos de Energia. (Adaptado de [2])

Antes de a GD se expandir amplamente pelas redes elétricas, a sua ligação à rede de distribuição era efetuada segundo a filosofia de “instalar e esquecer”<sup>1</sup>, que levava a que a GD fosse tratada como um elemento passivo do sistema. Porém, os elevados níveis de penetração deste tipo de fontes tem consequências ao nível da rede, em termos de estabilidade (tensão e frequência), qualidade de energia (conteúdo harmónico), fiabilidade (dependente sobretudo da disponibilidade do recurso), funcionamento de proteções e sobrecargas nas linhas, impostas pela intermitência das fontes renováveis, elementos amplamente utilizados na geração distribuída.

As fontes de energia ditas convencionais são “despacháveis”, i.e., operam em função da procura de energia. Por seu lado, a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, caracterizadas por uma disponibilidade sazonal e intermitente, como as energias solar fotovoltaica, eólica ou a energia hídrica (associada a aproveitamentos de fio de água), assume-se como bastante limitada e restritiva. Assim, se este tipo de tecnologias se difundir amplamente pelas redes elétricas, surgirão problemas de resposta à procura de eletricidade, em caso de indisponibilidade das fontes renováveis. Tal facto constitui um grave problema, porque a oferta e procura de energia num sistema elétrico devem ser equilibradas em curtos espaços temporais. Sem o referido equilíbrio, o sistema entra em colapso, resultando numa falha da rede [2].

Classicamente, o equilíbrio entre oferta e procura é garantido pela gestão da oferta, ou seja, adequando esta à procura. A eletricidade é gerada por um conjunto de centrais com uma elevada potência instalada que na sua maioria são controláveis, ao contrário da procura, que, geralmente, está fora do alcance dos sistemas de controlo. A partir dos dados históricos de consumo é possível prever-se com grande precisão, qual será a procura de eletricidade, existindo contudo um considerável nível de imprevisibilidade associado, gerido pelas reservas girantes.

No cenário evolutivo proposto para as redes elétricas, o equilíbrio procurado, é solucionado através do controlo da oferta, mas também da procura, num cenário de cooperação dinâmica entre as entidades responsáveis pela gestão da procura e da oferta de energia.

A interligação de pequenas unidades de GD, diretamente à rede de distribuição de BT é conhecida como microgeração (MG). O fenómeno da MG tem crescido rapidamente, expandindo-se globalmente, e dando origem a subsistemas que podem ser

---

<sup>1</sup> Da literatura anglo-saxónica *fit-and-forget*.

energeticamente independentes da rede convencional de transporte de energia durante determinados períodos de tempo, denominadas por micro-redes (MR).

## 2.2 Micro-Redes

De um modo geral, uma MR pode ser definida como uma rede de BT que agrega várias microfuentes modulares de geração de energia (como as microturbinas, pequenos aerogeradores, painéis fotovoltaicos, etc.). As tecnologias de geração distribuída operam em conjunto com elementos de armazenamento de energia, e com as cargas controláveis, encontrando-se estes três elementos chave (microfontes, armazenadores de energia e cargas) conectados à mesma rede, sendo comandados por um sistema de controlo hierárquico ou distribuído [3, 4]. As MR apresentam-se como ótimas soluções para locais onde a disponibilidade de energia deve ser ininterrupta, tais como hospitais ou servidores, e também para zonas remotas, onde a rede elétrica de transporte é inexistente e/ou apresenta uma considerável debilidade.

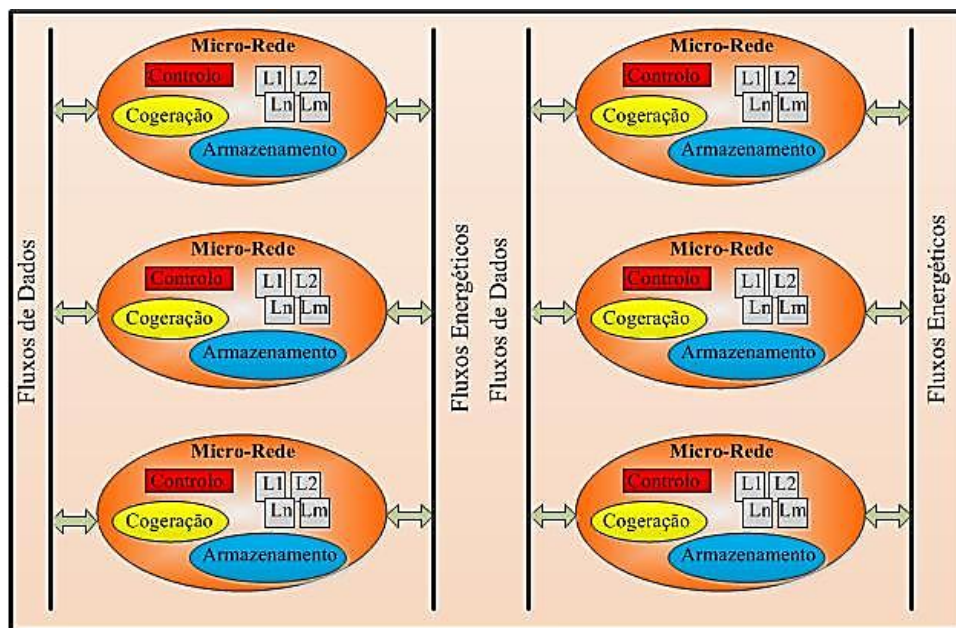


Figura 2.3- Futuro das Micro-redes. (Adaptado de [5])

A exploração de um sistema elétrico de energia, organizado em MR, como proposto na Figura 2.3, pode proporcionar consideráveis benefícios ao nível da operação do sistema, nomeadamente [6]:

- Diversificação da matriz energética, com a geração de energia através de diversas fontes;

- Proximidade física entre a produção e o consumo pode ajudar a consciencializar o utilizador final de energia, relativamente à utilização racional da mesma;
- Redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera;
- Diminuição de investimento no reforço da capacidade das redes existentes.

Além das vantagens atrás enumeradas, uma MR poderá operar em cooperação com as unidades de MG, gerindo convenientemente os consumos de energia, através de uma infraestrutura moderna e adequada de comunicação, e de um *software* adequado para a gestão dos elementos constituintes das MR.

As MR são normalmente exploradas com a possibilidade de ligação à rede pública, ou em modo isolado, onde a rede não está acessível. O recurso a MR suportadas pela rede pública permite:

- Redução das perdas ao nível da transmissão, visto que as fontes e cargas se encontram fisicamente próximas, traduzindo-se numa maior eficiência dos sistemas elétricos;
- Descongestionamento dos ramais;
- Melhoria da qualidade de serviço e dos perfis de tensão;
- Diminuição do impacto de interrupções de larga escala ao nível da geração e transmissão de energia;

As MR, se suportadas a montante pela rede pública de MT, possuem dois modos distintos de funcionamento: normal, quando estão efetivamente conectadas à rede de MT e emergência/crítico, imposto por defeitos que possam ocorrer na rede de MT, em caso de um colapso parcial ou generalizado. Opcionalmente, e de acordo com as potencialidades futuras das MR, o modo normal de operação deve passar pelo funcionamento em rede isolada autossustentável, onde cada MR na sua singularidade (com os seus sistemas de controlo, cargas, GD e elementos de armazenamento de energia) poderá interagir com as MR vizinhas, para comprar/vender energia em tempo real, num modo de funcionamento cooperativo, assistido por sistemas de gestão e controlo inteligentes.

### **2.2.1 Sistemas Ligados à Rede versus Sistemas Isolados**

Uma Micro-Rede Isolada é um sistema independente e especializado, de pequena a média dimensão, que segue as premissas das MR ligadas à rede, e que tem

como objetivo manter a qualidade e assegurar a fiabilidade energética num sistema independente. Nas MR isoladas, a geração de energia através de fontes distribuídas, entre as quais fontes renováveis, assume uma importância fulcral para o funcionamento sustentável da MR, já que não contempla uma possível ligação à rede elétrica convencional de distribuição.

O recurso a MR isoladas constitui uma excelente oportunidade para a eletrificação e desenvolvimento de locais remotos [7]. Segundo um relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2013, cerca de 1200 milhões de pessoas nos países em desenvolvimento não têm acesso à eletricidade [8]. Tal fato prende-se sobretudo com os elevados custos de instalação de infraestruturas dos subsistemas de transporte e distribuição de energia.

De salientar ainda a existência de inúmeras zonas isoladas com problemas de eletrificação, sobretudo ilhas, que, de um modo geral, são energeticamente abastecidas por sistemas electroprodutores independentes. O Japão destaca-se neste aspeto, sendo atualmente o país do mundo com maiores problemas de eletrificação em território insular. O abastecimento elétrico nessas regiões, é assegurado usualmente por geradores de combustão interna, que utilizam combustíveis fósseis, e aos quais estão associadas elevadas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases poluentes [9]. Um outro aspeto a ter em consideração é que o transporte de combustível para áreas remotas aumenta o custo de produção de eletricidade e, portanto, urge a necessidade de inclusão de fontes renováveis para geração de energia, salvaguardando-se o ambiente e aumentando a eficiência económica das regiões em questão.

Um pouco por todo mundo têm sido implementadas MR isoladas para satisfazer as necessidades energéticas de regiões isoladas desde países como a Escócia [10], Índia [11], Singapura [12], Bangladesh [13], Filipinas [14], Uganda [15], Etiópia [16], Afeganistão [16], Taiti [16], Malásia [16], até ao bem conhecido projeto europeu na ilha Dinamarquesa de *Bornholm*, conhecido como *EcoGrid* [17]. Em [9] é apresentada uma lista de inúmeros países com projetos nas MR isoladas, desde o Brasil, Canadá, Grécia, Hong Kong e até mesmo na zona gélida da Antártida.

Na Figura 2.4 é apresentada uma configuração básica de uma MR com GD e elementos de armazenamento de energia, que pode operar interligada à rede elétrica, ou em modo isolado, sendo que a diferença entre a operação dos dois modos relaciona-se com a existência de conexão ao Sistema Electroprodutor Existente, representados pelos três Grupos *Diesel*.

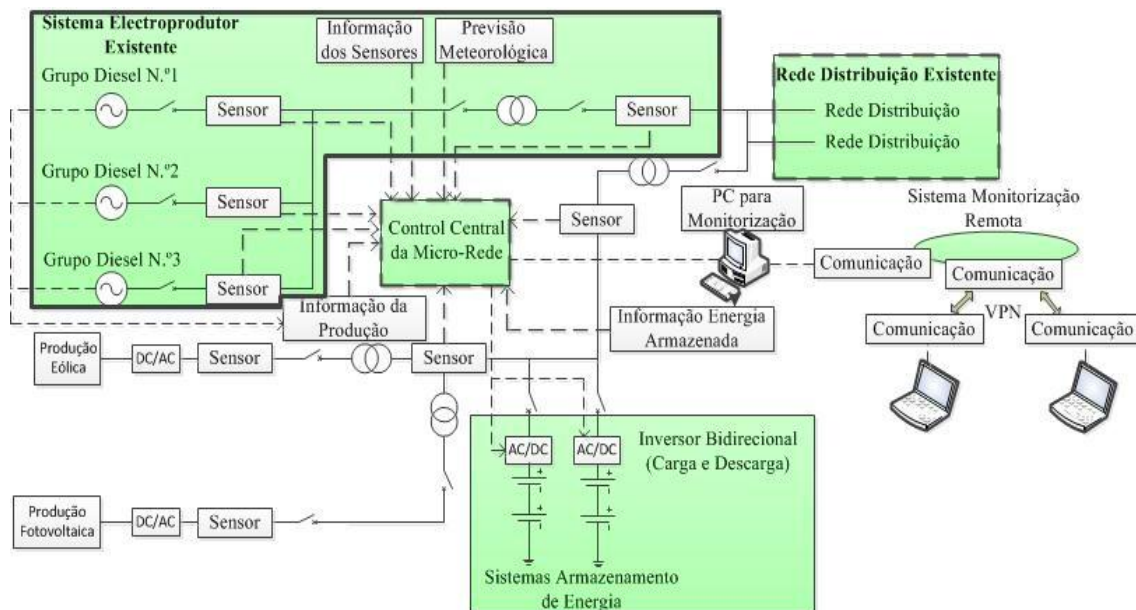


Figura 2.4- Configuração básica de uma Micro-rede com possibilidade de ligação à rede. (Adaptado de [9])

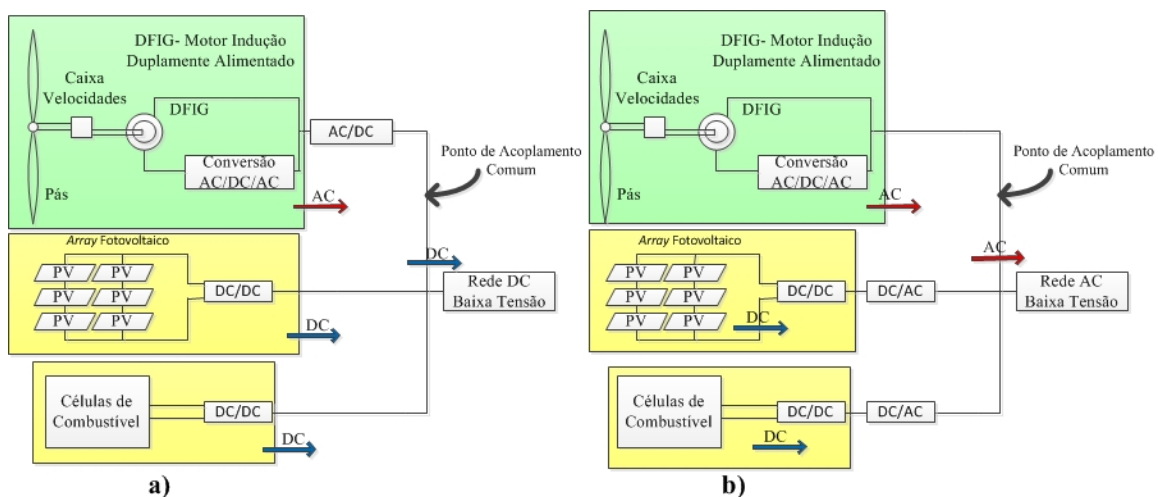
### 2.2.2 Distribuição em Corrente Alternada versus Corrente Contínua

As mudanças registadas na arquitetura das redes elétricas levantam outro tipo de questões bastante pertinentes.

Com o emergir das *Smart Grids*, SG, cujos princípios conceptuais serão apresentados na Secção 2.3, as redes baseadas em sistemas de corrente contínua em baixa tensão (LVDC), deverão ser encaradas como uma solução importante para as redes elétricas do futuro, substituindo as tradicionais redes de corrente alternada em baixa tensão (LVAC) [18].

As unidades de GD, dependendo da sua especificidade, podem gerar energia em AC ou DC. A utilização de uma solução de interligação única, DC ou AC, poderá acarretar uma diminuição das perdas, e a uma conseqüente redução de custos. Para a rede operar num sistema baseado em corrente alternada, a integração das fontes renováveis de energia deve ser realizada recorrendo a sistemas eletrónicos de conversão de energia, de forma a garantir que os níveis de frequência e de tensão, em valor eficaz e em fase, estejam dentro dos limites regulamentares.

Na **Error! Reference source not found.** são apresentadas as configurações possíveis de interligação das unidades de GD para redes de baixa tensão em DC (**Error! Reference source not found.**) a) e em AC (**Error! Reference source not found.**) b).



**Figura 2.5-a) Configuração típica da geração distribuída em LVDC. b) Configuração típica da geração distribuída em LVAC. (Adaptado de [18])**

Os sistemas de interligação das fontes distribuídas baseados em LVAC apresentam as seguintes vantagens relativamente aos sistemas baseados LVDC [19]:

- Elevar e baixar a tensão em AC é um processo muito fácil, através do recurso a transformadores. Em DC, a alteração do nível de tensão é efetuada através de conversores DC/DC, que requerem processos de implementação mais complexos;
- Os circuitos de proteção em AC estão tecnologicamente mais maturados do que os circuitos de proteção em DC, que necessitam de um maior investimento em investigação e desenvolvimento.

As LVDC, por sua vez, apresentam algumas vantagens em relação as LVAC, destacando-se [19]:

- A incorporação de vários elementos nas MR, como por exemplo, os painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento baseados em baterias, é facilitada, visto que aqueles não requerem nenhum processo de conversão de energia para AC;
- As linhas de transmissão em DC apresentam menor impedância do que as linhas em AC. O efeito pelicular apenas ocorre em sistemas de AC, o que leva à necessidade de se aumentar a secção da cablagem;
- Nas operações de ligar e desligar cargas e ou fontes, não é necessário efetuar processos de sincronização;

- O trânsito de energia reativa é inexistente, ou seja, a energia reativa não está presente em linhas DC;
- Evitam-se as preocupações na área da saúde sobre a exposição humana a campos induzidos por grandezas alternadas sinusoidais;

Em [13] é apresentado o exemplo do Bangladesh, país densamente povoado, e com enormes contraste sociais, que poderá apostar na eletrificação das zonas rurais, através de MR isoladas em DC.

### 2.2.3 Desafios e Desenvolvimentos Futuros

O sucesso na implementação e difusão das MR está dependente da resolução de uma série de questões de índole técnica, relacionadas essencialmente com os problemas de operação, controlo e segurança. Portanto, os projetos de Investigação e Desenvolvimento, *I&D*, no âmbito das MR devem dar resposta aos seguintes tópicos [3]:

- Estudo da arquitetura e operação das MR, de modo a possibilitar a integração de novas microfontes de geração de energia;
- Desenvolvimento e implementação de estratégias de controlo, que garantam que os requisitos de qualidade das redes são assegurados para o consumidor final, nomeadamente ao nível da tensão e da frequência, fornecendo energia da forma mais eficiente e obedecendo a critérios económicos e de fiabilidade;
- Determinação dos possíveis benefícios económicos de operação de MR, através de métodos e ferramentas que permitam avaliar a viabilidade daquelas. Aliás, a questão da rentabilidade económica merece especial importância, até porque em [3, 20] é referido que os custos associados à geração de eletricidade em sistemas distribuídos são consideravelmente superiores aos verificados em grandes centrais presentes na geração centralizada;
- Definição de esquemas adequados de proteções e ligação à terra, que garantam a segurança na operação das MR e permitam a deteção de falhas;
- Identificação das necessidades das MR, em relação a infraestruturas de comunicação e protocolos de comunicação;
- Estudo de estratégias de carga e descarga e de utilização eficiente dos sistemas de armazenamento de energia, essenciais aquando de falhas em sistemas com ligação das MR à rede de MT, mas sobretudo em MR isoladas.

A incorporação de inteligência e estratégias de controlo nas MR, bem como o conceito de funcionamento cooperativo entre várias MR e os diversos elementos constituintes das redes elétricas, pode acarretar enormes benefícios para o sistema, através da otimização de processos.

### 2.3 Smart Grids

Uma rede elétrica “inteligente”<sup>1</sup> define uma rede ou micro-rede onde existe uma integração flexível de componentes complementares, subsistemas, funções de gestão e controlo inteligentes e serviços direcionados na ótica do utilizador, sob o controlo de sistemas de gestão e controlo altamente inteligentes [3], “assessorada” por Tecnologias de Informação e Comunicação, (TIC). Estas tecnologias permitem uma gestão mais eficiente do sistema, respondendo a uma ampla gama de condições e eventos, que podem ocorrer em qualquer parte da rede, seja ao nível da produção, do transporte, da distribuição, ou do consumo, adotando estratégias adequadas para agir em cada situação, para obtenção de um sistema limpo, seguro, confiável, flexível, eficiente e sustentável.

Na Tabela 2.1 é efetuada uma pequena comparação entre as características das redes elétricas convencionais, e as redes elétricas “inteligentes”.

Comparativamente ao modo de exploração das redes tradicionais, as SG permitem uma melhor gestão dos fluxos de energia e informação bidirecionais, criando uma rede mais automatizada, avançada e distribuída.

**Tabela 2.1- Comparação entre redes convencionais e as redes elétricas inteligentes [3], [5].**

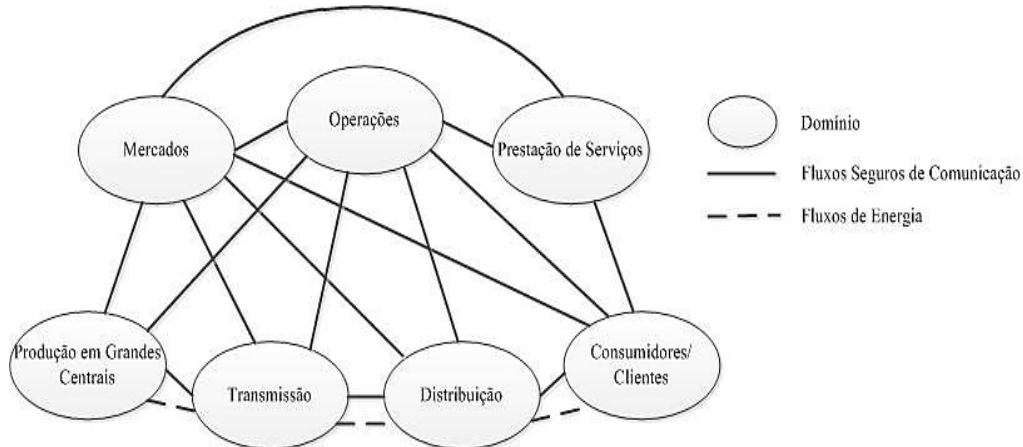
<b>Redes Convencionais</b>	<b>Smart Grids</b>
Comunicação unidirecional	Comunicação Bidirecional
Produção centralizada	Produção distribuída
Poucos Sensores	Inúmeros Sensores
Controlo Hierárquico	Controlo Distribuído
Monitorização manual	Auto-monitorização
Reparação manual	Auto-reparação
Falhas e apagões	Adaptável, e com operação em modo isolado
Controlo limitado	Controlo generalizado
Pouca escolha para o consumidor	Diversas opções para o consumidor
Eletromecânica	Eletromecânica e Digital

<sup>1</sup> *Smart Grids* na literatura anglo-saxónica, cujo termo é adotado no presente trabalho.

De acordo com a Agência Internacional da Energia, (IEA), o processo de desenvolvimento das SG é contínuo e evolutivo, e não apenas um evento isolado. A IEA refere que uma SG combina aspectos tecnológicos, económicos, regulamentares e sociais, que tornam o setor energético mais seguro e sustentável [21].

O conceito inicial de SG surgiu com o objetivo de ser criada uma infraestrutura de medição avançada, *Advanced Metering Infrastructure*, para se incrementar a eficiência energética, permitir a gestão do lado da procura, *Demand-Side Management*, e construir uma proteção confiável de auto-reparação, *Self-Healing*, da rede contra ações de sabotagem e desastres naturais. Contudo, os novos requisitos e exigências no âmbito das SG conduziram a que a indústria da eletricidade, as organizações de investigação e as entidades governamentais redefiniram o âmbito daquelas, levando a uma ampliação da área de ação das SG.

O NIST, *National Institute of Standards and Technology*, criou um modelo concetual, conforme a Figura 2.6, que serve como padrão para os projetos de SG, encontrando-se dividido em sete domínios. Cada um desses domínios envolve um ou mais intervenientes das SG, incluindo dispositivos, sistemas, ou programas de tomada de decisão que trocam informações necessárias para a execução das aplicações.



**Figura 2.6- Modelo conceitual do NIST para as SG. (Adaptado de [3])**

Segundo um relatório do NIST, e de acordo com a posição assumida pelo Departamento da Energia dos Estados Unidos da América, os benefícios e requisitos previstos nas SG são [2, 3]:

- Melhoria da fiabilidade e da qualidade de energia, bem como da capacidade de resistência a perturbações;

- Melhoria da capacidade e eficiência das redes elétricas existentes, com a elevada penetração de sensores e controladores, automatizados e dotados de inteligência;
- Otimização da utilização dos sistemas existentes, evitando a construção de centrais de *back-up* para os picos de consumo, diminuindo-se o consumo de combustíveis fósseis, com a redução da necessidade de geração ineficiente de energia durante os períodos referidos;
- Manutenção preventiva e propostas de *Self-Healing* para perturbações ao sistema;
- Facilidade de expansão da GD, que permita a integração simultânea de várias fontes renováveis de energia, de um modo controlado;
- Operação e manutenção otimizadas, apresentando oportunidades de melhoria da segurança das redes, criando um equilíbrio entre a confiança do consumidor e as necessidades de qualidade de energia;
- Redução das emissões de gases de efeito de estufa, permitindo a inclusão de Veículos Elétricos, EV, do tipo *Plug-In*, bem como outras fontes de armazenamento de energia;
- Aumento das possibilidades de escolha do consumidor, disponibilizando-se novos produtos, serviços e mercados;
- Redução dos consumos nas horas de pico, através da gestão ativa da procura por parte do consumidor;
- Aumento das oportunidades de eficiência energética, através do fornecimento de informações precisas e em tempo real sobre a utilização de energia ao consumidor final e às empresas de distribuição de energia.

A título de exemplo, seguidamente apresenta-se uma das técnicas na área das SG, que permite intervir diretamente na gestão dos consumos de energia, proporcionando consideráveis poupanças energética, a técnica de redução de tensão, (*Conservation Voltage Reduction, CVR*).

### **2.3.1 Conservation Voltage Reduction**

A técnica de CVR baseia-se na redução no valor da tensão de alimentação para os valores mínimos aceitáveis de funcionamento dos equipamentos, podendo resultar daí uma redução da potência consumida [22].

A poupança de energia a partir da redução de tensão é classificada através da relação entre a percentagem de energia poupada,  $\varepsilon_P(\%)$ , e a percentagem de redução no valor da tensão,  $\varepsilon_V(\%)$ , denominada de fator de CVR,  $f_{CVR}$ , definido por [23]:

$$f_{CVR} = \frac{\varepsilon_P(\%)}{\varepsilon_V(\%)}. \quad (2.1)$$

Este indicador quantitativo apresenta valores típicos entre 0,4 e 1,0, podendo tomar valores superiores a 1,0 no caso de cargas puramente resistivas e dependendo do tempo que estas se encontrem em funcionamento [24]. O fator de CVR define pois o valor percentual de redução de consumo de energia, numa base de diminuição de tensão de 1%, permitindo portanto relatar a poupança de energia devida à implementação da redução de tensão.

A implementação da técnica de CVR pode acarretar uma deterioração dos perfis de tensão ao longo da rede, razão pela qual a queda de tensão nos circuitos necessitará de ser compensada através de medidas corretivas, como recurso a baterias de condensadores (implementando-se um fluxo regressivo de potência reativa para um circuito tipicamente indutivo), ou ainda a autotransformadores para o caso de linhas de elevado comprimento.

Com a implementação de uma infraestrutura de monitorização avançada, potenciada pelas *Smart Grids*, é possível a comunicação dos valores de tensão em cada consumidor, permitindo a otimização dinâmica dos níveis de tensão, por ação comandada nos diversos dispositivos de controlo da tensão, controlando-se em tempo real a potência consumida nas mais diversas cargas.

A implementação da técnica de redução da tensão está geralmente associada às técnicas de compensação de quedas de tensão<sup>1</sup> e da regulação da tensão nos transformadores<sup>2</sup>. A primeira assenta no princípio de elevação dos valores de tensão nos picos do diagrama de cargas para compensar as quedas da tensão em períodos de ponta dos consumos, sendo que o valor mínimo de tensão deve ser garantido aos consumidores localizados nos finais das linhas, e os restantes consumidores localizados ao longo das linhas estão suscetíveis a valores variáveis de tensão mediante várias condicionantes [25], conforme demonstrado na Figura 2.7. Por sua vez, através da alteração da razão do número de espiras, a regulação da tensão através de

---

<sup>1</sup> *Line Drop Compensation* na literatura anglo-saxónica.

<sup>2</sup> *Load Tap Changer* na literatura anglo-saxónica.

transformadores implica a utilização de transformadores com regulação em carga, para elevação dos valores de tensão em linhas extensas, garantindo-se o valor mínimo admissível no final das linhas de distribuição.

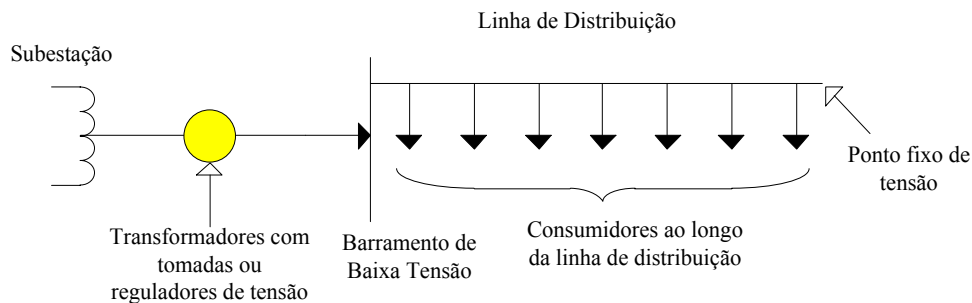


Figura 2.7-Regulação de tensão baseada no CVR. (Adaptado de [27])

### 2.3.2 Projetos de Smart Grids

Ao longo dos últimos anos, e de acordo com a mudança de paradigma em torno da arquitetura das redes elétricas, têm surgido diversos programas, projetos, e estudos para a implementação das SG um pouco por todo mundo. Apesar da política de ação das SG diferir de uma região para outra, em termos globais considera-se que um dado sistema é dotado de inteligência, quando tem a capacidade de [2]:

- Percepção, através da recolha de informação sobre a situação do sistema em que se insere;
- Comunicação, com recurso a trocas de informação com outras entidades, como sistemas, agentes ou pessoas;
- Desenvolvimento e implementação de métodos de processamento e tratamento da informação recolhida, com vista a uma tomada de ação, incluindo etapas de planeamento, escalonamento, previsão e ação;
- Coordenação através de cooperação e realização de ações conjuntas com outras entidades.

Os Estados Unidos assumem-se como o grande promotor mundial do estudo das SG, com diversos projetos em quase todos os seus Estados, contabilizando mais estudos do que o conjunto dos restantes países. Na Figura 2.8 a) são apresentados os projetos de SG nos Estados Unidos, e na Figura 2.8 b) os projetos realizados fora dos Estados Unidos, até ao ano de 2012. Fora dos Estados Unidos, a aposta nas SG centra-se sobretudo nos países desenvolvidos, como os membros da EU, a Austrália e o Japão.



Figura 2.8- Projetos de Smart Grids até ao ano de 2012: a) nos Estados Unidos; b) fora dos Estados Unidos [3].

O Departamento de Energia dos Estados Unidos iniciou um programa de modernização das suas redes elétricas com a iniciativa *Grid Wise*. Associado a este programa surgiu em 2003 a *Grid Wise Alliance*, um consórcio público-privado, que representa uma vasta gama da cadeia de fornecimento de energia, de empresas de distribuição de energia para grandes e empresas tecnológicas emergentes e universidades.

No Canadá, mais precisamente na província de Ontário, a empresa *Hydro One* estabeleceu em 2005 uma visão a longo prazo para melhorar e inovar o fornecimento e distribuição de eletricidade, desde as várias fontes de GD até aos consumidores finais. O plano de ação da *Hydro One* foca-se no estabelecimento de uma rede moderna, flexível e inteligente [26].

A Coreia do Sul foi o décimo maior consumidor mundial de eletricidade em 2008, razão pela qual o Presidente *Lee Myung Bak's* definiu uma visão estratégica no âmbito das SG, intitulada *Low Carbon, Green Growth*. A aposta coreana perspetiva um atrativo retorno económico do investimento, além da criação de 50.000 postos de trabalho anualmente.

O Governo Australiano anunciou no orçamento apresentado em Maio de 2009, um investimento até 100 milhões de dólares americanos, para o desenvolvimento de um projeto demonstrativo de SG em escala comercial, e a partir da iniciativa nacional de eficiência energética. O projeto do Governo conta com a parceria de empresas do sector energético, sendo designado de *Smart Grid, Smart City* [27].

Em 2005 a Comissão Europeia deu início à plataforma tecnológica europeia das SG, onde seriam representadas todas as entidades intervenientes no sector energético. O primeiro objetivo desta plataforma passou por reformular e promover a visão europeia, relativamente ao desenvolvimento das redes elétricas europeias no horizonte temporal de 2020, e mais além.

Em [28] é apresentado um relatório elaborado pela *Joint Research Institute*, onde consta que, até ao ano de 2012 foram iniciados 281 projetos de SG em 30 países da Europa, incluindo-se os 27 Estados-Membros da União Europeia, Croácia, Suíça e Noruega, num investimento total de 1.800 milhões de euros. Ainda segundo o mesmo estudo, o Reino Unido, a Alemanha, a França e a Itália são os países que mais investiram nas SG. Por sua vez, a Dinamarca é o país que mais tem iniciado projetos de *I&D*, criando diversos projetos-piloto de pequena escala, assumindo-se como o país com maior investimento *per capita*, e por kWh consumido. Ainda em [28] são apresentados uma série de projetos desenvolvidos pelos 30 países referidos para diferentes aplicações na área das SG, incluindo: gestão das redes inteligentes, integração das fontes renováveis distribuídas e de sistemas de energias renováveis de larga-escala, *demand response*, integração dos EV, medição inteligente, TIC, gestão dos sistemas de armazenamento, e habitações e clientes inteligentes.

Na Alemanha, o Ministério Federal da Economia e Tecnologia iniciou uma campanha de financiamento tecnológico denominada de *E-Energy*, referindo-se ao futuro sistema energético baseado em TIC [2]. Por conseguinte, desde o final de 2008, que seis consórcios têm vindo a desenvolver e testar elementos essenciais e fundamentais, para a concretização do objetivo prioritário, que passa pela criação de uma *Internet da Energia*, em seis regiões modelo independentes. A rede *E-Energy* utiliza mecanismos de *forecasting* para previsão do consumo e da produção, com base nas condições meteorológicas.

Em Espanha, a empresa *Iberdrola* lançou o projeto *Prime*, de acordo com as necessidades futuras dos consumidores finais de eletricidade, associadas às redes elétricas inteligentes. O *Prime* é baseado em tecnologia *PLC*, *Power Line Communication*, sendo a comunicação intermediada pelos cabos elétricos, desde as centrais das empresas de distribuição, até aos consumidores [2].

Na Holanda em 2012 foram implementados 12 projetos experimentais de larga escala, para avaliação do potencial das SG [31].

Em Portugal surgiu o projeto *InovGrid*, da responsabilidade de um consórcio liderado pela EDP Distribuição, como resposta ao desafio lançado pela liberalização dos mercados Europeu e Ibérico de eletricidade, e devido à necessidade de se introduzir maior inteligência nas redes de energia, controlando e gerindo de um modo mais abrangente a rede de distribuição, incluindo a integração de microprodução em grande escala [29]. O *InovGrid* foi desenvolvido para que seja atingido um elevado nível de inteligência e eficiência das redes, além de uma Qualidade de Serviço adequada. A arquitetura técnica utilizada é hierárquica multinível, conforme a Figura 2.9.

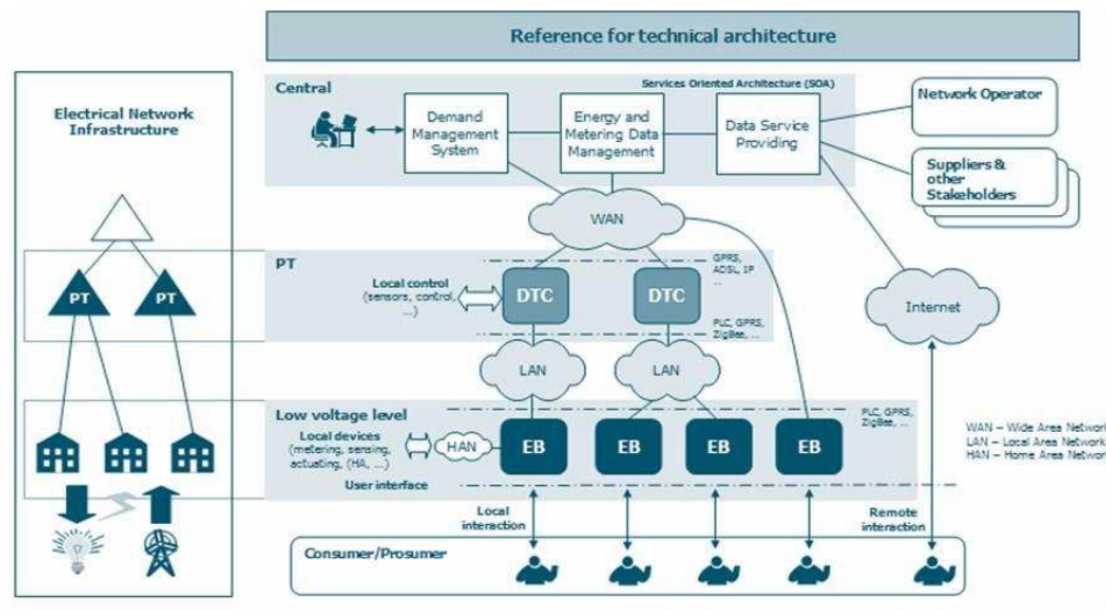


Figura 2.9- Arquitetura técnica multinível do InovGrid [30].

No primeiro nível, do produtor/consumidor, encontram-se as *Energy Boxes*, EB, onde estão implementadas funções de contagem e gestão de energia, incluindo o controlo dos equipamentos consumidores de energia, e da microprodução. No segundo nível, da subestação de MT/BT, encontra-se o *Distribution Transformer Controller*, DTC, responsável pela agregação da informação, gestão e monitorização das EB, pelo controlo e automação do Posto de Transformação, PT, além de gerir a operação da rede em modo isolado. No terceiro e último nível do controlo e gestão central, é realizada a agregação da informação comercial e da gestão da energia, sendo implementado o controlo operacional da rede.

## 2.4 Sistemas Multiagentes para Gestão e Otimização em Micro-Redes

As alterações que se têm registado ao nível das redes elétricas de energia, enunciadas anteriormente, têm levado a um aumento do nível de complexidade das

mesmas, sobretudo com a possibilidade de um consumidor poder injetar energia na rede, através de sistemas de geração de energia distribuídos, de pequeno a médio porte, surgindo o conceito de Produtor-Consumidor, conceptualmente designado de *Prosumer*. Com base na situação atual, torna-se notório que as SG têm pela frente enormes desafios, sobretudo no emprego de infraestruturas próprias para as TIC, que irão constituir um importante auxílio na transição das redes elétricas verticais e com infraestruturas organizadas centralmente, para um sistema descentralizado, que se apresenta complexo e ciber-físico, com inúmeros equipamentos autónomos e interativos, cujas funcionalidades devem ser monitorizadas em (aproximadamente) tempo real.

A modelação e análise dos sistemas reais em relação às suas interdependências está a tornar-se gradualmente mais complexa, razão pela qual, as ferramentas tradicionais de modelação se encontram cada vez mais longe de retratarem fielmente os comportamentos e relações existentes nos sistemas e, em determinados casos, bastante desadequada.

A arquitetura dos processos de controlo e de comunicação assume importância fulcral em qualquer rede elétrica de energia. Durante vários anos utilizaram-se sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), que permitem o controlo e manutenção do *hardware* integrante das redes elétricas, com base em determinados protocolos de sinalização. Existem no mercado diversas soluções standardizadas para a gestão de energia, oferecendo funcionalidades SCADA ao nível das MR. Porém, essas soluções são implementadas com protocolos de *software* específicos de quem fornece o equipamento, limitando desse modo a comunicação com as diferentes fontes de energia distribuídas, originando sobrecustos de implementação.

A noção de rede elétrica distribuída, autónoma e inteligente, reside numa rede constituída por entidades de *software* inteligentes, *agentes*, que interagem entre si na busca de um objetivo comum, com capacidade de aprendizagem, e que podem tomar decisões pertencentes à esfera do utilizador, podendo-se definir esta rede como Sistema Multiagente, (SMA).

#### **2.4.1 Conceitos Básicos de Sistemas Multiagentes**

Não existe atualmente uma definição universal e consensual do termo “agente”, pelo que, frequentemente se levantam debates ocasionais relacionados com esse fato. Apesar de, por inúmeras vezes, alguns autores intitulem os seus modelos como

baseados em agentes, existem algumas condicionantes inerentes à correta utilização desse termo, que se prendem com as capacidades do modelo, ou com as potenciais capacidades que podem emergir através de pequenos ajustes [30].

Em [2, 31, 32] define-se agente como uma entidade de *software* autónoma, que atua como representante de alguém ou de algo.



Figura 2.10- Representação de um agente típico. (Adaptado de [33])

Em termos práticos considera-se que os agentes possuem certas propriedades e atributos (Figura 2.10) sendo caracterizados como [33]:

- Autónomos e autodidatas, podendo funcionar de modo independente no seu ambiente, e nas suas interações com outros agentes;
- Modulares ou interdependentes, sendo individualidades identificáveis e discretas, com um conjunto de características ou atributos, e capacidade de tomada de decisão;
- Sociais/ cooperativos, interagindo com outros agentes, através de protocolos ou mecanismos que definem o modelo das interações.

Existem propriedades adicionais que podem não ser fulcrais na atividade desempenhada por um agente, como por exemplo:

- Um agente vive num ambiente (plataforma), com o qual interage. Assim, o seu comportamento é baseado no estado atual das interações com o ambiente, e com outros agentes, podendo ser classificado em função da sua resposta a uma

situação, além do que, o seu comportamento pode ser função de objetivos inerentes a si;

- Capacidade de aprendizagem e adaptação dos seus comportamentos, consoante as experiências com que se depara. Este processo requer capacidade de memória.

Um SMA é um sistema computacional em que dois ou mais agentes interagem ou trabalham em conjunto de forma a desempenhar determinadas tarefas ou satisfazer objetivos, que se encontram além da capacidade intrínseca de cada um dos agentes em particular [34].

Os SMA derivam do campo da inteligência artificial distribuída, sendo um paradigma que sugere um modo alternativo para o *design* de sistemas de controlo distribuídos de larga escala, através da interação entre múltiplos agentes autónomos e cooperativos, que se destacam pela sua modularidade, flexibilidade e robustez.

As principais vantagens associadas à utilização de SMA prendem-se com [34]:

- Resolução de problemas demasiado complexos para serem resolvidos por um agente único monolítico, fornecendo de um modo robusto, soluções naturais para problemas geográficos e/ou funcionalmente distribuídos, subdividindo o problema global em vários problemas;
- Paralelismo e escalabilidade, atribuindo diferentes tarefas a diferentes agentes, para que a execução seja mais rápida, num sistema aberto de interações entre os agentes;
- Estudo da inteligência individual e do comportamento social, visto que os SMA permitem a interoperacionalidade entre os agentes;
- Manutenção da privacidade de informação e conhecimentos individuais de cada agente.

#### **2.4.2 Sistemas Multiagente nas *Smart Grids***

Uma SG opera (com base na informação que reúne e distribui) mediante o comportamento dos seus diversos constituintes e elementos integrantes, como por exemplo as unidades de geração de energia, os dispositivos nos sistemas de transporte e distribuição de energia e os consumidores e/ou cargas, com o intuito de melhorar a eficiência, estabilidade, segurança, fiabilidade, economia e sustentabilidade dos sistemas elétricos de energia.

A procura por ferramentas que permitam o controlo de redes tão complexas conduz-nos para as tecnologias de SMA, cujo potencial foi comprovado, massivamente na exploração de sistemas industriais, com controlo complexo de larga escala [35-38].

A utilização dos SMA nas SG permite reproduzir algumas características de sistemas de controlo complexo em larga escala, através da interação entre os vários agentes autónomos, em que cada um é responsável pelo controlo de um elemento constituinte do sistema, seja ele um gerador, um transformador, um interruptor, um sensor, um elemento de armazenamento de energia ou um veículo elétrico. A referida interação entre os agentes segue uma lógica adequada de coordenação, segundo os objetivos globais do sistema, combinando as suas competências e aptidões individuais.

Na Figura 2.11 é apresentada a modelação de uma SG, cujo funcionamento é controlado por ação dos agentes representantes dos vários intervenientes da MR.

Segundo uma visão holónica (segundo a qual algo pode de modo simultâneo, representar uma parte e o todo), no seu nível mais baixo cada um dos agentes pode incluir outros agentes que gerem outras fontes distribuídas de energia. Assim, um consumidor doméstico pode incluir um sistema de aquecimento/refrigeração, um contador inteligente, uma unidade fotovoltaica, e um sistema de armazenamento de energia. Ou seja, dependendo do referencial, o consumidor pode representar o todo (no contexto da habitação), e a parte (no âmbito de uma rede elétrica de energia).

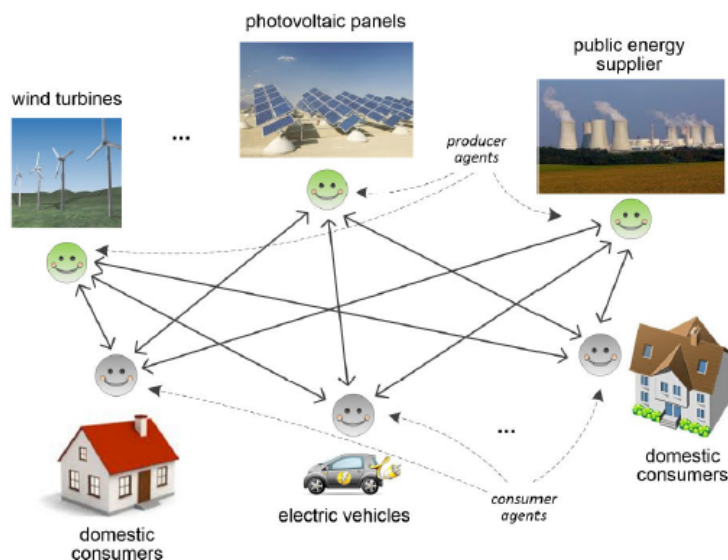


Figura 2.11- Modelação de uma *Smart Grid* com base em agentes [31].

O conceito apresentado sugere uma abordagem de controlo descentralizado, conforme os princípios dos SMA, garantindo:

- Modularidade e facilidade de utilização (a inclusão de um novo elemento é fácil, não requerendo paragem, reprogramação ou recomeço do sistema);
- Escalabilidade (o sistema pode-se expandir, de modo a fazer face ao crescimento global do número de elementos que o constituem);
- Reconfigurabilidade (um agente pode parar e modificar o seu comportamento e/ou estratégia, sem que tal fato afete os restantes componentes do sistema);
- Robustez (uma falha, ou perda de um agente, não pode comprometer o funcionamento correto do sistema);
- Reutilização (os componentes existentes podem ser reutilizados, no sentido de se desenvolverem novos agentes ou sistemas).

A aplicação dos SMA às SG evoca grandes desafios, em relação à integração de algoritmos de controlo adequados, restrições em tempo real, conexão ao *hardware*, e interoperabilidade. As plataformas de TIC reforçam diversas funcionalidades inerentes às SG, mais concretamente a monitorização distribuída e em tempo real, o diagnóstico, *Self-Healing*, a auto-manutenção (*Self-Monitoring*) e a negociação, requerendo-se para tal efeito, o *design* e implementação de mecanismos de coordenação próprios, e também algoritmos adaptáveis para serem incorporados nos agentes distribuídos.

### **2.4.3 Projetos de Sistemas Multiagente nas *Smart Grids***

Os SMA têm vindo a ser utilizados nos sistemas elétricos de energia, na tentativa de se contornarem problemas associados às ferramentas tradicionais de computação utilizadas no âmbito das redes elétricas, e que não são adequadas para os níveis de exigência e de complexidade dos sistemas de energia atuais. Por sua vez, os SMA podem ser bastante úteis, na obtenção de melhorias no desempenho, e nas tarefas de reposição e visualização das redes, além da implementação de técnicas de controlo de tensão.

#### **2.4.3.1 CRISP: Distributed Intelligence in Critical Infrastructure for Sustainable Power**

Um dos primeiros projetos direcionados para sistemas energéticos sustentáveis, e que contemplava o recurso a agentes para obtenção de uma infraestrutura inteligente e distribuída de informação e comunicação, foi o CRISP [39]. Do projeto em causa, surgiu o conceito de Célula de Grelha, *Grid Cell*, que representa uma sub-rede gerida de modo independente, por um agente chamado de *Smart Grid Automation Device*. Os

agentes em causa tomam as suas decisões locais, com base nos valores atuais e previstos de consumo e produção de energia, comunicando entre si sobre a alocação de recursos, e também a um nível superior, para que a informação seja agregada e processada.

Um dos principais aspetos positivos do projeto CRISP foi o desenvolvimento da ferramenta *PowerMatcher*, que estabelece o equilíbrio entre a oferta e procura, através do recurso a um mercado eletrónico liberalizado, e baseado em agentes, onde a energia é comercializada (por agentes específicos para o efeito), sendo o preço de equilíbrio determinado por um outro agente que é responsável pelo leilão de “pacotes de energia”. O *PowerMatcher* tem sido utilizado em diversos projetos-piloto relacionados com habitações ao nível residencial, sobretudo quando estas são agregadas em centrais virtuais, que interagem com os restantes elementos da rede, relativamente ao processo de compra e venda de energia num mercado eletrónico [2].

#### 2.4.3.2 Multi-Agent Smart Grid Management System

Um outro projeto de SMA relacionado com a compra e venda de energia em mercado eletrónico, a partir de previsões de consumo e produção de energia, é o *Multi-Agent Smart Grid Management System*, sendo a sua arquitetura apresentada na Figura 2.12 [40].

O sistema proposto apresenta 3 níveis hierárquicos. No nível mais alto encontra-se o Agente da Rede (GridAG), que tem a responsabilidade de comprar e vender energia ao Agente de Controlo da *Smart Grid* (SGC).

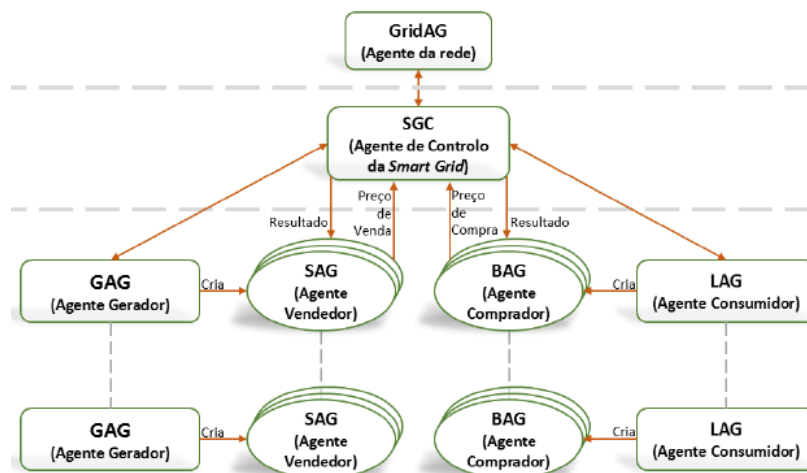


Figura 2.12- Arquitetura do *Multi-Agent Smart Grid Management System* [40].

No nível intermédio encontra-se o SGC, que controla o sistema, iniciando e lidando com as negociações existentes. No nível hierárquico mais baixo estão os Agente

Produtores (GAG), os Agentes Vendedores (SAG), os Agente Consumidores (LAG), e os Agentes Compradores (BAG). Inicialmente, cada GAG e cada LAG efetuam uma previsão do consumo e da produção de eletricidade, a partir do historial de produção e consumo, e também recorrendo a previsões meteorológicas. De seguida, são criados os SAG e os BAG, cabendo ao SGC definir as relações entre os agentes compradores e os vendedores, e em caso de necessidade pode comprar ou vender energia ao GridAG.

#### 2.4.3.3 Intelligent Distributed Autonomus Power Systems

O projeto IDAPS, *Intelligent Distributed Autonomus Power Systems*, anteriormente referido como sendo aquele em que foi apresentado o conceito de rede elétrica autónoma, inteligente e distribuída, apresenta um SMA capaz de simular uma MR, com o objetivo principal de satisfazer as cargas críticas em momentos de falha. Para tal, é utilizada uma estrutura de agentes que representam apenas uma MR, não sendo contemplados agentes representativos de consumidores ou produtores [41].



Figura 2.13- Arquitetura do IDAPS [41].

A arquitetura do IDAPS é apresentada na Figura 2.13, sendo o Agente Controlador responsável por monitorizar a frequência e a tensão da rede, para que sejam detetadas falhas, isolando a MR caso tal se verifique. Este ainda tem ainda a responsabilidade de obter informação proveniente da rede, como por exemplo o custo por unidade de energia. O Agente de Recursos armazena a informação proveniente dos geradores, podendo monitoriza-los e controlá-los. O Agente Utilizador possibilita que os utilizadores do sistema utilizem a informação do SMA, bem como os dados relativos ao consumo das cargas. O Agente Base de Dados armazena toda a informação do sistema.

#### **2.4.3.4 EcoGrid**

O projeto Europeu *EcoGrid* irá reutilizar a ferramenta *PowerMatcher* para implementar um mercado eletrônico de energia em tempo real [17].

A implementação e demonstração do projeto em escala real será realizada na ilha dinamarquesa de *Bornholm*, onde a maioria dos consumidores residenciais será equipada com um controlador inteligente, que opera mediante a flutuação dos preços da energia, que serão atualizados a cada 5 minutos, para que sejam mitigados possíveis desequilíbrios entre oferta e procura.

#### **2.4.3.5 More Microgrids**

O projeto *More Microgrids* teve como objetivo o estudo da aplicação da tecnologia SMA para controlo das MR [42]. Em cada habitação as cargas são controladas de forma inteligente por um controlador de carga inteligente, *Intelligent Load Controller* (ILC), que contém um agente a funcionar sob a plataforma JADE [43]. O agente ILC comunica com o agente responsável pelo controlo central da MR, cuja função é a de manter o equilíbrio entre consumo e produção de eletricidade. Se a procura é superior à produção, os agentes ILC são solicitados para efetuar o deslastre seletivo de cargas consideradas como não-prioritárias.

#### **2.4.3.6 GridAgents**

O *software GridAgents* está a ser desenvolvido pela empresa *Infotility*, apresentando-se como uma plataforma para aplicações de redes de grande escala, e com elevada penetração de fontes de energia distribuídas. O *GridAgents* explora o funcionamento conjunto entre a tecnologia SMA e serviços *Web* [44]. O projeto-piloto deverá ser implementado nas redes elétricas de *Fault Corridor* e de *Madison Square*, na cidade de Nova Iorque.

#### **2.4.3.7 MASGrid**

O projeto *MASGrid*, de origem Austríaca, lida com um SMA que permite a auto-otimização das redes de distribuição de energia de forma a minimizar as perdas nas linhas e garantir os critérios de qualidade de energia requerida pela elevada penetração de GD. Outro objetivo do projeto passa pela auto-reconfiguração, *Self-Reconfiguration*, da rede [45].

Para que os objetivos do projeto sejam cumpridos, é fundamental que os componentes ativos utilizados nas redes sejam capazes de reagir de forma autónoma, mediante o seu conhecimento, para otimização da rede elétrica durante a operação.

Uma das principais diretrizes do *MASGrid* passa pela integração do conceito de SMA nos sistemas de DMS (*Distribution Management System*) / SCADA das empresas de distribuição, apoiando os operadores no gerenciamento das redes de distribuição de energia.

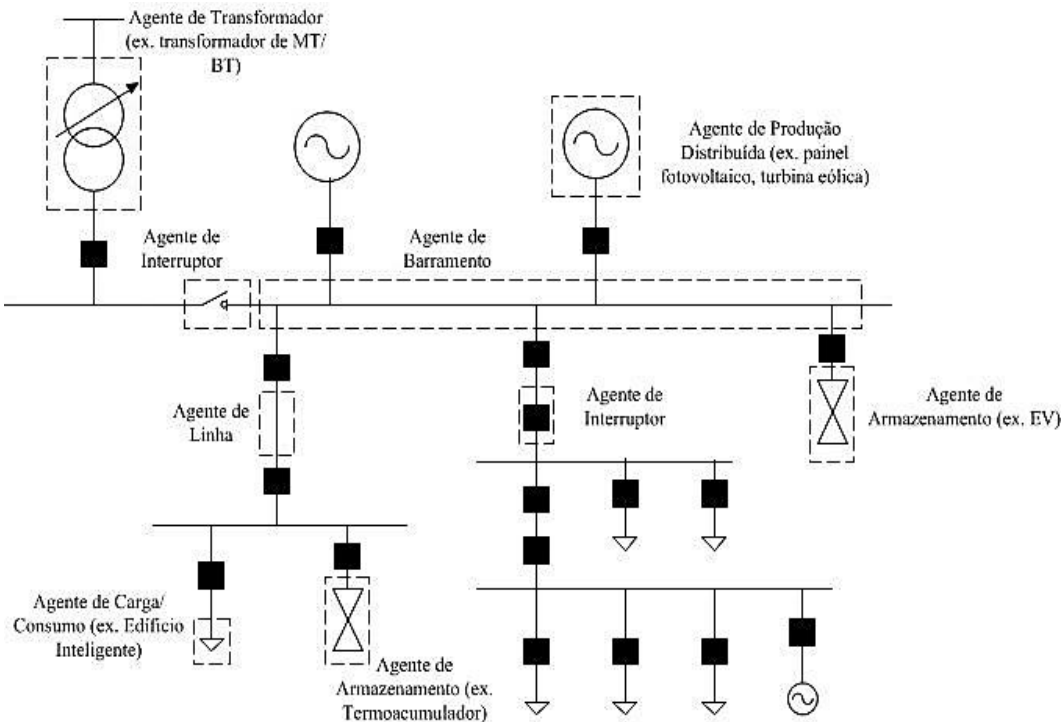


Figura 2.14- Tecnologia SMA no âmbito do projeto *MASGrid*. (Adaptado de [33, 45])

Na Figura 2.14 é apresentada a abordagem aos SMA no âmbito do projeto *MASGrid*, sendo cada elemento integrante da rede de distribuição (como exemplo: interruptores, cargas, fontes distribuídas, transformadores, etc.) tratado como um agente autónomo, que pode ter como responsabilidade monitorizar, controlar ou otimizar o funcionamento da rede.

A arquitetura do *software* adotada no projeto *MASGrid* encontra-se dividida em 3 camadas: DMS/SCADA (onde se realizam tarefas globais, e fornecem estratégias de alto nível para otimização e reconfiguração), *Agent Layer* (responsável pela otimização ou reconfiguração da topologia da rede), e *Real-Time Control Layer* (executa as ações previstas pelos agentes). A arquitetura do projeto permite que sejam suportadas as funções de *Self-Healing*, *Self-Optimization*, *Self-Monitoring* e diagnóstico, e reconfiguração automática da topologia da rede [33].

## 2.5 Síntese

Ao longo do presente capítulo foi abordada a alteração do paradigma em torno da arquitetura dos sistemas elétricos de energia, com o emergir das novas redes de energia dotadas de inteligência e controladas com base em *software* adequado.

O paradigma atual dos sistemas elétricos de energia permite a sua organização em micro-redes, definida como uma rede de BT que agrega várias microfuentes modulares de geração de energia, constituindo ótimas soluções para locais remotos, de difícil eletrificação e/ou zonas onde a rede elétrica apresenta uma considerável debilidade, e ainda para alimentar cargas críticas (hospital, e.g.).

As redes elétricas inteligentes, *Smart Grids*, acrescentam inteligência e tecnologias de informação e comunicação bidirecionais ao longo da rede, para que todos os intervenientes (transformadores, proteções, produção, consumo, sensores, interruptores, entre mais) funcionem com o objetivo comum de otimização e gestão dos recursos energético

Alguns dos benefícios das SG passam por uma melhoria da fiabilidade e da qualidade de energia, bem como da capacidade de resistência a perturbações, além de se verificar um aumento das possibilidades de escolha do consumidor, disponibilizando-se novos produtos, serviços e mercados.

A dotação de inteligência, bem como as restantes medidas que têm promovido a alteração do paradigma dos sistemas elétricos de energia, tornam o controlo daqueles mais complexo. De entre as ferramentas que se afiguram capazes de gerenciar e controlar as redes “inteligentes”, destacam-se as baseadas em sistemas multiagentes, SMA, cujo potencial foi comprovado em sistemas industriais.

No próximo capítulo será apresentada a arquitetura adotada para o SMA, sendo identificados os diferentes tipos de agentes intervenientes, bem como as estratégias e mecanismos de cooperação entre agentes, que se pretendem implementar.

### **3 Arquitetura do Sistema Multiagente**

A gestão e otimização do funcionamento das MR é um passo fundamental para a proliferação deste conceito, sendo para isso necessário conferir-se às MR uma maior sustentabilidade, independentemente de estas se encontrarem ou não conectadas à rede pública.

Como foi referido anteriormente, o controlo dos processos funcionais de uma MR pode ser efetuado com base num sistema multiagente, que seja capaz de gerir todos os intervenientes, representados por agentes, segundo uma perspectiva de cooperação. Com o fim enunciado, será apresentada a arquitetura base que um SMA deve conter para que possa gerir de modo otimizado e inteligente o funcionamento de uma MR, apresentando-se os diversos tipos de agentes requeridos, além das estratégias e mecanismos de cooperação entre esses mesmos agentes, quer o sistema esteja a funcionar normalmente, quer ocorra um determinado tipo de avaria/falha que impossibilite a ligação à rede pública, denominado aqui de modo crítico/emergência.

Ao longo do presente capítulo serão explorados os principais comportamentos e mecanismos dos diversos agentes, para a gestão de uma MR em modo normal ou crítico, e segundo estratégias com diferentes graus de otimização e inteligência. Para esse efeito, destaca-se a projeção de mecanismos direcionados para o controlo das cargas críticas (priorização, deslastre e escalonamento), além dos processos de previsão (*forecasting*) da produção com base na informação meteorológica, conforme exposto ao longo das próximas secções.

#### **3.1 Identificação dos Agentes e dos seus Atributos**

Para otimizar e gerir de uma forma sustentável e eficiente uma micro-rede que tem a possibilidade de estar interligada à rede pública de distribuição, foram identificados três tipos fundamentais de agentes, produtores, consumidores, e de armazenamento de energia, cujo enquadramento em relação à importância e posição para o sistema de interesse, será efetuado nesta secção.

##### **3.1.1 Agentes Produtores**

Os agentes produtores são responsáveis pela gestão da energia proveniente das unidades de MG, disponibilizando energia aos consumidores domésticos, ou solicitando o seu armazenamento aos agentes responsáveis por esse processo (os agentes de

armazenamento de energia), atendendo à produção disponível. Os produtores devem ser capazes de avaliar qual a produção expetável para um curto período temporal seguinte, recorrendo ao histórico de produção, ou através de um processo preditivo, com base em previsão meteorológica. Os agentes produtores possuem certas características que os identificam, tais como o ID (código identificativo), o tipo de produtor (renovável ou não-renovável), a potência instantânea que podem debitar, além da potência máxima.

Como foi referido, um dos principais atributos de um agente produtor é a gestão da energia gerada nas unidades responsáveis por esse fenómeno. Assim, a previsão e utilização de modelos de *forecasting* com base em previsão meteorológica assume bastante interesse no âmbito das MR. De facto, uma previsão meteorológica fidedigna pode auxiliar bastante o processo de gestão de uma MR que incorpore fontes renováveis de energia, a partir de uma estimativa da produção daquelas, em especial quando existem variações nas condições meteorológicas em curtos espaços de tempo.

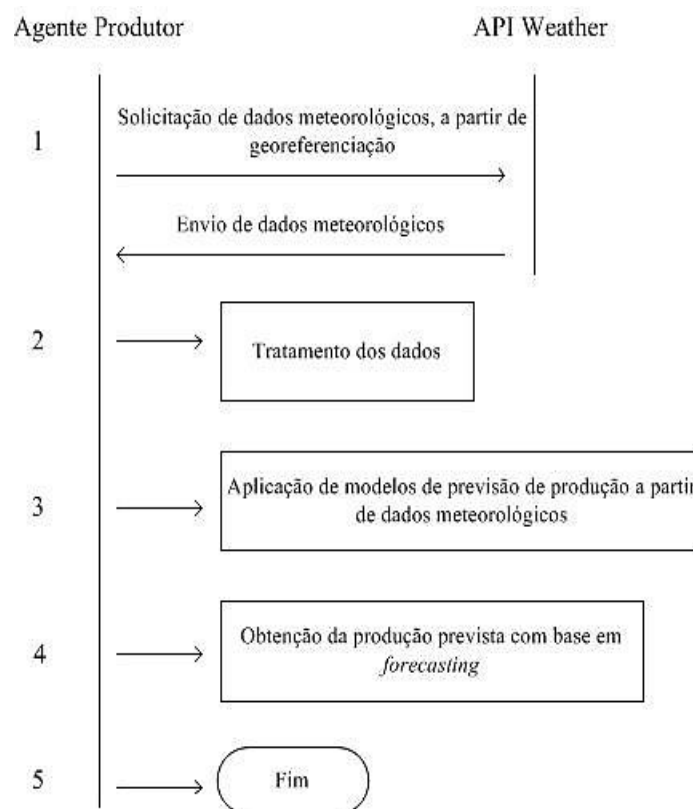


Figura 3.1- Aquisição e processamento de dados meteorológicos para previsão da produção, por parte dos agentes produtores.

A abordagem seguida para o *forecasting* encontra-se ilustrada na Figura 3.1. Resumidamente, os agentes produtores devem enviar uma solicitação para o fornecimento dos dados meteorológicos pretendidos (incluindo as coordenadas de latitude e longitude do local), para a aplicação *Web* utilizada.

A aplicação *Web* recebe a solicitação e processa a informação, enviando a resposta para os agentes produtores (em formato XML, por exemplo) que, por sua vez, procedem ao tratamento dos dados fornecidos. De seguida, os agentes aplicam um modelo de determinação da produção futura, utilizando um algoritmo embebido em cada agente produtor para a obtenção da produção expetável, que dependerá do tipo de unidade de geração de energia. Por exemplo, no caso de uma turbina eólica será requerida a informação da curva de potência dessa turbina, além das características nominais da própria turbina. No caso de uma unidade fotovoltaica será requerida informação relacionada com os rendimentos dos módulos, além de um modelo de conversão da temperatura em valores de radiação, caso a aplicação *Web* não a disponibilize.

### **3.1.2 Agentes Consumidores**

Os agentes consumidores representam os consumidores de energia, bem como as suas cargas. Na arquitetura da rede, os agentes consumidores têm a responsabilidade de gerir a procura de energia por parte do consumidor, no modo mais económico e energeticamente vantajoso para o utilizador, controlando a energia que será disponibilizada para o funcionamento das diversas cargas identificadas nos consumidores, sendo capazes de priorizar e gerir as diversas cargas de acordo com a sua importância, na perspectiva do utilizador.

Os consumidores podem ser caracterizados com base no seu ID, no tipo de consumidor (doméstico, serviços, etc.), e na potência máxima de ligação à rede, isto é, a potência máxima que podem requerer num determinado intervalo.

O agente consumidor assumirá um papel preponderante quando ocorrer qualquer impedimento na ligação à rede elétrica, efetuando o deslastre, escalonamento e/ou priorização das suas cargas, consoante a disponibilidade de energia, tendo em consideração ocorrências anteriores. Além disso, este agente deverá ser capaz de solicitar a energia aos elementos de armazenamento de modo antecipado, para evitar que seja requerido o fornecimento de energia à rede em períodos tarifários não económicos.

Na Figura 3.2 é proposto um processo de solicitação de energia por parte dos agentes consumidores em função do período do dia (económico ou não económico em relação à compra de energia à rede), e do modo de operação do sistema (normal ou de emergência). De acordo com a figura em questão, quando a MR operar no modo normal

e em período não-económico, os agentes consumidores começarão por solicitar energia aos agentes produtores, seguidamente aos agentes fixos de armazenamento, depois ao veículo elétrico (EV), e em última instância à rede de distribuição.

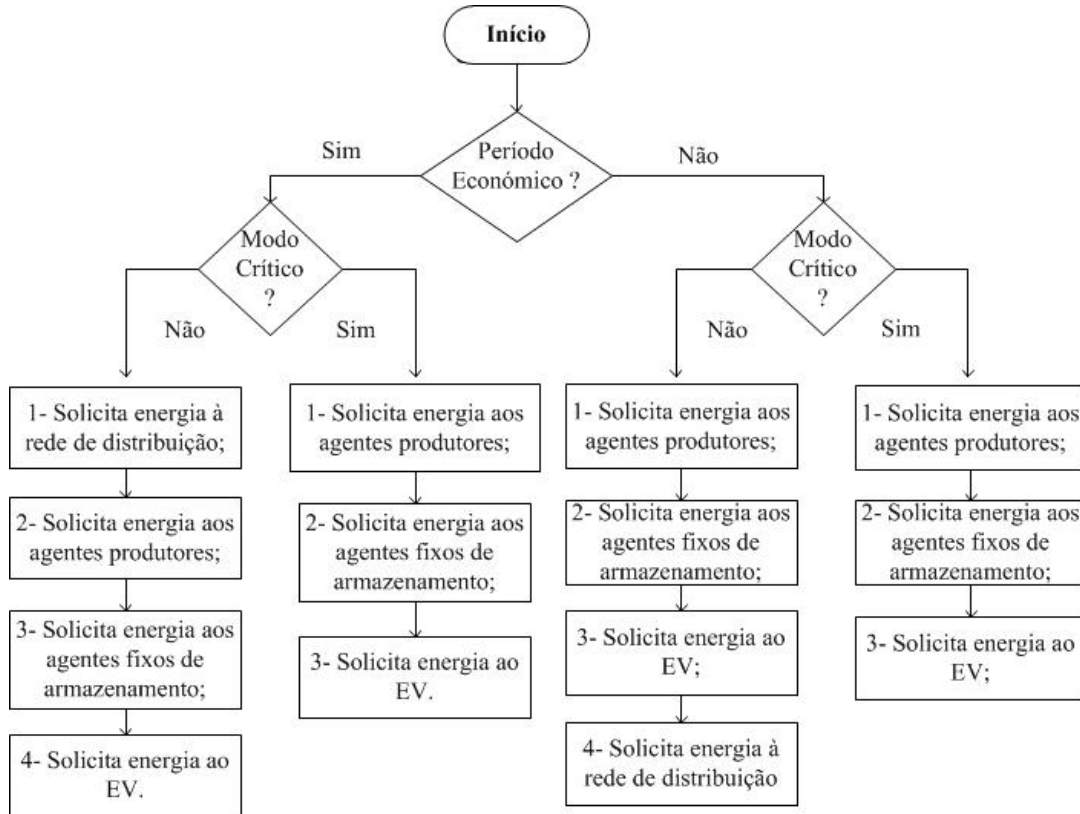


Figura 3.2- Algoritmo de gestão da procura de energia, por parte dos agentes consumidores.

### 3.1.3 Agentes de Armazenamento de Energia

Os agentes armazenadores de energia representam qualquer elemento de armazenamento de energia sob as mais diversas formas, quer seja elétrica, química, cinética ou calor. Estes agentes podem ser caracterizados com base no seu ID, e nos valores máximos e mínimos de energia que podem armazenar, além da potência máxima que podem fornecer em caso de solicitação de fornecimento de energia, e também da potência máxima com que podem alocar a energia proveniente das mais diversas fontes. Na arquitetura aqui apresentada, considera-se a possibilidade de armazenamento de energia elétrica em bancos de baterias e/ou veículos elétricos a baterias.

A otimização em relação à utilização das baterias é garantida por estes agentes que, além de imporem o recurso às baterias entre os valores limite pretendidos, restringem igualmente qual a quantidade máxima de energia utilizável e carregável,

num determinado período de tempo. A utilização de um modelo de gestão dos fluxos de energia para os elementos de armazenamento constitui um dos aspetos importantes da arquitetura apresentada, tendo sido explorado o modo de funcionamento proposto e detalhado no Anexo A, para o qual se propuseram os algoritmos de controlo dos processos de carga e descarga das baterias apresentados na Figura 3.3 e na Figura 3.4, respetivamente.

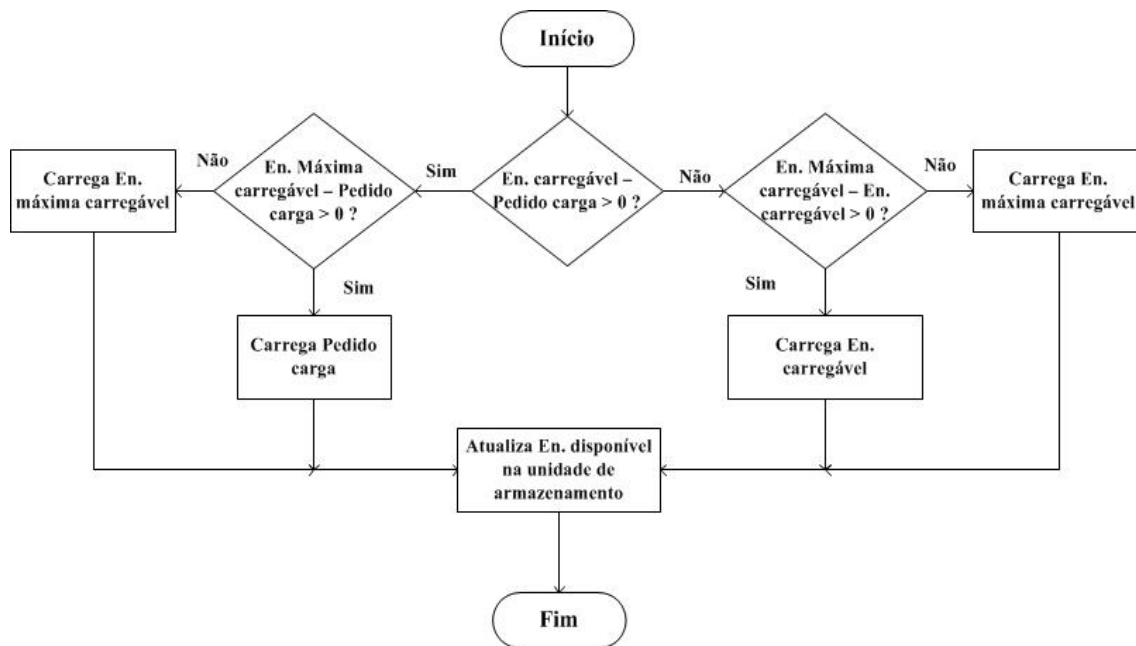


Figura 3.3- Algoritmo do processo de carga das baterias, por parte dos agentes de armazenamento.

Em relação ao processo de carga, o agente de armazenamento começa por verificar se o pedido de carga efetuado supera o espaço disponível na sua unidade de armazenamento. Se tal fato se verificar, o agente compara o espaço que tem disponível para alocar energia, com a quantidade máxima de energia carregável no intervalo de tempo em questão. Se a energia máxima carregável no período em análise for superior à energia alocável na unidade de armazenamento, então o agente permitirá a carga da energia possível. Se a energia máxima carregável no período de tempo em questão for inferior ao máximo que a unidade de armazenamento pode suportar mediante o seu estado de carga, então o agente autorizará a carga da energia máxima carregável para o período em análise.

No final do processo, o agente atualiza o valor da quantidade de energia que tem armazenado.

Por outro lado, se o pedido de carga não superar a capacidade disponível na unidade de armazenamento, o agente irá verificar se o pedido de carga é superior à

energia máxima carregável para o período em análise. Se isso se confirmar, será permitida a alocação da energia até ao valor máximo carregável para esse período. Caso contrário, o agente permitirá a carga conforme o pedido efetuado.

No que diz respeito ao processo de descarga das baterias, e conforme o algoritmo apresentado na Figura 3.4, o agente de armazenamento numa primeira instância verifica se o pedido de fornecimento de energia que lhe foi endereçado supera a energia que este tem disponível na unidade de armazenamento correspondente. Se tal fato se confirmar, o agente começa por analisar se a energia que tem disponível é inferior ao máximo que pode fornecer no intervalo em questão. Caso seja verdade, o agente fornecerá toda a energia disponível até ao seu estado de carga mínimo, senão fornecerá o valor máximo admissível para esse intervalo.

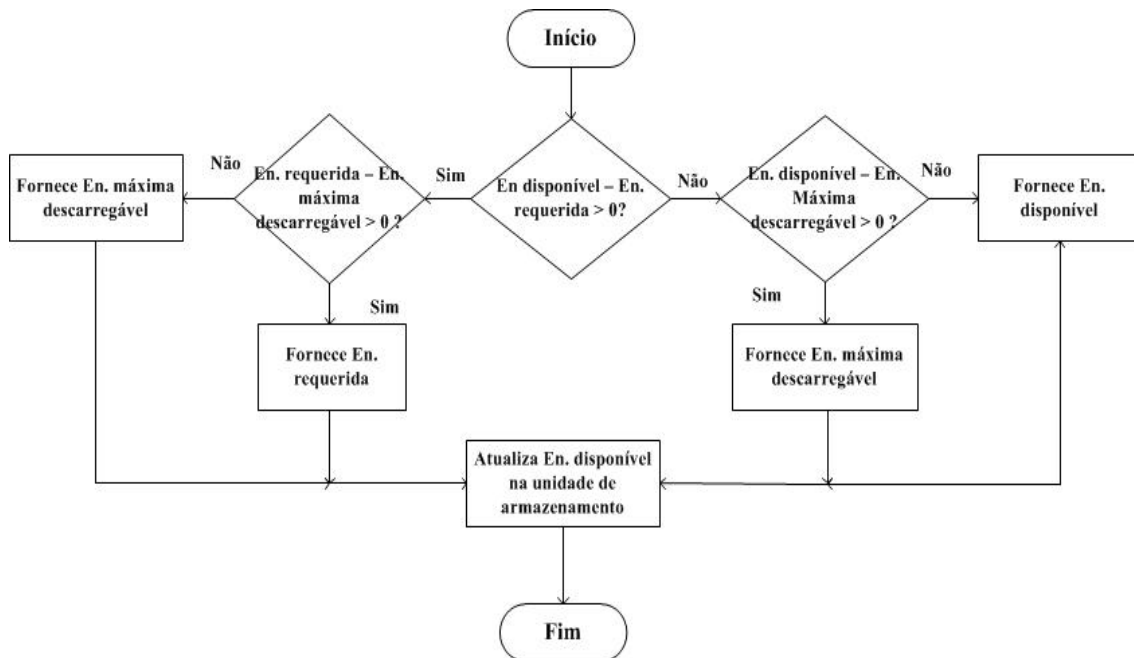


Figura 3.4- Algoritmo do processo de descarga das baterias, por parte dos agentes de armazenamento.

Se a quantidade de energia solicitada ao agente for inferior à que este tem disponível, e se não ultrapassar o valor máximo que o agente pode ceder nesse intervalo de tempo, então será permitido o fornecimento de acordo com a solicitação. Se, por outro lado, o valor solicitado for superior ao máximo que a unidade de armazenamento pode disponibilizar para o intervalo temporal, então o agente fornecerá o valor máximo que lhe é possível.

Tal como no processo de carga, depois de fornecer energia o agente atualizará o valor do seu estado de carga.

## 3.2 Estratégias e Mecanismos de Cooperação

Para que o funcionamento do sistema ocorra de forma otimizada e eficaz, torna-se fundamental que os agentes considerados interajam e cooperem entre si, adotando as decisões mais sustentáveis em função das circunstâncias existentes, e favorecendo a operação global da MR, segundo uma perspectiva comunitária.

A interação entre os diversos agentes segundo uma vertente cooperativa permitirá que sejam encontradas soluções que beneficiem de igual modo os diversos intervenientes, podendo inclusive limitar-se e/ou escalonar-se a operação das cargas, em todos os consumidores, caso não exista energia suficiente para suprir todas as necessidades dos mesmos.

A arquitetura projetada para o SMA permite a adoção de algumas estratégias e mecanismos de cooperação, dependendo de como a MR se encontra a operar. Quando a MR estiver conectada à rede elétrica de distribuição, operará em modo normal. Se for detetado qualquer problema e/ou avaria na ligação da MR à rede pública, esta iniciará o funcionamento em modo crítico. Em cada um dos modos de funcionamento, serão aplicadas e testadas diferentes estratégias, que compreendem diferentes níveis de sofisticação do modelo implementado, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Modos de operação definidos para a Micro-Rede.

<b>Modo</b>	<b>Normal</b>	<b>Emergência/Crítico</b>
<b>Estratégia</b>		
Básica	Básica	Básica
Inteligente	Básica + Gestão e otimização de fornecimento de energia e carga das baterias	Básica + Priorização, deslastre e escalonamento de cargas

As diferentes estratégias aplicáveis em cada um dos modos de funcionamento serão apresentadas nas próximas subseções.

### 3.2.1 Estratégia Básica para o Modo Normal

A Estratégia Básica de operação da MR apoia o seu funcionamento em dois processos fundamentais. No primeiro, os agentes consumidores tentam suprir as suas necessidades, solicitando para isso o fornecimento de energia aos agentes produtores e aos agentes de armazenamento, através de interações, havendo ainda a possibilidade de comprar energia à rede elétrica. No segundo processo, e após os consumidores terem

realizado o seu processo de solicitação do fornecimento de energia, os agentes produtores tentam alocar a energia que não lhes foi solicitada, requerendo aos agentes armazenadores que aloquem a energia excedente, existindo ainda a possibilidade desta ser vendida à rede elétrica.

### 3.2.1.1 Solicitação do Fornecimento de Energia

O processo de interação entre agentes para satisfazer as necessidades energéticas dos consumidores deve ser iniciado pelos agentes consumidores que representam os utilizadores finais de energia, e que irão enviar solicitações para fornecimento de energia aos agentes produtores, aos agentes armazenadores de energia, e à companhia elétrica responsável pela distribuição de eletricidade, caso seja necessário, conforme exposto na Figura 3.5, onde se apresentam as interações entre os agentes consumidores e os restantes agentes.

A decisão sobre qual a ordem sequencial a seguir, em termos de solicitações de fornecimento de eletricidade, isto é, se numa primeira abordagem, se questionam os agentes produtores, os agentes de armazenamento de energia, ou a companhia elétrica, será dependente da estratégia de otimização adotada, cabendo ao agente consumidor decidir qual a opção mais rentável para si.

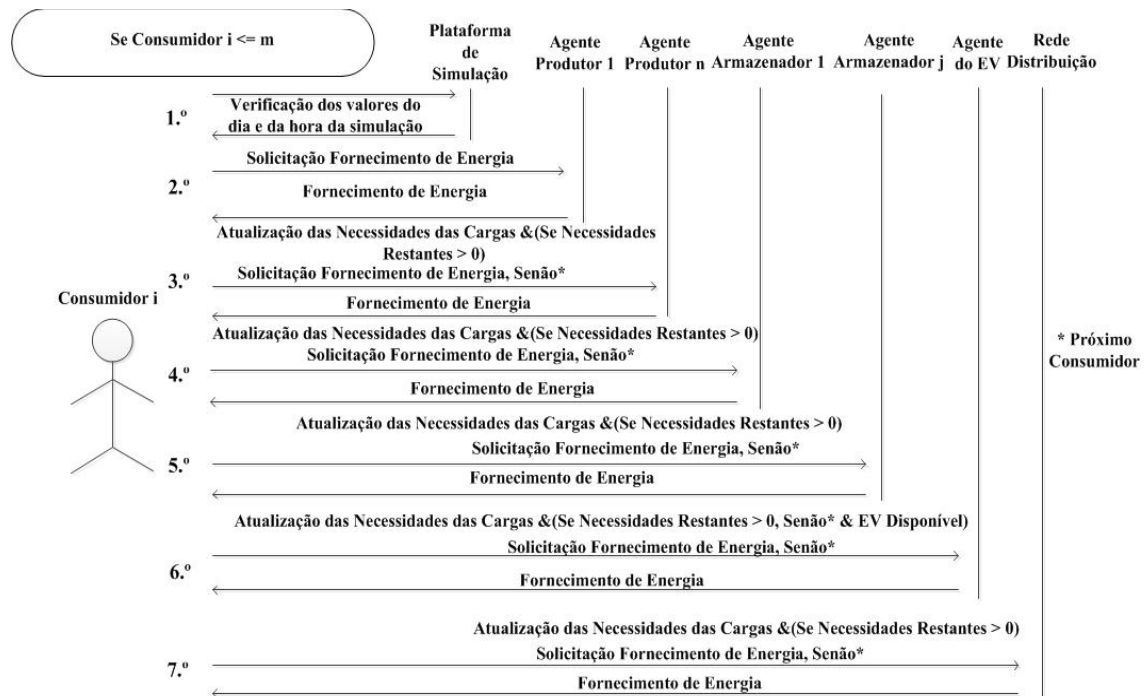


Figura 3.5- Interação entre os agentes consumidores e os agentes restantes, para supressão das necessidades e fornecimento de energia.

Como se considera que nesta abordagem o sistema não é dotado de inteligência, então serão solicitados em primeiro lugar os agentes produtores, que deverão fornecer a energia que lhes foi solicitada, desde que a tenham disponível. Se a energia disponibilizada não for suficiente para satisfazer as necessidades, então será solicitado o fornecimento da energia em falta ao próximo produtor, desde que ainda haja algum produtor disponível.

Quando já não existirem produtores disponíveis, e se as necessidades não tiverem sido totalmente supridas, serão enviados pedidos de fornecimento de energia aos agentes armazenadores, que irão responder a esse pedido, tendo em consideração o estado de carga mínimo normalmente admissível para os seus elementos de armazenamento, bem como a energia máxima que pode ser disponibilizada num determinado período de tempo, conforme o algoritmo da Figura 3.4, do processo de descarga das baterias.

Considerando a presença de um EV, e sendo este um elemento volátil de armazenamento, num qualquer consumidor residencial, a disponibilidade do fornecimento de energia por parte daquele, está dependente da sua presença na habitação. Além de que será indispensável garantir que no próximo período expeável de utilização do EV, este tenha armazenada a energia suficiente para efetuar o seu percurso habitual, de acordo com o histórico do seu funcionamento. As restrições em relação ao estado de carga mínimo da bateria do EV, bem como a energia máxima que lhe pode ser solicitada num determinado período temporal, são igualmente contemplados.

Após o fornecimento de energia por parte dos agentes armazenadores, caso ainda existam necessidades, dever-se-á solicitar o apoio da rede, para que esta disponibilize a energia em falta no consumidor. Qualquer pedido de fornecimento de energia à rede elétrica será da responsabilidade do agente consumidor, que deverá respeitar o valor máximo da potência de ligação estabelecido para o consumidor doméstico.

Após todos os consumidores terem efetuado a sucessão de interações na procura de suprirem das suas necessidades, é altura de os agentes produtores iniciarem um processo iterativo para alocarem a produção restante, caso exista.

### 3.2.1.2 Alocação da Energia Excedente

Uma vez que, os consumidores já solicitarem o fornecimento de energia, cabe então aos agentes produtores tentarem encaminhar a energia restante, i.e., que não foi requerida, pelo que irão iniciar a comunicação com os agentes de armazenamento.

A interação entre os agentes produtores e os agentes armazenadores de energia é ilustrada na Figura 3.6, onde é patente que os agentes produtores tentam alocar a energia excedentária, que foi gerada nas fontes de energia pelas quais são responsáveis.

O processo de comunicação entre os agentes em causa é iniciado pelo produtor que, para se inteirar da energia disponível, irá verificar o valor do dia e da hora da simulação, além de atualizar o valor da energia disponível, contando com a que já foi cedida aos consumidores.

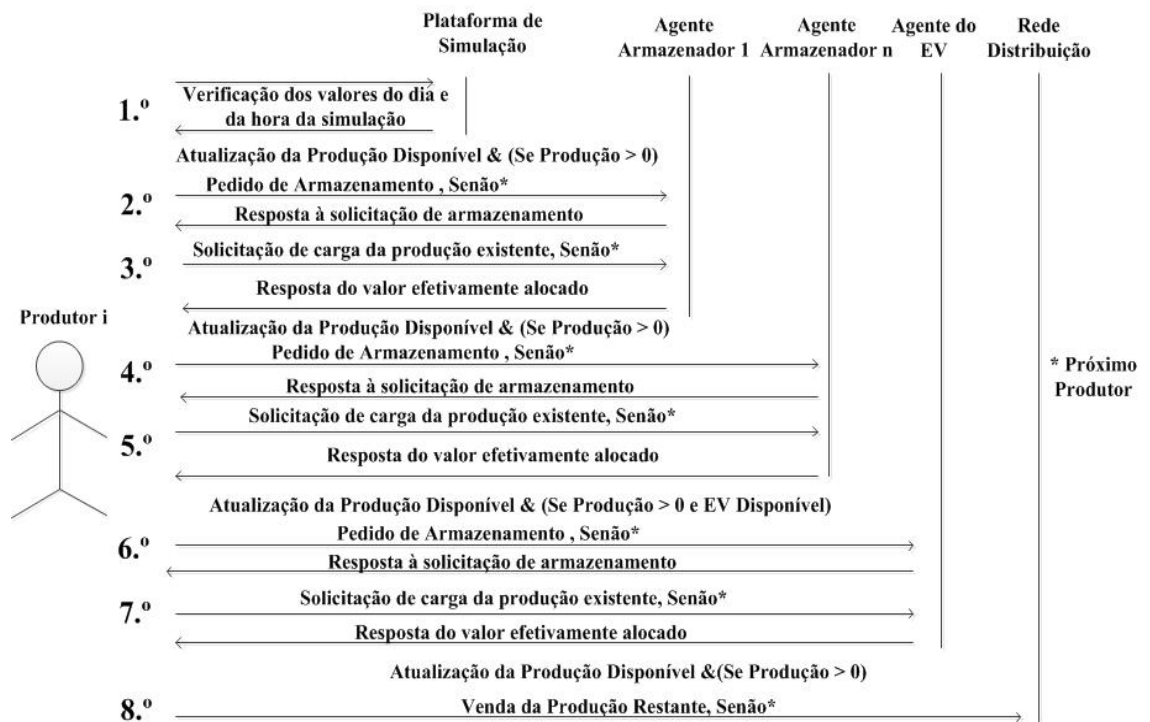


Figura 3.6- Interação entre os agentes produtores e os agentes armazenadores, para alocação da energia proveniente das unidades de geração de energia controladas pelos agentes produtores.

Seguidamente, o agente produtor irá tentar alocar a sua produção disponível, iniciando uma sucessão de interações com os agentes de armazenamento. Numa primeira instância são questionados os agentes das baterias, e posteriormente, caso tal seja requerido, será solicitada a carga da bateria ao EV, se este se encontrar disponível.

De um modo simplificado, o agente produtor envia um pedido para um agente armazenador, para tentar alocar toda a energia excedente, e que irá responder mediante a quantidade de energia máxima que pode armazenar, com base na quantidade máxima

armazenável num dado intervalo, conforme o algoritmo de carga das baterias da Figura 3.3. Recorde-se que as variáveis relativas ao processo de carga das baterias, se encontram diretamente relacionadas com os equipamentos utilizados para o armazenamento de energia, obedecendo às indicações do fabricante.

Após receber a resposta do agente armazenador, o agente produtor envia um pedido para carregar aquilo que é possível, e irá verificar se ainda existe alguma produção por alocar. Se a produção for totalmente alocada, passa-se para o próximo produtor caso haja. Por outro lado, se depois de supridas as necessidades dos consumidores existir energia que não foi requerida, então será enviado um pedido de carregamento ao próximo agente de armazenamento caso exista.

Na eventualidade de, depois de solicitado o carregamento a todos os elementos de armazenamento, ainda haver produção por colocar, então esta será vendida à rede elétrica.

### **3.2.2 Estratégia Inteligente para o Modo Normal**

Na estratégia inteligente de operação da MR para o modo normal serão utilizados mecanismos para otimização e controlo no fornecimento de energia, nomeadamente através da carga antecipada dos elementos de armazenamento, por solicitação dos agentes consumidores (e tendo em consideração os valores médios das suas necessidades e da produção), e controlando também a sucessão de solicitações de fornecimento de energia, isto é, com base no período do dia, gerir a procura de energia dos consumidores do modo mais economicamente vantajoso.

Considerando que o preço da eletricidade praticado pelas empresas de distribuição, varia consoante o período do dia, pretende-se evitar ao máximo o recurso à mesma em períodos fora de vazio, isto é, quando a energia é mais cara. Assim, será necessário que cada agente consumidor saiba quanto costuma consumir em período não-económico, para que posteriormente, em período económico solicite aos bancos de baterias que carreguem essa quantidade de energia, de modo a não recorrer à rede no período já mencionado, conforme o mecanismo simplificado apresentado na Figura 3.7 embebido nos agentes fixos de armazenamento.

De um modo sucinto, os agentes armazenadores irão inquirir os agentes produtores e os agentes consumidores, relativamente aos valores médios de produção e de consumo verificados nos últimos sete dias, conforme os passos 1 e 2 da Figura 3.7. Após esta primeira fase, o agente armazenador efetua o cálculo da diferença entre o

somatório da produção de todos os agentes produtores e o somatório do consumo de todos os agentes consumidores, que se apresenta no passo 3 da mesma figura.

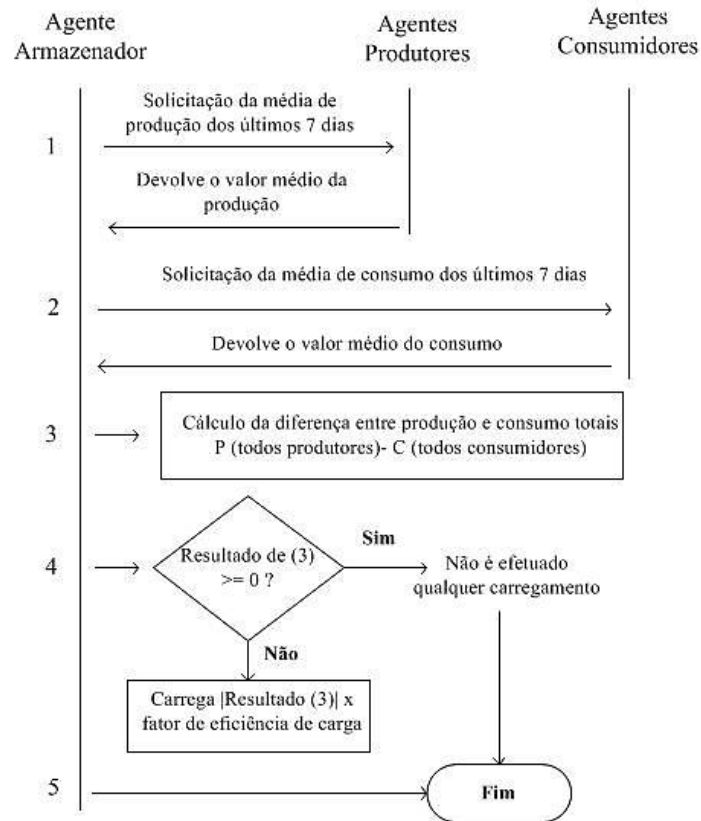


Figura 3.7 -Mecanismo simplificado de carga das baterias em período económico, implementado nos agentes de armazenamento de energia.

Mediante o valor resultante, o agente de armazenamento tomará uma decisão, como se assinala no passo 4. Se o valor resultante de 3 for maior ou igual a zero (podendo ser adicionada uma pequena margem de incerteza associada à variabilidade possível no consumo e na produção), não será efetuado qualquer carregamento das baterias. Caso a resultante seja inferior a zero, então o agente armazenador irá carregar a diferença entre o total da produção e o total do consumo, multiplicado por um fator entre 5% a 15% superior à unidade à custa da eficiência de carga de um agente de armazenamento, de modo a evitar que os agentes consumidores se vejam na necessidade de recorrer à rede em período não-económico.

Uma função importante que a arquitetura do SMA deve contemplar a gestão do processo de procura de energia por parte dos agentes consumidores. Assim, em período de vazio os agentes consumidores irão optar numa primeira instância por solicitar o fornecimento de energia diretamente à rede, conforme a Figura 3.2 anteriormente apresentada. Deste modo, a produção das unidades de MG será encaminhada para os

sistemas de armazenamento, por solicitação dos agentes produtores aos agentes de armazenamento. Esta alteração relativamente à entidade à qual é requerida numa primeira abordagem o fornecimento de energia é efetuada com o intuito de se armazenar a energia proveniente das unidades distribuídas de geração de energia, para utilização posterior, num período em que a energia é à partida mais cara. Este processo implica uma interação de todos os agentes em busca do bem comum, já que, em caso de cada agente querer maximizar o seu benefício em termos económicos, tal filosofia não seria facilmente praticável.

Existe uma outra consideração que limitará o funcionamento do sistema, já que a potência solicitada por cada consumidor num dado intervalo de tempo deve ser no máximo igual à potência contratada, isto é, a potência de ligação à rede.

Considere-se como exemplo a situação em que num dado consumidor, além de se satisfazerem as cargas, se pretende efetuar a carga de um banco de baterias. Se a potência das cargas for inferior à potência contratada, mas o conjunto de cargas e carregamento do banco de baterias superar a potência contratada, então no máximo a potência de carga do banco de baterias corresponderá à diferença entre a potência contratada, e a potência solicitada pelas cargas.

### **3.2.3 Estratégia Básica para o Modo Crítico**

A Estratégia Básica de operação de uma MR em modo crítico, segue os mesmos princípios de interação entre agentes, que se utilizam quando a micro-rede opera em modo normal, não sendo dotada de mecanismos e processos inteligentes de gestão e otimização. Neste caso, a principal diferença é que não existe a possibilidade de comprar e/ou vender energia à rede elétrica de distribuição, uma vez que, a ligação a essa mesma rede se encontra impedida.

Tal como acontece em modo normal, e tratando-se da estratégia básica de funcionamento, não serão utilizados quaisquer mecanismos e/ou processos inteligentes de gestão da energia disponível, pelo que, enquanto os agentes produtores puderem disponibilizar energia e/ou os agentes armazenadores tiverem alguma reserva, os consumidores poderão satisfazer normalmente as suas cargas. Quando a produção não estiver disponível, e os agentes armazenadores não puderem disponibilizar mais energia, os consumidores não terão hipótese de satisfazer as suas necessidades.

### 3.2.4 Estratégia Inteligente para o Modo Crítico

Na estratégia mais otimizada para a situação de falha e/ou avaria na ligação à rede elétrica, o plano de ação é bastante diferente do modo normal.

Após ter sido detetada uma anomalia na ligação à rede elétrica, os agentes consumidores desencadearão um conjunto de ações de cooperação com os restantes agentes, com vista a promover a melhor gestão possível das cargas que representam, como sugere a Figura 3.8. Os agentes consumidores começarão por calcular o período expectável para a falha na ligação à rede, com base nos registos históricos dessas ocorrências, conforme o ponto 1 da figura anteriormente mencionada. Após este cálculo, no ponto 2, cada agente consumidor deve calcular o consumo esperado para as suas cargas mais críticas, para o período de tempo obtido, através de um processo de priorização de cargas.

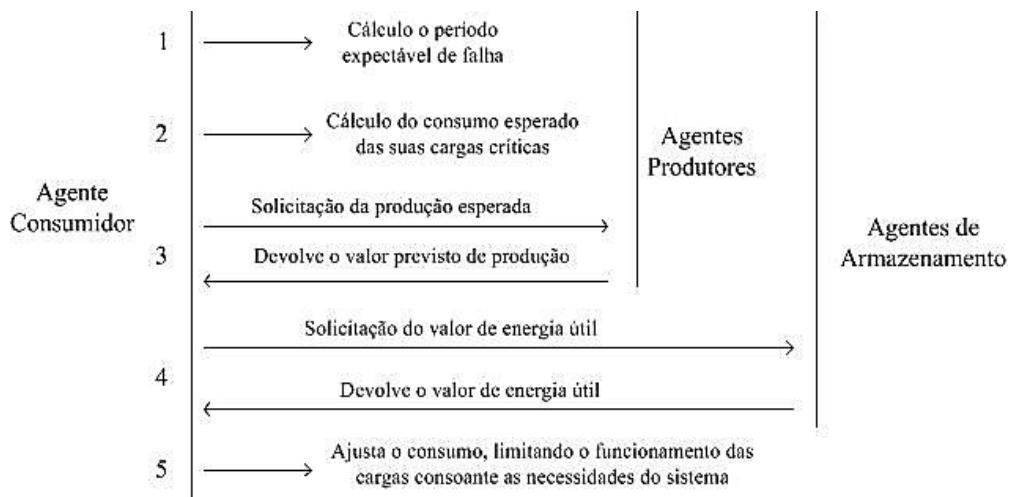
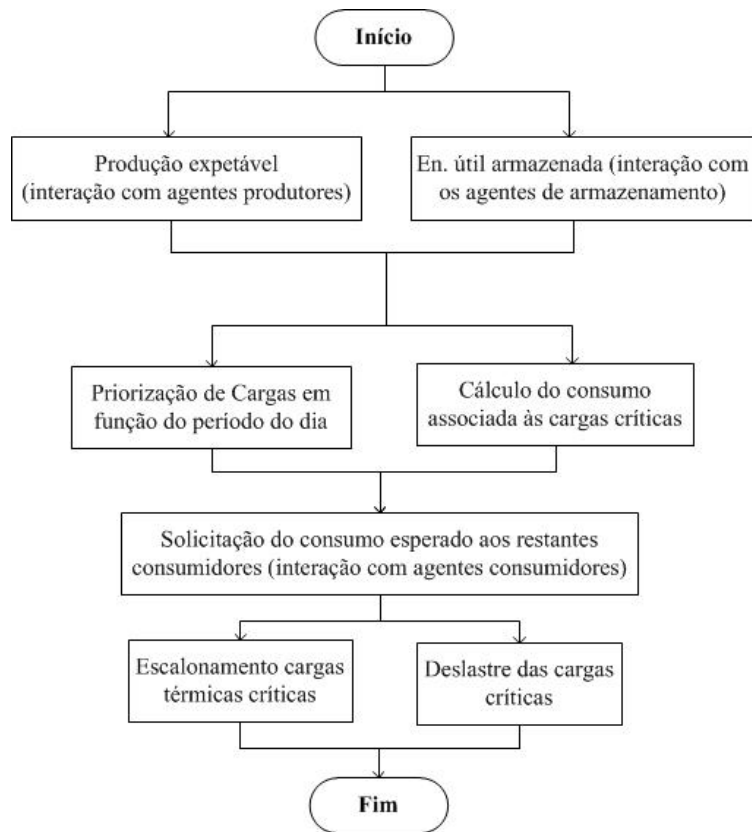


Figura 3.8- Conjuntos de comportamentos e interações desencadeados nos agentes consumidores, quando é detetada uma falha na ligação à rede.

A escolha das cargas críticas depende da hora do dia, visto que, as cargas mais importantes na ótica do consumidor não serão certamente as mesmas à hora de almoço, ou de madrugada, devendo assim ser especificadas em cada consumidor em função do período do dia. No passo 3, o agente consumidor irá solicitar ao agente produtor o valor da produção expectável, para esse agente produtor, ao longo do período estimado para a falha. O agente produtor retorna esse valor, consoante os registos de produção dos últimos dias para o horário previsto para a falha, ou estimando a produção prevista através de um mecanismo de *forecasting*, introduzido anteriormente. Em 4, o agente consumidor irá solicitar ao agente de armazenamento o valor da energia útil disponível. O agente consumidor deverá retornar a informação, em função do estado de carga atual

do elemento de armazenamento que ele gere, e do estado de carga mínimo admissível nesse mesmo elemento. Por último, no passo 5, o agente consumidor irá limitar o funcionamento das suas cargas conforme as necessidades do sistema, isto é, conforme as informações disponibilizadas pelos restantes agentes.



**Figura 3.9-** Algoritmo da sequência de ações no modo de emergência, por parte dos agentes consumidores.

De acordo com a Figura 3.9, após o agente consumidor obter os valores da produção expetável e da energia útil disponível nas baterias, através da interação com os agentes necessários, serão iniciados dois processos de gestão e otimização das cargas existentes no consumidor. Importa frisar que os agentes consumidores irão interagir entre si, de modo a ajustarem o consumo das suas cargas (com base no deslastre e escalonamento) à energia total disponível. Deslastrear uma determinada carga implica diminuir a potência que a mesma pode requerer e /ou diminuir o tempo de funcionamento. O escalonamento implica uma redução na utilização de uma carga, num determinado período (pode ser uma redução total ou parcial), sendo o restante consumo deslocado para uma outra altura, posterior ao fim da avaria. Esta abordagem é indicada por exemplo para equipamentos de frio, ou para sistemas de aquecimento de água.

Conforme o projetado para a arquitetura do sistema, em modo crítico, primeiramente dever-se-á proceder ao deslastre e escalonamento de cargas e, apenas após este processo, utilizar a energia disponível nas baterias. Tal facto é facilmente compreensível, já que os processos em causa de priorização, deslastre, escalonamento e previsões de consumo e produção são valores estimados, consoante o valor médio dos históricos de falhas, ou seja, o tempo real de falha pode ser superior ao expectável. Assim ao utilizar-se a energia armazenada apenas em último caso, garante-se uma certa margem de manobra para este tipo de ocorrências, além do que podem ocorrer duas falhas consecutivas na ligação à rede, pelo que utilizar-se toda a energia disponível para o primeiro evento, não seria a medida mais inteligente.

### 3.2.4.1 Estabelecimento de Cargas Críticas

O processo de caracterização e deslastre de cargas críticas é apresentado na Tabela 3.2. Como já foi referido, a importância que uma carga assume na ótica do utilizador, varia consoante a hora do dia.

Tabela 3.2- Esquemas de deslastre de cargas críticas do sistema.

Período	Cargas Críticas (ordem de importância)	Nível	Nível	Nível	Nível	Nível	Nível
		1	2	3	4	5	6
<b>Início da Manhã, Almoço e Jantar (picos de consumo)</b>	1º	-	-	- 15 %	- 15 %	- 30%	- 50%
	2º	-	- 25%	- 25%	- 50%	- 50%	- 50%
	3º	- 50%	- 50%	- 75%	- 75%	- 75%	- 75%
	4º	- 50%	100%	-100%	-100%	-100%	-100%
<b>Fora dos grandes consumos</b>	1º	-	-	-	- 25%	- 50%	- 75%
	2º	-	-	- 25%	- 50%	- 50%	- 75%
	3º	-	- 50%	- 75%	- 75%	- 75%	- 75%
	4º	-50%	- 50%	- 75%	- 75%	- 75%	- 75%
	5º	- 50%	-100%	-100%	100%	-100%	-100%

Neste trabalho considera-se a distinção entre dois períodos de consumo dispares, o primeiro que envolve os picos normais de consumo, associados às primeiras horas da manhã, à hora do almoço, e hora do jantar, e um segundo período que envolve os intervalos temporais restantes. Para este trabalho, estipulou-se que no primeiro período são identificáveis quatro conjuntos de cargas críticas, e no segundo período cinco conjuntos de cargas críticas. A cada um destes conjuntos de cargas serão aplicados no

máximo seis níveis de deslastre, ou seja, de restrição/redução de consumo. Quanto mais importante uma carga se assumir, mais se deve adiar a restrição no seu funcionamento.

Como já foi introduzido, o escalonamento de cargas também é contemplado na arquitetura do sistema. Deste modo, quando o tipo de carga o exigir (essencialmente cargas térmicas como frigoríficos, congeladores ou sistemas de aquecimento de água), o consumo será restringido apenas em termos temporais, sendo repostos após o término da interrupção na ligação à rede.

#### **3.2.4.2 Deslastre de Cargas**

Depois de identificadas as cargas críticas do sistema para cada um dos períodos considerados, torna-se necessário definir o modo de como será gerido o processo de deslastre de cargas.

A abordagem a seguir passa pela análise da diferença entre os valores esperáveis de produção e do consumo das cargas críticas para o período estimado para a interrupção na ligação à rede, como sugerido na Figura 3.10, sendo a análise efetuada de forma particular para cada uma das várias iterações que possam existir no total do período de interrupção na ligação à rede, sendo que uma iteração corresponderá a uma unidade de tempo da simulação. Inicialmente, para cada iteração o deslastre aplicado corresponderá ao nível 0, ou seja não é aplicada qualquer restrição ao funcionamento das cargas consideradas críticas.

Quando para uma das iterações, a produção estimada for inferior ao consumo das cargas críticas, será dado início ao deslastre de cargas, sendo adicionado um nível de deslastre de cargas, sendo de seguida recalculada a resultante entre a produção esperável e o consumo estimado para a iteração em causa. Se o valor resultante for positivo avança-se para a iteração seguinte (onde é efetuada a mesma análise para o período de simulação imediatamente a seguir), caso contrário será repetido o processo, adicionando-se consecutivamente níveis de deslastre de cargas.

Se o deslastre de cargas atingir o nível seis, e mesmo assim a diferença entre a produção esperável e o consumo das cargas críticas for inferior a zero, então utilizar-se-á a energia disponível nos elementos de armazenamento. Se após este processo, o valor resultante for positivo, então será atualizada a quantidade de energia disponível nos agentes armazenadores, respeitando os limites de funcionamento implementados para os sistemas de armazenamento, e prossegue-se para a próxima iteração.

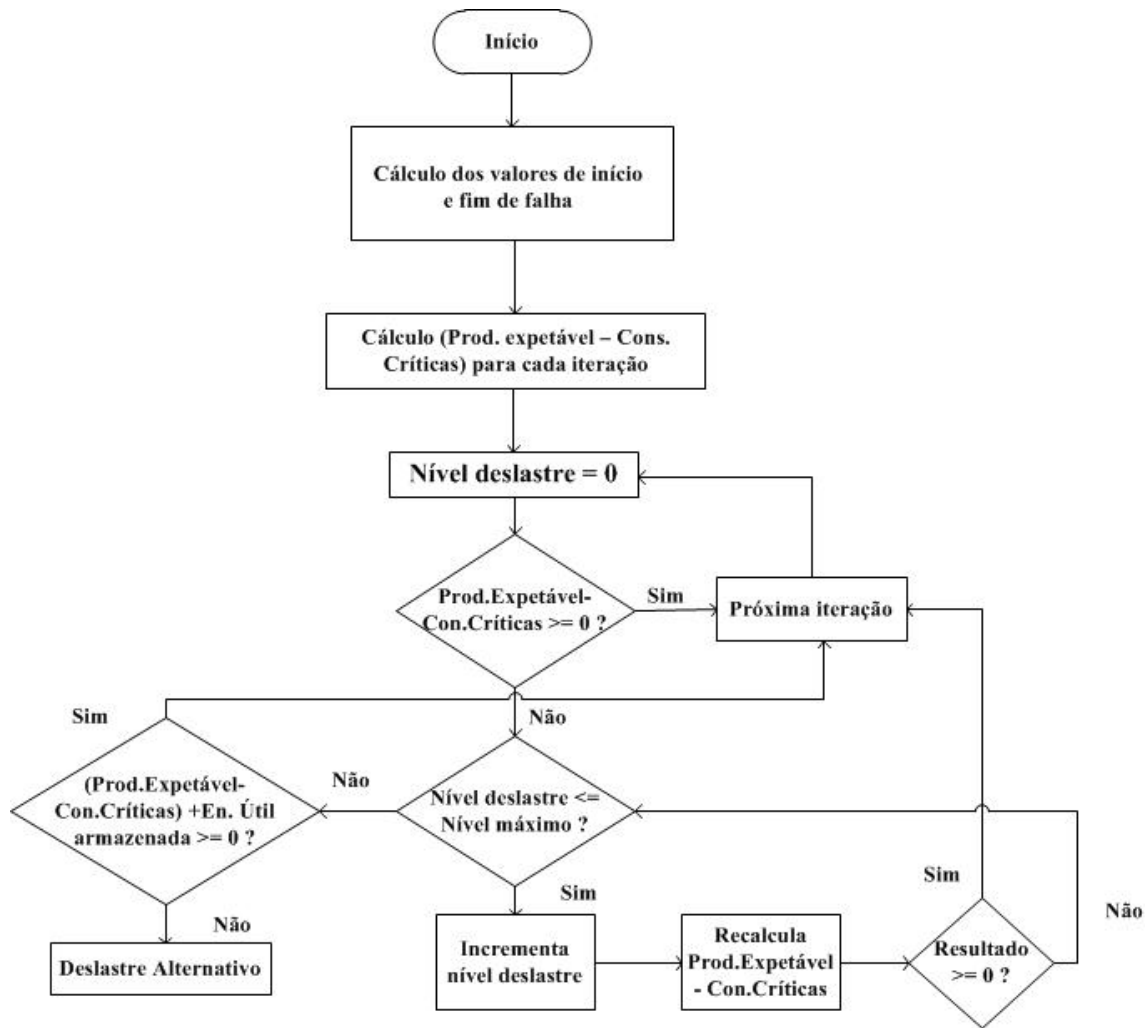


Figura 3.10- Algoritmo do processo de deslastre de cargas, implementado nos agentes consumidores.

Quando mesmo após ser somada a energia disponível que pode ser utilizada dos sistemas de armazenamento, o resultado para a iteração continuar negativo, então será iniciada uma estratégia diferente de atuação, com um deslastre de cargas alternativo.

No deslastre de cargas alternativo, ao invés de se aplicarem individualmente níveis sucessivos de deslastre de carga para cada iteração, serão aplicados níveis iguais de deslastre para o total das iterações, sendo após cada nível adicional de deslastre, verificado se em alguma dessas iterações, a diferença entre a produção expetável e o consumo das cargas críticas é negativo. Se essa situação se verificar será incrementado mais um nível de deslastre de carga para todas as iterações, e assim sucessivamente até se atingir o nível 6, ou até todas as iterações apresentarem valores positivos. Após ser atingido o nível 6, se continuarem a existir períodos em que o consumo das cargas críticas ainda ligadas supera a produção, será utilizada a energia disponível nas baterias enquanto esta existir.

### 3.2.4.3 Escalonamento de Cargas

O processo de escalonamento de cargas será efetuado em paralelo com o apresentado no passo anterior, estando o algoritmo do processo apresentado na Figura 3.11.

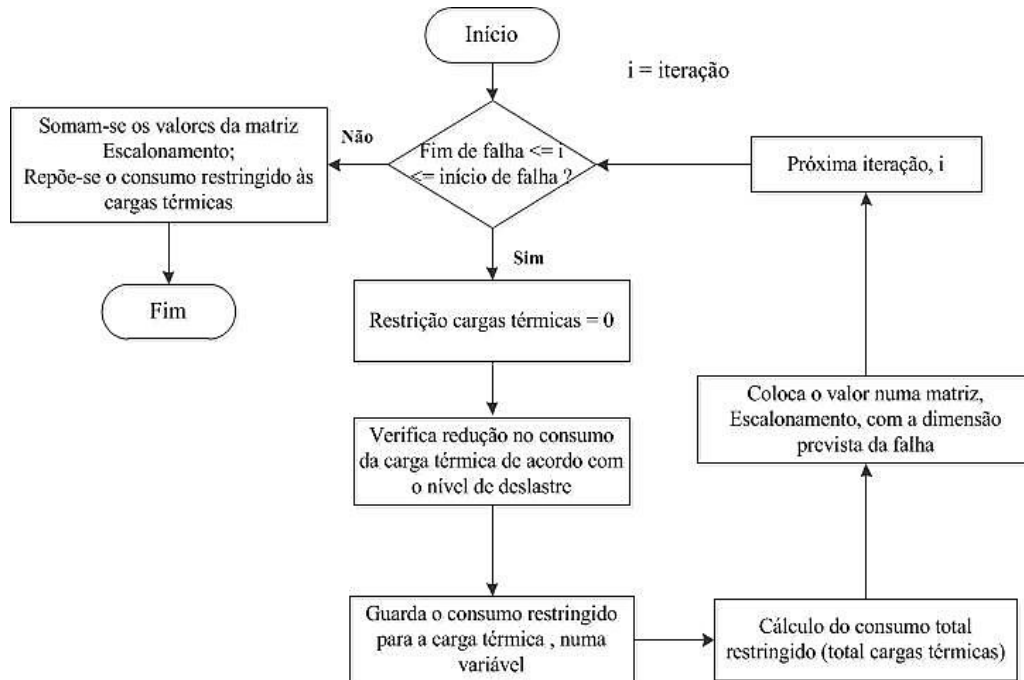


Figura 3.11- Mecanismo de escalonamento de cargas, embebido nos agentes consumidores.

De um modo sucinto, durante o período de interrupção na ligação à rede, ou seja, em modo crítico, quando a operação de uma carga térmica for restringida, então interessará aos agentes consumidores quantificar o valor dessa redução, sendo o valor guardado numa matriz, com a dimensão igual ao número de iterações,  $i$ , que se prevê existirem no período de interrupção. Quando o sistema voltar ao modo de funcionamento normal, isto é, após a falha, serão somados os valores colocados na matriz de escalonamento, sendo o consumo das cargas escalonadas repostas na sua totalidade, através de um incremento adicional no consumo.

### 3.3 Síntese

Ao longo do Capítulo 3 *Arquitetura do Sistema Multiagente* foram identificados três tipos de agentes que permitem modelar o funcionamento de uma MR: consumidores, produtores e armazenamento de energia.

Os primeiros gerem a procura de energia por parte dos consumidores domésticos e os segundos são responsáveis por alocar a produção proveniente das unidades de MG.

Os agentes armazenadores controlam as solicitações de energia aos bancos de baterias, além dos processos de carga e descarga dos mesmos.

Além de definidos os comportamentos dos agentes, foram estipulados dois modos de funcionamento (normal e crítico) e duas estratégias de operação (básica e inteligente), sendo apresentados os mecanismos contemplados nas possíveis conjugações entre os diferentes modos e estratégias.

No capítulo seguinte será apresentado o caso de estudo, bem como o comportamento e características dos elementos constituintes, nomeadamente dos consumidores, das unidades de geração de energia, e dos sistemas de armazenamento.

## 4 Caso de Estudo

A modelação de uma MR de estudo assume-se como um passo fundamental para se testarem e validarem as estratégias inteligentes e colaborativas de gestão em MR, introduzidas no capítulo anterior.

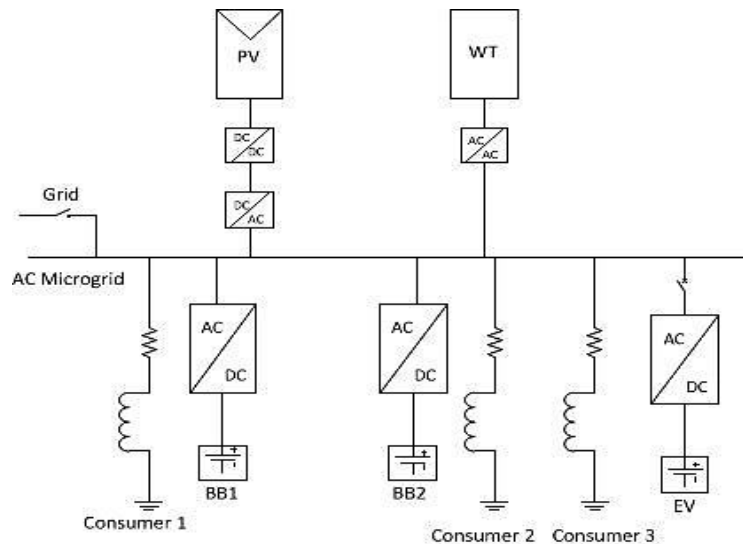
Neste capítulo são apresentadas a arquitetura e as características da MR que serviu como base para o estudo e implementação dos agentes na plataforma de simulação escolhida, e é modelado o comportamento e funcionamento dos seus principais constituintes. Desta forma, serão apresentados os diagramas de cargas sazonais adotados para os consumidores considerados, e também os diagramas de produção para as unidades de microgeração integrantes da MR. Além disso, será dado ênfase ao modelo de funcionamento das unidades de armazenamento de energia, orientado para um modo de exploração que potencie o tempo de vida útil, otimizando o modo de operação.

### 4.1 Arquitetura da Micro-Rede em Estudo

Como caso de estudo para verificação da sustentabilidade em MR proporcionada por sistemas multiagente, foi modelada uma pequena MR de BT que contempla três barramentos, cada um dos quais representativo de uma habitação, ou seja um consumidor doméstico, conforme a Figura 4.1.

Além dos consumidores residenciais, a MR possui duas unidades de GD, uma unidade fotovoltaica com 3,68 kWp de potência instalada, localizada no primeiro consumidor (*PV*), e um aerogerador de eixo horizontal com três pás e potência nominal de 3 kW (*WT*). A MR de BT conta ainda com dois elementos fixos de armazenamento de energia (dois bancos de baterias), com uma capacidade de 450 Ah, situados nos consumidores 1 e 2 (*BB1* e *BB2*).

O consumidor 3 apesar de não possuir nenhuma unidade de geração de energia, nem nenhum elemento fixo de armazenamento, tem a possibilidade de interligar à rede um EV, com uma bateria de capacidade de 66 Ah (para uma tensão da bateria de 364 V).



**Figura 4.1- Micro-Rede de estudo.**

Usualmente, a MR funcionará com o apoio da rede elétrica, sendo a priorização no acesso à energia (produção atual, energia armazenada ou compra direta à rede), dependente do período do dia em questão, uma vez que, em determinadas alturas, poderá ser benéfica a satisfação direta das necessidades dos consumidores a partir da rede pública. Nessas situações, a produção local é utilizada para carga das baterias que, estrategicamente, fornecem energia para as cargas em períodos onde a compra à rede assume encargos mais elevados.

#### **4.1.1 Diagramas de Cargas**

Um ponto fundamental no estudo das redes elétricas de distribuição de energia centra-se no fornecimento de energia, para supressão das necessidades referentes à procura do consumidor. Por conseguinte, e de acordo com a abordagem que se pretende seguir neste estudo, torna-se fulcral o conhecimento dos equipamentos presentes em cada utilizador, bem como do período normal de operação dos mesmos. Como tal, foram modelados os diagramas de carga para os três consumidores residenciais, segundo um perfil de utilização considerado convencional. Nas Figura 4.2, Figura 4.3, e Figura 4.4, são apresentados os diagramas de cargas discriminativos para cada um dos consumidores residenciais, isto é, a potência solicitada por cada conjunto de equipamentos, ao longo das vinte e quatro horas de um dia. É de ressaltar, que os diagramas apresentados são representativos de um dia de Inverno, pelo que ao longo do ano o consumo irá variar consoante a Equação (4.1), onde  $C_i$  se assume como uma variável entre 0,75 e 1,0, que multiplicada pelos valores do diagrama de cargas considerado, origina o consumo para um determinado dia.

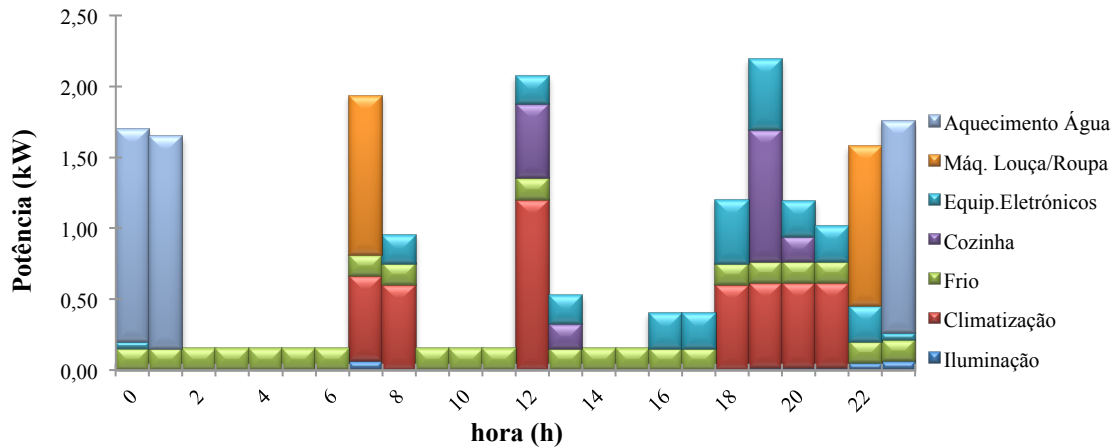


Figura 4.2- Diagrama de cargas discriminativo da habitação 1.

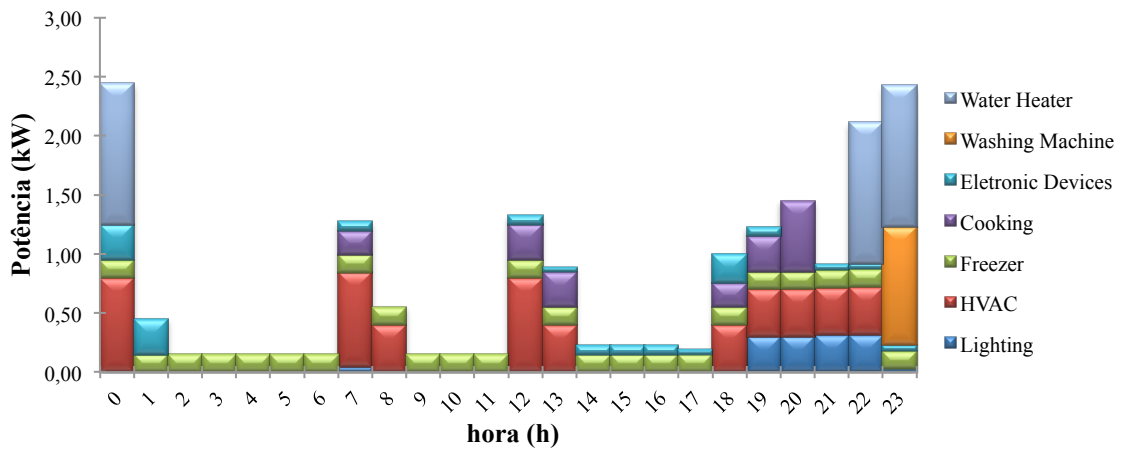


Figura 4.3- Diagrama de cargas discriminativo da habitação 2.

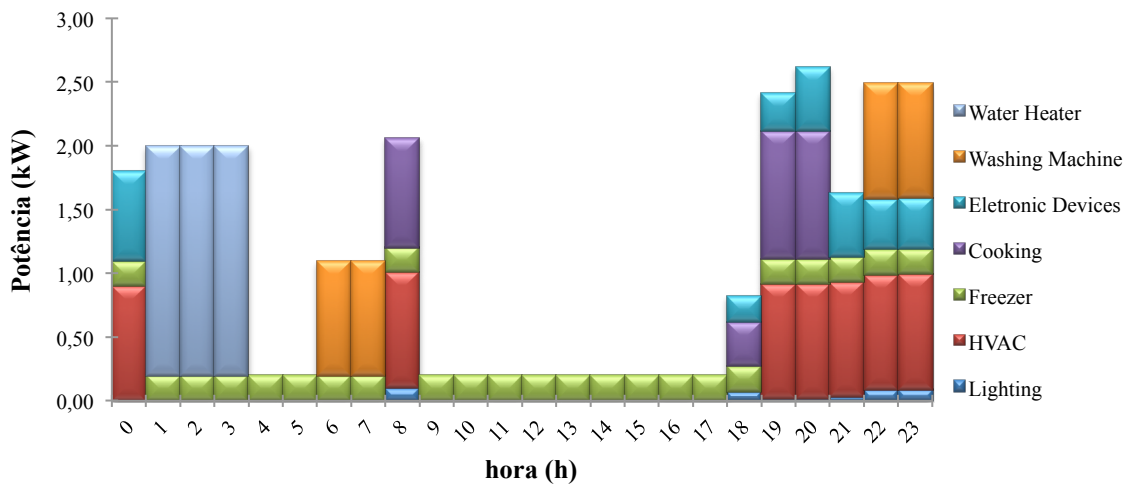


Figura 4.4- Diagrama de cargas discriminativo da habitação 3.

Os equipamentos residenciais qualificaram-se em sete categorias: Aquecimento de Água, Máquinas Lavar e/ou Secar, Equipamentos Eletrônicos, Equipamentos de Cozinha, Equipamentos de Frio, Sistemas de Climatização e Iluminação. O período de

funcionamento de cada um dos conjuntos de equipamentos referidos foi determinado com base nos perfis de utilização típicos.

$$\begin{cases} \text{If } day = 1, C_i = 1; \\ \text{If } day > 1 \ \& \ day < 183, C_i = -\left(0,25/182\right) \times day + 1,0011; \\ \text{If } day = 183, C_i = 0,75; \\ \text{If } day > 183 \ \& \ day \leq 365, C_i = \left(0,25/182\right) \times day + 0,4986; \end{cases} \quad (4.1)$$

Dos diferentes conjuntos de cargas apresentados, alguns assumem preponderância fundamental na ótica do utilizador ao longo das vinte e quatro horas, razão pela qual, podem ser classificados como críticos em determinado período. Por exemplo, durante os períodos da manhã, da hora de almoço e da hora de jantar, os equipamentos de cozinha irão assumir especial importância face aos restantes. Deste modo, em caso de falha da rede, procurar-se-á dar prioridade ao fornecimento de energia a essas cargas.

#### 4.1.2 Unidades de Microgeração

Como foi referido anteriormente, a MR conta com duas unidades de MG para apoiar o fornecimento de energia às habitações. Este fato não é impeditivo, nem restritivo em relação ao acesso à energia gerada localmente, visto que poderá ser o consumidor 2, ou o consumidor 3, a utilizar a energia gerada na unidade fotovoltaica da habitação 1, e o mesmo se aplica em relação à energia proveniente da turbina eólica.

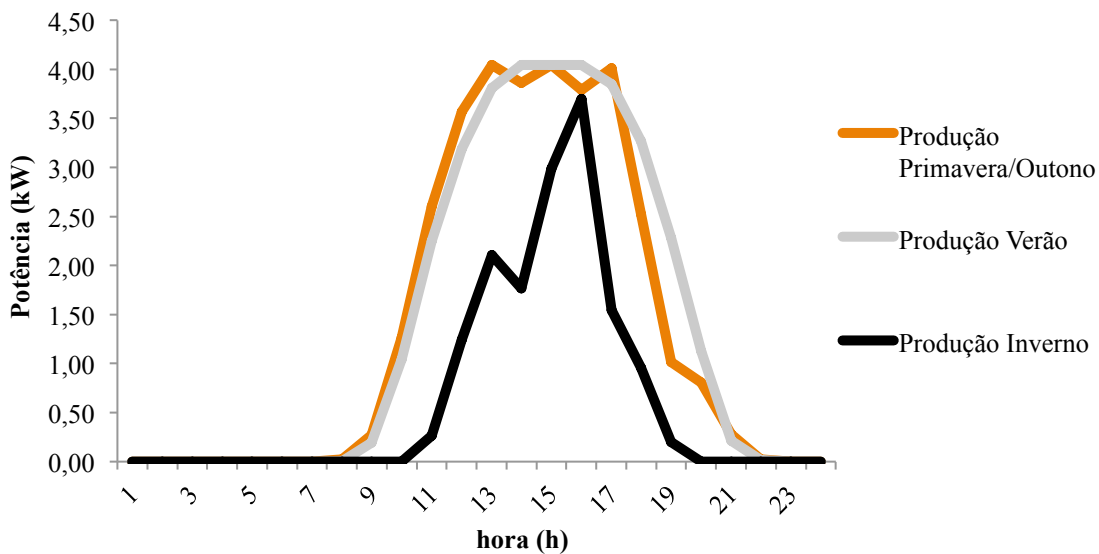


Figura 4.5- Curva de produção típica de um painel fotovoltaico em Bragança.

Para efeitos de simulação, foram considerados os diagramas exemplificativos de produção para o distrito de Bragança, apresentados nas Figura 4.5 e Figura 4.6, relativos à unidade fotovoltaica e à turbina eólica, respetivamente.

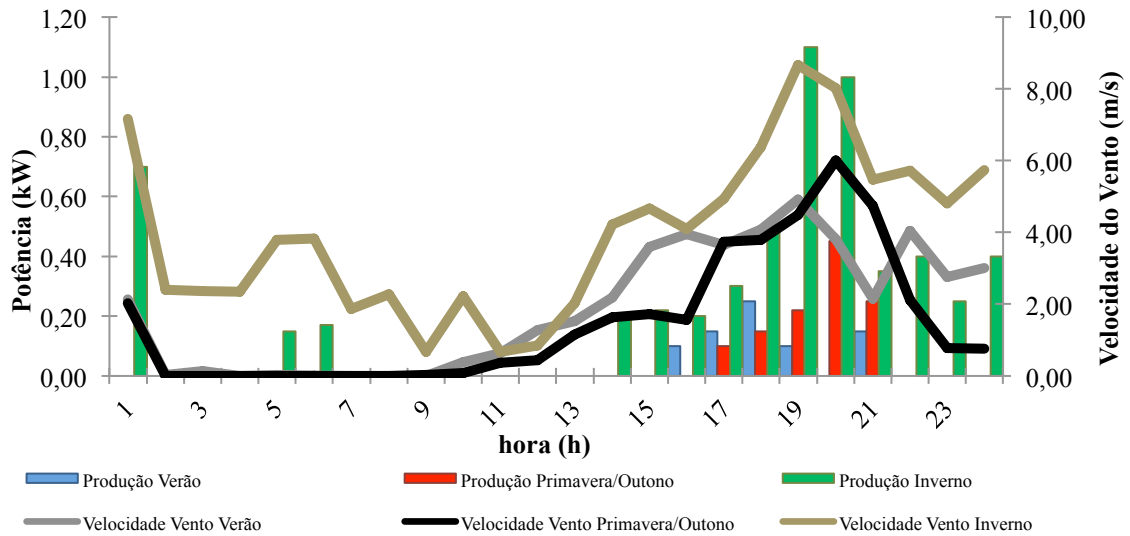


Figura 4.6- Curva de produção de um aerogerador, e velocidade do vento em Bragança.

Em relação à produção fotovoltaica, os valores apresentados são correspondentes à produção registada em unidades de pequena dimensão, que se situam nas coberturas das Escolas do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

A produção eólica foi estimada a partir dos registos de velocidade do vento, adquiridos por um pequeno sistema de sensorização e aquisição de dados, e apresentados também na Figura 4.6.

Com a velocidade do vento, e recorrendo à curva de potência do aerogerador apresentada na Figura 4.7, é possível extrapolar a produção eólica.

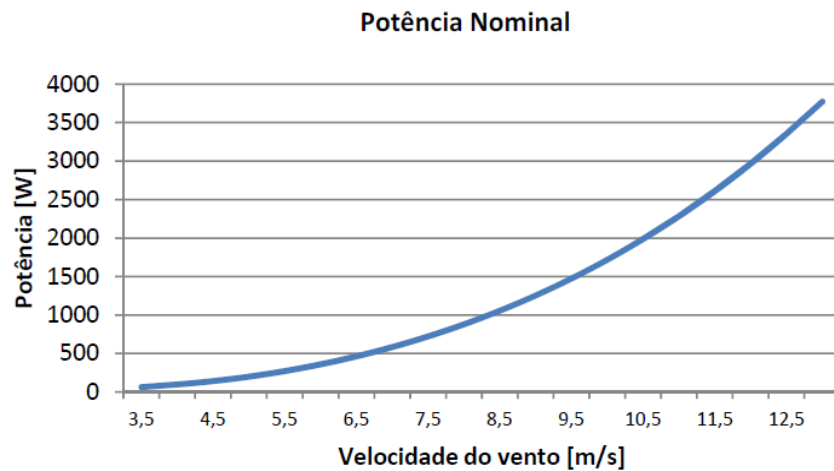


Figura 4.7- Curva de potência do aerogerador horizontal de 3 pás, com potência nominal de 3 kW [46].

### 4.1.3 Unidades de Armazenamento

Para a MR de estudo foram considerados dois bancos de baterias de chumbo-ácido sulfúrico, um localizado junto da habitação 1, e outro junto da habitação 2, cujo comportamento deverá ser modelado, respeitando o modo de utilização que maximiza o seu tempo de vida útil, e de acordo com os pressupostos apresentados no Anexo A.

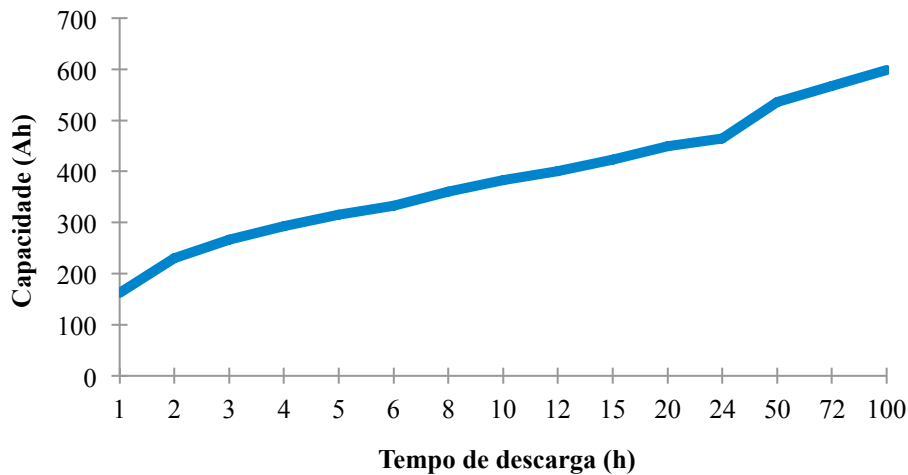
A capacidade de armazenamento requerida para um banco de baterias pode ser obtida através da Equação (4.2), onde  $n.d.a$  corresponde ao número de dias de autonomia que se pretende para o banco de baterias em caso de falha da rede,  $DOD_{máx}$  é a profundidade de descarga máxima,  $\eta_{inversor,cabos}$  é o rendimento global do sistema, contemplando as perdas nos cabos e no inversor,  $E_{diário}$  corresponde ao consumo diário máximo de energia expetável, e  $V_{sistema}$  é a tensão do lado DC da MR, neste caso 48 V.

$$C = \frac{E_{diário} \times n.d.a}{V_{sistema} \times DOD_{máx} \times \eta_{inversor,cabos}}. \quad (4.2)$$

O consumo diário máximo de energia na habitação 1 é de 20,07 kWh, e na habitação 2 é de 18,17 kWh. Para período de autonomia foi selecionado o valor de 0,6 dias, ou seja 14 horas. A tensão do sistema é de 48 V, e a profundidade máxima de descarga é 60%, o que corresponde ao funcionamento de uma bateria entre os limites de SOC de 20% a 80%. Da Equação (4.2) resulta, para a habitação 1, uma capacidade requerida de 440 Ah, e para a habitação 2, uma capacidade de 398 Ah. Para que sejam utilizados valores de baterias comerciais foram selecionados 2 bancos iguais, cada um deles com capacidade de 450 Ah.

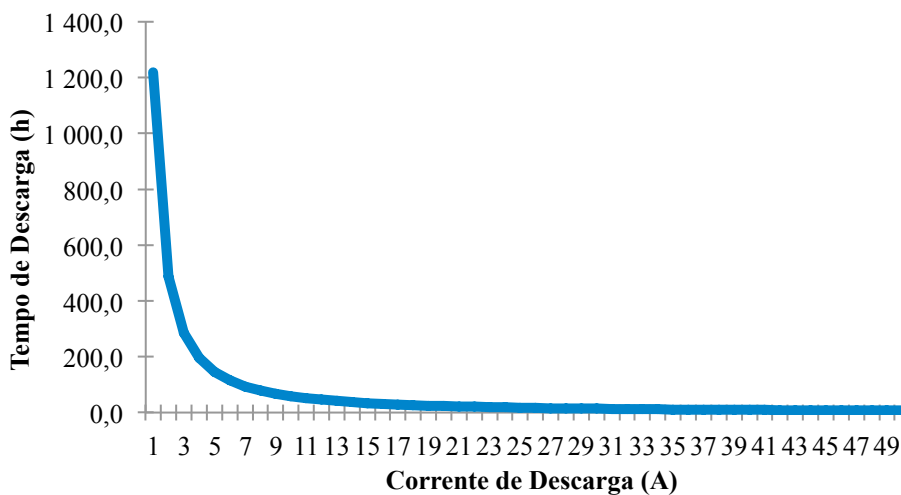
O processo de carga e descarga das baterias será limitado a uma corrente de carga/ descarga máxima a 45 A. A Figura 4.8 apresenta a curva de variação da capacidade da bateria, em função do período de descarga, sendo obtida normalmente através de dados disponibilizados pelo fabricante. Quanto maior for o tempo de descarga da bateria (menor corrente de descarga), mais energia se poderá utilizar da mesma.

De acordo com a informação apresentada no Anexo A, a curva de Peukert relaciona o tempo de descarga com a corrente de descarga utilizada, sendo que quanto maior for a corrente de descarga, mais rápida será a descarga da bateria. Para a construção desta curva é necessário estimar-se o número/constante de Peukert, que neste caso específico assume o valor de 1,32.



**Figura 4.8- Variação da capacidade de bateria de chumbo-ácido, com o tempo de descarga.**

Na Figura 4.9 é representada a variação do tempo de descarga da bateria com a intensidade de corrente utilizada.



**Figura 4.9- Tempo de descarga de uma bateria de chumbo-ácido, em função da corrente de descarga.**

Os níveis de tensão de uma célula e/ou bateria diferem entre os processos de carga e de descarga. Tipicamente, a tensão na descarga é cerca de 88% do valor da tensão na carga, correspondendo à eficiência da tensão, a relação entre os valores de tensão na descarga e na carga. A partir da curva de descarga, apresentada na Figura 4.10, verifica-se que a tensão da bateria para um SOC de 100% é de 50,6 V, diminuindo este valor gradualmente ao longo da descarga, até se atingirem 42 V para um SOC de 0%.

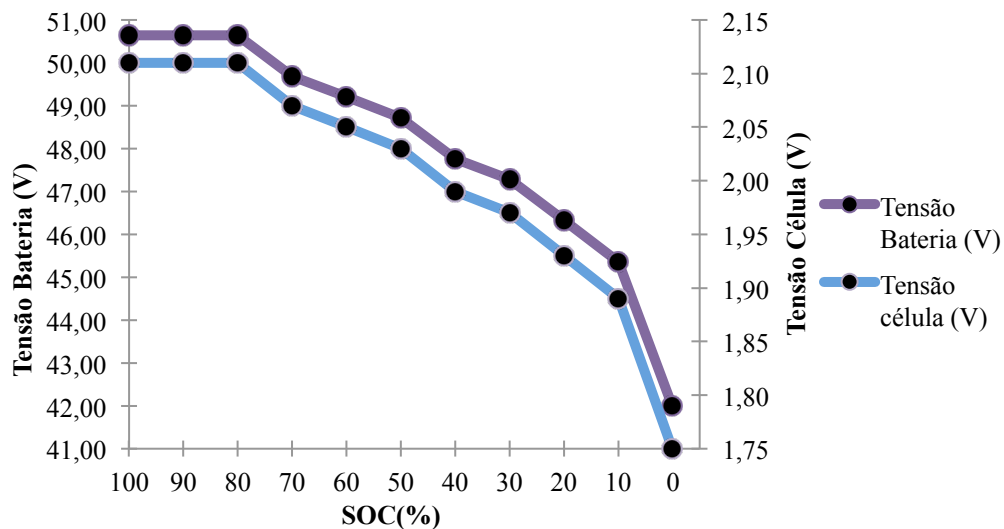


Figura 4.10- Tensão de uma célula e de uma bateria de ácido-chumbo durante a etapa de descarga.

Na Figura 4.11 é ilustrada a curva de carga da bateria. Da sua análise, é perceptível que durante a carga a tensão aumenta desde 47,7 V, para um SOC de 0%, até 57,6 V para um SOC de 80%. Quando a bateria atinge um determinado nível de tensão nas suas células colocadas em série, neste caso 2,40 V, inicia-se uma nova etapa do processo de carga, durante o qual a tensão se mantém constante.

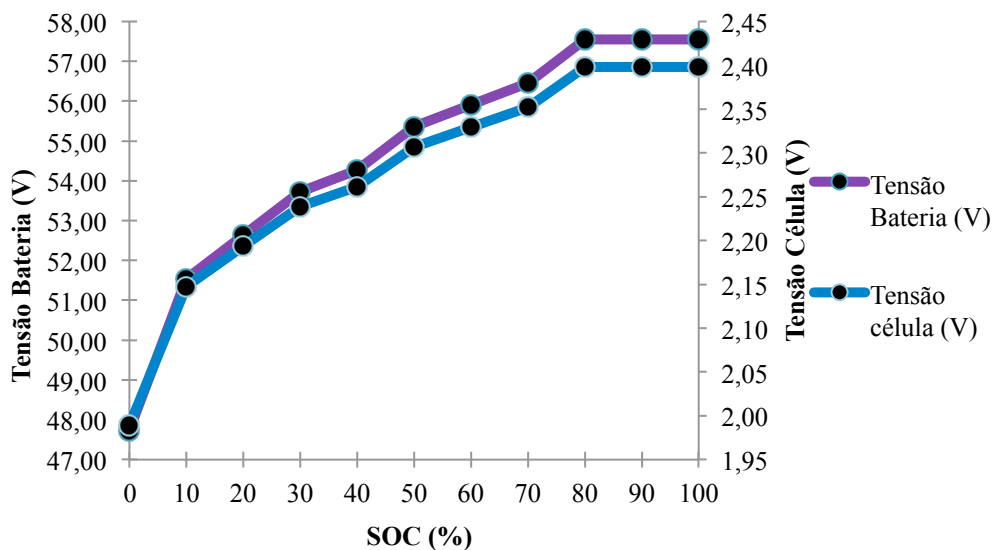


Figura 4.11- Tensão numa célula e na bateria de ácido-chumbo durante a etapa de carga.

O processo de carga e descarga de uma bateria é limitado à corrente máxima a que esta se encontra sujeita, pelo que, também a potência fornecida e a solicitada à bateria será limitada. A potência máxima de carga/descarga de uma bateria é dada pela Equação (4.3), onde  $V_{méd}$  é a tensão média para o intervalo de carga/descarga, e  $I_{máx}$  é a corrente máxima de carga/descarga. Neste caso particular, a potência máxima de carga

será de 2,57 kW, para um intervalo de SOC entre 70% e 80%, e a potência máxima de descarga será de 2,28 kW, para um intervalo de SOC entre 100% e 80%.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{e}d} \times I_{m\acute{a}x}}{1000} [\text{kW}]. \quad (4.3)$$

**Tabela 4.1- Limite máximo da potência de carga e descarga em função do SOC.**

SOC (%)	Potência Máxima de Carga (kW)	Potência Máxima de Descarga (kW)
0	0,00	1,97
10	2,23	2,06
20	2,34	2,11
30	2,39	2,14
40	2,43	2,17
50	2,47	2,20
60	2,50	2,22
70	2,53	2,26
80	2,57	2,28
90	1,75	2,28
100	0,71	0,00

Na Tabela 4.1 é apresentada a variação da potência máxima de carga, e de descarga, em função do SOC. Constata-se que à medida que a bateria vai carregando, a potência máxima de carga também aumenta, porque apesar da corrente de carga ser a mesma, a tensão da bateria aumenta gradualmente. Por sua vez, a potência máxima de descarga diminui ao longo da descarga das células, isto porque o nível de tensão das células também irá diminuir.

A variação da energia envolvida nos processos de carga e descarga da bateria é estimado através de (4.3), desde que seja conhecido o intervalo de tempo envolvido entre os diversos intervalos dos níveis de SOC considerados (assumindo um total de 10 intervalos relativos a gamas de variação do SOC de 10%).

Para o processo de descarga sabe-se que, a uma corrente de 45 A, o tempo de descarga será de 8 horas. Porém, este processo não é linear, visto que, a potência irá variar à medida que a bateria vai cedendo energia. Para se determinar o intervalo de descarga,  $ID$ , em cada intervalo relativo a uma variação de 10% de SOC, basta relacionar-se a potência de descarga nesse intervalo,  $P_{des}$ , com a potência média de

descarga,  $P_{méd}$ , e com o tempo total de descarga, conforme proposto em (4.4), onde  $n_{intervalos}$  representa o número de intervalos.

$$ID = \frac{8}{\left(\frac{P_{des}}{P_{méd}}\right) \times n_{intervalos}}. \quad (4.4)$$

A determinação do intervalo de carga,  $IC$ , é um processo mais complexo, visto que, não existe um tempo total de carga definido, até porque, como já foi referido, até 80% do SOC a corrente de carga é constante, e a partir daí começa a decrescer até atingir um valor de cerca de 3% do valor da fase anterior.

Como é sabido, a energia na carga pode ser dada em função da capacidade e da tensão da bateria, como sugerido em (4.5). Para um SOC de 100% a energia de carga será de 25,92 kWh, para um SOC de 90% será  $0,9 \times 25,92$ , e assim sucessivamente.

$$E_C \approx C_{bat} \times V_{bat}. \quad (4.5)$$

O intervalo de carga resulta do quociente entre a energia,  $E_{Carga}$ , e a potência de carga,  $P_{Carga}$ , em cada intervalo de SOC, ou seja:

$$IC = \frac{E_{Carga}}{P_{Carga}}. \quad (4.6)$$

Na Figura 4.12 é apresentada a variação do tempo de carga e de descarga, conforme o SOC. Daqui, é visível que o tempo de carga até 80% do SOC é de cerca de 8,5 horas, entre os limites de exploração da bateria, 20% a 80% do SOC, é de 6,27 horas, e para a carga total, o tempo necessário é 13,5 horas.

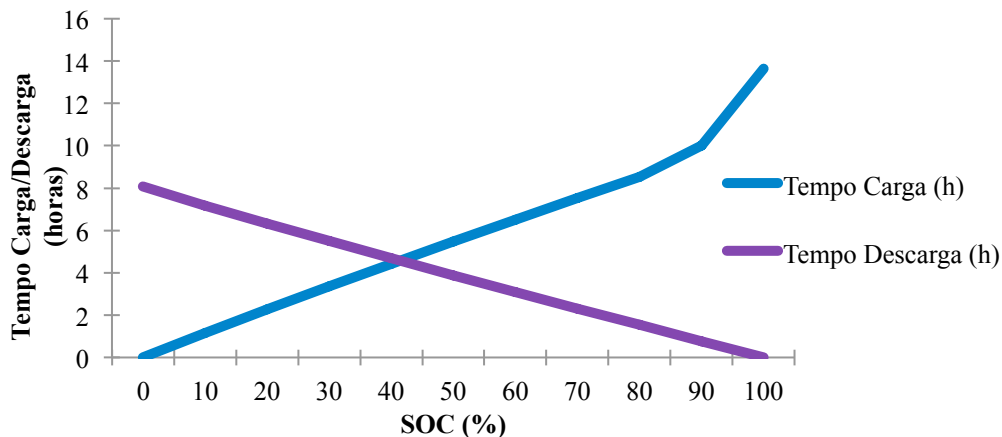


Figura 4.12- Tempo de carga e descarga de uma bateria de ácido-chumbo, para uma corrente constante de carga e descarga, de 45 A.

Na Figura 4.13 é representada a quantidade de energia requerida na carga da bateria, bem como a energia utilizável no processo de descarga. Refira-se ainda que a eficiência de *Coulomb* para cada banco de baterias é de 89%, o que associado a uma eficiência de tensão da ordem de 88% perfaz uma eficiência energética global da bateria de 78%.

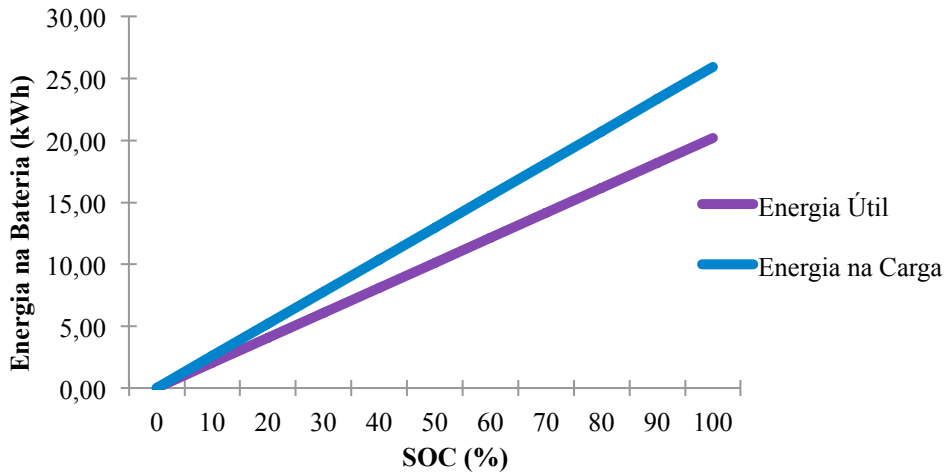


Figura 4.13- Energia na carga, e energia útil, numa bateria de ácido-chumbo, em função do estado de carga.

Durante a modelação do caso de estudo, definiu-se que a habitação 3, não teria um banco de baterias fixo, tendo sido estipulada a inclusão de um pequeno veículo elétrico a baterias da propriedade dos moradores da habitação 3, que funcionará como um elemento móvel e temporário de armazenamento e/ou fornecimento de energia. As características chave do EV são apresentadas na Tabela 4.2.

A carga da bateria de um EV é efetuada em postos de carga específicos, que podem ser de 3 níveis [47].

Tabela 4.2- Características do EV [46].

<b>Tensão Bateria (V)</b>	364
<b>Capacidade Bateria (kWh)</b>	24
<b>80% SOC (kWh)</b>	19,2
<b>C<sub>carga</sub> (A)</b>	66,2
<b>Tempo carga para C<sub>rate</sub> (h)</b>	1
<b>Consumo médio (kWh/km)</b>	0,125
<b>Energia útil para 160 kms (kWh)</b>	20

Para o caso de estudo, a carga será efetuada num posto do nível 1, onde a carga é efetuada em corrente alternada monofásica, permitindo-se na Europa uma corrente de carga de 13 a 16 A, com uma tensão de 230 V, perfazendo uma potência máxima de

carga entre 3 kW e 3,68 kW (Nos Estados Unidos a corrente de carga pode atingir 16 A, para uma tensão de 120 V, ou seja uma potência máxima de carga de 1,9 kW).

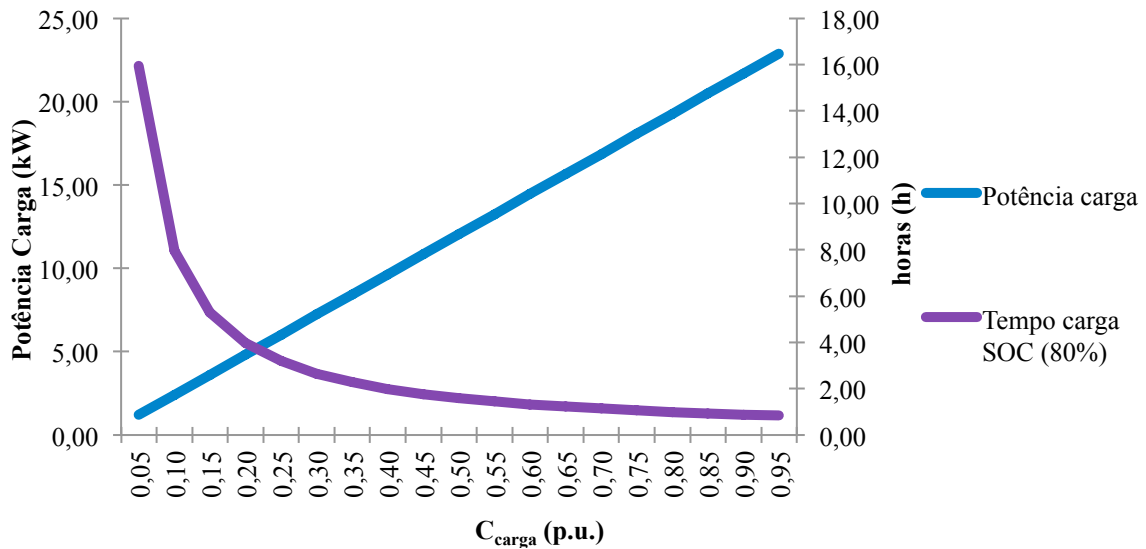


Figura 4.14- Características de carga da corrente, potência e intervalo de tempo, para o Veículo Elétrico.

No que concerne ao processo de carga, são apresentadas na Figura 4.14 algumas características relativas àquele, nomeadamente a potência e o tempo requerido para se atingir um SOC de 80%. Como na Europa, a potência máxima de carga pode atingir os 3,68 kW, então a corrente de carga do EV deverá ser cerca de 15% do valor nominal, ou seja, cerca de 9,93 A, correspondendo a uma potência máxima de carga de 3,61 kW. Apesar de o tempo de carga apresentado ser relativo à carga desde 0% do SOC até 80% de SOC, a bateria do EV deverá funcionar num SOC entre os 20% e os 80%, de modo a prolongar-se ao máximo o período de vida útil. Na figura em questão,  $C_{carga}$  diz respeito ao valor percentual em relação à corrente nominal de carga da bateria, ou seja a fração de carga.

Na Tabela 4.3 apresentam-se, os valores da energia útil acumulada e do tempo de carga, de acordo com o estado de carga. Refira-se que, para os cálculos efetuados, foi considerada uma eficiência de Coulomb de 89%, e uma eficiência de tensão de 88%, ou seja, uma eficiência energética global de 79%, para a corrente máxima de carga considerada.

**Tabela 4.3- Variação da energia de carga e da energia útil com o estado de carga da bateria do Veículo Elétrico.**

SOC (%)	Tempo Carga (h)	Energia Carga (kWh)	Energia Útil (kWh)
0	0,00	0,00	0,00
10	0,66	2,40	1,90
20	1,33	4,80	3,80
30	1,99	7,20	5,70
40	2,66	9,60	7,60
50	3,32	12,00	9,50
60	3,98	14,40	11,40
70	4,65	16,80	13,31
80	5,31	19,20	15,21
90	7,04	21,60	17,11
100	8,76	24,00	19,01

O EV estará disponível na habitação das 19 horas até às 8 horas do dia seguinte. Desde que chega à habitação o EV poderá auxiliar no fornecimento de energia para as habitações, respeitando o estado de carga mínimo da sua bateria. A partir das 2 horas até às 8 horas, altura em que deixa de estar disponível na habitação 3, o EV irá carregar a sua bateria a partir de energia excedente da microprodução (cenário muito pouco provável), ou a partir da rede elétrica. Normalmente, durante um dia o consumo de energia por parte do EV é de cerca de 5 kWh, isto tendo em consideração um consumo médio por km de 0,125 kWh, e um percurso diário de 40 quilómetros, associado aos deslocamento entre a habitação e o local de trabalho, de quem utiliza o veículo elétrico.

## 4.2 Síntese

Ao longo do Capítulo 4 foi apresentada e caracterizada a MR que servirá como base de estudo, bem como os seus principais elementos constituintes.

Os principais elementos em estudo são duas unidades de MG, uma fotovoltaica e uma eólica, três consumidores residenciais com diferentes necessidades ao longo do dia, e que variam durante o ano, além de dois bancos de baterias fixos para armazenamento de energia, e de um elemento móvel também de armazenamento, um veículo elétrico.

Consoante as necessidades apresentadas para um dia típico de Inverno determinou-se que a capacidade aconselhável para os dois bancos de bateria seria de 450 Ah, aproximando o valor dimensionado para estes elementos, da disponibilidade em termos comerciais.

As especificidades e comportamento das grandezas de interesse em relação ao processo de carga e descarga dos elementos de armazenamento existentes, incluindo o veículo elétrico, foram modelados para um modo de exploração daqueles de forma a prolongar o tempo de vida útil.

Da modelação efetuada para as baterias, foi determinado que no caso dos dois bancos fixos, a potência máxima de carga para um SOC entre 70% e 80% é de 2,57 kW. No que concerne à potência máxima de descarga, estimou-se o valor de 2,28 kW, para um SOC entre 100% e 80%. Um SOC de 80 % corresponde a uma energia de 16,18 kWh, e um SOC de 20 % a 4,04 kWh. Para o veículo elétrico, os valores obtidos são 3,61 kW, 3,18 kW, 15,21 kWh e 3,8 kWh, respetivamente.

O controlo das interações entre os elementos da MR, bem como o controlo do seu comportamento, será intermediado através de um sistema multiagente para gestão e otimização do funcionamento da MR, conforme será apresentado no capítulo seguinte, onde será exposto o trabalho realizado com o Repast 2.1

## 5 Implementação e Validação do Modelo Baseado em Agentes

O presente capítulo aborda a implementação do modelo baseado em agentes introduzido no capítulo 3, aplicado à Micro-Rede de estudo modelada e apresentada no capítulo 4.

Na primeira parte deste capítulo será dada a conhecer a ferramenta de modelação e simulação baseada em agentes que foi utilizada, o Repast, bem como o modo como foram introduzidos os diversos mecanismos e estratégias de gestão de MR, projetados no capítulo 3.

Na segunda parte do capítulo serão apresentados os resultados às simulações efetuadas, bem como uma análise comparativa entre esses mesmos resultados, tanto para o modo normal de operação da MR, como para o modo crítico.

### 5.1 Implementação em Repast

A plataforma de simulação utilizada para implementação do caso de estudo e das estratégias apresentadas anteriormente foi o *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*, Repast 2.1, um ambiente de Modelação e Simulação Baseada em Agentes, MSBA, que comporta uma série de bibliotecas especialmente escritas para esse efeito, utilizando uma série de linguagens de programação incluindo *Java* e *C#* [48]. A utilização do *Repast* é cada vez mais generalizada, devido à sua aplicação transversal às diversas áreas científicas e tecnológicas, sendo um ambiente flexível e *open source*.

O *Repast ReLogo* contempla grande parte das funcionalidades da biblioteca do Repast 2.1, num pacote semanticamente mais simples, embora poderoso, e que se baseia na linguagem dinâmica *Groovy*. O *ReLogo* fornece uma abordagem simplificada para a criação de modelos *Repast*, através do recurso a agentes do ambiente de simulação (*patches*), agentes de coordenação (*Observers*), agentes móveis (*Turtles*), e redes de interligação (*links*) [49].

Pretende-se que, através da cooperação e colaboração entre os diversos agentes constituintes do sistema, seja efetuada a gestão da MR visando o aumento da sua sustentabilidade. A escolha de um sistema multiagente permite que cada elemento constituinte da MR, representado por um agente, mantenha o seu conhecimento individual, podendo contudo interagir de forma social e cooperativa com os restantes agentes, de modo a fragmentar o problema de resolução demasiado complexa para um único agente (gestão e otimização da MR) num conjunto de sub-problemas de resolução mais fácil, permitindo a inclusão em qualquer momento de novos agentes produtores,

consumidores, ou de armazenamento de energia, devido à modularidade oferecida pelos SMA.

Os diversos agentes utilizados para o controlo e gestão da MR proposta no caso de estudo são os apresentados na Tabela 5.1. De acordo com os pressupostos da criação de modelos em *ReLogo*, podem classificar-se os agentes produtores, consumidores e de armazenamento de energia como *Turtles*, já que estes agentes irão “movimentar-se” no ambiente de simulação.

**Tabela 5.1- Diversos agentes intervenientes na gestão da MR.**

<b>Tipo de Agente</b>	<b>Identificação do Agente</b>
<b>Produtor</b>	<i>PVProducer</i>
	<i>WindProducer</i>
<b>Consumidor</b>	<i>House1Consumer</i>
	<i>House2Consumer</i>
	<i>House3Consumer</i>
<b>Armazenamento Energia</b>	<i>BateryBank</i>
	<i>BateryBank2</i>
	<i>EVagent</i>
<b>Apoio à Simulação</b>	<i>AuxiliarAgent</i>

O *AuxiliarAgent* desempenha funções auxiliares aos diversos agentes em processos intermédios, como por exemplo, na realização de cálculos auxiliares inerentes à etapa de carga das baterias em período de vazio, para posterior utilização dessa energia. Além disso, é através deste agente que se introduz alguns comportamentos inerentes ao sistema, nomeadamente o sorteio de valores aleatórios para simulação de uma falha na ligação à rede. Caso a atividade de um determinado agente, dependa da unidade temporal utilizada, então este terá que enviar uma solicitação de fornecimento da “hora” atual ao *AuxiliarAgent*.

A interação entre as *Turtles* é efetuada por intermédio de etapas sucessivas de perguntas e respostas, iniciadas com a função *ask ()*. A ordem com que são executadas as etapas de pergunta/resposta entre os agentes é definida por intermédio do *UserObserver*, através de uma função de início de ciclo que se tem que definir, *go ()*, como é apresentado na Figura 5.1, que contém o *layout* da interface *UserObserver*. Quando é iniciada uma interação entre agentes, como por exemplo o fornecimento de energia para supressão dos consumos (entre um agente produtor e um agente consumidor), a iniciativa deve ser da responsabilidade da entidade interessada no

fornecimento do serviço, neste caso o consumidor, que pretender ver suprido o seu consumo doméstico.

Conforme a Figura 5.1, a sequência geral cíclica de ações implementadas em Repast, para simular a operação da MR em estudo são: leitura da energia disponível nas baterias e no EV; determinação das necessidades dos três consumidores; verificação da energia que não foi solicitada aos dois agentes produtores; carga das baterias em período económico (dependendo da necessidade de se efetuar essa ação, bem como da hora de simulação); solicitação de carga por parte do EV, e finalmente o incremento da unidade temporal.

```

def go(){
    txtFileInfo << clockAgents().hora.toString()
    txtFileInfo << clockAgents().FAULT.toString()
    ask (EVagents()){ step() }
    ask (baterlyBanks()){ step() }
    ask (baterlyBank2s()){ step() }
    ask (house1Consumers()){ step() }
    ask (house2Consumers()){ step() }
    ask (house3Consumers()){ step() }
    ask (PVProducers()){ remainingpower() }
    ask (windProducers()){ remainingpower() }
    ask (clockAgents()){batcontrol()}
    ask (EVagents()){ requestaccess()}
    txtFileInfo << house1Consumers().needshouse1.toString()
    txtFileInfo << house1Consumers().remainhouse1.toString()
    txtFileInfo << house1Consumers().ECprovide1house.toString()
    txtFileInfo << house1Consumers().Encargos_house1.toString()
    txtFileInfo << house2Consumers().needshouse2.toString()
    txtFileInfo << house2Consumers().remainhouse2.toString()
    txtFileInfo << house2Consumers().ECprovide2house.toString()
    txtFileInfo << house2Consumers().Encargos_house2.toString()
    txtFileInfo << house3Consumers().needshouse3.toString()
    txtFileInfo << house3Consumers().remainhouse3.toString()
    txtFileInfo << house3Consumers().ECprovide3house.toString()
    txtFileInfo << house3Consumers().Encargos_house3.toString()
    txtFileInfo << PVProducers().product.toString()
    txtFileInfo << PVProducers().RequestedPV.toString()
    txtFileInfo << windProducers().prodw.toString()
    txtFileInfo << windProducers().Requested.toString()
    ask (clockAgents()){ incrementclock() }
    txtFileInfo << baterlyBanks().actpowerbat1.toString()
    txtFileInfo << baterlyBank2s().actpowerbat2.toString()
    txtFileInfo << EVagents().actualpowEV.toString()

```

Figura 5.1- Layout da interface *UserObserver*.

A ordem com que surgem as funções *ask ()* na Figura 5.1 corresponde à sucessão de processos interativos entre os agentes que compõem a micro-rede. Assim, e de acordo com a referida figura, a primeira função a ser iniciada será a denominada como *step*, no *EVagent*. Quando terminar a interação entre agentes, iniciada através desta função, passa-se para a função seguinte, neste caso a função com o nome *step*, no agente *baterlyBank2*, e assim sucessivamente.

A instrução iniciada pela codificação *txtFileInfo* permite que em cada passo de simulação da MR, seja convertida para o formato *.txt* uma variável presente num determinado agente, de modo a quantificar a variável pretendida.

### 5.1.1 Interação Base do Sistema

Por uma questão de conveniência, e de acordo com a informação apresentada na Figura 5.1, o primeiro passo prende-se com a leitura da hora da simulação. Para a MR de estudo foi escolhida como unidade de tempo a hora, pelo que, qualquer novo passo na simulação (iteração) corresponde a um incremento de uma hora na base de tempo do sistema.

Ao fim de vinte e quatro horas o *AuxiliarAgent* incrementa um dia, e reinicializa a variável hora. Passados 365 dias, o incremento de um dia equivalerá ao iniciar do dia 1, ou seja, em termos práticos, o iniciar de um novo ano de simulação. O agente em questão, é ainda responsável pelo sorteio de três valores aleatórios, que serão utilizados para simular um problema que impossibilite a ligação da MR à rede pública: o primeiro é referente ao dia em que ocorrerá esse problema, podendo acontecer em qualquer dos 365 dias do ano; o segundo é respeitante à hora de início da falha, que pode coincidir com qualquer hora do dia; finalmente, o terceiro corresponde à duração publicada interrupção, que se assume variável entre uma e cinco horas. Como valor de partida, para a duração do evento que aciona o funcionamento da rede em modo isolado, consideram-se cinco horas.

De seguida, é necessário verificar-se o estado de carga das baterias, porque as decisões afins à gestão inteligente do sistema, no intervalo de tempo atual, dependem do estado de carga daquelas no final do intervalo de tempo precedente. Esta ação é da responsabilidade do agente que gere cada uma das baterias.

Na secção seguinte é explicado o funcionamento da MR no modo normal, ou seja, após incrementar a unidade temporal, o *AuxiliarAgent* verifica se o dia atual na simulação corresponde ou não ao dia sorteado para a falha da rede, correspondendo em termos práticos à identificação da normalidade na ligação à rede.

### 5.1.2 Gestão e Otimização da Micro-Rede no Modo Normal

Uma vez sorteados os valores aleatórios para a ocorrência de uma falha/avaria, e depois de se verificar que na iteração atual o sistema operará no modo normal de funcionamento, o próximo passo diz respeito à procura de energia por parte dos consumidores, sendo estes os responsáveis pela iniciativa em termos de comunicação entre agentes, visto serem os interessados no fornecimento de energia. Assim, cada agente consumidor começa por verificar qual é a necessidade de energia na habitação que lhe corresponde. Adquiridas as necessidades da habitação, o agente consumidor

questiona o *AuxiliarAgent* acerca da hora da simulação, e caso esteja em período económico (período de vazio), irá enviar um pedido de fornecimento de energia para a rede pública que, desde que esteja disponível (como se verifica no modo de funcionamento normal) irá satisfazer as necessidades requeridas, até um máximo de 5,52 kW, valor associado a uma potência contratada à rede de 6,9 kVA com um fator de potência indutivo de 0,8. Esta estratégia é utilizada com o objetivo de comprar energia à rede quando esta é mais barata, além de beneficiar o sistema electroprodutor, já que diminuirá as solicitações de energia nas horas de pico. Além da compra direta da energia à rede para supressão das necessidades, o consumidor solicitará a um agente armazenador que aloque a energia necessária, para que no próximo período fora de vazio, o consumidor não tenha que comprar energia à rede a um preço mais elevado.

Caso o intervalo de tempo em simulação não corresponda a um horário definido como “económico”, então cada agente consumidor começará por questionar um agente produtor, relativamente à possibilidade de este fornecer energia. O agente produtor depois de receber a solicitação por parte do consumidor irá verificar qual a produção que tem disponível. Se a energia que o produtor ainda tem disponível for superior ao pedido, então fornece a energia suficiente para suprir a totalidade das necessidades do consumidor, caso contrário fornecerá a energia que tem disponível.

A sequência seguida pelos agentes consumidores em relação à solicitação do fornecimento de energia para supressão das suas necessidades é resumida na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2- Sequência na solicitação de fornecimento de energia por parte dos consumidores.**

<b>Modo</b>	<b>Período</b>	<b>1°. Produtor</b>	<b>2°. Produtor</b>	<b>1°. Banco Baterias</b>	<b>2°. Banco Baterias</b>	<b>EV</b>	<b>Rede Elétrica</b>
<b>Normal</b>	[8, 22 [	1	2	3	4	5	6
	[0, 8 [& [22, 24]	2	3	4	5	6	1
<b>Emergência</b>	[8, 22 [	1	2	3	4	5	-
	[0, 8 [& [22, 24]	1	2	3	4	5	-

A carga das baterias de forma antecipada por parte do consumidor será sempre vantajosa, visto que, a diferença de preços entre os dois períodos distintos de faturação

num tarifário bi-horário<sup>1</sup> é superior aos 22% de perdas relacionados com a eficiência de carga das baterias. O processo de carga das baterias em período económico, cuja codificação está ilustrada na Figura 5.2 segue o modelo apresentado no Capítulo 3. A função de controlo apresentada *buypower ()* é iniciada pelos agentes armazenadores, quando estes verificam que pretendem carregar as baterias através da rede elétrica, em período económico e no modo normal de operação.

```
def buypowerEC(gg){
  buy=buy+gg
  if(Winterconsumer.get(clockAgents().clock).toFloat()+ buy<=5.52){
    h2=h2+gg
    aux2=aux2+gg
    ask (myself()){charging(gg)}

  }else{
    auxEC=5.52-Winterconsumer.get(clockAgents().clock).toFloat()-(h2)
    aux2=aux2+auxEC
    ask (myself()){charging(auxEC)}

  }
  prcharg=auxEC+h2
}
```

Figura 5.2- Excerto de código para a realização da solicitação de carga antecipada das baterias.

Quando um agente consumidor não consegue suprir as suas necessidades, mesmo recorrendo aos dois agentes produtores, então irão solicitar-se os agentes das baterias. O agente consumidor envia um pedido de fornecimento de energia ao agente de um banco de baterias, para que este disponibilize o défice de energia na habitação. O agente do banco de baterias irá verificar se o valor do pedido levará a que SOC mínimo da bateria, neste caso 20 %, ou seja 4,04 kWh, seja ultrapassado. Se o valor solicitado levar a que seja transgredido o SOC mínimo, então a bateria só poderá disponibilizar a diferença entre a energia que tem disponível (já descontado qualquer pedido de fornecimento de energia na iteração atual) e o mínimo de carga, isto desde que a diferença não ultrapasse a energia máxima que a bateria pode disponibilizar para um determinado período de tempo, caso contrário disponibilizará o máximo possível cumprindo as limitações existentes. Se o valor solicitado não conduzir a que seja ultrapassado o mínimo de carga, dever-se-á verificar se este é superior à energia máxima solicitável, isto porque, no limite o banco de baterias disponibilizará essa quantidade de energia. Se as restrições ao funcionamento do banco de baterias, ou a falta de energia disponível, levarem a que as necessidades do consumidor ainda existam,

<sup>1</sup> De acordo com o tarifário adotado da empresa EDP Serviço Universal.

então será questionado o banco de baterias seguinte, aplicando um procedimento similar. Na eventualidade, de se voltar a verificar que continuam a existir necessidades por suprir, e se o EV estiver disponível (o EV estará disponível para fornecer energia entre as 19 horas e as 2 horas da manhã), então este poderá auxiliar na supressão da procura. Se tal fato se confirmar, então serão contabilizados os encargos económicos para o consumidor que endereçou o pedido de fornecimento de energia ao EV (no caso da solicitação ser da parte dos consumidores 1 ou 2), correspondendo ao valor de custo do kWh em período económico dividido pela eficiência da bateria do EV (78%). Como os encargos económicos são contabilizados num novo consumidor, então serão deduzidos aos encargos do consumidor 3, que paga a energia necessária para carga do EV.

Quando o EV pretende carregar a sua bateria irá solicitar a permissão ao agente consumidor 3, que através da função *chargeEV()* ilustrada na Figura 5.3 irá controlar a energia que o EV pode solicitar à rede, tendo em consideração o consumo das cargas, e se tal se verificar, a energia requerida pelo consumidor para carga das baterias em período económico.

```
def chargeEV(){
  if(clockh3 >= 2 && clockh3 <= 7 && House3Consumer.Criticalmodeh3 == false){
    auxiliar3=5.52-Winterconsumer.get(clockAgents().clock).toFloat()-prcharg
    ask (myself()){buypower(auxiliar3)}
  }else{
    auxiliar3=0
    ask (myself()){buypower(auxiliar3)}
  }
}
```

Figura 5.3- Excerto de código para a realização da solicitação de carga do EV por parte do consumidor 3.

Em caso de indisponibilidade do EV, ou de as necessidades restantes do consumidor continuarem a existir, é enviado em último caso um pedido de fornecimento de energia à rede pública, com o valor igual à procura de energia que falta satisfazer ao consumidor.

Depois de disponibilizada a energia pela rede, avança-se para o consumidor seguinte que efetuará todo o processo descrito.

Quando todos os agentes consumidores tiverem efetuado o processo de solicitação de energia aos agentes produtores e/ou agentes das baterias, será avaliada a existência de produção restante, que não foi utilizada pelos agentes consumidores. Se existir produção excedentária, cada agente produtor irá enviar um pedido para

disponibilizar energia para carga dos bancos de baterias. Se as baterias já se encontram no limite máximo do seu SOC, ou se num dado intervalo a quantidade máxima de energia armazenável for ultrapassada (se a resultante da produção for suprir à quantidade máxima de energia alocável), então a energia excedente será vendida à rede de distribuição.

O valor máximo que cada produtor pode disponibilizar para cada agente das baterias e/ou para o agente EV será o correspondente à energia máxima de carga para o intervalo de tempo considerado. A energia enviada para a carga de uma bateria não deverá implicar que esta ultrapasse o valor máximo de carga, que corresponde a 80 % da capacidade da sua capacidade, ou seja, 16,18 kWh.

Uma vez que, a eficiência de carga da bateria se situa nos 78 %, então apenas 78 % da energia enviada para carregar a bateria será tomada como energia útil, isto é, energia que ficará disponível para posterior utilização dos consumidores. Tal situação é transversal para o EV, que em modo normal de funcionamento, a partir das 2 horas da manhã começa a carregar a sua bateria com os excedentes dos agentes produtores, ou então solicitando a rede elétrica.

Encaminhados os valores de produção excedentária, caso existam, as variáveis auxiliares representando por exemplo a energia fornecida por cada agente, a energia fornecida pelas baterias, as necessidades restantes de cada consumidor, ou a produção restante serão reiniciadas para o valor 0, sendo incrementada uma hora no sistema, e iniciando-se novamente o processo descrito.

Uma outra funcionalidade implementada na MR permite calcular ao longo da simulação, os encargos económicos relacionados com a compra de energia à companhia responsável pela distribuição de energia elétrica. Para este efeito foram seguidos os valores de custo do kWh de energia do tarifário bi-horário, no modo de ciclo semanal, da empresa EDP Serviço Universal, para a BT [47].

### **5.1.3 Funcionamento Isolado/Crítico**

Quando se identifica que o dia atual de simulação coincide com o dia da falha, então procederá à ativação do modo crítico de funcionamento (desde a hora de início da falha até que seja detetado o momento de fim da ocorrência). Quando a hora de simulação coincide com o valor de fim da inoperacionalidade da rede, o modo crítico é desativado, voltando o sistema a funcionar em modo normal, sorteando os valores aleatórios para a próxima falha e assim sucessivamente.

Além de iniciado o modo crítico, cada agente produtor calculará a produção prevista e cada agente consumidor, o consumo previsto para o período de duração da falha. Esta sucessão de ações é iniciada pelo *AuxiliarAgent*, conforme a Figura 5.4. O agente de apoio à simulação questiona os restantes agentes intervenientes no sistema acerca dos consumos esperados das cargas críticas, produção esperada, além da energia disponível nos agentes armazenadores.

```
def calculation(){
  double resultado = 0
  int vriaux=0, entaux=0
  if (Criticalmode == true){
    auxclock=str_crt+average_length.round(0)
    for (int i = 0; i <= 23; i++){
      aux111Consume[i] = 0
      auxProduc[i] = 0
      auxProducw[i] = 0
      aux1Consume[i] = 0
      aux2Consume[i] = 0
      aux3Consume[i] = 0
      auxcoise[i] = 0
      auxcoisepro[i] = 0
      auxResu[i]=0
      auxLEvel[i]=0
    }
    ask (PVProducers()){provprod(clock,auxclock)}
    auxProduc=aux111Consume
    ask (windProducers()){provprod(clock,auxclock)}
    auxProducw=aux111Consume
    ask (baterlyBanks()){conprev(clock,auxclock)}
    bat1v=bataux
    ask (baterlyBank2s()){conprev(clock,auxclock)}
    bat2v=bataux
    rr=bat1v
    ttt=bat2v
    ask (house1Consumers()){conprev(clock,auxclock)}
    aux1Consume=aux111Consume
    ask (house2Consumers()){conprev(clock,auxclock)}
    aux2Consume=aux111Consume
    ask (house3Consumers()){conprev(clock,auxclock)}
    aux3Consume=aux111Consume
    if(bat2v<0){
```

Figura 5.4- Excerto de código da função *Calculation ()* do *AuxiliarAgent*.

Inicialmente é considerado um período 5 horas de falha como ponto de partida, ou seja, os cálculos da previsão e gestão da energia serão direcionados para esse intervalo de tempo. Contudo, a duração da falha é um valor aleatório previamente sorteado por uma função *Random ()*, mas que não é dado a conhecer ao sistema, já que este aprenderá com a ocorrência de sucessivas falhas, a dimensionar o cálculo do tempo de falha, através de uma média móvel da duração das interrupções na ligação à rede.

Em modo crítico as etapas de carga e descarga das baterias, bem como as sucessivas etapas de comunicação entre os agentes irão suceder-se da mesma maneira, apesar de não poder ser disponibilizada energia pela rede elétrica. Refira-se ainda que em período de falha é permitido que o limite mínimo dos dois bancos de baterias fixos, bem como do EV, possam atingir 10 % do SOC, sem grande prejuízo para o estado de

conservação das baterias, visto que espera-se que tais acontecimentos sejam esporádicos.

### 5.1.3.1 Previsão da Produção e do Consumo

No processo de previsão dos consumos e da produção, serão gerados dois *arrays* com 24 valores, em que cada entrada corresponde ao período de uma hora do dia, e cujos valores de interesse corresponderão aos compreendidos entre a hora de início e o fim previsto da falha, assumindo-se para os restantes elementos o valor de 0. A previsão do consumo e da produção obtém-se a partir do histórico dos últimos sete dias, recorrendo-se para isso ao cálculo de médias móveis de consumo e produção.

Na Figura 5.5 é apresentado um exemplo de cálculo de uma média móvel de consumo, neste caso para a habitação 3. Na primeira parte do algoritmo, o sistema coloca os sete primeiros registos num *array* com sete entradas, com os valores iniciais iguais a zero.

```
if(day<=7){
    consum3.set(day-1, House3)
    for(int zz =0; zz<day; zz++){
        House3=(House3*((zz/(zz+1))))+(consum3[zz]*(1/(zz+1)))
    }
}else{
    int timeshifted=0
    while(timeshifted<1){
        for(int nn =0; nn< consum3.size()-1;nn++){
            consum3[nn]=consum3[nn+1];
        }
        timeshifted=timeshifted+1
    }
    consum3.set(6, House3)
    for(int zz =0; zz<consum3.size(); zz++){
        House3=(House3*((zz/(zz+1))))+(consum3[zz]*(1/(zz+1)))
    }
}
println "consum3"
print consum3.toString()
```

Figura 5.5- Excerto de código para o cálculo da previsão do consumo para a habitação 3 usando médias móveis.

Após o *array* se encontrar preenchido com os sete valores (correspondentes a 7 dias de consumo em período não económico), será sucessivamente apagado o valor mais antigo e adicionado o novo valor. O valor médio do consumo corresponderá à média dos sete registos.

### 5.1.3.2 Priorização de Cargas

Para o caso de estudo, as cargas críticas, definidas em função da hora do dia, são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Conjunto de cargas em determinado período do dia, aquando do funcionamento em rede isolada.

Hora de simulação	Cargas Críticas
[7, 9 [; [12, 14 [; [19, 22 [	Equipamentos de Cozinha Iluminação Equipamentos de Frio Equipamentos Eletrónicos
[0, 7 [; [9, 12 [; [14, 19 [; [22, 24]	Aquecimento de Água Iluminação Equipamentos de Frio Equipamentos Eletrónicos Equipamentos de Climatização

Os consumos previstos para as cargas críticas nas três habitações serão somados, originando o *array* do consumo total previsto, o mesmo se passando com os valores da produção. Subtraindo aos valores do *array* da produção, os valores do *array* do consumo, cria-se um *array* resultante com resultados positivos, negativos, ou com o valor 0. A partir deste ponto é seguida a política de deslastre e escalonamento de cargas, apresentada na arquitetura do SMA, caso tal seja requerido, ou seja, a produção prevista seja inferior ao consumo previsto para as cargas críticas numa dada hora.

### 5.1.3.3 Deslastre de Cargas

O esquema de deslastre para as cargas críticas da MR de estudo é apresentado na Tabela 5.4, seguindo os padrões apresentados para a arquitetura elaborada para o sistema. O deslastre de cargas, enquanto mecanismo de restrição do consumos dos equipamentos utilizados, e dependendo da tipologia destes, pode ser aplicado com base numa redução do tempo de utilização, ou então com base na limitação da potência solicitar por estes. Tome-se como exemplo a Tabela 5.4, onde uma redução no consumo de uma televisão (incluída no conjunto dos equipamentos eletrónicos) corresponde à limitação temporal do seu funcionamento. Por outro lado, as reduções associadas aos equipamentos de climatização são direccionadas para uma diminuição da potência que estes podem debitar num dado intervalo de tempo.

Tabela 5.4- Esquemas de deslastre de cargas do sistema.

Hora de simulação	Cargas Críticas (por ordem de importância)	Nível	Nível	Nível	Nível	Nível	Nível
		1	2	3	4	5	6
[7, 9 [; [12, 14 [; [19, 22 [	Eq. de Cozinha	-	-	- 15 %	- 15 %	- 30%	- 50%
	Iluminação	-	- 25%	- 25%	- 50%	- 50%	- 50%
	Eq. de Frio	- 50%	- 50%	- 75%	- 75%	- 75%	- 75%
	Eq. Eletrônicos	- 50%	100%	-100%	-100%	-100%	-100%
[0, 7 [; [9, 12 [; [14, 19 [; [22, 24]	Aquecimento de Água	-	-	-	- 25%	- 50%	- 75%
	Iluminação	-	-	- 25%	- 50%	- 50%	- 75%
	Eq. de Frio	-	- 50%	- 75%	- 75%	- 75%	- 75%
	Eq. Eletrônicos	-50%	- 50%	- 75%	- 75%	- 75%	- 75%
	Eq. de Climatização	- 50%	-100%	-100%	100%	-100%	-100%

Depois de efetuado o deslastre de cargas e de enviada a energia possível para os consumidores, será incrementada uma iteração. A partir daí, são recalculados a produção e o consumo previstos até ao fim expetável da falha, bem como os processos que dependem destes valores, ou seja, os cálculos de deslastre (e escalonamento) serão refeitos durante cada hora do período de falha, isto é a cada nova iteração.

#### 5.1.3.4 Escalonamento de Cargas

O escalonamento de cargas corresponde à alocação de consumos em outros períodos, desde que o tipo de carga o permita. Neste caso, será efetuada a alocação dos equipamentos de aquecimento de água e dos equipamentos de frio, visto que o seu comportamento não é tao restritivo em termos de funcionamento em tempo real, como acontece com os dispositivos eletrônicos, equipamentos de cozinha e demais cargas. Assim, se por exemplo 50% do consumo requerido para aquecimento de água for restringido durante o modo crítico, então no fim da ocorrência serão restabelecidos os restantes 50%, que continuarem a constituir-se como uma necessidade, estas funcionalidade é possibilitada com a inclusão de um *array*, com vinte e quatro entradas (uma para cada hora do dia), onde são contabilizadas as necessidades não supridas para as cargas em causa. A soma do total de entradas permitirá, após o fim da falha na rede, determinar qual o incremento no consumo, de modo a satisfazer as necessidades restantes, e que será verificará nas duas horas seguintes ao fim do funcionamento em modo de emergência.

### 5.1.3.5 Modelo para *Forecasting*

Para a MR em estudo foi implementado um modelo de previsão de produção das unidades de MG, com recurso a dados meteorológicos obtidos a partir de uma aplicação *Web* [50], e conforme apresentado no Capítulo 3, onde é apresentado o algoritmo de aquisição e processamento de dados meteorológicos para previsão da produção, por parte dos agentes produtores. Depois de obtidos os dados das temperaturas máxima e mínima bem como da velocidade do vento, torna-se possível determinar a produção expetável nas duas unidades de MG.

Para a estimação da potência debitada pela turbina eólica (kW),  $P_t$ , foi utilizada a Equação (5.1), onde  $\rho$  é a massa volúmica do ar ( $1225 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  corresponde à área “varrida” pelas pás da turbina ( $7,07 \text{ m}^2$ ),  $v$  diz respeito à velocidade do vento, e  $\eta$  é o rendimento do aerogerador (40 %) [51]. A turbina apenas inicia o processo de geração de energia a partir de velocidades do vento de 3,5 m/s.

$$P_t = \frac{1/2 \times \rho_{ar} \times A \times v^3 \times \eta_t}{1000} [\text{kW}] \quad (5.1)$$

Para estimar a produção da unidade fotovoltaica de 3,68 kWp, foi utilizado o método de *Bristow&Campbell* [52], como ponto de partida para a obtenção da radiação prevista para uma superfície inclinada  $30^\circ$  em relação ao plano horizontal, e orientada a Sul. A determinação da produção do módulo fotovoltaico foi obtida tendo em consideração as características dos seus painéis, apresentadas em [53], e segundo a Equação (5.2), onde  $P_{PV}$  é a potência debitada pela unidade fotovoltaica (kW),  $Rad_{int}$  é o valor da radiação intercetada pelo painel ( $\text{W.m}^{-2}$ ),  $A_{painel}$  é o valor da área total do conjunto dos módulos fotovoltaicos ( $25,92 \text{ m}^2$ ), e  $\eta_{PV}$  é a eficiência global do painel, neste caso 14.2 %.

$$P_{PV} = \frac{Rad_{int} \times A_{painel} \times \eta_{PV}}{1000} [\text{kW}] \quad (5.2)$$

## 5.2 Análise de Resultados

Após a implementação e simulação das estratégias de funcionamento perfiladas para os dois modos de funcionamento, torna-se possível efetuar uma análise crítica dos resultados das simulações, algo que será realizado ao longo desta secção.

Para o conjunto de simulações efetuadas, importa frisar que no modo crítico de operação da MR, apesar de as falhas/avarias na rede serem geradas de modo aleatório,

para efeitos de análise comparativa será imposto um dia específico para a falha, neste caso 21 de Janeiro, no período compreendido entre as 18 horas e as 23 horas.

### 5.2.1 Estratégia Básica no Modo Normal

Na Figura 5.6 é apresentada a variação do consumo total de energia registado nos agentes consumidores, ao longo das vinte e quatro horas de um período de três dias, quando o sistema funciona no modo normal, não sendo dotado de inteligência. Como foi anteriormente introduzido, o consumo registado para cada habitação ao longo de um ano é variável em cada uma das habitações.

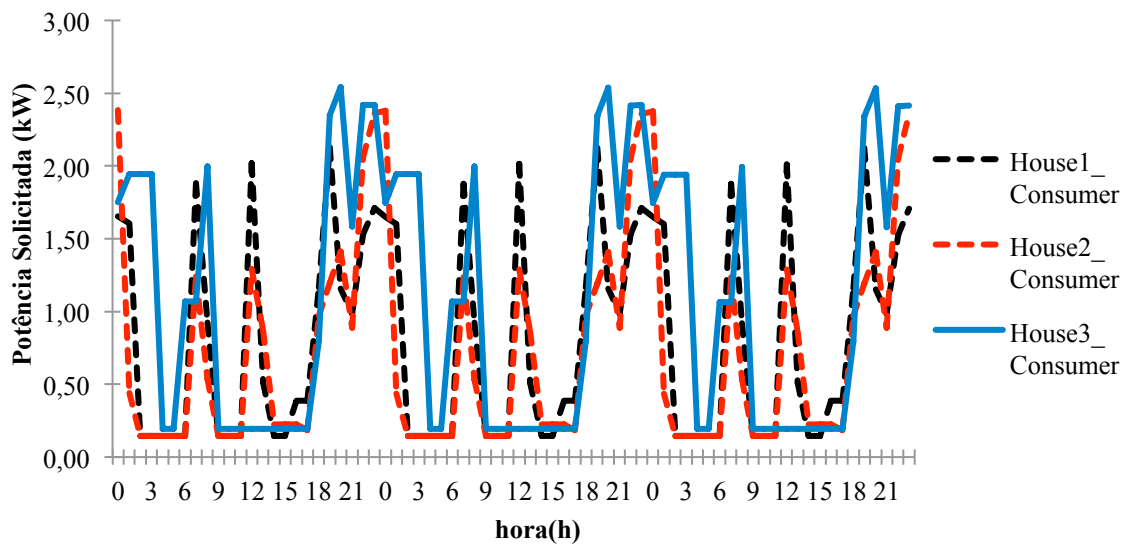


Figura 5.6- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, no modo normal de operação.

Uma análise mais fundamentada em relação ao comportamento dos agentes consumidores para a simulação efetuada é possível através de alguns valores relativos aos fluxos de energia registados e aos encargos correspondentes, como apresentado nas Tabela 5.5. e Tabela 5.6. Assim, verifica-se que os agentes consumidores 1 e 2 solicitaram à rede menos de metade das suas necessidades anuais de energia, cerca de 37% e 46% respetivamente. O agente consumidor 3 utilizou a rede para suprir cerca de 63% do seu consumo.

Em relação aos encargos com o fornecimento de energia, ressalva-se que o consumidor 1 foi o que apresentou menores gastos, isto porque, apesar de apresentar maior consumo total anual de energia do que o consumidor 2, solicita uma menor quantidade de energia à rede e/ou ao EV, já que normalmente grande parte do seu consumo é satisfeito pela unidade fotovoltaica.

**Tabela 5.5- Resultados da simulação da Estratégia Básica, no modo normal de operação, para os agentes consumidores, para o período de 1 ano.**

	<b>Consumidor1</b>	<b>Consumidor2</b>	<b>Consumidor3</b>
<b>Consumo total (kWh)</b>	6.410,04	5.803,74	8.533,68
<b>N.º solicitações à rede</b>	2.558	3.202	3.634
<b>En. fornecida pela rede (kWh)</b>	2.352,89	2.687,94	5.530,16
<b>Necessidades por suprir (kWh)</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Encargos (€)</b>	248,85	287,31	1.024,37

Em situação oposta surge o consumidor 3, que apresenta encargos mais significativos com o fornecimento de energia, quase quadruplicando os encargos associados aos outros consumidores. Tal fato é facilmente compreensível, visto que normalmente o consumidor 3 solicita a energia que necessita, depois dos outros dois consumidores, ou seja, grande parte da produção das unidades de MG é utilizada pelos dois primeiros consumidores.

Na Tabela 5.6 são apresentados de forma resumida, os fluxos energéticos que caracterizam o comportamento dos agentes produtores. Pela tabela enunciada, é perceptível que o agente fotovoltaico é responsável por, sensivelmente, 89% da produção total das unidades de MG. Do total da energia gerada (10328,98 kWh), apenas 0,57 kWh foram vendidos à rede pública.

**Tabela 5.6- Resultados da simulação da Estratégia Básica, no modo normal de operação, para os agentes Produtores, para o período de 1 ano.**

	<b>Produtor fotovoltaico</b>	<b>Produtor eólico</b>
<b>Produção total (kWh)</b>	9.219,46	1.109,52
<b>En. solicitada pelos consumidores (kWh)</b>	9.218,89	1.109,52
<b>En. fornecida à rede (kWh)</b>	0,57	0,0

O comportamento típico dos agentes armazenadores de energia é apresentado na Figura 5.7, onde se constata a variação da energia armazenada nas baterias dos agentes em causa, para um período de três dias. Durante a tarde, a energia armazenada nos bancos de baterias fixos 1 e 2 atinge o seu valor máximo, devido a uma maior produção global registada nos agentes produtores e a um menor consumo verificado nos agentes consumidores.

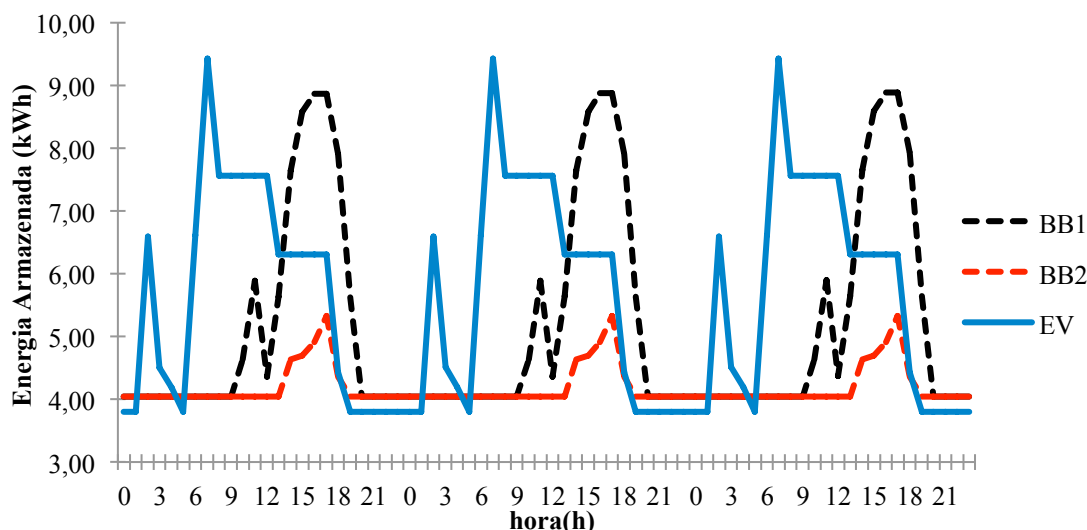


Figura 5.7- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Básica, no modo normal de operação.

Por seu lado, a bateria do EV regista o seu máximo no período da madrugada. A bateria do EV apenas irá carregar a partir das 2h00, e caso não lhe seja solicitada energia. Depois das 5h00, e até que o EV se desloque da habitação, não será requerida energia ao EV, para que este tenha autonomia suficiente para suprir o consumo próprio do veículo elétrico durante o dia.

Ainda em relação aos agentes de armazenamento, na Tabela 5.7 são resumidas algumas ocorrências resultantes da simulação, onde é visível que, em 47% dos casos, o estado de carga mínimo do banco de baterias 1 é atingido (20%). Já em relação ao banco de baterias 2, tal fato é registado em 64% do período. O EV, pelas restrições em termos da utilização da energia armazenada na sua bateria, atinge o nível mínimo em apenas 23% do tempo. Ainda pela Tabela 5.7 verifica-se que a utilização dos elementos armazenadores de energia não está otimizada, uma vez que, à exceção do banco de baterias 1, que atinge o estado máximo de carga (80%) em 90 ocasiões, os restantes dois elementos armazenadores registam um estado de carga máximo bastante distante do limite permitido.

Tabela 5.7- Resultados da simulação da Estratégia Básica no modo normal, para os agentes de armazenamento, para o período de 1 ano.

	Banco Baterias 1	Banco Baterias 2	Veículo Elétrico
SOC <= 20% (n.º ocorrências)	4.087	5.615	2.023
SOC >= 80% (n.º ocorrências)	90	0	0
En. Máx. (kWh)	16,18	10,76	10,29

### 5.2.2 Estratégia Básica no Modo Crítico/Emergência

Na Figura 5.8 é apresentada a variação dos consumos registados nos respetivos agentes, para um período de análise de três dias. Na figura é visível que o funcionamento normal do sistema é interrompido no segundo dia do período apresentado, devido a uma falha na ligação à rede, entre as 18 horas e as 23 horas, encontrando-se esta assinalada a laranja. O retângulo a verde destaca a energia solicitada pelos consumidores no mesmo período (entre as 18 horas e as 23 horas) no dia anterior à interrupção da ligação à rede. Devido à falta de inteligência do sistema, o consumo de energia durante o período de falha atinge 0 kWh, ou seja, nem sequer as cargas mais importante e críticas podem funcionar, apesar de as necessidades existirem.

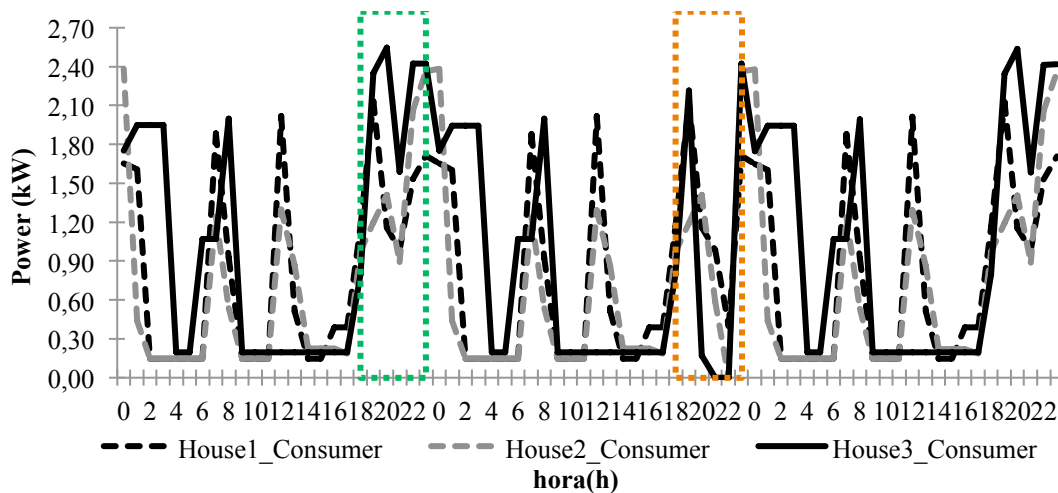


Figura 5.8- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, em modo crítico/emergência.

Na Figura 5.9 é apresentada a variação da energia armazenada registada nos agentes armazenadores de energia, para o mesmo período de três dias da figura anterior, onde a laranja se encontra assinalada a variação no nível das baterias para o período de falha de cinco horas. O retângulo a verde destaca a energia armazenada nas unidades de armazenamento no mesmo período (entre as 18 horas e as 23 horas) no dia anterior à interrupção da ligação à rede.

Apesar de em modo crítico se permitir que o estado de carga mínimo das baterias atinja os 10%, decorridas três horas desde o início da falha, atinge-se o nível mínimo nos três elementos de armazenamento considerados, razão pela qual, a partir desse momento não será suprido qualquer consumo que possa ser solicitado pelos agentes consumidores.

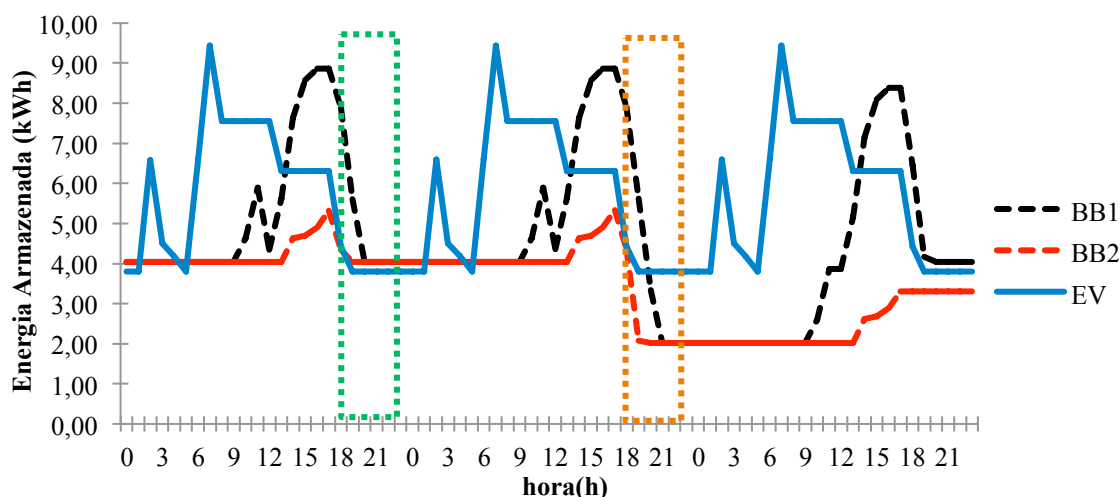


Figura 5.9- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Básica, em modo crítico/emergência.

### 5.2.3 Estratégia Inteligente no Modo Normal

Para o funcionamento normal da MR, os perfis de consumos existentes são iguais aos da Figura 5.6, anteriormente apresentada para a estratégia básica de operação da MR, correspondendo exatamente ao mesmo período de análise, embora o modo como são supridos os consumos possa divergir, por alteração da(s) fonte(s) de energia alocadas no abastecimento das cargas.

Tabela 5.8- Resultados da simulação da Estratégia Inteligente, no modo normal de operação, para os agentes consumidores, para o período de 1 ano.

	Consumidor1	Consumidor2	Consumidor3
Consumo total (kWh)	6.410,04	5.803,74	8.533,68
N.º solicitações à rede	3.653	3.659	3.745
En. fornecida pela rede (kWh)	2.995,31	3.029,03	4.963,42
Necessidades por suprir (kWh)	0,00	0,00	0,00
Encargos (€)	134,69	312,26	851,41

A Tabela 5.8 resume a simulação, sendo apresentados os resultados de interesse para os agentes consumidores. O número de solicitações à rede é bastante semelhante nos três casos, situando-se entre 42% e 43% do total da energia requerida, tal como seria expetável, já que a carga das baterias em período económico visa prevenir o recurso à rede em período fora de vazio.

Comparativamente à estratégia de operação básica do sistema verifica-se um aumento no total de energia solicitada à rede, bem como no número de solicitações de fornecimento de energia enviadas para a mesma. Porém, como as solicitações de

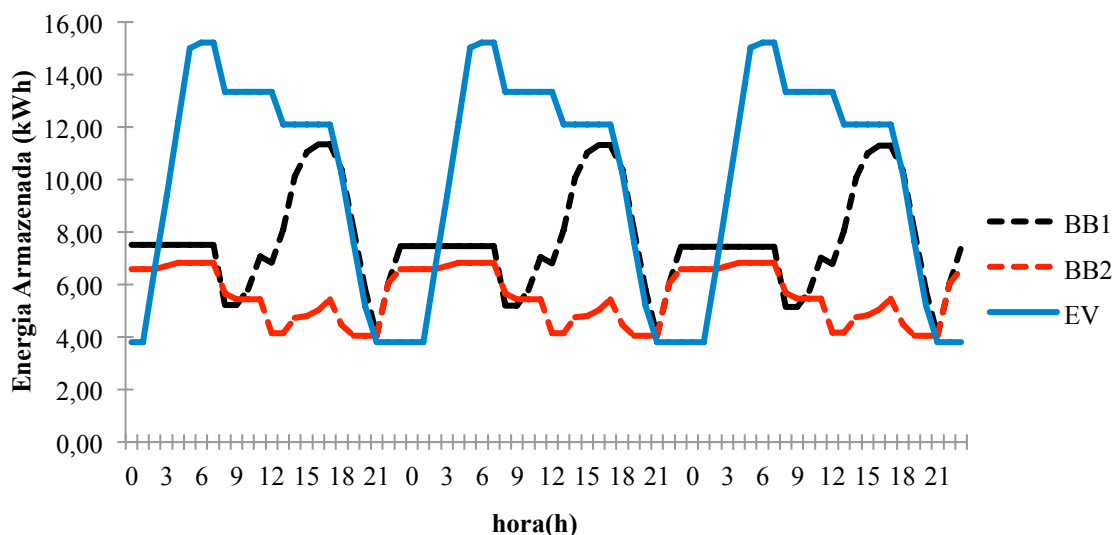
fornecimento de energia são efetuadas em período de vazio, os encargos totais são inferiores.

Ao nível dos agentes produtores, na Tabela 5.9 são sumariados os resultados da simulação para esses agentes, de onde se retira que o produtor fotovoltaico vende à rede cerca de 10% do total de energia gerada na unidade fotovoltaica, ou por ser ultrapassado o estado de carga máximo das baterias, ou por impossibilidade de carregar o total de energia gerada num determinado período de tempo. Em relação ao produtor eólico, a venda de energia anual à rede é residual, inferior a 1%.

**Tabela 5.9- Resultados da simulação da Estratégia Inteligente, no modo normal de operação, para os agentes Produtores, para o período de 1 ano.**

	Produtor fotovoltaico	Produtor eólico
<b>Produção total (kWh)</b>	9.219,46	1.109,52
<b>En. solicitada pelos consumidores (kWh)</b>	8.315,36	1.100,42
<b>En. fornecida à rede (kWh)</b>	904,10	9,10

Na Figura 5.10 é apresentada a variação da energia acumulada nas baterias para a estratégia inteligente. Para o período selecionado de 72 horas, os bancos de baterias 1 e 2 não atingem o limite máximo de carga permitido, ao contrário do EV, que invariavelmente às 6 horas atinge a carga máxima possível para a sua bateria.



**Figura 5.10- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Inteligente, no modo normal de operação.**

Os bancos de baterias fixos carregam essencialmente durante a tarde, e no período de vazio entre as 22 horas e as 8 horas. A maioria das solicitações de fornecimento de energia por parte das baterias ocorre a partir das 17 horas até às 22

horas, altura a partir da qual a satisfação das necessidades dos consumidores passa a ser realizada por recurso à rede pública. O EV carrega a bateria a partir das 2 horas até atingir o nível máximo possível, ou até se deslocar da habitação. A descarga da bateria do EV ocorre devido ao funcionamento do automóvel, e a partir das 19 horas por causa das possíveis solicitações por parte dos agentes consumidores, de tal modo que, imediatamente antes de se iniciar o período de vazio, o nível de armazenamento registado por todos os agentes responsáveis é sensivelmente o mínimo admissível.

**Tabela 5.10- Resultados da simulação da Estratégia Inteligente, no modo normal de operação, para os agentes armazenadores de energia, para o período de 1 ano.**

	<b>Banco Baterias 1</b>	<b>Banco Baterias 2</b>	<b>Veículo Elétrico</b>
<b>SOC &lt;= 20% (n.º ocorrências)</b>	177	705	401
<b>SOC &gt;= 80% (n.º ocorrências)</b>	755	116	1.428
<b>En. Máx. (kWh)</b>	16,18	16,18	15,21

Pela Tabela 5.10 é notório que entre 2% a 8% do ano, as baterias atingem o seu estado de carga mínimo, valores bastante inferiores aos apresentados para a estratégia básica na Tabela 5.7, onde com exceção do EV, o SOC mínimo era atingido em cerca de 50% do período em análise. Por outro lado, verifica-se também uma boa otimização na utilização das baterias, já que para os elementos de armazenamento, é atingido o nível máximo de carga, em respetivamente 9%, 1% e 16% do tempo de simulação, para os bancos de baterias 1 e 2, e para a bateria do EV.

#### **5.2.4 Estratégia Inteligente no Modo Crítico/Emergência**

Na Figura 5.11 é apresentada a variação do consumo total de energia registado nos agentes consumidores, ao longo das vinte e quatro horas de um período de três dias, para a estratégia inteligente, em modo de emergência, na qual são introduzidas medidas inteligentes de gestão e otimização da operação da MR considerada.

Destacado a laranja encontra-se o consumo registado durante o tempo de falha na conexão à rede, onde comparativamente aos perfis de consumo normais destacados na mesma figura a verde, se verifica uma forte diminuição da energia fornecida, devido ao escalonamento, deslastre e priorização de cargas. Durante as primeiras três horas será limitado o fornecimento de energia, que adquire valores semelhantes ao habitual nas últimas duas horas da falha, visto que, já foi garantida a existência de energia suficiente até ao fim da falha para suprir no mínimo as cargas prioritárias. Nas duas horas

seguintes ao fim da falha, destaca-se um pequeno aumento da demanda, visto que os consumos escalonados deverão ser ressarcidos.

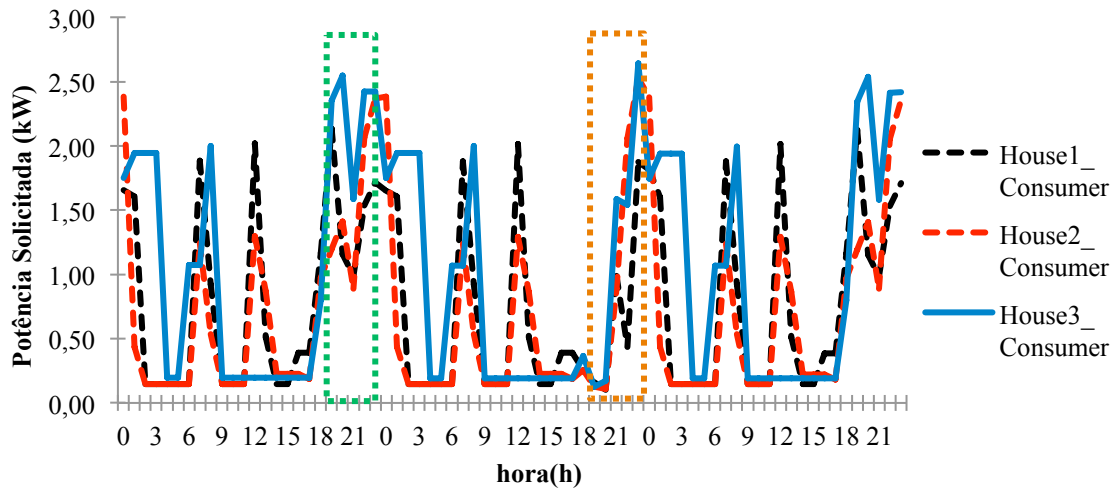


Figura 5.11- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Inteligente, em modo crítico/emergência.

O comportamento dos bancos de baterias é ilustrado na Figura 5.12. O traço laranja tracejado assinala a variação do estado de carga dos elementos de armazenamento, durante a ocorrência registada.

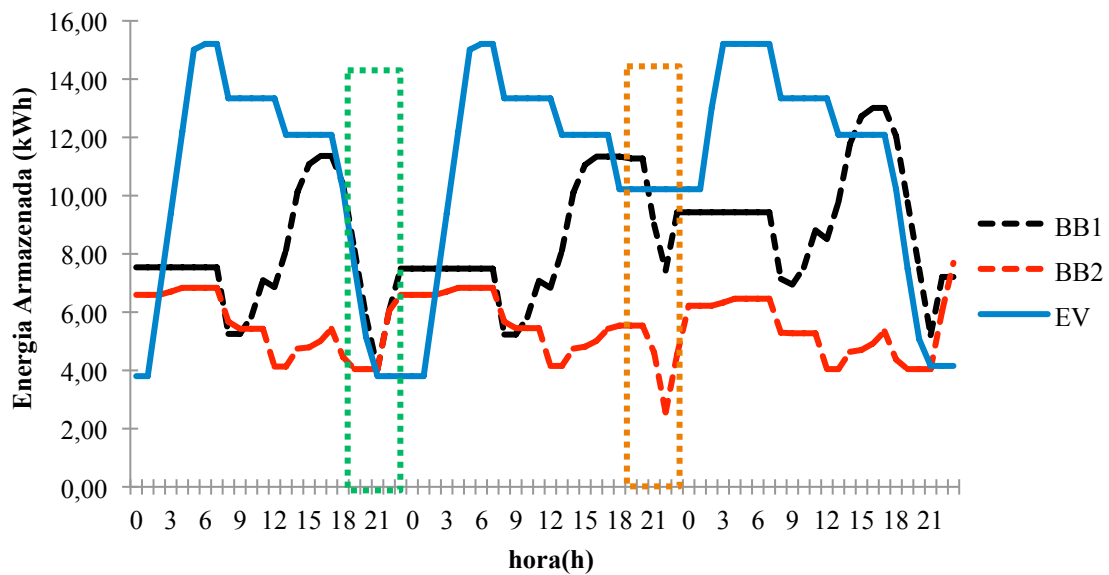


Figura 5.12- Variação da energia armazenada nas baterias registada pelos agentes armazenadores de energia, para a Estratégia Inteligente, em modo crítico/emergência.

O banco de baterias 2 atinge o limite mínimo de 10% do SOC uma hora antes do final da falha. Por sua vez, tanto o banco de baterias 1, como a bateria do EV têm ainda energia acumulada disponível, visto que, as estratégias adotadas tentam precaver um possível problema na rede no período imediatamente a seguir ao fim previsto para a falha, até porque o deslastre, escalonamento e priorização de cargas é previsto

consoante o registo histórico de ocorrências, o que não impossibilita que o problema na ligação à rede persista por um período superior ao valor médio.

### 5.2.5 Análise Comparativa entre as Estratégias Testadas no Modo Normal

Para uma comparação fundamentada entre as duas estratégias apresentadas para o modo de funcionamento normal recorre-se aos resultados apresentados na Tabela 5.11. Pela sua análise compreende-se que, apesar de na estratégia inteligente serem solicitados mais 417 kWh de energia à rede, em termos globais poupam-se cerca de 495 kWh com o sistema inteligente de otimização e gestão, isto porque são vendidos para a rede pública mais 912 kWh, em relação à simulação para o modelo básico do sistema. Além disso, para o sistema otimizado, grande parte das solicitações registadas são efetuadas em período de vazio, resultando numa diminuição global dos encargos de 262 euros, ou seja quase 17% de redução dos encargos.

Tabela 5.11- Comparação dos resultados obtidos para as Estratégias Básica e Inteligente no modo normal.

	Estratégia Básica	Estratégia Inteligente	Diferença (Inteligente-Básica)
<b>En. total fornecida pela rede (kWh)</b>	10.570,99	10.987,96	416,77
<b>En. total fornecida à rede (kWh)</b>	0,57	913,20	912,63
<b>Balanço de energia da rede (kWh)</b>	10.570,41	10.074,56	-495,85
<b>Encargos totais (€)</b>	1.560,53	1.298,37	-262,16

### 5.2.6 Análise Comparativa entre as Estratégias Testadas no Modo Crítico/Emergência

Como já foi discutido nos pontos anteriores, existe uma divergência em termos comportamentais do sistema, dependendo do nível de sofisticação e controlo implementados no mesmo.

Na Figura 5.13 a preto apresenta-se a variação do total do consumo das três habitações, durante três dias.

Na curva a azul tracejado é representado o consumo total de energia para a operação do sistema sem medidas de otimização e gestão. A linha preta contínua é representativa do funcionamento inteligente do sistema, pelo que, em termos comparativos é de ressaltar que no início da falha o sistema inteligente restringe o consumo total de energia, algo que não se verifica na estratégia básica.

O traço vermelho contínuo representa a energia armazenada no total dos três elementos de armazenamento, isto quando o sistema é dotado de inteligência.

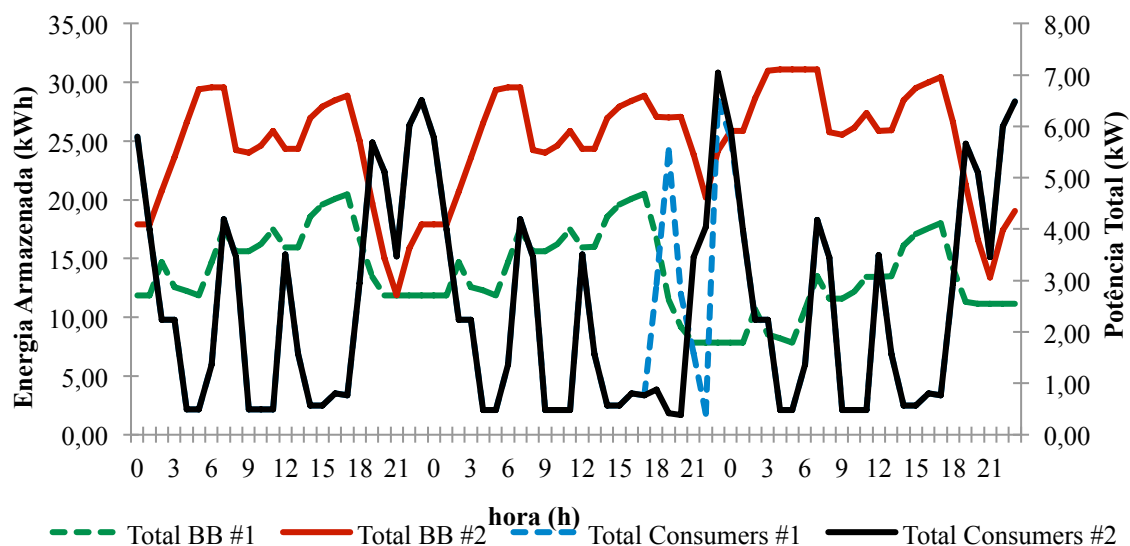


Figura 5.13- Comparação do total de consumo e da energia armazenada, para as Estratégias Básica e Inteligente, no modo crítico/emergência.

O traço verde descontinuo representa a mesma informação, mas na situação em que o sistema não possui capacidades avançadas de tomada de decisão. Na referida situação, o nível médio global da energia armazenada é inferior à situação de simulação do sistema inteligente, já que, a carga antecipada das baterias para evitar o recurso à rede em período fora de vazio, não é efetuada. Como se constata pela figura, a referida capacidade de carga antecipada permite uma margem de energia disponível nas baterias superior, na segunda estratégia.

### 5.2.7 Alocação dos Consumos em Horário Diferente no Modo Normal

Com o objetivo de se verificar a influência da centralização dos consumos em determinado período do dia, para as duas estratégias de funcionamento distintas, no modo normal, foram realizados dois conjuntos de simulações adicionais, um para cada estratégia.

O primeiro conjunto de simulações compreende um deslocamento de parte do consumo registado em período de vazio, para o período fora de vazio. Na segunda série de simulações efetuou-se a ação inversa, pelo que, deslocou-se parte do consumo do período fora de vazio, para o de vazio.

Na Figura 5.14 é apresentada a variação do consumo registado nos agentes consumidores, quando parte do consumo original é deslocada para o período fora de vazio, aliás como é notório na figura referida, onde por exemplo o consumidor 3 no período da manhã entre as 8 horas e as 9 horas solicita quase 5 kWh de energia.

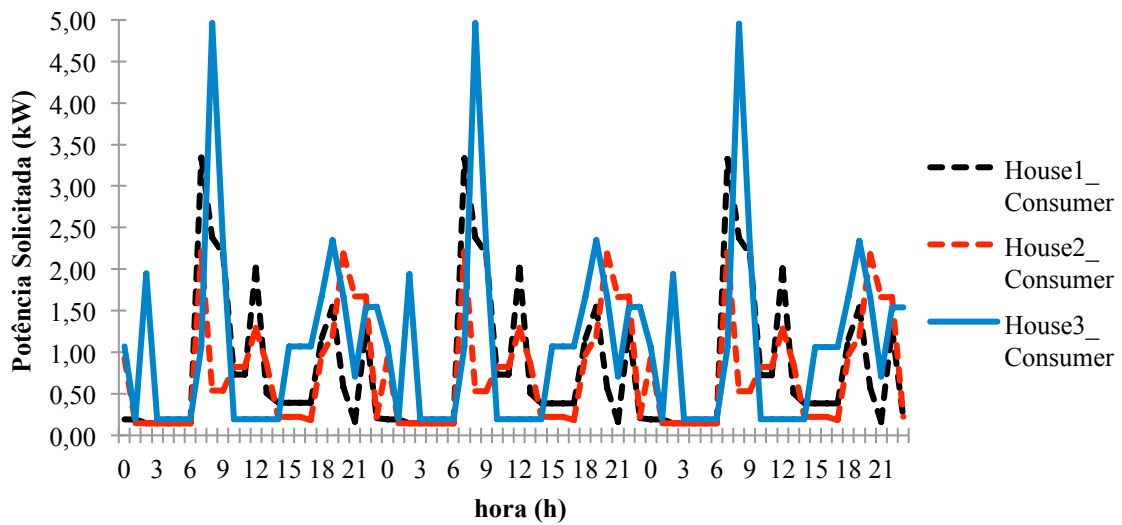


Figura 5.14- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, no modo normal de operação, com deslocamento de algum consumo para o período fora de vazio.

Por outro lado, na Figura 5.15 encontra-se representada a variação do consumo nos agentes consumidores, quando parte do consumo original é deslocada para o período de vazio. Assim, na figura em análise é observável uma centralização do consumo a seguir às 22 horas.

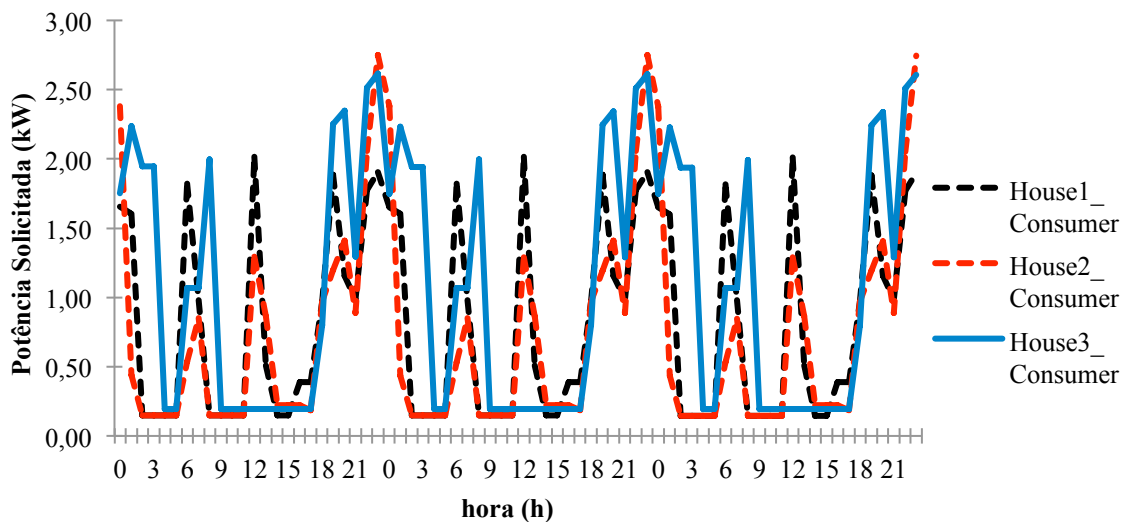


Figura 5.15- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Básica, no modo normal de operação, com deslocamento de algum consumo para o período de vazio.

Na Tabela 5.12 são apresentados os resultados dos dois conjuntos de simulações adicionais, para as duas estratégias de funcionamento, no modo normal de operação. Uma análise atenta aos resultados em questão, permite afirmar que quanto mais deslocado for o consumo para as horas de vazio, mais rentabilidade económica será obtida com o recurso ao sistema dotado com capacidade de otimização e gestão das

operações, com uma redução de encargos face ao modo básico (para os mesmos diagramas de cargas) de 18,5%.

**Tabela 5.12- Resultados dos dois conjuntos adicionais de simulações, no modo normal de operação, para os agentes consumidores, para o período de 1 ano.**

	<b>Estratégia Básica + deslocamento p/vazio</b>	<b>Estratégia Inteligente + deslocamento p/ vazio</b>	<b>Estratégia Básica + deslocamento p/ fora de vazio</b>	<b>Estratégia Inteligente + deslocamento p/ fora de vazio</b>
<b>En. fornecida pela rede (kWh)</b>	10.570,96	11.663,30	10.134,72	8.341,33
<b>En. fornecida à rede (kWh)</b>	0,57	1.411,18	0	0
<b>Balanço de energia da rede (kWh)</b>	10.570,38	10.252,12	10.134,72	8.341,33
<b>Encargos totais (€)</b>	1.515,55	1.235,12	1.764,29	1.536,87

Na simulação em que parte do consumo foi deslocada para período fora de vazio, a redução de encargos com o sistema inteligente foi de 12,9%, apesar de em termos globais ser solicitada uma menor quantidade de energia à rede. Porém, quando o consumo está centrado no período fora de vazio, grande parte das solicitações à rede serão efetuadas nesses períodos, razão pela qual os encargos serão superiores. Apesar do sistema inteligente incluir a carga das baterias no período de vazio, convém lembrar que estas se encontram restringidas ao seu estado de carga máximo, além de apenas puderem carregar uma determinada quantidade de energia em cada período de tempo. Salienta-se ainda, que quanto mais se concentrar o consumo no período fora de vazio, maior será o número de vezes que as baterias irão atingir o seu limite mínimo de carga.

### **5.2.8 Inclusão da Técnica de CVR nos Modos de Funcionamento**

De acordo com o apresentado no Capítulo *Tendências e Desafios nos Sistemas Elétricos de Energia*, a técnica de CVR constitui um elemento interessante de análise no âmbito das Redes Elétricas Inteligentes. Assim, foi simulada uma estratégia adicional que inclui a técnica de CVR aplicada à MR de estudo, nos dois modos de funcionamento, assumindo-se como uma capacidade extra que pode ser introduzida nas estratégias inteligentes de operação. Para este efeito foi considerada uma redução de tensão de 5% em relação ao valor nominal (230 Vac), tendo sido utilizados fatores de

CVR parciais para cada equipamento obtidos experimentalmente, e que relatam a possível poupança de energia.

**Tabela 5.13- Comparação das Estratégias de funcionamento definidas, com a inclusão da técnica de CVR na Estratégia Inteligente, para o modo normal.**

	<b>Estratégia Básica</b>	<b>Estratégia Inteligente</b>	<b>Estratégia Inteligente c/CVR</b>
<b>Consumo Total (kWh)</b>	20.747,46	20.747,46	18.631,70
<b>En. total fornecida pela rede (kWh)</b>	10.570,99	10.987,96	9.454,91
<b>En. total fornecida à rede (kWh)</b>	0,57	913,20	1.718,15
<b>Balanço de energia da rede (kWh)</b>	10.570,41	10.074,56	7.736,76
<b>Encargos totais (€)</b>	1.560,53	1.298,37	941,06

Na Tabela 5.13 é efetuada uma comparação entre os resultados obtidos para as estratégias padrão definidas, e a inclusão da técnica de CVR na estratégia inteligente, para o modo de funcionamento normal. A técnica de CVR permite uma redução dos consumos de energia, sem afetação significativa do funcionamento dos equipamentos, situada na ordem dos 10,2 %, que se traduz numa redução de encargos em relação à estratégia mais básica de operação de 40 %, e comparativamente à estratégia inteligente de gestão e otimização da MR de 27,5 %. Além de uma redução do consumo total, constata-se também uma diminuição da energia total solicitada à rede, e um incremento nas vendas à rede.

Em relação ao modo crítico, na Tabela 5.14 é efetuada a comparação dos consumos entre as duas estratégias de operação, e a estratégia inteligente que inclui a implementação da técnica do CVR.

A utilização de estratégias inteligentes implica uma redução do consumo, associado às regras de escalonamento, priorização e deslastre de cargas, que não são utilizadas na estratégia básica, onde se registam períodos em que a quantidade de energia disponibilizada para os consumidores durante a falha é de 0 kWh, cenário este, que não se repete dotando o sistema com inteligência. A inclusão do CVR na estratégia inteligente permite uma redução extra no consumo, garantindo o mesmo desempenho para as diversas cargas. Aliás, graças à redução generalizada do consumo, é permitido ao consumidor 2 suprir um pouco mais as suas necessidades durante duas horas do período de falha.

**Tabela 5.14- Comparação do consumo nas duas estratégias do modo crítico, com a inclusão da técnica de CVR na Estratégia Inteligente.**

<b>Consumidor1 (kWh)</b>					
<b>Hora do dia (h)</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
<b>Estratégia Básica</b>	1,167	2,129	1,157	0,987	0,400
<b>Estratégia Inteligente</b>	0,255	0,162	0,101	0,987	0,438
<b>Estratégia Inteligente + CVR</b>	0,225	0,143	0,085	0,871	0,383
<b>Consumidor2 (kWh)</b>					
<b>Hora do dia (h)</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
<b>Estratégia Básica</b>	0,972	1,196	1,410	0,588	0,000
<b>Estratégia Inteligente</b>	0,255	0,129	0,109	0,890	2,059
<b>Estratégia Inteligente + CVR</b>	0,222	0,349	0,437	0,741	1,910
<b>Consumidor3 (kWh)</b>					
<b>Hora do dia (h)</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
<b>Estratégia Básica</b>	0,799	2,217	0,169	0,000	0,000
<b>Estratégia Inteligente</b>	0,368	0,125	0,174	1,585	1,543
<b>Estratégia Inteligente + CVR</b>	0,311	0,111	0,154	1,396	1,351
<b>Total dos Consumidores (kWh)</b>					
<b>Hora do dia (h)</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
<b>Estratégia Básica</b>	2,938	5,542	2,736	1,575	0,400
<b>Estratégia Inteligente</b>	0,878	0,416	0,384	3,462	4,040
<b>Estratégia Inteligente + CVR</b>	0,758	0,603	0,676	3,008	3,644

Ainda na Tabela 5.14, mas relativamente ao total dos três consumidores, observa-se que em três das cinco horas do período de falha, a inclusão da técnica de redução de tensão permite uma diminuição do total do consumo. Por outro lado, no período das 19 horas às 20 horas o consumo é superior, quando se considera o recurso ao CVR. Todavia, estes resultados não constituem uma contrariedade para o CVR, já que, nesse período foi permitido que os consumidores utilizassem mais energia, isto é, foram aplicados níveis de restrição menores no deslastre de cargas.

### **5.2.9 Forecasting no Modo Crítico**

Para verificar a utilidade do *Forecasting* para determinação da produção expetável, foi efetuada uma simulação para o modo de funcionamento crítico, pretendendo-se analisar a importância que os modelos de previsão de produção com base em dados meteorológicos podem assumir, face à solução utilizada até então, que previa a utilização de médias móveis de produção dos últimos sete dias.

Neste caso são utilizadas as condições meteorológicas obtidas para o instante em que se procede à simulação, que não é efetuada em tempo real, pelo que o dia em análise (21 de Janeiro) será avaliado a partir dos dados meteorológicos obtidos aquando da realização da simulação.

Na Figura 5.16 é apresentada a evolução da potência solicitada pelos consumidores, quando o sistema é dotado de inteligência, onde integra a capacidade de prever a produção expectável para o período estimado de falha, com base na previsão meteorológica. O tracejado laranja representa o comportamento do consumo no período de falha. Comparativamente ao funcionamento do sistema inteligente sem capacidade de previsão da produção com base na meteorologia, apresentado na Figura 5.11, verifica-se que a energia disponibilizada para os consumidores é inferior, isto porque a produção prevista para a turbina eólica é inferior ao perfil de produção adotado, conforme apresentado no Capítulo 3.

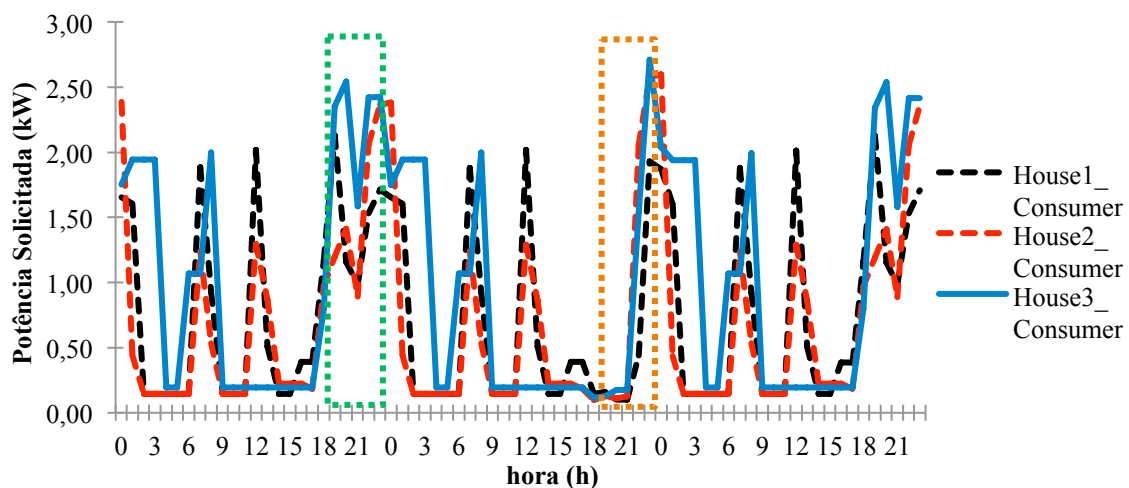


Figura 5.16- Variação dos consumos registados pelos agentes consumidores para a Estratégia Inteligente com a inclusão de *forecasting* para a produção, em modo crítico/emergência.

Em relação à produção fotovoltaica os valores obtidos pela previsão meteorológica são os mesmos que os do perfil de produção adotados, neste caso 0 kWh, visto que às 18 horas do dia 21 de Janeiro já se deu o ocaso.

A previsão meteorológica assume especial importância no caso de consideráveis divergências entre os perfis adotados de produção, e os valores obtidos pela previsão.

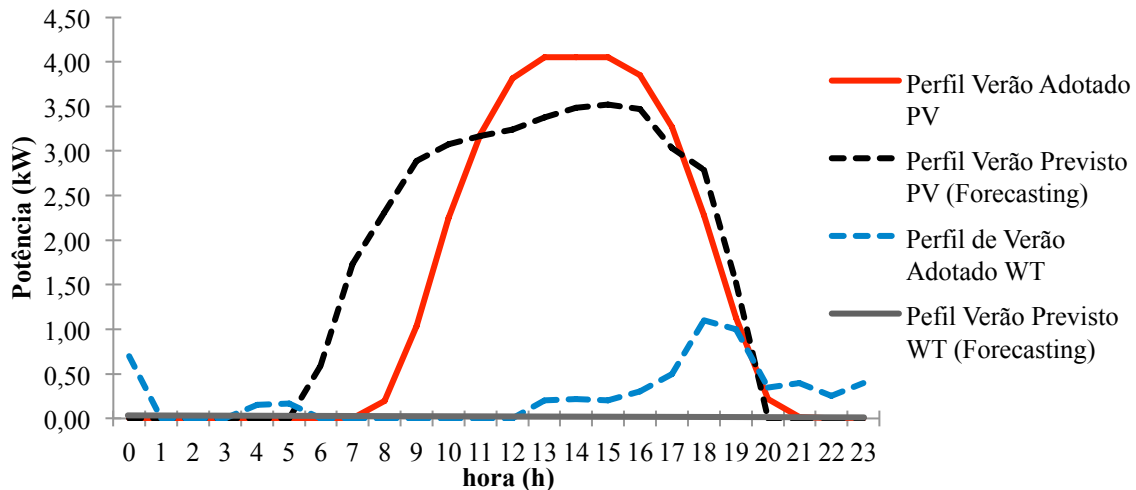


Figura 5.17- Curva potência adotada, e potência prevista para unidade a fotovoltaica (PV) da MR e para o aerogerador (WT), num dia típico de Verão.

Se o dia selecionado para a simulação coincidir com a data atual, correspondente ao perfil de produção de Verão, o comportamento do sistema será semelhante (conforme expectável pela Figura 5.17), já que, segundo os dados de entrada da simulação, o consumo é inferior no Verão, ao contrário da geração de energia, além de que o estado de carga das baterias também é elevado. Segundo a previsão, a potência eólica esperada para a data atual, permanecerá em 0 kW, ao longo de todo o dia.

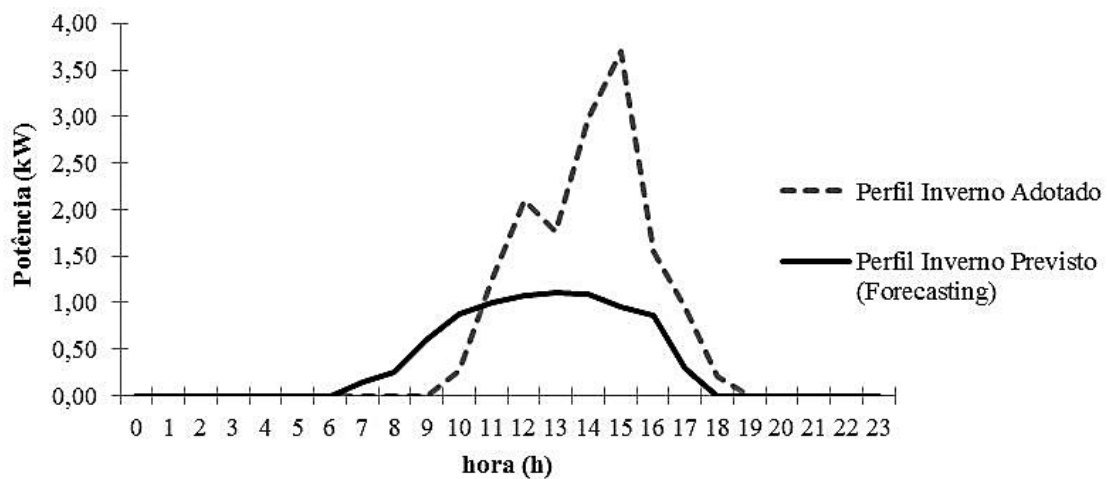
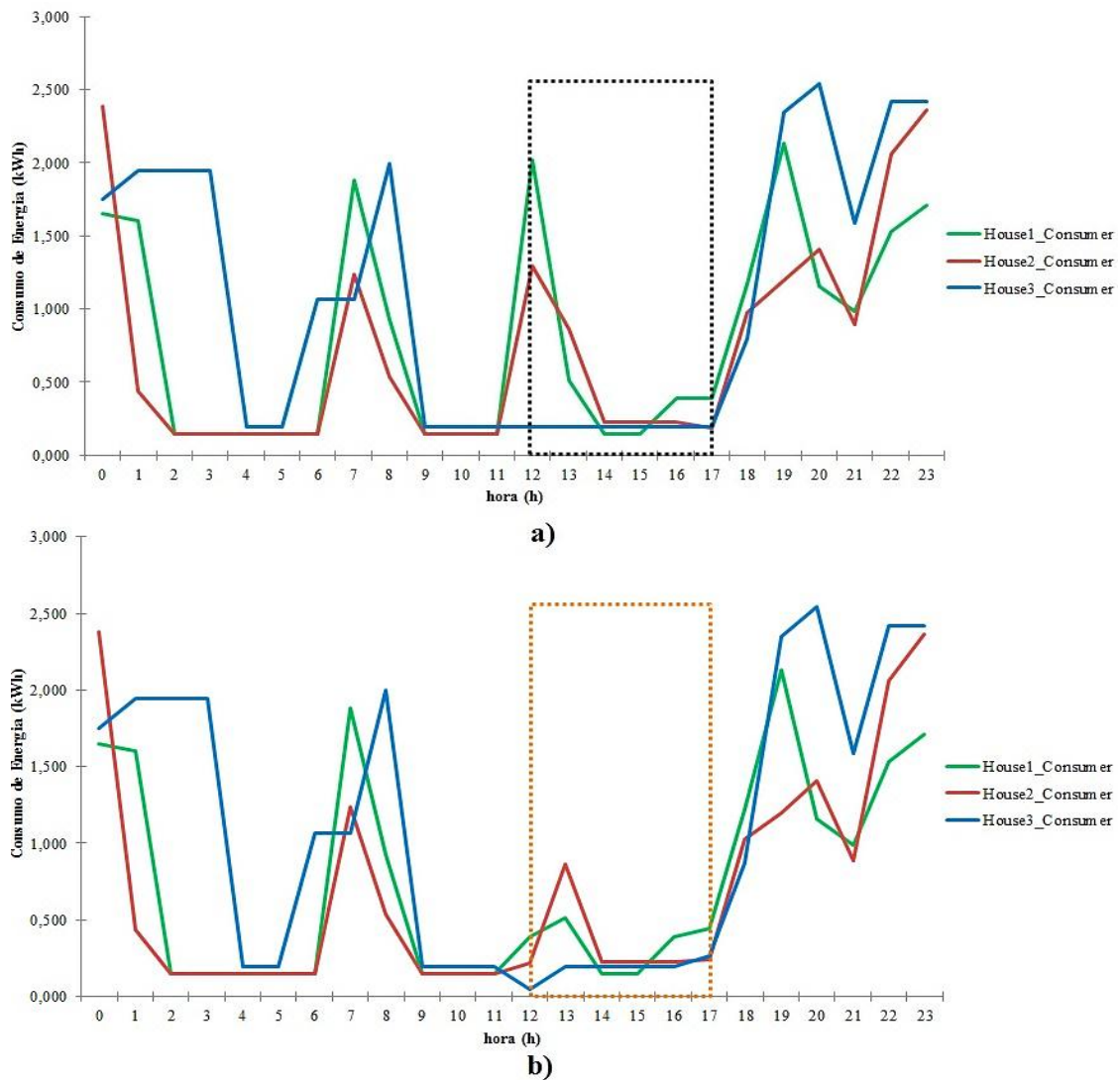


Figura 5.18- Curva de potência adotada, e potência prevista para a unidade fotovoltaica da MR, num dia típico de Inverno com influência da nebulosidade.

Na Figura 5.18 é apresentada a curva de potência adotada para um dia típico de Inverno para a unidade fotovoltaica (21 de Janeiro, tal como anteriormente considerado), além de uma outra curva correspondente à potência estimada para essa unidade nesse mesmo dia, obtida a partir da previsão meteorológica, e tendo em

considerando a presença constante de nebulosidade ao longo do dia (redução de cerca de 50% da radiação disponível).

Se ocasionalmente ocorresse uma falha/avaria na ligação à rede, no período compreendido entre as 12 horas e as 17 horas, e considerando que o sistema é dotado das capacidades já enunciadas de deslastre, priorização e escalonamento de cargas, então as variações notórias, em termos de disponibilização de energia para os agentes consumidores, seriam as representadas na Figura 5.19.



**Figura 5.19- Variação da energia disponibilizada para os agentes consumidores num dia típico de Inverno: a) sem previsão meteorológica; b) com previsão meteorológica.**

Analisando a Figura 5.19, compreende-se que a variação da produção registada a partir da previsão dos dados meteorológicos, promove uma modificação na gestão efetuada pelo controlo inteligente da MR, como é visível no retângulo a laranja, onde está destacado o período de falha, e onde é perceptível uma restrição mais rigorosa dos consumos, comparativamente com a imagem a), cujo período de interesse está

assinalado a preto. Tal fato deve-se à grande disparidade em termos de geração de energia, já que a nebulosidade afeta drasticamente funcionamento da unidade fotovoltaica. Por outro lado, e segundo o perfil obtido para o aerogerador na Figura 5.17, as baixas velocidades do vento levam a uma produção estimada de 0 kWh ao longo do dia.

### **5.3 Síntese**

Ao longo deste capítulo foram apresentados os detalhes da implementação do caso do estudo segundo a arquitetura projetada para o sistema multiagente, tendo sido escolhida a ferramenta de modelação e simulação baseada em agentes, Repast.

As estratégias e mecanismos incluídos no modelo criado seguem o estipulado, podendo o sistema operar em modo normal ou de emergência, sendo incluídas estratégias e mecanismos inteligentes de gestão e otimização da MR, em ambos os modos de funcionamento.

Após a implementação do caso de estudo em Repast, foram executadas várias simulações, de forma a testar a capacidade de resposta do modelo criado.

No primeiro conjunto de simulações foram testados os dois modos de funcionamento (normal e crítico) nas duas estratégias consideradas (básica e inteligente). Para o modo normal, na estratégia inteligente apesar de serem solicitados mais 417 kWh de energia à rede, em termos globais poupam-se cerca de 495 kWh com o sistema inteligente de otimização e gestão, isto porque são vendidos para a rede pública mais 912 kWh, permitindo uma redução de encargos de 262 euros, ou seja 17% em relação à estratégia básica, para o período de simulação de 1 ano. No modo crítico, a utilização da estratégia inteligente com os mecanismos de priorização, deslastre e escalonamento de consumos permite gerir a energia, de modo a satisfazer no mínimo as necessidades mais básicas dos consumidores, ao contrário da estratégia sem inteligência, onde a não aplicação de nenhum dos mecanismos referidos, pode levar a que durante uma interrupção na ligação à rede, não sejam satisfeitas quaisquer necessidades dos consumidores durante algum tempo.

Uma breve simulação em relação à interferência da localização dos consumos na melhoria proporcionada pela dotação de inteligência à MR, permitiu identificar que quanto mais o consumo se centralizar em períodos de vazio, que são mais económicos, maiores serão os benefícios económicos proporcionados pela dotação de inteligência à

MR, embora tal fato possa estar relacionado com as limitações no funcionamento dos elementos de armazenamento de energia.

A inclusão da técnica de redução da tensão, CVR, na estratégia inteligente de operação no modo normal, considerando uma redução da tensão de 5 % em relação ao seu valor nominal (230 Vac) e os fatores de CVR das cargas utilizados, permitiria uma redução de consumos face à estratégia básica de cerca de 40 %, e uma diminuição aproximada de 28 % face à estratégia inteligente edificada e que não inclui o CVR. No modo crítico, o CVR permite que o consumo das cargas críticas sujeitas aos mecanismos de controlo de funcionamento, seja ainda inferior.

Por último, foi simulada a utilização de *forecasting* para estimar a produção das unidades de microgeração, com base em dados meteorológicos, sendo para tal requerido o acesso a uma aplicação *Web*, que fornece esses dados. A previsão da produção a partir de dados meteorológicos pode assumir especial relevância no caso de a rede entrar em funcionamento no modo de emergência, visto que a gestão da energia disponível será bastante sensível a elevadas disparidades entre as produções reais e as previstas pelo sistema. Assim, pela simulação é notório que quanto mais contrastarem os valores previstos através das médias móveis dos últimos dias com a produção real estimada através de dados meteorológicos, mais importante a ferramenta de *forecasting* se assume, podendo permitir a gestão mais adequada no fornecimento das cargas críticas.

Em suma, conclui-se que a dotação de inteligência ao controlo da micro-rede do caso de estudo é uma opção fundamental, permitindo diminuir os consumos de energia, os encargos económicos associados, além de se proporcionar um maior nível de segurança ao consumidor, visto que, no caso de uma interrupção na ligação à rede, os mecanismos adotadas de gestão e otimização das cargas críticas, permitem que as necessidades mínimas admissíveis sejam supridas. A inclusão do CVR, caso seja viável tecnicamente, assume-se como uma excelente oportunidade para incrementar a poupança energética e a redução de encargos.

## 6 Conclusões

Ao longo deste capítulo são apresentadas e discutidas as principais conclusões retiradas da realização do trabalho efetuado, tendo por base os objetivos delineados no início do estudo das estratégias de gestão e otimização para o funcionamento das Micro-Redes.

### 6.1 Conclusões Gerais

A alteração do paradigma energético em torno das redes elétricas de energia tem conduzido ao emergir de pequenas redes de baixa tensão, compostas essencialmente por unidades de microgeração, frequentemente de fontes renováveis de energia, dispositivos de armazenamento e cargas controláveis, e que requerem uma infraestrutura de comunicação adequada entre os elementos constituintes, as Micro-Redes.

Um agente é uma entidade de *software* autónoma e cooperativa, que atua como representante de alguém ou de algo. Um sistema multiagente é um sistema computacional em que dois ou mais agentes interagem ou trabalham em conjunto de forma a desempenhar um determinado conjunto de tarefas ou satisfazer um conjunto de objetivos, que se encontram além da capacidade intrínsecas de cada um dos agentes em particular.

Para o caso de estudo, foi utilizada uma plataforma de modelação e simulação baseada em agentes, o Repast 2.1.

O principal objetivo inerente ao trabalho realizado relacionou-se com o estabelecimento de estratégias e mecanismos de gestão e controlo de MR, que permitam aumentar a sustentabilidade e a eficiência energética das mesmas. Assim, estabeleceram-se dois modos de operação da MR (normal e crítico), e duas abordagens estratégicas (básica e inteligente), onde podem ser incluídos mecanismos inteligentes de controlo das cargas (priorização, deslastre, escalonamento), de *forecasting* da produção com base em dados meteorológicos, e de gestão do período de cargas das unidades de armazenamento.

A introdução de inteligência na gestão da MR em análise, em modo normal, conduz a um aumento no total de energia solicitada à rede. Porém, como essas solicitações são efetuadas em período de vazio, e a quantidade de energia vendida à rede aumenta, os encargos totais são menores (17%).

Em modo crítico, a utilização de estratégias e mecanismos inteligentes de priorização, deslastre e escalonamento das cargas, permite precaver o fornecimento de

níveis mínimos de energia para suprir as necessidades das cargas críticas na ótica do utilizador. Para tal, o sistema multiagente irá impor uma restrição controlada da energia disponibilizada para os consumidores, essencialmente nas primeiras horas a seguir à ocorrência do problema na ligação à rede, e baseando-se nos valores esperados de produção, consumo, e também na energia útil existente nas baterias. A partir do momento que o sistema preveja que a energia disponível é suficiente para suprir o consumo mínimo das cargas prioritárias até à hora prevista de término da falha, então implementará níveis inferiores de restrição no fornecimento de energia aos consumidores.

Para a MR em estudo, quanto mais concentrado se encontrar o consumo em períodos de vazio, maior será a poupança económica obtida em comparação com a estratégia básica, de acordo com um conjunto de simulações efetuadas no modo normal de operação da micro-rede. Nessas simulações testou-se a influência do desvio de parte do consumo para os períodos de vazio e fora vazio. Apesar de em ambos os casos, a estratégia inteligente utilizada incluir a carga antecipada das baterias em período económico, convém lembrar que existem restrições em relação ao estado de carga máximo das baterias, além de que, em cada unidade de tempo, apenas uma determinada quantidade de energia pode ser alocada nos dispositivos de armazenamento.

A possível inclusão da técnica de redução da tensão, CVR, na estratégia inteligente de gestão em modo normal, permite uma poupança de custos face à estratégia básica de 40% e de 28% face à estratégia inteligente, quando não são considerados os efeitos da referida técnica. Em modo crítico, o CVR permite gerir o funcionamento das cargas de um modo menos restritivo, garantindo uma autonomia superior para a MR quando esta operar em sistema isolado.

A utilização de mecanismos *forecasting* da produção, com base em dados meteorológicos constitui uma abordagem alternativa, viável, e que pode ser incluída nas estratégias inteligentes de otimização e gestão das MR. Neste caso específico, a sua utilização assume especial destaque em modo crítico, já que, em casos em que existe ao longo dos dias alguma variabilidade das condições atmosféricas, o *forecasting* torna-se um mecanismo mais correto para estimar a produção expetável, do que o recurso a médias móveis do histórico de produção, permitindo uma melhor gestão das cargas dos consumidores durante interrupções na ligação à rede.

Em suma, com base no trabalho realizado e nos resultados às simulações executadas, é legítimo assumir-se que a dotação de inteligência no processo de gestão

das MR, através de mecanismos e estratégias de otimização, permite aumentar a eficiência económica e energética para o conjunto de consumidores existentes, além de incrementar a sustentabilidade da MR em caso de falha na ligação à rede a montante, a partir do controlo das cargas críticas na ótica do utilizador.

## **6.2 Desenvolvimentos Futuros**

Após a elaboração deste documento e sobretudo com base na experiência adquirida no âmbito dos sistemas multiagentes, pode-se enumerar um alargado leque de situações que futuramente podem e devem ser analisadas para otimizar os processos de gestão para as MR com maior nível de complexidade, que considerem a presença de outros tipos de agentes, de maior dimensão, e com unidades de consumo diferentes, por exemplo, através da inclusão de edifícios de serviços ou de comércio.

Neste trabalho foi introduzida de uma forma superficial o potencial do *forecasting*, enquanto mecanismo de otimização para a operação de uma micro-rede. Sugere-se efetuar uma abordagem mais profunda a esta técnica, utilizando ferramentas mais precisas para a conversão dos dados meteorológicos disponibilizados, nomeadamente na conversão das temperaturas previstas em radiação solar exetável, incluindo o tipo de influência que a nebulosidade acarreta em termos da radiação.

Um ponto interessante a desenvolver futuramente, e de acordo com a legislação que vigora em Portugal (que prevê que um determinado consumidor possa assumir simultaneamente o papel de consumidor e de produtor), passa por implementar um mecanismo de variação do preço da eletricidade conforme a oferta e a procura disponíveis, para que cada consumidor possa negociar o modo mais rentável para suprir as suas necessidades.

Além dos desenvolvimentos já enumerados, a implementação física de uma unidade-piloto, isto é, a análise em tempo real do controlo de uma micro-rede com base num sistema multiagentes, é um passo essencial para a maturação e aperfeiçoamento das estratégias de otimização e controlo que foram introduzidas ao longo do presente documento.

## 7 Bibliografia

- [1] *Programa Específico de Execução do Horizonte 20-20-20- Programa-Quadro de Investigação e Inovação (2014-2020)*, C. Europeia, 2011.
- [2] K. Kok, "Power Matcher: The Smart Coordination for the Smart Electricity Grid," PhD, Dutch Research School for Information and Knowledge Systems, 2013.
- [3] X. Fang, *et al.* (2012), Smart Grid- the New and Improved Power Grid: A Survey *IEEE Communications Surveys & Tutorials 14*.
- [4] A. G. Madureira, "Coordinated and Optimized Voltage Management of Distribution Networks with Multi-Grids," Doctor of Philosophy Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering University of Porto, 2010.
- [5] H. Farhangi. (2010) The Path of the Smart Grid. *IEEE Power & Energy*. 11.
- [6] M. Ribeiro, "Estratégia de Reposição em Serviço utilizando Micro-redes," MSc Dissertation, Computing and Electrical Engineering, University of Porto, 2010.
- [7] T. L. Vandoorn, *et al.*, "Active Load Control in Islanded Microgrids Based on the Grid Voltage," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 2, pp. 139-151, 2011.
- [8] ONU. (2013). Available:  
<http://www.unmultimedia.org/radio/portuguese/2013/05/estudo-da-onu-afirma-que-12-bilhao-nao-tem-acesso-a-eletricidade/>
- [9] T. Kojima and Y. Fukuya. Microgrid System for Isolated Islands. *57(Smart Community)*.
- [10] F. Thim, *et al.* Conception and Operation of a Unique Large-Scale Hybrid System on a Hebridean Island.
- [11] M. Mondal and S. Mandal, "Remote Village Electrification through Renewable Solar energy: a Case Study of Sagar Island, West Bengal, India," *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, vol. 2, pp. 201-205, 2013.
- [12] Y. Fan, *et al.* (2012), Design and Implementation of Stand-alone Smart Grid Employing Renewable Energy Resources on Pulau Ubin Island of Singapore.
- [13] M. Hasan, *et al.*, "Analysis of Smart grid with 132/33 kV sub-transmission line in rural power system of Bangladesh," *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 2, pp. 106-110, 2013.

- [14] E. a. C. F. Association, "Rural Eletrification Program by Renewable Energy in the Mountainous Region of Nothern Samar in the Philippines," West Japan Engineering Consultants2007.
- [15] Z. Ezor, "Rural Eletrification in Uganda," School for International Training, 2009.
- [16] H. Karacaoglan, "Customized Techological Solutions for Rural Eletrification based on Renewables," ed: SMA Solar Technology.
- [17] D. Gantenbein, *et al.* (2012, EcoGrid Eu: An Efficient ICT Approach for a Sustainable Power System.
- [18] J. J. Justo, *et al.*, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 387-405, 2013.
- [19] E. Planas, *et al.*, "General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 17, pp. 147-159, 2013.
- [20] A. Ipakchi. (2007, Implementing the Smart Grid: Enterprise Information Integration.
- [21] P. Palensky and F. Kupzog, "Smart Grids," Austrian Institute of Technology2013.
- [22] D. M. Lauria, "Conservation Voltage Reduction (CVR) at Northeast Utilities," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 2, pp. 1186-1191, 1987.
- [23] S. C. FREEMAN, "3-Phase Conservation Voltage Reduction Analysis," ReportDEC 15, 2006 2006.
- [24] L. Global Energy Partners, "Distribution Efficiency Initiative," E05-139, MAY 18, 2005 2005.
- [25] R. H. Fletcher and A. Saeed, "Integrating engineering and economic analysis for conservation voltage reduction," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, 2002, pp. 725-730 vol.2.
- [26] "Operationalizing Privacy by Design: The Ontario Smart Grid Case Study," Information & Privacy Commissioner2011.
- [27] "Smart Grid, Smart City : A new direction for a new energy era," d. Á. e. d. A. Departamento do Ambiente, Ed., ed, 2009.
- [28] V. Giordano, *et al.*, "Smart Grid projects in Europe: Lessons learned and current developments," European Commission, JRC Scientific and Policy Reports2013.

- [29] G. P. J. Verbong, *et al.*, "Smart grids or smart users? Involving users in developing a low carbon electricity economy," *Energy Policy*, vol. 52, pp. 117-125, 2013.
- [30] F. Gomes and A. Carrapatoso, "Projecto InovGrid- A evolução da rede de distribuição como resposta aos novos desafios do sector eléctrico," in *VIII Simpase- Simpósio de Automação de Sistemas Eléctricos*, ed. Brasil, 2009.
- [31] C. Macal and M. North, "Agent-Based Modeling and Simulation," in *Winter Simulation Conference*, 2009.
- [32] H. Feroze, "Multi-Agent Systems in Microgrids: Design and Implementation," Master of Science, Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [33] P. Leitão, *et al.*, "Multi-Agent Systems as Automation Platform for Intelligent Energy Systems," presented at the IECON 2013, 2013.
- [34] L. P. Reis, "Introdução aos Sistemas Multi-Agentes," ed: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.
- [35] M. Pechoucek and V. Marik. (2008, Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies.
- [36] M. C. Costache and V. Minzu, "Multi-agent systems in industrial fault diagnosis," in *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2012 16th International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [37] Sa, *et al.*, "Selecting a multi-agent system development tool for industrial applications: a case study of self-serving aircraft assets," in *Digital Ecosystems and Technologies (DEST), 2010 4th IEEE International Conference on*, 2010, pp. 400-405.
- [38] S. D. J. McArthur, *et al.*, "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications&#x2014;Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1753-1759, 2007.
- [39] G. J. Schaeffer and H. Akkermans, "CRISP Final Summary Report," 2006.
- [40] T. Nagata, *et al.*, "A multi-agent approach to smart grid energy management," in *IPEC, 2012 Conference on Power & Energy*, 2012, pp. 327-331.
- [41] M. Pipattanasomporn, *et al.*, "Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation," in *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*, 2009, pp. 1-8.

- [42] N. Hatziargyriou, "Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids," European Commission, Sixth Framework Project for RTD, Summary Report 2009.
- [43] T. Italia. (2014). *Java Agent Development Framework*. Available: <http://jade.tilab.com/>
- [44] D. A. Cohen, "GridAgents&#x2122;: Intelligent agent applications for integration of distributed energy resources within distribution systems," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-5.
- [45] M. Merdan, *et al.*, "Multi-Agent system for self-optimizing power distribution grids," in *Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2011 5th International Conference on*, 2011, pp. 312-317.
- [46] "Powering Yourself – WindGEN 3000," P. Y. Conceitos Energéticos Lda, Ed., ed, 2012.
- [47] Electropaedia. *Electric Vehicle Charging Infrastructure*.
- [48] D. Magalhães, "Modelo de Baterias com aplicação em sistemas de gestão de baterias (BMS) de Veículos Elétricos (EVs)," Mestre, Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [49] J. Ozik, "Relogo Getting Started Guide," ed: Repast Development Team, 2014.
- [50] E. Serviço Universal. (2014). *Tarifas BTN até 20.7 kVA*. Available: <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>
- [51] Wikipedia. (2014). *Wind turbine*. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine)
- [52] (2014). Available: <http://api.openweathermap.org/data/2.5/forecast/daily?q=Braganza,PT&mode=xml&units=metric&cnt=2>
- [53] L. Bristow K and S. Campbell G, "On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature," *Agricultural and forest meteorology*, vol. 31, pp. 159-166, 1984.

## **8 Anexos**

### **8.1 Anexo A : Sistemas de Armazenamento de Energia**

## **A Sistemas de Armazenamento de Energia**

Os sistemas/tecnologias de armazenamento de energia assumem-se como um dos elementos essenciais na área das MR, sendo de importância vital no caso sistemas isolados. A produção e o consumo desfasados temporalmente, implica o recurso a sistemas de armazenamento, acumulando energia proveniente da produção e que não está a ser requerida no momento, e alimentando as cargas quando a produção é insuficiente, permitindo assim melhorar a qualidade de energia. Uma outra função essencial dos sistemas de armazenamento de energia está relacionada com a alimentação de cargas críticas, fornecendo energia em caso de falhas da rede.

Atualmente existem diversas soluções de armazenamento de energia, fruto do forte investimento e da investigação desenvolvidos nesta área. No caso das MR, e de acordo com [1] e [2], as tecnologias de armazenamento mais apropriadas são *Flywheels*, que armazenam energia cinética recorrendo a um volante de inércia, Baterias, Super-Condensadores, cujo armazenamento de energia é limitado mas permitem uma resposta muito rápida a solicitações bruscas, sistemas mecânicos a ar comprimido e Hidrogénio, que armazenam energia química, podendo esta ser convertida através de células de combustível.

Geralmente, para fins de equilíbrio entre produção e consumo são necessários dispositivos com elevada capacidade de armazenamento, preferencialmente com uma elevada densidade específica, permitindo fornecer uma considerável quantidade de energia durante longos períodos de tempo. Neste âmbito, destacam-se os sistemas eletroquímicos, como as baterias e as células de combustível. Por outro lado, para compensar pontuais flutuações de potência, são utilizados sistemas com uma elevada rapidez de resposta, e que têm uma elevada potência específica, tal como os super-condensadores. Devido à sua vulgarização e ampla utilização, as baterias químicas são objeto de estudo nas secções seguintes onde serão explorados os principais conceitos e especificações afins às baterias.

### **A.1 Princípio do Funcionamento das Baterias**

De um modo geral, uma bateria é um elemento responsável pela conversão de energia química em energia elétrica, podendo o processo ser reversível, no caso das baterias recarregáveis. A quantidade de energia armazenável numa bateria depende

diretamente da quantidade de reagentes colocados no seu interior, aquando da conceção da mesma.

Em termos técnicos, as baterias podem ser classificadas em primárias ou secundárias. As primárias não permitem o processo de recarga, ao passo que as secundárias permitem a recarga, ou seja, a conversão de eletricidade em energia química.

Conceptualmente, as baterias correspondem à agregação de elementos básicos conhecidos como células, que são ligadas em série ou paralelo, de modo a satisfazer os requisitos de tensão e potência de um determinado sistema.

Uma célula é tipicamente composta por dois elétrodos: um positivo (o cátodo), e o outro negativo (o ânodo), um eletrólito, um separador e, obviamente, pelos terminais. A diferença de potencial de uma célula corresponde à diferença entre os potenciais absolutos dos elétrodos positivo e negativo.

O ânodo é o eléctrodo onde ocorre a semi-reação de oxidação (libertação de electrões), sendo simbolizado por um sinal negativo (-) junto ao seu terminal. Por seu lado, o cátodo é o eléctrodo onde ocorre a captação de electrões, isto é, onde decorre a semi-reação de redução, sendo simbolizado por um sinal positivo (+) junto do seu terminal. À resultante das duas semi-reações referidas atrás, é dado o nome de equação de oxidação-redução, ou simplesmente REDOX [3].

O eletrólito é o meio que permite a condução iónica entre os dois elétrodos. O separador é uma camada isolante que separa fisicamente os elétrodos de polaridade oposta. Os terminais são os pontos de ligação entre os elétrodos e o circuito externo.

Quando uma célula está em processo de descarga (a fornecer energia), os electrões fluem do ânodo para o cátodo, através da ligação estabelecida pela carga. Por sua vez, no eletrólito existe a migração dos aniões (iões com carga negativa) do cátodo para o ânodo, e de catiões (iões com carga positiva) em sentido inverso.

Durante o carregamento, o fluxo de corrente é invertido, registando-se a oxidação no eléctrodo positivo, que passa a ser o ânodo, ocorrendo a redução no eléctrodo negativo, que passa a ser o cátodo [4].

Na Figura A.1 a) é apresentado o comportamento da bateria na descarga, e na Figura A.1 b), o comportamento da bateria no processo de carga.

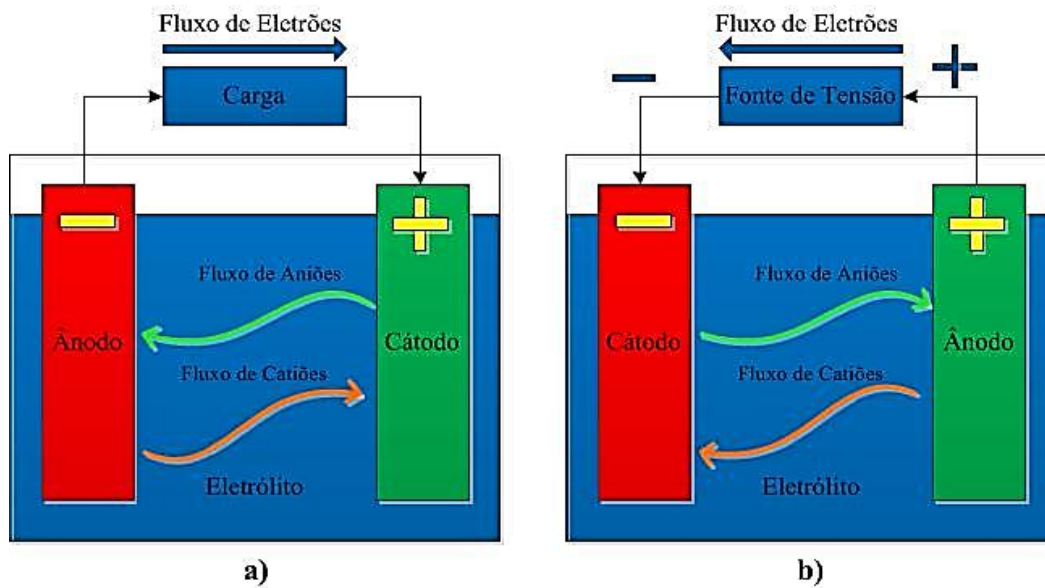


Figura A.1- Representação simplificada de uma célula eletroquímica durante a carga (a) e descarga (b). (Adaptado de [3])

## A.2 Especificações Técnicas das Baterias

A energia armazenada numa bateria é avaliada pela sua capacidade,  $C_{bat}$ , sendo normalmente expressa em Ah, ou em Wh. Quanto maior for a capacidade de uma determinada bateria, maior será a quantidade de energia armazenável na mesma.

A capacidade nominal de uma bateria,  $C_N$ , corresponde ao valor da corrente que permite a descarga da bateria em uma hora, em condições externas (temperatura, e.g.) pré-especificadas, sendo normalmente um dado disponibilizado pelo fabricante.

Usualmente, o fabricante disponibiliza ainda informação sobre a quantidade de energia que é possível retirar da bateria, para diferentes tempos de descarga, dado que a capacidade da bateria e o tempo de descarga não se relacionam de forma linear. Como exemplo, a referência de  $C_6 = 150$  Ah, significa que, para um período de descarga de 6 horas a uma corrente constante de 25 A, podem utilizar-se 150 Ah da capacidade da bateria, enquanto  $C_8 = 250$  Ah, indica que, para um período de descarga de 8 horas a uma corrente constante de 31,25 A, podem utilizar-se 250 Ah da capacidade da bateria.

Existe uma relação exponencial, entre o tempo e a corrente de descarga da bateria, conhecida como curva de *Peukert* [3], que pode ser modelada através de:

$$t = H \times \left( \frac{C}{IH} \right)^K, \quad (\text{A.1})$$

sendo  $t$ , o tempo de descarga da bateria (horas),  $C$ , a capacidade de descarga à corrente nominal (Ah),  $I$ , a corrente de descarga atual (A), e  $K$ , o número de Peukert, que varia

em função do tipo e do estado de uma bateria. Tipicamente, para uma bateria de chumbo-ácido sulfúrico, o número de *Peukert* situa-se entre 1,1 e 1,3 [5]. A variável *H* diz respeito ao período nominal de descarga da bateria (horas).

No que concerne à tensão nos terminais da bateria, pode definir-se a tensão nominal,  $V_{nom}$ , como a tensão teórica da bateria, resultante do produto da tensão individual de uma célula pelo número de células associadas em série.

A tensão de circuito aberto,  $V_{OC}$ , é a diferença de tensão aos terminais da bateria, sem qualquer carga a ser alimentada. A tensão final de descarga,  $V_{min}$ , é o valor da tensão mínima atingida por uma célula ou bateria, durante o processo de descarga.

A resistência interna é a resistência inerente à bateria, e que determina as perdas internas e, conseqüentemente, a quantidade de energia que pode ser disponibilizada pela bateria num determinado intervalo temporal.

A eficiência de uma bateria,  $\eta_{bat}$ , é obtida através do quociente entre a energia total retirada da mesma durante a descarga,  $E_D$  (Wh), e a energia total de carga,  $E_C$  (Wh), conforme a Equação (A.2) [5]:

$$\eta_{bat} = \frac{E_D}{E_C} = \frac{\int v_{bat} (-i_{bat}) dt}{\int v_{bat} i_{bat} dt} \approx \frac{V_D I_D T_D}{V_C I_C T_C}. \quad (A.2)$$

Na equação anterior,  $v_{bat}$  e  $i_{bat}$  correspondem à tensão e corrente da bateria,  $V_C$  e  $V_D$  são os valores de tensão na carga e descarga em (V), respetivamente,  $I_C$  e  $I_D$  são as correntes de carga e descarga de uma bateria em (A), e  $T_C$  (h) e  $T_D$  (h) representam o tempo de carga e descarga. De referir que as grandezas apresentadas correspondem a valores médios para um dado intervalo.

A eficiência pode ser reescrita segundo a Equação (A.3), através do produto entre a eficiência da tensão,  $E_V$ , e a eficiência de *Coulomb*,  $E_{Cou}$ .

$$\eta_{bat} = E_V \times E_{cou} = \left( \frac{V_D}{V_C} \right) \times \left( \frac{I_D T_D}{I_C T_C} \right). \quad (A.3)$$

No início do ciclo, o valor de  $E_C$  é bastante próximo dos 100%, contudo no fim do ciclo a eficiência vai diminuindo. Uma das formas de se garantir uma elevada eficiência de *Coulomb* é através da utilização de correntes de carga baixas. Valores típicos do rendimento deste tipo de baterias são da ordem de 75 % [6].

Como foi referido anteriormente, as aplicações de baterias em MR exigem dispositivos com elevada capacidade de armazenamento, o que se traduz numa elevada densidade específica de energia ( $\text{Wh/m}^3$ ), permitindo fornecer uma considerável quantidade de energia durante longos períodos de tempo. Outros indicadores são a energia específica ( $\text{Wh/kg}$ ) e a potência específica ( $\text{W/kg}$ ).

### **A.3 Parâmetros Característicos das baterias**

Em relação às baterias, são conhecidos e normalmente utilizados um conjunto de parâmetros de caracterização do seu funcionamento.

O estado de carga, *State of Charge* (SOC), corresponde à relação percentual entre a energia disponível na bateria num dado instante, e a energia máxima armazenável por esta. Um SOC de 0% indica que a bateria se encontra completamente descarregada, ao passo que, um SOC de 100% sugere um nível de carga máximo.

A utilização adequada de uma bateria requer a definição dos limites de operação, entre os quais irá variar o SOC. Porém, a estimação do SOC nem sempre se afigura como uma tarefa simples, dependendo de diversas condicionantes internas e externas à bateria, imposta pelo seu comportamento não-linear.

A profundidade de descarga, conhecida como *Depth of Discharge*, DOD, relaciona em termos percentuais, a quantidade de energia retirada de uma bateria e o seu valor nominal de armazenamento. Assim, o DOD e o SOC são complementares. Tal como anteriormente foi referido, devem ser estabelecidos limites de exploração da bateria, ou seja, deve ser utilizada uma profundidade de descarga que promova uma utilização racional da bateria, de forma a aumentar a sua longevidade.

O número de ciclos de vida de uma bateria é um parâmetro chave na caracterização da mesma, dando uma indicação sobre o tempo exetável de funcionamento desta. Um ciclo de utilização corresponde a um processo de carga e descarga. Na realidade, quando é atingido o limite do número de ciclos para o qual a bateria foi projetada e concebida, não significa que o equipamento se torne inútil e/ou inoperacional, apenas a sua capacidade de armazenamento de energia diminui para 80% do valor inicial [6].

O estado de conservação, *State of Health* (SOH), relata o estado atual de conservação da bateria comparativamente à situação inicial, i.e., a capacidade atual de utilização do SOC da mesma. Deste modo, quando uma bateria é nova o SOH é de 100%, contrariamente ao período de fim de utilização, em que o SOH atinge 0% [7].

O correto funcionamento de uma bateria é influenciado por uma série de condicionantes internas e externas a esta. Estas condicionantes afetam diretamente as características operacionais da bateria, quer em relação à capacidade de armazenamento e utilização de energia que esta irá disponibilizar, quer ao nível de tensão nos seus terminais. Importa referir que alguns dos efeitos a que uma bateria é sujeita são prejudiciais para esta, podendo levar à sua degradação acelerada, causando uma perda temporária da capacidade ou, em casos mais extremos, levar à incapacidade das células [8]. A temperatura, a amplitude e o tempo de operação das correntes de carga e descargas, são os principais fatores que condicionam o funcionamento de uma bateria.

#### **A.4 Ciclo de Carga**

Para a carga completa de uma bateria de ácido-chumbo podem ser necessárias 12 a 16 horas, se for utilizado um algoritmo de controlo que vise proteger e prolongar a vida útil da bateria. Associado a este processo de carga completa estão normalmente contempladas 4 fases: Carga Massiva (*Bulk Charge*), Carga de Absorção (*Absorption Charge*), Carga Flutuante (*Float Charge*), e Equalização (*Equalization*) [3].

A carga massiva corresponde à carga efetuada a uma intensidade de corrente constante, sendo que a tensão das células vai aumentando, correspondendo à etapa em que uma maior quantidade de energia flui para a bateria, e que decorre até que o limite de tensão nas células seja atingido, que normalmente ocorre quando se atinge um SOC de 80%, num período de 5 a 8 horas. A corrente de carga máxima utilizada não deve exceder 15% da capacidade da bateria para uma descarga em 6 horas, ou seja, a corrente máxima de descarga (A) corresponde a 15% de  $C_6$  (Ah). O recurso a correntes de carga consideravelmente inferiores é viável, embora prolongue em demasia o período de carga necessário.

Na carga de absorção é completado o ciclo de carga da bateria até ser atingido um SOC de 100%. Na passagem da fase anterior para esta, o valor da corrente vai diminuindo gradualmente à medida que a resistência interna da bateria aumenta. O intervalo de tempo necessário para se completar esta segunda etapa,  $T$ , é definido por:

$$T = 0.42 \times \frac{C_{20}}{I_C}. \quad (\text{A.4})$$

Na Equação anterior, a variável  $C_{20}$  é a capacidade de descarga da bateria em Ah para um período de 20 horas, e  $I$  corresponde à corrente de carga que assume o valor de 10% da capacidade de descarga para 20 horas,  $C_{20}$ .

As células das baterias necessitam de um determinado nível de tensão para se manterem em carga completa, quando não existe nenhuma carga ligada aos terminais da bateria. Na carga flutuante são compensadas as perdas da bateria causadas pela sua auto-descarga, para que o nível de carga se mantenha no seu valor máximo.

Depois de um ciclo de carga completo, as células de cada bateria irão variar ligeiramente ao nível da gravidade específica<sup>1</sup>. Por conseguinte, através da equalização, também conhecida como sobrecarga controlada, é induzido um aumento do nível da tensão da bateria durante um período de 2 a 3 horas, para equilibrar a gravidade específica e, conseqüentemente, ajustar valor de tensão para todas as células para o mesmo valor, até porque, note-se, que as células estão associadas normalmente em série.

## Bibliografia

- [1] C. Macal and M. North, "Agent-Based Modeling and Simulation," in *Winter Simulation Conference*, 2009.
- [2] J. Carrasco, *et al.* (2006) Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*.
- [3] D. Magalhães, "Modelo de Baterias com aplicação em sistemas de gestão de baterias (BMS) de Veículos Elétricos (EVs)," Mestre, Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [4] Wikipedia. (2014). *Redox*. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Redox>
- [5] Wikipedia. (2014). *Peukert's law*. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Peukert's\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Peukert's_law)
- [6] R. Erickson, "Lecture:Lead-acid batteries," ed, 2009.
- [7] Electropaedia. *Battery Performance Characteristics*. Available: <http://www.mpoweruk.com/performance.htm>
- [8] R. B. Enginering, "Battery User Manual."

---

<sup>1</sup> Medida do peso do eletrólito nas células das baterias, comparativamente com a água.