

# **GESTÃO COLABORATIVA E INTELIGENTE EM MICRO-GRIDS**

**Tito António Moura Mesquita Fernandes**

Relatório Final do Trabalho de Projeto apresentado à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Industrial – Especialização em Engenharia Eletrotécnica**

Trabalho realizado sob a orientação de

**Professor Doutor Paulo Leitão**

**Bragança, Novembro de 2013**



# **GESTÃO COLABORATIVA E INTELIGENTE EM MICRO-GRIDS**

**Tito António Moura Mesquita Fernandes**

Relatório Final do Trabalho de Projeto apresentado à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Industrial – Especialização em Engenharia Eletrotécnica**

Trabalho realizado sob a orientação de

**Professor Doutor Paulo Leitão**

**2012/2013**



## **Agradecimentos**

Embora uma tese seja, pela sua finalidade acadêmica, um trabalho individual, há contributos de natureza diversa que não podem e nem devem deixar de ser realçados. Por essa razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Paulo Jorge Pinto Leitão, meu orientador, pela competência científica e acompanhamento do trabalho, pela disponibilidade e generosidade reveladas ao longo deste ano de trabalho, assim como pelas críticas, correções e sugestões relevantes feitas durante a orientação.

Aos meus colegas de curso e amigos por todos os bons momentos passados, camaradagem e amizade que sempre demonstraram, que nunca esquecerei, e que se mantenha por longos anos. Um agradecimento sentido ao Adriano pelas sugestões, ajuda e correções feitas durante o desenvolvimento deste projeto.

Estou muito grato a todos os meus familiares pelo incentivo recebido ao longo destes anos. A minha irmã Tatiana e aos meus pais, Alfredo e Paula, obrigado pelo amor, alegria e atenção sem reservas, sem vocês, eu apenas existiria. Por último mas não menos importante dedico esta dissertação a minha bisavó Ana, que apesar de já não se encontrar fisicamente entre nós é uma estrela muito brilhante no céu que enaltece a sua memória.

O meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.



## Resumo

Concebidas inicialmente para transportar e distribuir energia, as atuais redes elétricas dos países desenvolvidos apresentam dificuldades na capacidade de resposta causadas pelo aumento do consumo, devido à crescente dependência da eletricidade no dia-a-dia das pessoas, assim como na integração da produção de energia elétrica distribuída baseada em energias renováveis, como sejam painéis fotovoltaicos e integração de veículos elétricos.

A manutenção da estabilidade da rede é agora um enorme problema, devido às constantes oscilações entre a oferta e procura de energia elétrica, elevada inserção de recursos distribuídos de produção de energia e, principalmente devido à grande concentração da procura em períodos específicos (picos de procura).

As redes inteligentes, do inglês *smart grids* apresentam um novo paradigma nas redes elétricas para estes problemas. Estas redes são bidirecionais no sentido que potenciam a utilização de todos os recursos energéticos e permitem a gestão da rede em tempo real, potenciando a otimização dos fluxos de energia.

Uma abordagem interessante face ao desafio de controlo e coordenação destas novas redes inteligentes poderá passar pela utilização de sistemas multiagente, que fornecem uma abordagem distribuída à conceção de sistemas de controlo, uma vez que são baseados em agentes distribuídos e autónomos, mas com capacidade de interagir/cooperar entre si para atingir os objetivos do sistema.

Neste projeto foi utilizada a ferramenta NetLogo para simular e testar um sistema de redes inteligentes, baseada em sistemas multiagentes. O caso de estudo focou o projeto-piloto da *smart grid* da ilha de Kythnos, Grécia. Após a realização do modelo aproximado da rede inteligente, foram implementados, testados e comparados métodos de controlo e cooperação entre os diversos agentes da rede inteligente de modo a desenvolver uma permuta eficiente de energia elétrica. Os métodos e mecanismos de controlo criados apresentaram resultados satisfatórios, permitindo uma maior flexibilidade e versatilidade dos produtores para se adaptarem ao mercado energético, menor desperdício de energia e menores encargos para os consumidores.

**Palavras-chave:** *Smart grids*, sistemas multiagente, NetLogo.



## **Abstract**

Initially designed to transport and distribute electricity, current electricity grids of developed countries have difficulties in responsiveness caused by increased consumption due to the increasing dependence on electricity in the day-to-day lives, as well as integration of energy production distributed electricity based on renewable energy, such as photovoltaic panels, and integration of electric vehicles.

Maintaining the stability of the network is now a huge problem, due to constant fluctuations between supply and demand of electricity, high integration of distributed resources and energy production, mainly due to the large concentration of demand in specific periods (peak demand).

Smart grids, present a new paradigm in power grids for these problems. These networks are bidirectional in the sense that enhance the use of all energy resources and enable the management of the network in real time, enhancing the optimization of energy flows.

An interesting approach to the challenge of control and coordination of this new smart grid may involve the use of multi-agent systems, which provide a distributed approach to the design of control systems, since they are based on distributed and autonomous agents, but with the ability to interact / cooperate to achieve system objectives.

In this project was used the NetLogo tool to simulate and test a smart grid system based on multi-agent systems. The case study focused on the pilot project of smart grid of the island of Kythnos, Greece. After completion of the approximate model of the smart grid, have been implemented, tested and compared methods of control and cooperation between the various actors of the smart grid in order to develop an efficient transfer of power.

The methods and monitoring mechanisms set satisfactory results, allowing greater flexibility and versatility of producers to adapt to the energy market, less energy waste and lower costs for consumers.

**Keywords:** *Smart grids*, multi-agent systems, NetLogo.



## ÍNDICE

<b>1.Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2.Definições, tecnologias e desafios.....</b>	<b>5</b>
2.1 Rede elétrica convencional.....	5
2.1.1 Sistemas híbridos de produção de energia .....	7
2.1.2 Desafios .....	8
2.2 <i>Smart Grids</i> .....	10
2.2.1 Conceitos e funções.....	10
2.2.2 Estrutura de uma <i>Smart Grid</i> .....	11
2.2.3 <i>Micro-grids</i> auto-sustentadas .....	21
2.3 Exemplos de <i>Smart Grids</i> .....	23
<b>3.Abordagem baseada em agentes numa <i>micro-grid</i> auto-sustentada .....</b>	<b>29</b>
3.1 Sistemas Multiagente .....	29
3.2 Arquitetura do sistema multiagente para a gestão da <i>micro-grid</i> auto-sustentada.....	30
<b>4.Implementação experimental.....</b>	<b>35</b>
4.1 Descrição do caso de estudo.....	35
4.2 Ferramentas de simulação baseadas em agentes .....	41
4.3 Implementação do modelo de agentes em NetLogo .....	45
<b>5.Análise de Resultados .....</b>	<b>52</b>
5.1 Simulação do cenário de auto-sustentação com gerador a <i>diesel</i> .....	52
5.1.1 Influência da utilização de baterias .....	52
5.1.2 Impacto da diversidade de recursos de produção .....	59
5.2 Simulação do cenário de auto-sustentação com ligação á rede.....	63
5.2.1 Influência da utilização de baterias .....	63
5.2.2 Impacto da diversidade de recursos de produção.....	66
5.3 Análise comparativa.....	69
<b>Conclusões.....</b>	<b>74</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia de valor da energia elétrica. [10].....	6
Figura 2: Esquema representativo de um sistema híbrido. [8].....	7
Figura 3: Configuração individual e configuração comunitária. [8].....	8
Figura 4: Estrutura de uma <i>smart grid</i> . [16] .....	12
Figura 5: Figura ilustrativa de um painel fotovoltaico. [9].....	14
Figura 6: Regiões de funcionamento de um aerogerador. [8].....	15
Figura 7: Curva de potência em função da velocidade do vento de um aerogerador. [8] .	15
Figura 8: Curva de eficiência de um típico gerador a <i>diesel</i> . [7].....	16
Figura 9: Banco de baterias utilizado numa aplicação solar. [8] .....	17
Figura 10: <i>Smart meter</i> (SilverPac). [23].....	19
Figura 11: DTC (Efacec). [19].....	20
Figura 12: SCADA. ....	21
Figura 13: Roadmap de Implementação da <i>Inovgrid</i> . [19].....	24
Figura 14: Localização da ilha de Bornholm, Dinamarca. [34].....	26
Figura 15: Estrutura de um sistema multiagente. [2].....	30
Figura 16: Conjunto de tipos de agentes existentes no modelo para a micro-grid. ....	31
Figura 17: Cadeia de envio de pedidos energéticos.....	32
Figura 18: Cadeia de opção energética com a adição do agente armazenador.....	33
Figura 19: Carregamento do agente armazenador. ....	34
Figura 20: <i>Smart grid</i> de Kythnos, Grécia.....	35
Figura 21: Esquema elétrico da <i>micro-grid</i> simulada.....	36
Figura 22: Diagrama de cargas numa habitação para o período de verão. ....	37
Figura 23: Diagrama de cargas numa habitação para o período de inverno. ....	37
Figura 24: Inclinação ideal dos painéis fotovoltaicos para as estações de verão e inverno. [8].....	38
Figura 25: Diagrama de cargas de 1 unidade fotovoltaica para o período de verão.....	38
Figura 26: Diagrama de cargas de 1 unidade fotovoltaica para o período de inverno.....	39
Figura 27: Diagrama de cargas do gerador eólico para o período de verão. ....	40
Figura 28: Diagrama de cargas do gerador eólico para o período de inverno. ....	40
Figura 29: <i>Screenshot</i> do ambiente gráfico da plataforma NetLogo. [4] .....	42
Figura 30: Ambiente de trabalho da plataforma NetLogo. [4] .....	43
Figura 31: Sistema de coordenadas do NetLogo. [5].....	44
Figura 32: Estrutura da <i>smart grid</i> no software NetLogo.....	46

Figura 33: Interface gráfica dos botões de controlo.....	47
Figura 34: Informação retirada do <i>command center</i> no início da simulação.....	48
Figura 35: Algoritmo de envio de pedidos energéticos. ....	49
Figura 36: Algoritmo de previsão do gerador.....	49
Figura 37: Algoritmo de carregamento do banco de baterias. ....	50
Figura 38: Algoritmo previsão do dia seguinte.....	51
Figura 39: Resultados para cenário sem baterias, 5 unidades PV, verão.....	53
Figura 40: Resultados para cenário sem baterias, 5 unidades PV, inverno. ....	53
Figura 41: Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, verão. ....	54
Figura 42: Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, verão, segundo dia. .55	
Figura 43: Resultados para o cenário com baterias “inteligentes”, 5 unidades PV, verão.56	
Figura 44: Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, inverno.....	57
Figura 45: Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, verão, segundo dia. .58	
Figura 46: Resultado para o cenário sem baterias, verão, 4 PV + 1 W. ....	60
Figura 47: Resultado para o cenário sem baterias, inverno, 4 PV + 1 W. ....	60
Figura 48: Resultado para o cenário com baterias, verão, 4 PV + 1 W. ....	61
Figura 49: Resultado para o cenário com baterias, inverno, 4 PV + 1 W.....	62
Figura 50: Resultados do cenário sem baterias, verão, 5 PV.....	64
Figura 51: Resultados do cenário sem baterias, inverno, 5 PV. ....	64
Figura 52: Resultados do cenário com baterias, verão, 5 PV. ....	65
Figura 53: Resultados do cenário com baterias, inverno, 5 PV.....	65
Figura 54: Resultados do cenário sem baterias, verão, 4 PV + 1 W.....	67
Figura 55: Resultados do cenário sem baterias, inverno, 4 PV + 1 W. ....	67
Figura 56: Resultados do cenário com baterias, verão, 4 PV + 1 W. ....	68
Figura 57: Resultados do cenário com baterias, inverno, 4 PV + 1 W.....	68

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resumo de algumas tecnologias DER. ....	13
Tabela 2: Ações prioritárias a implementar no InovCity. [19] .....	24
Tabela 3: Especificações da ilha de Bornholm. [34] .....	27
Tabela 4: Exemplos de código em linguagem Logo do <i>software</i> NetLogo [5]. .....	44
Tabela 5: Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com gerador <i>diesel</i> . ....	58
Tabela 6: Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com gerador <i>diesel</i> . ....	62
Tabela 7: Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com ligação à rede. ....	66
Tabela 8: Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com ligação á rede. ....	69
Tabela 9: Tabela com os resultados experimentais dos cenários testados. ....	70
Tabela 10: Resultados comparativos do uso de gerador. ....	72



## **Acrónimos**

ABM	Agent Based Modelling
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMM	Automated Meter Management
AMR	Automated Meter Reading
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CHP	Combined Heat and Power
DER	Distributed Energy Resources
DMS	Distribution Management Systems
DTC	Distribution Transformer Controller
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
GUI	Graphical User Interface
HVDC	High-Voltage, Direct Current
MAS	Multi-agent systems
MASON	Multi Agent Simulation of Neighborhood
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
PT	Posto de Transformação
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SMA	Sistemas Multiagente
WAAPCA	Wide-Area Adaptive Protection, Control and Automation
WAMC	Wide-Area Monitoring and Control
WASA	Wide-Area Situational Awareness
WAMS	Wide-Area Monitoring Systems



## 1. Introdução

A rede elétrica é uma enorme rede interligada, usada para interligar diversas entidades, nomeadamente consumidores e produtores, podendo estas ser empresariais ou particulares. A arquitetura tradicional dessas redes foi desenvolvida para atender às necessidades impostas pelo desenvolvimento económico e humano durante décadas, predominantemente através da utilização de tecnologias de produção baseadas em carbono, como sejam as convencionais centrais elétricas a gás, carvão ou petróleo e hidroelétricas. Estas centrais apresentam uma eficiência muito baixa, tipicamente 30%, devido à existência de ciclos termodinâmicos e outro tipo de perdas. A forte concorrência de tecnologias de produção renováveis, combinada com uma maior eficiência comparativamente com as tecnologias de produção de energia proveniente de combustíveis fósseis, vem alterar o padrão convencional energético à escala global.

Para minimizar o impacto das mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, manter a prosperidade social, o conceito de “energia inteligente”, do inglês *smart energy*, refere-se ao uso da energia de uma forma mais eficiente, utilizando a integração de tecnologias avançadas, destinados à manutenção de um sistema ambientalmente sustentável. Este conceito deve ser adotado para garantir um crescimento económico equilibrado e uma sustentabilidade ambiental. A *smart energy* é necessária devido a uma série de razões, sendo a principal, a disponibilidade limitada de energias não renováveis tais como o carvão, gás e petróleo.

Nos últimos anos, o novo conceito de uma rede inteligente, do inglês *smart grid*, tornou-se um elemento fundamental no mundo contemporâneo e tem atraído cada vez mais atenção de engenheiros e políticos. A ideia básica é construir uma rede mais centrada no cliente, podendo integrar de forma inteligente todos os intervenientes de uma rede elétrica, enriquecendo a ligação produtor-cliente de modo a fortalecer o fornecimento de energia de uma forma mais sustentável, económica e segura. No entanto, o significado de *smart grid* é muito mais amplo referindo-se a um meio de transformar o setor elétrico a partir de uma rede centralizada para um sistema mais descentralizado e interativo, trazendo as filosofias, conceitos e tecnologias que permitirão dinamizar o fluxo de energia na rede elétrica. Contudo estas mudanças fundamentais causarão impactos significativos na própria estrutura da rede elétrica e nos métodos de controlo e previsão das redes elétricas atuais. Desta forma, a introdução de Tecnologias de Informação e

Comunicação (TIC), os avanços na área da eletrônica e outros dispositivos, permitem uma melhor monitorização e controlo das operações que vêm atenuar esses impactos.

A necessidade de evolução do conceito de redes elétricas tradicionais para o novo conceito de *smart grid*, é apontado pelo Comissário Europeu para a Ciência e Investigação, Dr. Janez Potočnik: “*A transmissão eficiente de eletricidade e a sua distribuição é um requisito fundamental para dotar os cidadãos europeus, sociedades e economias com recursos essenciais de energia. A necessidade de renovar as redes de eletricidade da Europa, conhecer crescente demanda de energia elétrica, permitir um mercado transeuropeu de energia elétrica e integrar de forma mais sustentável a produção de recursos (incluindo fontes renováveis), apresenta grandes desafios. Pesquisa e desenvolvimento têm um papel importante a desempenhar na resolução deles. A visão para as novas redes de eletricidade do futuro apresentado pelo Conselho Consultivo Europeu da plataforma de tecnologia "SmartGrids" propõe que a Europa deve avançar de maneiras diferentes nestes domínios importantes.*” [33]

O próprio Presidente dos Estados Unidos da América, Barack Obama, em Março de 2011, frisou a importância das *smart grids* como sendo a chave fulcral do seu plano para reduzir os custos de energia para os consumidores, alcançar a independência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. [1]

O conceito de redes inteligentes também levanta muitas questões económicas. As políticas públicas terão de ser adaptadas, em primeiro lugar para fazer provisão para os ganhos potenciais das redes inteligentes e o fluxo de informação associado, e em segundo lugar para regular as novas redes e funcionar como um incentivo para os investidores. [22] As novas ofertas da concorrência e sistemas de preços para o utilizador final vai contribuir para melhorar a eficiência alocativa e produtiva, que tem por objetivo alcançar o mais alto nível de bem-estar social dada uma determinada estrutura de valores minimizando os riscos para o mercado. Com os dados em tempo real sobre a produção e o consumo, produtores e consumidores serão capazes de se adaptar às condições do mercado. Desta forma, as redes inteligentes irão impulsionar o desenvolvimento de fontes de energia renováveis e novas tecnologias, ajudando a sua integração e utilização otimizada.

Deve notar-se que, neste documento, a palavra “rede” ou “*grid*” não se refere apenas à rede física mas também aos métodos de controlo, integração de sistemas computacionais, geração distribuída e aos demais dispositivos que suportam toda a sua função.

O grande desafio das *smart grids* encontra-se no uso apropriado de tecnologias TIC que irão ajudar na gestão da transformação da rede elétrica convencional, organizada numa infra-estrutura central num sistema descentralizado organizado. Um elevado número de tecnologias DER está a ser continuamente instalado nas redes de média e baixa tensão, dispositivos de gestão e controlo inteligentes estão a ser instalados por toda a rede, tais como geradores distribuídos, indicadores de passagem de falhas e finalmente edifícios e casas inteligentes estão a ser equipados com dispositivos inteligentes de resposta à variação do preço da energia, programando os horários dos consumos de energia elétrica. Todos estes fatores mostram que a rede elétrica tende a tornar-se num sistema complexo em larga escala de sistemas cyber-físicos, com milhares ou mesmo milhões de dispositivos autónomos, e que a sua funcionalidade tem de ser monitorizada, coordenada e supervisionada em tempo real ou perto do tempo real.

Os sistemas multiagente apresentam-se como uma solução promissora para fazer face a estes desafios. De facto, os sistemas multiagentes são compostos por múltiplos agentes, que exibem um comportamento autónomo mas ao mesmo tempo interagem com os outros agentes presentes no sistema seguindo regras e protocolos de interação social como coordenação, cooperação e negociação para estudar a gestão de sistemas de distribuição, do ponto de vista da reconfiguração da topologia da rede, simulando as características de uma rede inteligente.

Neste projeto, são estudadas estratégias de gestão colaborativa em *micro-grids* auto-sustentadas, tendo por objetivo garantir um controlo coordenado e otimizado do fluxo de energia elétrica, utilizando uma abordagem baseada num sistema multiagente, no qual cada recurso produtor, consumidor ou armazenador de energia elétrica é representado por um agente autónomo e cooperativo. Nesta abordagem inteligente e dinâmica, a gestão colaborativa emerge da interação entre os vários agentes, cada um dos quais contribuindo com o seu comportamento local.

O modelo de gestão baseado em agentes foi simulado experimentalmente usando a plataforma de simulação NetLogo [5] e o caso de estudo de um sistema de distribuição elétrico baseado na *micro-grid* inteligente da ilha grega de Kythnos. [2] Na fase de

simulação do modelo computacional desenvolvido para o caso de estudo, foram testados vários métodos para a otimização do fluxo de energia elétrica na *micro-grid* auto-sustentada.

Este documento está organizado em seis capítulos, iniciado por esta breve introdução onde consta a apresentação e contextualização do problema e o objetivo deste projeto. O segundo capítulo corresponde à definição de rede elétrica inteligente, classificação dos seus constituintes e tecnologias associadas, definição de *micro-grid* auto-sustentada e apresentação de algumas redes inteligentes existentes. O terceiro capítulo apresenta a abordagem baseada em agentes, começando por introduzir os conceitos básicos e metodologias de sistemas multiagentes. O quarto capítulo descreve o caso de estudo da *micro-grid* utilizada neste trabalho, as várias ferramentas de simulação baseadas em agentes, com particular referência à ferramenta NetLogo utilizada neste trabalho, e a implementação do modelo computacional baseado em agentes. O quinto capítulo apresenta a análise dos resultados experimentais de simulação. No final, são expostas as conclusões do trabalho realizado, assim como apresentadas algumas sugestões de trabalho futuro.

## **2. Definições, tecnologias e desafios**

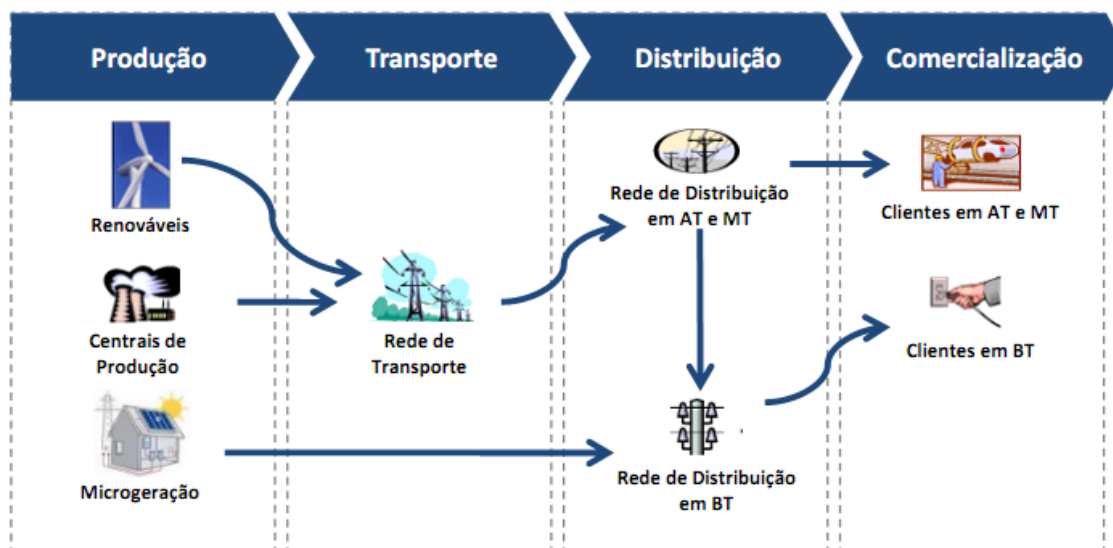
Tradicionalmente a maioria dos utilizadores da rede eléctrica não têm qualquer participação ativa na produção de energia eléctrica e muito menos na gestão das redes eléctricas. Com a implementação de mercados eléctricos e com o aparecimento e desenvolvimento de tecnologias de produção distribuída, as redes eléctricas do futuro terão de evoluir no sentido de permitir aos utilizadores desempenharem um papel ativo, como produtores de energia eléctrica, na gestão do consumo e num estágio mais avançado no seu controlo, de forma parcial e coordenada com os restantes intervenientes.

Para que este cenário seja uma realidade é necessário desenvolver modelos que permitam a coexistência entre a produção centralizada e a produção distribuída.

Este capítulo apresenta um consenso derivado do conceito do que a rede eléctrica inteligente deve ser em termos tecnológicos e arquitetónicos. Também será feita uma introdução aos sistemas híbridos de produção de energia e serão evidenciadas as diversas tecnologias que suportam a base do conceito *smart grid*.

### **2.1 Rede eléctrica convencional**

A rede eléctrica convencional é utilizada como o principal meio de fornecimento de energia a nível doméstico, comercial e industrial. Como é ilustrado na Figura 1, uma rede eléctrica convencional inclui diversas operações distintas, nomeadamente a produção, transporte, distribuição e comercialização de energia eléctrica.



**Figura 1:** Cadeia de valor da energia elétrica. [10]

A cadeia de valor da energia elétrica começa com a fase de *produção*, utilizando uma fonte de energia. Tipicamente, as centrais de produção de energia baseiam-se essencialmente no carvão, gás natural e recursos hídricos. Existe alguma aposta na energia nuclear e petróleo, com a tendência a decrescer a curto prazo devido em parte à proliferação de energias renováveis que tendem a desempenhar um papel mais ativo na rede elétrica convencional. Atualmente, a produção e comercialização de eletricidade é, uma atividade liberalizada, funcionando numa lógica de mercado e de livre concorrência, contrariamente ao enquadramento legal anterior, em que a produção assentava num regime regulado.

Depois de produzida, é necessário fazer o *transporte* da eletricidade em Muito Alta Tensão (MAT) dos centros produtores até aos centros de consumo. Assim, a rede de transporte assegura a interligação entre as centrais de produção e as redes de distribuição, cobrindo um espaço geográfico bastante alargado.

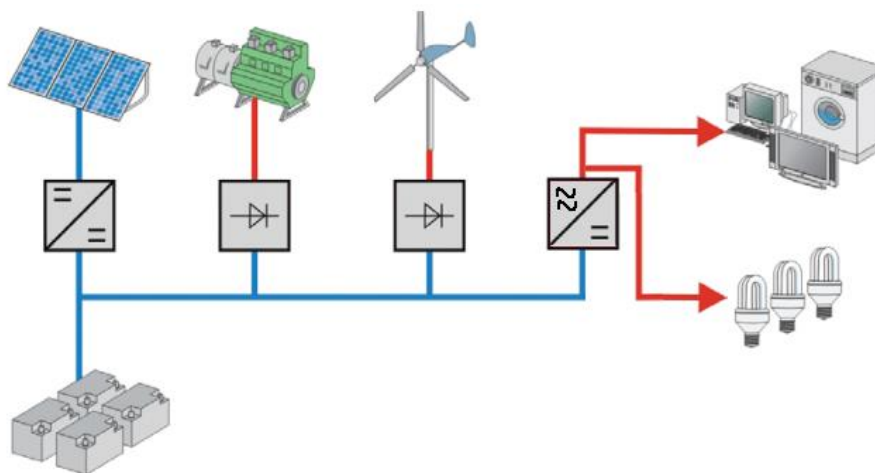
A função da rede de *distribuição* é levar a energia até aos consumidores finais (domésticos, empresariais ou industriais). As redes de distribuição utilizam três níveis de tensão: Alta Tensão (AT), que fornece energia às subestações, Média Tensão (MT), que alimenta os postos de transformação e Baixa Tensão (BT), à qual estão ligados diretamente os aparelhos.

As empresas que comercializam a eletricidade gerem as relações com os consumidores finais, particulares ou empresas, incluindo a faturação e o serviço ao cliente.

### 2.1.1 Sistemas híbridos de produção de energia

Sistemas híbridos de produção de energia elétrica são sistemas que combinam duas ou mais fontes de produção de energia. As fontes de produção de energia poderão ser de origem renovável, tais como energia eólica, solar, biomassa, hídrica, etc., podendo ser integrada ou complementada com fontes de produção convencionais, que consomem combustíveis fósseis, tais como os geradores a *diesel*.

Têm-se sentido grandes desenvolvimentos nos sistemas híbridos em termos de dimensionamento e otimização do sistema como um todo, é relativo ao modo de funcionamento isolado da rede elétrica. No presente estudo, apenas terão especial atenção sistemas híbridos de produção de energia elétrica compostos por geradores fotovoltaicos, aerogeradores, e um sistema de apoio composto por um gerador *diesel* e um sistema de armazenamento constituído por um banco de baterias em funcionamento isolado da rede. A Figura 2 apresenta um esquema representativo de um sistema híbrido como o estudado no presente estudo.



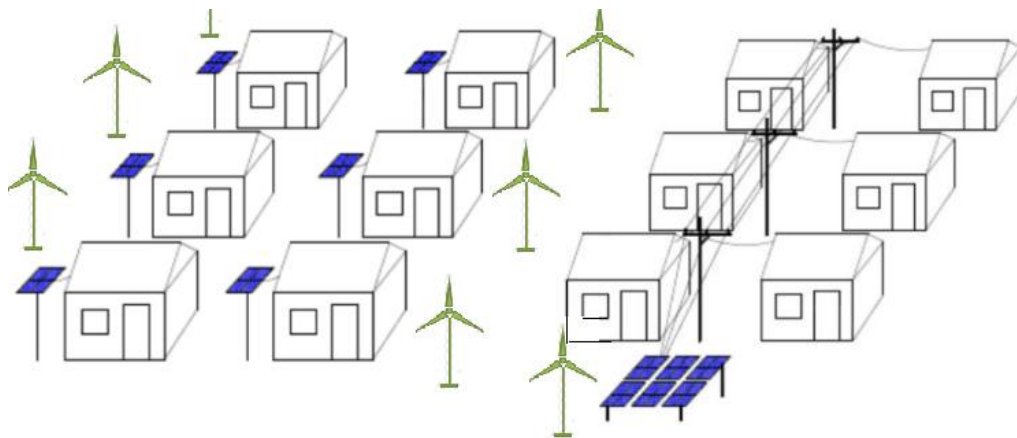
**Figura 2:** Esquema representativo de um sistema híbrido. [8]

O problema do dimensionamento é acrescido, quando os diversos componentes e as suas operações que compõem o sistema híbrido necessitam de ser otimizados. Estes fatores levam a uma crescente necessidade de dimensionamento otimizado. Aliada à maior capacidade técnica atual de controlo da operação do sistema e à viabilidade técnica

de previsão de recursos endógenos é possível otimizar estrategicamente o despacho tendo em conta a previsão.

Para aplicações de sistemas híbridos de médias e grandes dimensões, isto é, em locais cuja carga a alimentar compreende várias habitações, vilas e aldeias, poderá optar-se por uma configuração centralizada ou individual, dependendo da aplicação, das características dos consumidores, período de uso, condições climáticas, do tipo de estratégia e filosofia da rede.

É possível proceder a uma configuração individual, representada à esquerda na Figura 3, visando a obtenção de lucro do consumidor ou abordar uma perspectiva comunitária e cooperativa como ilustrado à direita na Figura 3.



**Figura 3:** Configuração individual e configuração comunitária. [8]

Os sistemas híbridos poderão diferenciar-se, não apenas em termos da proveniência dos recursos, mas também em termos da natureza da energia final produzida. Existem variados estudos e implementações de sistemas híbridos produtores de energia elétrica e em simultâneo com a energia térmica.

### 2.1.2 Desafios

O sistema elétrico mundial enfrenta uma série de desafios que obrigam a uma mudança nas políticas energéticas, de forma a garantir a sustentabilidade. Um dos fatores que obrigam a esta mudança é o preço das energias primárias. Considerando as políticas atuais, o cenário projetado para as próximas décadas prevê um aumento dos preços das principais fontes de energia utilizadas mundialmente para a produção de eletricidade, sendo mais acentuado para o petróleo e gás natural e mais atenuado para o carvão.

A infra-estrutura elétrica atual caminha para o limite da sua capacidade. Embora a continuidade do serviço não esteja atualmente comprometida, os riscos associados à utilização de uma rede elétrica cada vez mais envelhecida crescem de dia para dia e com eles crescem os desafios associados aos compromissos ambientais estabelecidos pelas várias Nações.

A produção de energia elétrica provoca um impacto ambiental significativo, em particular no que diz respeito à produção que resulta da queima de combustíveis fósseis. A produção de origem renovável é, pelo contrário, benigna para o ambiente, podendo associar-se apenas à componente hidroelétrica alguns impactos ambientais, nomeadamente ao nível do terreno, populações ou modificação do habitat natural de algumas espécies animais. Apesar destes fatores negativos, a produção por via hidroelétrica é uma opção consideravelmente menos agressiva para o meio ambiente que o carvão ou o petróleo.

Outros fatores que implicam a modernização das redes elétricas convencionais, utilizando infraestruturas computacionais, são resumidos nos pontos que se seguem [16]:

- Possibilitar de forma confiável e estável a expansão da capacidade de fornecimento de eletricidade, mediante uma procura crescente.
- Melhorar a relação custo-benefício nos processos de produção e de fornecimento de energia elétrica.
- Fornecer informações ao consumidor sobre o consumo individual de energia elétrica, bem como fornecer ferramentas para auxiliar no controlo e na tomada de decisão acerca do consumo.
- Auxiliar na redução da emissão de gases decorrentes da produção de energia elétrica com recursos fósseis.
- Integração de microgeração, que pressupõe a disponibilização de produção de pequeno porte, através da utilização, entre outros, de painéis fotovoltaicos, microgeradores eólicos e células a combustível, capazes de produzir energia para consumo próprio e compensação de energia junto à concessionária.
- Antecipar e responder a perturbações no sistema mediante a reconfiguração automática.

- Preparar a rede elétrica para suportar a futura procura de veículos elétricos.
- Dotar a rede de dispositivos de armazenamento de energia para uso conjunto com fontes intermitentes.

## 2.2 *Smart Grids*

O termo *smart grid* ou rede inteligente refere-se à rede de energia elétrica que inteligentemente integra o comportamento e as ações de todos os utilizadores conectados à rede elétrica com o objetivo de distribuir energia elétrica de uma forma sustentável, económica e eficiente [17].

A preocupação com a emissão de gases de efeito estufa, o desenvolvimento de novas fontes renováveis de produção de energia ou menos poluentes, o interesse na melhoria da qualidade da energia fornecida ao consumidor e as preocupações com as tarifas estão a motivar o setor elétrico à procura de soluções práticas que modernizem a rede elétrica convencional.

### 2.2.1 **Conceitos e funções**

Os desafios que se colocam atualmente prendem-se com a construção de cidades mais inteligentes, mais eficientes e mais sustentáveis. As *smart grids* posicionam-se como um conceito não só útil mas fundamental para atingir as metas propostas.

A projeção de uma rede elétrica inteligente para o futuro prevê um conjunto de funcionalidades [10]:

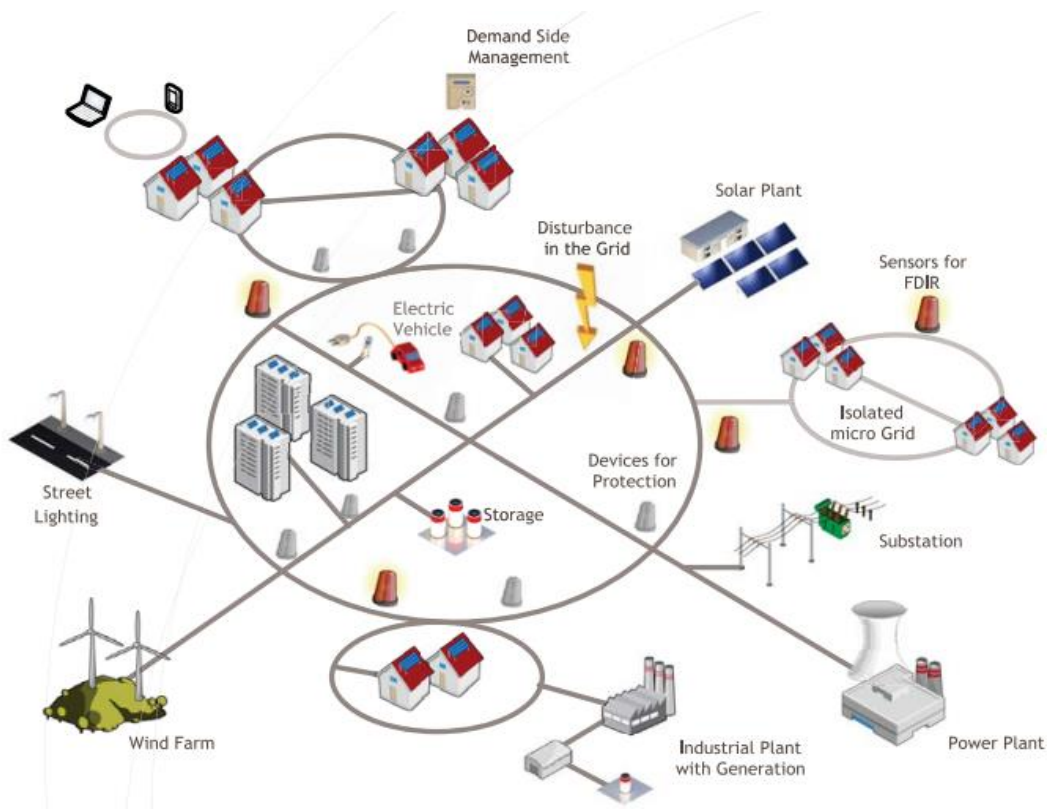
- **Auto-reparação:** A completa sensorização da rede permitirá utilizar informação em tempo real para antecipar, detetar e responder a problemas na rede. A *smart grid* tem assim a possibilidade de mitigar ou mesmo evitar interrupções ou diminuições de qualidade do serviço.
- **Motivação e envolvimento dos consumidores:** Uma rede elétrica inteligente incorpora tecnologias que permitem que os consumidores controlem os equipamentos das suas residências que lhes possibilitem uma gestão energética mais eficiente, reduzindo os custos na fatura elétrica. Uma comunicação entre a rede e o consumidor permite uma relação de cooperação, possibilitando a tarifação em tempo real e a redução de consumos em períodos de pico de procura de eletricidade.

- **Resistência a ataques ou desastres:** A informação em tempo real proveniente da rede permite aos operadores gerir os fluxos elétricos de modo a redirecioná-los por percursos alternativos que garantam o serviço nas zonas afetadas.
- **Acomodação de todas as opções de produção e armazenamento de energia:** A interconexão eficiente de várias fontes de produção de energia distribuída permite que os consumidores residenciais, comerciais e industriais produzam eletricidade que, em excesso, possam fornecer à rede. Este fator melhora a fiabilidade e a qualidade da energia, reduz os preços da eletricidade e aumenta as escolhas do consumidor.
- **Capacidade para acomodar uma grande variedade de fontes:** capacidade de integrar de forma transparente (*plug and play*) uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologias.
- **Menor impacto ambiental** do sistema produtor de eletricidade, reduzindo perdas e utilizando fontes renováveis e de baixo impacto ambiental.
- **Maior eficiência:** A *smart grid* minimiza os custos de operação e de manutenção da rede. Os fluxos de energia otimizados reduzem os desperdícios energéticos e maximizam o uso de recursos energéticos de baixo custo. A harmonização da distribuição local com fluxos de energia inter-regionais na rede de transporte reduz os congestionamentos e pontos de estrangulamento na rede.

As características anteriormente apresentadas descrevem a visão para uma rede elétrica mais flexível e distribuída, inteligente, controlável e protegida que a rede elétrica atual [7].

### 2.2.2 Estrutura de uma *Smart Grid*

Uma *smart grid* envolve a integração de diversos dispositivos e tecnologias, tal como ilustrado na figura que se segue, destacando-se dispositivos de produção de energia, sistemas de armazenamento de energia e sistemas de monitorização e gestão.



**Figura 4:** Estrutura de uma *smart grid*. [16]

Nas secções que se seguem serão detalhados os vários dispositivos e tecnologias existentes.

#### 2.2.2.1 Recursos Energéticos Distribuídos

Os recursos energéticos distribuídos, do inglês *Distributed Energy Resources* (DER), referem-se a pequenas fontes de produção ou armazenamento de energia que estão conectadas à rede de distribuição. Uma rede inteligente de eletricidade permite a existência de uma grande proliferação de fontes DER tais como os painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, microgeradores a *diesel*, sistemas de armazenamento, células de combustível, turbinas hidroeléctricas e produção de energia através de biomassa. As características de algumas tecnologias DER podem ser encontradas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Resumo de algumas tecnologias DER.

<b>Tecnologia</b>	<b>Benefícios</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Combustível</b>	<b>Potência (kW)</b>
<b>Microturbinas</b> Eficiência (28% a 33%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recuperação térmica melhora a eficiência</li> <li>Operável como necessidades básicas, pico, ou back-up</li> <li>Comercialmente disponível em quantidades limitadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produção térmica insuficiente para aplicações industria</li> </ul>	Gás natural, propano, diesel, multi-combustível	15-250
<b>Pequenas turbinas a gás de combustão</b> Eficiência (25% a 40%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Altamente eficiente quando usado com recuperação térmica</li> <li>Pode operar como necessidades básicas back-up, ou pico</li> <li>Custos relativamente baixos instalados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Questão ambiental-emissões e de ruído</li> <li>Possíveis necessidades de armazenamento de combustível no local</li> </ul>	Gás natural, destilado, metano	3,000-15,000
<b>Motores de Combustão Interna</b> Eficiência (28% a 37%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pode ser muito eficiente quando combinado com recuperação de calor</li> <li>Inicialização rápida</li> <li>Tecnologia muito madura, estável</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Questão ambiental-emissões e de ruído</li> <li>Possíveis necessidades de armazenamento de combustível no local</li> </ul>	Diesel, gás natural, propano, biogás, outros destilados de petróleo	<1-6,000
<b>Células de Combustível</b> Alta temp: Eficiência (45% para 55%) A baixa temp: A eficiência (30% a 40%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ganhos de eficiência muito elevados dos combustíveis</li> <li>Tecnologia limpa, água e calor são apenas emissões dos combustíveis de hidrogénio, baixa emissão de outros combustíveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poucos dispositivos disponíveis comercialmente</li> <li>Maioritariamente aplicado em automóveis</li> </ul>	Direto por hidrogénio, gás natural, propano, metanol	250-2,850
<b>Fotovoltaica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem partes móveis, de baixo custo e longa vida útil</li> <li>Sem emissão, nenhum ruído</li> <li>Pode ser usado para corte de pico</li> <li>Altamente confiável, tecnologia madura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Custos elevados instalação</li> <li>Não adequado para back-up, exceto quando acompanhada de armazenamento</li> <li>Produção variável de energia</li> </ul>	Radiação solar	Limitado pela área
<b>Grandes Turbinas Eólicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tecnologia madura</li> <li>Não há custos variáveis de combustível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessidade de fonte da concessionária para a compra e venda de energia</li> </ul>	Ventos > 12 m/s	>5,000

Os painéis fotovoltaicos são uma tecnologia muito popular geralmente aplicada nos telhados das habitações. Na simulação da *micro-grid* projetada foram inseridos diversos dispositivos deste tipo, como tal vai-se proceder a uma breve análise das suas

características. Esta tecnologia utiliza células semicondutoras para produção de energia elétrica a partir da radiação solar. A célula comporta-se basicamente como um díodo de junção p-n capaz de gerar energia elétrica utilizável a partir de fontes de luz com os comprimentos de onda da luz solar, a este processo dá-se o nome de efeito fotovoltaico. Os fótons incidem sobre a superfície n, criando pares lacuna eletrão. Devido ao campo elétrico da junção p-n, os eletrões são forçados a circular pela carga. Estes combinam-se com as lacunas na superfície p, que é continuamente regenerada com as lacunas que passam a junção devido ao campo. A tensão da célula deve-se ao efeito de difusão dos portadores na junção p-n. Este efeito de difusão e o campo elétrico neutralizam-se, mantendo um equilíbrio que depende da corrente na carga.



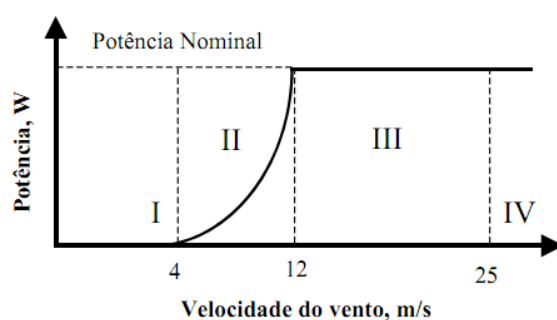
**Figura 5:** Figura ilustrativa de um painel fotovoltaico. [9]

Ao longo de três gerações distintas, onde a primeira geração corresponde a células de silício cristalino (monocristalino, policristalino, fita), correspondendo a cerca de 90% do mercado atual. A segunda geração corresponde a tecnologias de películas finas sobre substratos rígidos de vidro ou cerâmica (silício amorfo, CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio)), correspondendo a pouco menos de 10%. Por fim, a terceira geração, ainda numa fase inicial, corresponde a nanotecnologias para formação de películas finas sobre substratos flexíveis (células orgânicas, termo-fotovoltaica, multi-junção) [9]. Além da energia fotovoltaica é também muito aplicada a energia eólica, este tipo de dispositivos será aplicado na simulação da *micro-grid* deste trabalho.

A utilização do vento como fonte para obter energia elétrica alberga muitas vantagens tais como o facto de ser um recurso não poluente, evitar a dependência de combustíveis fósseis, para produções em larga escala a relação custo/produção é linear e, ao contrário

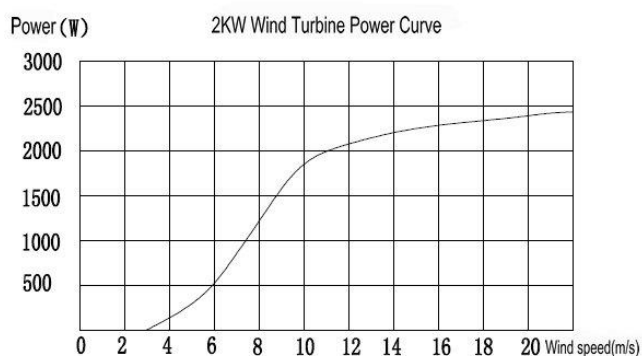
de outros recursos como o sol, a produção de energia eólica tem um potencial de produção de 24 horas por dia. Como em tudo possui as suas contrapartidas, dependendo da escala de produção, possui normalmente um elevado custo inicial, alguns impactos ambientais, especialmente em grandes parques eólicos, mas a elevada variabilidade da velocidade do vento sempre foi a maior desvantagem.

Como se pode verificar pela Figura 7, a região III é utilizada para limitar a potência de saída no valor nominal do gerador eólico para velocidades do vento entre 12 e 25 m/s.



**Figura 6:** Regiões de funcionamento de um aerogerador. [8]

Na Figura 8 pode-se verificar a potência gerada por um gerador eólico de 2kW consoante a velocidade do vento, mais a frente neste relatório quando for introduzida a criação do perfil energético do gerador eólico utilizado no modelo simulado considerou-se um comportamento ideal entre os 12 e os 25 m/s como foi sugerido por este gráfico.



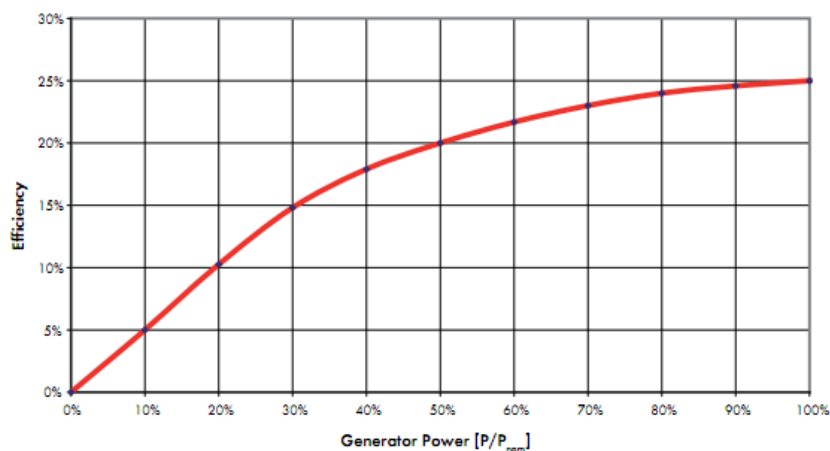
**Figura 7:** Curva de potência em função da velocidade do vento de um aerogerador. [8]

As medidas de velocidade do vento são feitas a uma altura de referência, que deve ser próxima da altura a que irá ser colocado o rotor do aerogerador. A zona onde se verifica uma variação da velocidade do vento em altura, denominada por camada limite

atmosférica da Terra, é da ordem de algumas centenas de metros e tipicamente toma valores entre os 600 e os 1.000 metros.

Para atenuar o efeito da diminuição de produção de origem renovável durante períodos de pouca disponibilidade de recursos endógenos, durante a noite e/ou em períodos em que se registre velocidades do vento baixas, os sistemas fotovoltaicos e eólicos necessitam de um sistema de apoio. Este sistema irá permitir, por um lado diminuir as necessidades de capacidade de armazenamento do sistema e por outro, aumentar a fiabilidade do conjunto, em termos de diminuição do fator de probabilidade de perda de carga. A capacidade do gerador *diesel* a instalar em determinado sistema depende principalmente do seu modo de interligação com o mesmo, do tipo e da natureza da carga.

Na perspetiva de uma *micro-grid* auto-sustentada os geradores a *diesel* são usados principalmente em funcionamento de carga total, pois quando estes geradores não são utilizados em plena carga, o seu rendimento baixa como é possível observar na figura seguinte.



**Figura 8:** Curva de eficiência de um típico gerador a *diesel*. [7]

Pode-se verificar pelo gráfico que por volta dos 50% da potência nominal, a eficiência do gerador é de 20%, abaixo de 50%, a eficiência do gerador cai muito, sendo assim, uma das normas executadas nesta simulação, aquando da utilização de alguns mecanismos de controlo, o gerador irá funcionar a 100% da sua potência nominal. Os geradores *diesel* desempenham um papel fundamental, na estabilidade e controlo do sistema. Vários autores referem que, se o gerador trabalha normalmente na gama dos 70% a 90% da sua potência nominal, onde a sua utilização é mais próxima de ser economicamente eficiente.

### 2.2.2.2 Tecnologias para sistemas de armazenamento

Para um sistema de fornecimento de energia elétrica com fontes renováveis, a funcionar em modo isolado, o uso de um sistema de armazenamento de energia é indispensável, tanto em termos económicos, visto evitar redundância de produção, assim como em termos de fiabilidade, permitindo fornecer energia em altura de pouca disponibilidade de recursos endógenos.

As baterias armazenam energia na forma eletroquímica, existindo dois tipos de baterias eletroquímicas, as primárias, convertendo energia química em energia elétrica de uma forma não reversível, e as baterias secundárias, também conhecidas por baterias recarregáveis, convertendo energia elétrica em química quando carregada, e energia química em elétrica durante o seu descarregamento.



**Figura 9:** Banco de baterias utilizado numa aplicação solar. [8]

Em termos de duração total de uma bateria, este depende de dois fatores, da sua composição física, por exemplo a composição do eletrólito e do modo como é utilizada, o número de ciclos de carga e descarrega e a percentagem de energia que estas são carregadas influenciam o seu tempo de vida. Este tempo de vida limitado pela sua composição, também denominado de *float life*, é a máxima duração da bateria até necessitar de substituição. Esta limitação está associada ao efeito causado pela corrosão nas baterias, altamente influenciado pela temperatura. Temperaturas ambientes elevadas permitem um meio mais favorável para a aceleração da corrosão. Desta forma, as baterias deverão ser mantidas em meios arejados. Estes dispositivos têm sido fonte de estudo intensivo devido à aplicação em veículos elétricos.

Os veículos elétricos assumem um papel fundamental nesta nova rede inteligente, uma vez que o uso “inteligente” de veículos elétricos, integrado na operação da rede, permite um melhor dimensionamento dos sistemas de produção e uma melhor integração das energias renováveis. Os veículos elétricos merecem especial atenção pois é possível conectar as suas baterias à rede elétrica, permitindo deste modo a injeção de energia na rede. Para tal, deverão ser criados incentivos para focar o carregamento das suas baterias durante o período noturno. Idealmente, estes veículos devem ser recarregados durante períodos de vazio de carga e com tarifas mais vantajosas, ajudando na absorção do excesso de produção de renováveis no período noturno. Neste caso, os veículos elétricos funcionam como sistemas de armazenamento. Usando o excesso de carga da bateria, pode ser injetada energia na rede durante períodos de pico de carga. Neste caso, os veículos elétricos podem funcionar como um sistema de produção fornecendo serviços auxiliares como: [7]

- “*Peak shaving*”, em que os veículos elétricos ajudam a rede durante os períodos de pico;
- Potência de reserva para a residência em situações de rede congestionada;
- Carregamento inteligente em que os veículos elétricos deixam a rede decidir quando devem carregar de acordo com o período em que estão parados, mas ligados à rede (tipicamente durante a noite);
- Reservas primárias para isolamento de redes funcionando em ilha ou operação de emergência para auxílio quando as redes estão interconectadas;

A gestão do carregamento ou injeção deve respeitar as limitações físicas impostas pela constituição química das baterias de forma a evitar a sua degradação prematura, uma vez que o objetivo primordial é a mobilidade elétrica.

### 2.2.2.3 Tecnologias de supervisão e controlo

A monitorização clássica da rede de distribuição e o seu controlo era relativamente de baixa tecnologia. A monitorização não passava de um quadro de parede que exibia o estado do sistema. Muitas vezes, esse quadro enchia-se de anotações relativas a alterações pontuais. Este facto demonstrava as dificuldades em controlar o sistema originando grandes problemas de segurança.

No entanto, os centros de controlo da rede e os demais dispositivos que a incorporam não pararam no tempo. De acordo com as exigências da sociedade foram evoluindo. Nos dias de hoje, os sistemas de distribuição de energia estão a tornar-se cada vez mais “inteligentes” e mais seguros pelo que, os centros de operações que os controlam estão a assumir novos papéis na gestão da rede.

Os medidores e sensores inteligentes na distribuição da rede ajudam a identificar falhas de utilizadores, identificar locais de interrupção, especificar equipamentos provocando a interrupção dos mesmos, e confirmar a restauração de energia. Os *smart meters* ou contadores inteligentes são normalmente medidores elétricos que registam o consumo de energia elétrica, em intervalos de tempo (por ex. intervalos de uma hora) e transmite essa informação, pelo menos diariamente de volta para a concessionária para fins de fiscalização e cobrança. O termo *smart metering* pressupõe uma infra-estrutura de medição avançada, *advanced metering infrastructure* (AMI) que compreende medidores e sistemas de comunicação, que serve como uma porta de entrada para a utilidade / interação com o cliente.



**Figura 10:** *Smart meter* (SilverPac). [23]

O *Distribution Transformer Controller* (DTC) fica localizado na subestação MT/BT Posto de Transformação (PT) e tem a função de comunicar e gerir contadores inteligentes existentes na rede BT da subestação. O DTC opera como um dispositivo inteligente de controlo e automação do PT, e tem funções de deteção de defeito e controlo da iluminação pública. O DTC apresenta um conceito modular e expansível, permitindo assim a introdução faseada de novas funcionalidades conforme elas se tornem necessárias. O DTC implementa ainda outras funções, tais como a análise da qualidade de

energia, detecção e notificação de falhas de energia, monitorização do desequilíbrio de carga, monitorização de sobrecarga do transformador e balanço energético.



**Figura 11:** DTC (Efacec). [19]

Os sistemas de informação centrais processam a informação recebida de todos os componentes envolvidos, suportando as operações e o controlo da rede de distribuição de energia. A integração dos sistemas técnicos e comerciais permite a implementação de uma forma precisa dos processos de faturação, através da utilização de dados de consumo/ produção obtidos em tempo real. Os sistemas centrais disponibilizam uma visão global de todos os dispositivos existentes, permitindo a operação de uma rede ativa. Estas tecnologias são denominadas do inglês *Wide-Area Monitoring and Control* (WAMC) e incorporam softwares como *Supervisory control and data acquisition* (SCADA), *wide-area monitoring systems* (WAMS), *wide-area adaptive protection, control and automation* (WAAPCA), *wide-area situational awareness* (WASA).

Os SCADA disponibilizados nas salas de comando de centros de operação são responsáveis pela supervisão e controlo de operações de automação de diversos sistemas. No caso de redes de distribuição de energia elétrica, tais sistemas são geridos pelos profissionais da área operacional das empresas e fornecem informação do estado de equipamentos, por exemplo se está ligado ou desligado, valores de grandezas elétricas e comandos para acionamento, desligamento de equipamentos, como transformadores e disjuntores.

Um Sistema de gestão de distribuição, do inglês, *Distribution management systems* (DMS) é uma coleção de dispositivos projetados para monitorizar e controlar uma rede de distribuição eficiente e confiável. Os sistemas DMS atuam como um sistema de apoio à decisão para auxiliar a sala de controlo com a monitorização e controlo do sistema de distribuição elétrico. Estes sistemas permitem melhorar a fiabilidade e a qualidade do

serviço em termos de redução de falhas, minimizando o tempo de interrupção, mantendo uma frequência aceitável e níveis de tensão.

O sistema SCADA/DMS, em conjunto com outros sistemas, devem atuar como um só, mas abrangendo toda a rede, desde a produção até o cliente. As funções de controle e automação deixam de ser limitadas aos centros de comando. A implementação em larga escala de comunicações e automatismos está transformando a rede de distribuição passiva numa *smart grid* ativa, em que todas as manobras podem ser monitorizadas e operadas à distância. [11]



**Figura 12:** SCADA.

Dispositivos da análise de estabilidade da rede e sistemas de recuperação automáticos, do inglês, FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), são dispositivos com base em eletrônica de potência, que foram desenvolvidos para melhorarem o desempenho dos sistemas de corrente alternada e tornar a sua transmissão em longas distâncias viável.

### **2.2.3 *Micro-grids* auto-sustentadas**

Existem muitos lugares, nos países em desenvolvimento, onde cerca de 33% da população ainda não têm acesso a energia elétrica. A quebra de fornecimento de energia elétrica, por exemplo por falha na rede de distribuição, obrigando uma rede elétrica a auto-sustentar-se até a avaria ser reparada. Também nos países desenvolvidos, por exemplo existem regiões que pretendem independência energética do sistema fornecedor de eletricidade existente. Estas regiões podem ser eletrificadas, expandindo as redes dos sistemas de energia já existentes ou através da construção de novos sistemas de energia isolados, que funcionam como fontes de energia alternativas, denominadas *micro-grids* auto-sustentadas.

Em geral, é preferível estender as redes existentes, o que nem sempre é fácil, pois a maioria das regiões não eletrificadas tanto nos países em desenvolvimento como nos países desenvolvidos estão localizadas em áreas remotas e difíceis, como regiões montanhosas, florestas, desertos e ilhas, que exigem grande investimento para ampliação da rede. [9]

Por norma as localidades a eletrificar são pequenas, compostas por poucos consumidores e não possuem comércio ou indústria pesada que careça de elevadas quantidades de energia elétrica. Desta forma, não é justificável a construção de uma rede de transmissão de energia, optando-se pelo recurso a fontes de energia renovável que envolvem elevado investimento inicial ou energias convencionais como geradores a *diesel*, que têm o obstáculo de possuírem elevados consumos de combustível, poluírem o ambiente e necessitarem de manutenção contínua.

Mas não só pequenas localidades e países em desenvolvimento optam pelo recurso a *micro-grids* auto-sustentadas. O exemplo dinamarquês da ilha de Bornholm e da ilha grega de Khytnos, sendo o primeiro comentado no próximo capítulo e o segundo estudado neste projeto. Estes realçam a importância do investimento das sociedades modernas no conceito das *micro-grids* auto-sustentadas.

As fontes de energia renovável são sugeridas para construir a base das fontes de energia para estas *micro-grids* isoladas. A energia proveniente das fontes renováveis está disponível localmente e quando utilizadas adequadamente podem reduzir consideravelmente os períodos de funcionamento das fontes de energia convencionais, o que irá resultar na redução do consumo de combustível e na minimização da necessidade de manutenção.

Atualmente existe bastante investigação na área das *micro-grids*, e têm sido apresentadas variadas arquiteturas de controlo que ambicionam superar a robustez do atual sistema de energia elétrica. A avaliação dos alegados benefícios deve contudo ser feita rigorosamente e para isso é crucial possuir o máximo de informação acerca dos dispositivos intervenientes. Neste campo é importante reforçar o conhecimento das tecnologias de geração e armazenamento de energia existentes que podem vir a integrar estas *micro-grids*, por serem os principais atores deste sistema isolado, em conjunto com os consumidores. Dessa forma elaboram-se modelos mais exatos que possibilitem um estudo prévio consistente, aproximando os conceitos teorizados da realidade tecnológica

atual e identificando possíveis limitações técnicas que possam surgir no conjunto das unidades integrantes da rede.

A introdução de TIC na estrutura destas redes revela-se fundamental para se elaborar a gestão colaborativa, de forma a suportar a monitorização e a otimização do fluxo de energia, minimizando a dependência da rede elétrica ou das fontes de energia convencionais.

### **2.3 Exemplos de *Smart Grids***

Portugal já se lançou na implementação em larga escala da Rede Elétrica Inteligente a cargo de um consórcio liderado pela EDP Distribuição e incorporando empresas com competências nas áreas da medição e comunicações (Janz), automação de sistemas de energia, comunicações, SCADA e automação de subestações (EFACEC), sistemas de informação (Edinfor/ LOGICA CMG) e institutos de investigação (INESC Porto), com o suporte da noLimits Consulting.

A primeira fase do projeto consiste na instalação de cerca de 30 mil novos contadores de energia elétrica – a *Energy Box* – em clientes de Baixa Tensão, abrangendo grande parte do concelho de Évora, iniciando-se assim o conceito de *InovCity*. Prevê-se a cobertura da totalidade dos seis milhões de clientes em 2017. As funcionalidades preconizadas pela EDP para a “sua” *Energy Box* permitem aos consumidores conhecer melhor os seus gastos, saber onde poupar e qual a melhor hora para vender energia à rede, entre outras funcionalidades. [19]

O desenvolvimento do projeto está focado na instalação de uma rede elétrica ativa, incluindo soluções de *self-healing* (auto-recuperação), estratégias de controlo de microgeração de forma a permitir o funcionamento em ilha e recuperação de serviço após apagões, gestão da procura, etc.

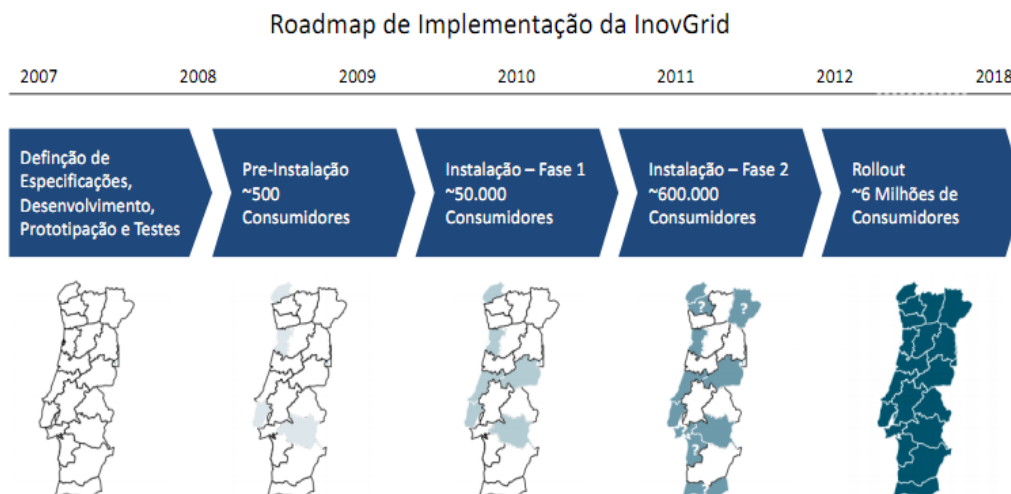
O Projeto *InovGrid* pressupõe a sua expansão ao Projeto *InovCity*, representa o conceito das redes inteligentes de eletricidade, enquanto projecto-piloto da primeira *smart grid* ibérica. A cidade de Évora foi selecionada para a implementação, com base em critérios de dimensão, características elétricas da rede e visibilidade. O grande objetivo do *InovCity* consiste na contribuição efetiva para reduzir emissões de CO<sub>2</sub>, aumentar a contribuição das energias renováveis e melhorar a eficiência energética. A concretização destes objetivos depende da capacidade de conseguir a redução de consumos, a

transferência de consumos (ponta para vazio) e o aumento da penetração da microprodução. A rede inteligente de distribuição de energia elétrica vai ser aberta a todos os comercializadores e empresas de serviços de valor acrescentado, possibilitando o aparecimento de novos tarifários e serviços e o melhoramento dos serviços existentes. Na Tabela 2, apresentam-se as ações prioritárias a implementar no *InovCity*. [19]

**Tabela 2:** Ações prioritárias a implementar no *InovCity*. [19]

Foco	Ações
Microgeração	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentivar campanha de microgeração em Évora</li> <li>• Promover ações locais de investigação e demonstração de energias alternativas</li> </ul>
Veículos Elétricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalar postes de carregamento elétrico</li> <li>• Demonstrar o uso de veículos elétricos nas frotas da Câmara Municipal de Évora e EDP</li> <li>• Facilitar testes de conceito de tecnologias e modelos de negócio.</li> </ul>
Iluminação Pública	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover auditorias e ações de eficiência da Iluminação Pública</li> <li>• Fomentar o uso de sistemas de iluminação inteligentes</li> </ul>
<i>Smart Homes</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento do conceito de <i>Smart Home</i> com integração de domótica e utilização de eletrodomésticos inteligentes</li> </ul>
Outros serviços de valor acrescentado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento e testes de eficiência energética, de informação sobre o consumo, informação ambiental e de sustentabilidade</li> </ul>

A entrada no mercado está diretamente dependente da implementação das redes inteligentes de energia em Portugal. Assim sendo, a política de distribuição será evolutiva ao longo do tempo, tendo em conta o *roadmap* de implementação previsto para a *InovGrid*.



**Figura 13:** Roadmap de Implementação da *Inovgrid*. [19]

A implementação faseada da *InovGrid* planeada prevê uma total implementação no território nacional em 2018. O serviço de Planeamento e Gestão Remota de Consumos Elétricos propõe-se a acompanhar a evolução da implementação, tendo em conta os *targets* de mercado definidos. [19]

A microgeração tem um papel fundamental no paradigma de *smart grid*, como tal em Portugal surgiu a lei da Microgeração, também designada por “Renováveis na Hora”, através do DL 363/2007, que estabelece o seu regime jurídico e a portaria 201/2008, que regula o processo de adesão à microprodução. Nesta lei agilizam-se os processos de licenciamento e aliciam-se os promotores através de tarifas mais atrativas que as do DL 68/2002.

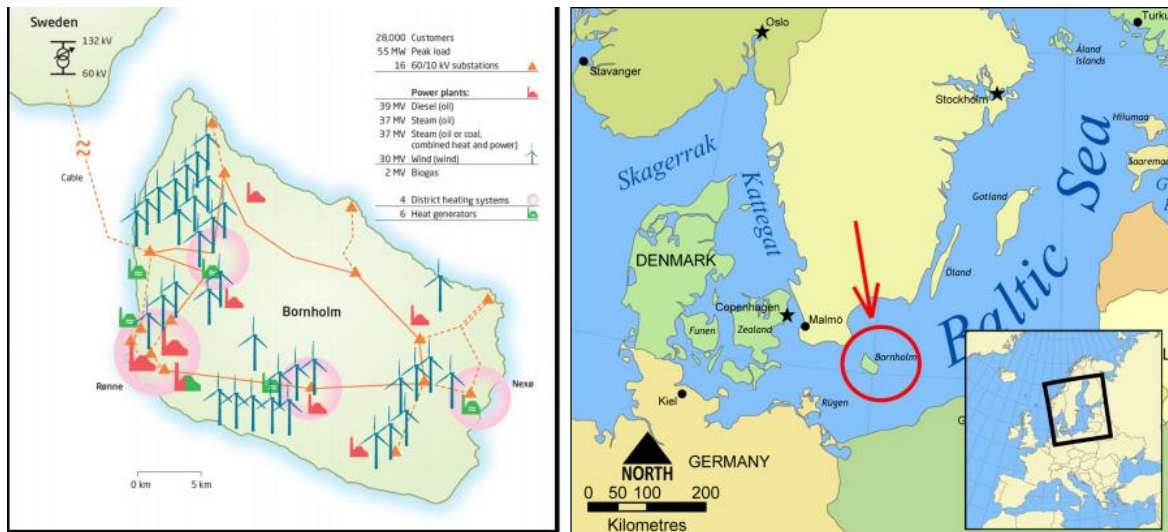
A lei da microgeração veio facilitar a entrega de energia à rede. Permitindo que se instalem unidades de cogeração a biomassa, de energia solar, de energia eólica, de hídrica e de pilhas de combustível com base em hidrogénio proveniente da microprodução renovável. As unidades de microprodução podem ter uma única fonte ou ser uma combinação das fontes de energia acima mencionadas, desde que não se ultrapasse o limite máximo de produção anual de energia, que para a energia solar é de 2.4 MWh por kW instalado e para as restantes fontes de energia é de 4MWh por kW.

As unidades de microprodução podem entregar energia em baixa tensão em qualquer local que tenha um contador de consumo e a tarifa de venda de eletricidade depende do regime escolhido, regime geral ou regime bonificado.

A logística da lei da microgeração começou a funcionar em Abril de 2008, e irá contribuir para o aumento da capacidade instalada de fotovoltaico e eólica, bem como das outras fontes de energia contempladas nesta lei. O objetivo é de que, anualmente, se instalem pelo menos 10 MW nestes pequenos sistemas e a previsão do governo, assumindo um crescimento de 20% ao ano, é de que até 2015 se instalem 165 MW ao abrigo da microgeração. [10]

O projeto EcoGrid UE é um projeto europeu de larga escala que apresenta um mercado em tempo real de recursos renováveis distribuídos. A ideia-chave do EcoGrid UE é introduzir mecanismos baseados no mercado perto da fase de operação que vem permitir maior capacidade de equilíbrio, especialmente a partir de um consumo mais flexível. A demonstração desde projeto europeu tem lugar na ilha dinamarquesa de Bornholm, com

mais de 50% do consumo de eletricidade proveniente da produção de energia renovável [34].



**Figura 14:** Localização da ilha de Bornholm, Dinamarca. [34]

De um total de 28.000 clientes em Bornholm, cerca de 2000 consumidores residenciais irão participar com a resposta da procura flexível aos preços em tempo real. Os participantes serão equipados com dispositivos de resposta à procura residencial, aparelhos que utilizam *gateways* e controladores inteligentes. A instalação das soluções inteligentes permite que o preço em tempo real seja apresentado aos consumidores e assim os utilizadores podem pré-programar as suas preferências de procura de resposta automática, por exemplo, através de diferentes tipos de contratos de energia elétrica. Automatizar a rede e a possibilidade de escolha ao cliente é um dos elementos-chave para o conceito EcoGrid UE. A tabela seguinte resume alguns números chave das especificações da ilha de Bornholm, de salientar o elevado número de utilizadores inseridos na *smart grid* e a diversidade de tipos de energias envolvidas no processo de produção desta rede.

**Tabela 3:** Especificações da ilha de Bornholm. [34]

Property	Value
<b>Customers</b>	
Number of customers	~28.000
Number of customers (> 100.000 kWh/year)	~300
Total energy consumed	268 GWh
Peak load	55 MW
<b>Low-carbon energy resources</b>	
Wind power plants	36 MW
CHP/biomass	16 MW
PV	2.0 MW
Biogas plant	2.0 MW
Electric vehicles (under roll-out)	
<b>Grid</b>	
60 kV grid	131 km
Number of 60/10 kV substations	16
10 kV grid	914 km
Number of 10/0.4 kV substations	1006
0.4 grid	1.887 km
<b>Communication</b>	
Fiber network between 60/10 kV substations	131 km
<b>District heating</b>	
Number of district heating systems	5
Total heat demand (in 2007)	560 GWh
<b>Operation</b>	
Normal operation mode	Interconnected Nordel
Island operation capability	Continuous

O projeto EcoGrid UE é uma demonstração de grande escala de um sistema de energia completo, incluindo estes elementos [34]:

- A rede total distribuída com todos os recursos até 60 kV, 28 mil clientes, 55 MW pico de carga, 268 GWh do consumo de eletricidade, e 500 GWh procura de calor.
- Todos os DER, incluindo a energia eólica (30 MW), fotovoltaica (2 MW), biomassa (16 MW), biogás (2 MW), cinco unidades de CHP (*combined heat and power*) e veículos elétricos têm uma intervenção total de mais do que 50 % do consumo de energia elétrica.
- Sistemas de TIC e uma nova arquitetura de informação permitem que todas as DER e consumidores participem no mercado de energia. Haverá um sistema de comunicação e informação e novos procedimentos operacionais.
- Aparelhos *smart house*, medidores inteligentes, E-mobilidade utilizando veículo elétrico é uma parte integrante do conceito total.
- Armazenamento de energia será demonstrado através de bombas de calor, sistemas de aquecimento urbano eólicos. As baterias dos veículos elétricos serão utilizadas para o armazenamento de eletricidade direta.

O orçamento total para EcoGrid UE é 21.000.000 €, dos quais cerca de metade é financiada pela UE. O projeto será executado por 4 anos iniciado em 2011.

Estima-se que os impactos globais do EcoGrid EU tragam progressos significativos no processo de criação de normas, na introdução de melhorias ao acesso dos pequenos consumidores a um mercado mais equilibrado, melhoria das previsões de produção, minimizar os custos de instalação de equipamentos de monitorização, lançamento de mais soluções de controlo e estratégia das *smart grids* assim como a sensibilização e incentivo da sociedade global para o conceito e visão destas.

Como referido, o objetivo principal de uma *smart grid* centra-se na otimização do fluxo de energia numa rede elétrica, com um reduzido tempo de resposta e com o mínimo de perdas possíveis. No capítulo que se segue será apresentado um modelo, baseado nos princípios dos sistemas multiagentes, para a gestão colaborativa de *micro-grids* auto-sustentadas.

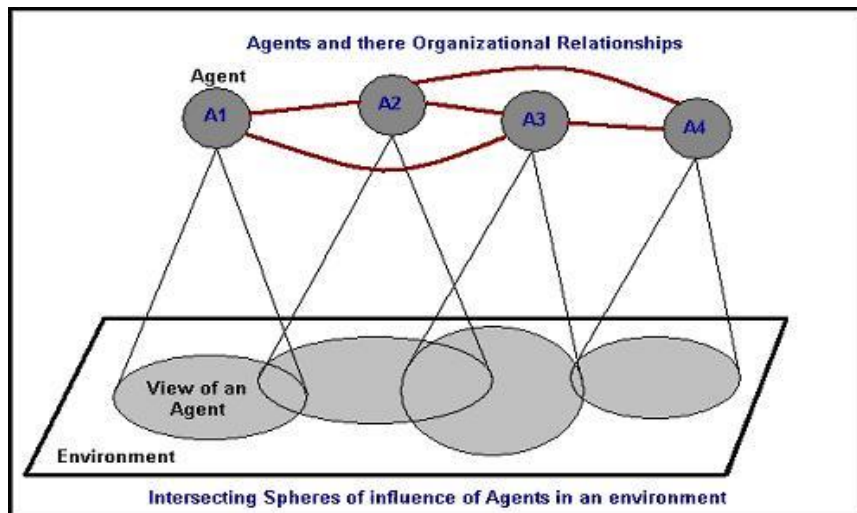
### **3. Abordagem baseada em agentes numa *micro-grid* auto-sustentada**

De forma a melhorar a gestão em *micro-grids* auto-sustentadas, este capítulo apresenta uma abordagem baseada nos princípios da tecnologia de sistemas multiagentes, focando o comportamento individual dos agentes e a coordenação entre agentes para atingir a gestão colaborativa global.

#### **3.1 Sistemas Multiagente**

Os sistemas multiagente (SMA) são sistemas compostos por múltiplos agentes, que exibem um comportamento autónomo mas ao mesmo tempo interagem com os outros agentes presentes no sistema [14]. Estes agentes exibem características fundamentais, como serem capazes de agir de forma autónoma tomando decisões levando à satisfação dos seus objetivos e serem capazes de interagir com outros agentes utilizando protocolos de interação social inspirados nos humanos ou em animais, incluindo também algumas das funcionalidades como a coordenação e cooperação.

Cada agente é basicamente um elemento capaz de resolução autónoma de problemas e opera assincronamente, com respeito aos outros agentes. Para que um agente possa operar como parte do sistema, é necessária a existência de uma infra-estrutura que permita a comunicação e/ou interação entre os agentes que compõe o SMA. Desta forma, o sistema vai conter múltiplos agentes, cada qual com diferentes capacidades de perceção e ação no mundo. Cada agente terá uma esfera de influência distinta sobre o ambiente, ou seja, será capaz de influenciar diferentes partes do ambiente, tal como é ilustrado na Figura que se segue. Por exemplo, no caso de um agente que joga uma partida de xadrez, os sensores permitir-lhe-ão determinar a posição das peças no tabuleiro e os atuadores serão capazes de agir no tabuleiro realizando jogadas. A definição exata da forma de funcionamento dos sensores e atuadores do agente pode, no entanto, apresentar diversas alternativas.



**Figura 15:** Estrutura de um sistema multiagente. [2]

As implementações práticas de sistemas multiagente estão focadas na construção de modelos que permitam a criação de pequenas e grandes sociedades de agentes autónomos, capazes de interagir convenientemente de forma a atingirem os seus objetivos. [4]

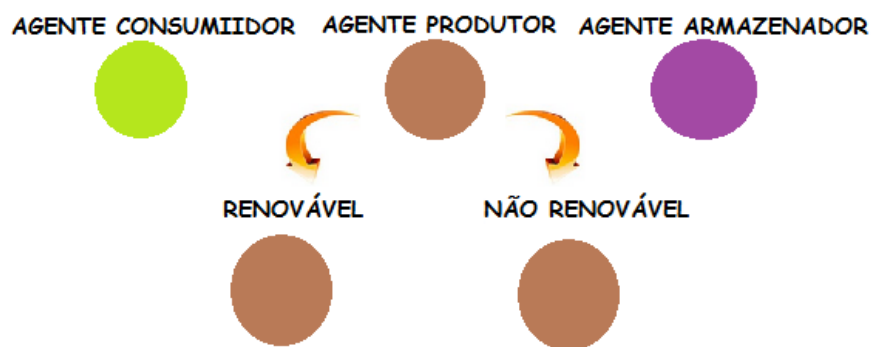
Os sistemas multiagente estão simbioticamente ligados com o paradigma *smart grid* e *micro-grids* auto-sustentadas pois a ideia principal num sistema multiagente é que um comportamento global inteligente pode ser alcançado a partir do comportamento individual dos agentes distribuídos, tal como numa *smart grid*, em que se pretende uma resposta rápida e eficaz às alterações na rede, cooperação entre consumidores, maior flexibilidade com os produtores, controlo distribuído em vez de centralizado e heterogeneidade entre dispositivos. Num sistema multiagente não é necessário que cada agente seja individualmente inteligente para alcançar um comportamento global inteligente, em analogia com as sociedades de insetos que se encontram na biologia; por exemplo, uma formiga não é particularmente inteligente, mas uma colónia de formigas possuiu comportamentos incrivelmente complexos.

### 3.2 Arquitetura do sistema multiagente para a gestão da *micro-grid* auto-sustentada

A abordagem para a gestão colaborativa de uma *micro-grid* auto-sustentada que se propõe neste trabalho é baseada nos princípios de sistemas multiagentes. A base que sustém o bom funcionamento de um sistema multiagente é a identificação dos diferentes tipos de agentes existentes no sistema, os seus comportamentos individuais, e

posteriormente os mecanismos de interação entre agentes distribuídos que conduzam ao comportamento emergente desejado.

Neste modelo são identificados três tipos de agentes distintos, cada um dos quais apresentando diferentes papéis, funções e objetivos, tal como é ilustrado na Figura 16: produtor, consumidor, armazenador.



**Figura 16:** Conjunto de tipos de agentes existentes no modelo para a micro-grid.

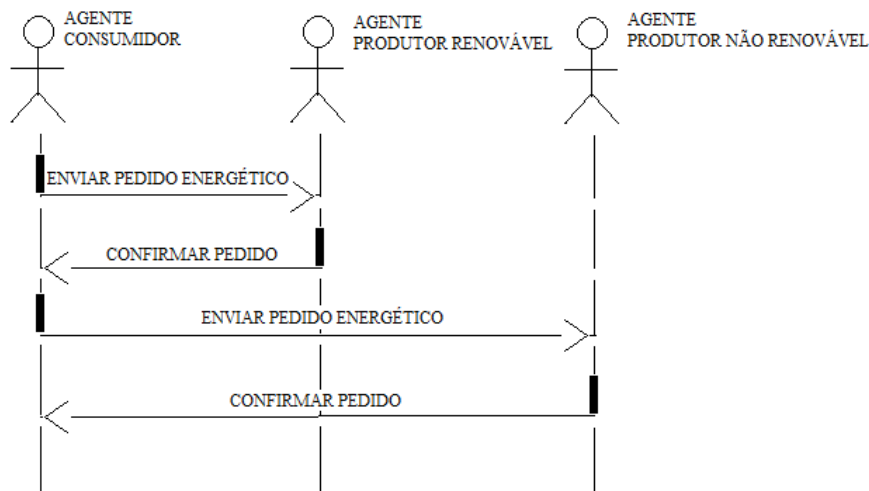
Os *agentes consumidores* serão os clientes do sistema. Estes agentes não terão qualquer tipo de mecanismo de produção e envio de energia elétrica, apenas requisitando energia aos agentes produtores e armazenadores de energia para sustentar as suas necessidades energéticas. Estes agentes gerem as necessidades de energia elétrica do dispositivo/sistema que representam, representados através de um diagrama de cargas, interagindo com outros agentes que possuam a capacidade de fornecer a energia em tempo real.

Os *agentes produtores* representam dispositivos/sistemas com capacidade de produção de energia elétrica. O agente associado ao sistema de produção irá gerir de uma forma otimizada as suas capacidades energéticas, representadas através de um diagrama de produção de energia, interagindo com os diversos agentes consumidores que necessitam de energia elétrica. O agente produtor pode ser dividido entre os agentes produtores renováveis e os agentes produtores não renováveis, conforme a fonte de energia utilizada pelo dispositivo, que irá apresentar ao comportamento do agente requisitos específicos.

Os *agentes armazenadores* de energia correspondem a sistemas de armazenamento de energia elétrica, como sejam baterias. Este tipo de agente gere de forma otimizada o carregamento e fornecimento de energia elétrica aos consumidores, interagindo com os

agentes produtores na fase de carregamento e com os agentes consumidores na fase de fornecimento.

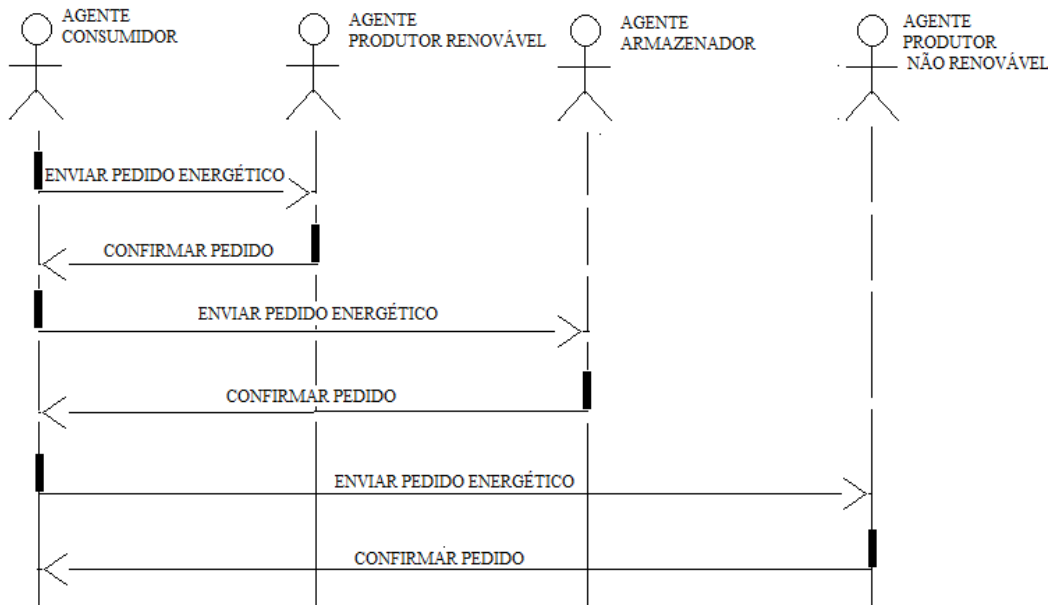
Um dos mecanismos do sistema multiagente para gestão de *micro-grids* auto-sustentadas resulta de um envio de pedidos de energia rudimentar, uma ligação direta entre os consumidores e produtores, dispondo apenas de duas opções para obter energia elétrica: a prioridade do consumidor será sempre enviar um pedido de energia ao produtor renovável, caso este não consiga satisfazer o seu pedido, ou só consiga satisfazer parte do pedido, o consumidor faz novo pedido desta vez destinado ao produtor não renovável.



**Figura 17:** Cadeia de envio de pedidos energéticos.

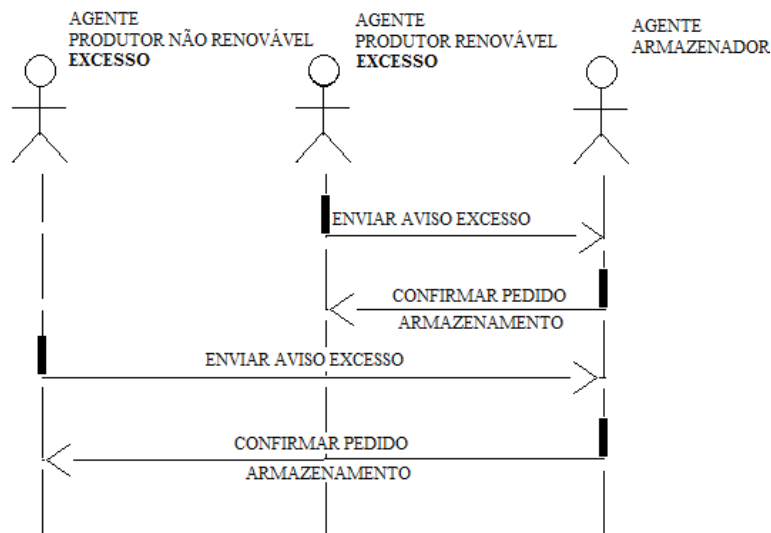
O envio do segundo pedido não é prioritário pois a energia proveniente do produtor não renovável não é energia “limpa” e não possui custos mais baixos como a energia proveniente produtor renovável. A energia requisitada ao produtor não renovável não é tão desejada pois se for no caso de um gerador a *diesel* é necessário proceder a ativação do mesmo para se providenciar energia.

A adição do banco de baterias, representado por agentes armazenadores, permite um maior leque de escolha para os agentes consumidores, uma vez que o agente armazenador posiciona-se na hierarquia de pedidos de energia enviados em segunda opção, ou seja, os agentes consumidores primeiro tentam obter energia dos produtores renováveis, de seguida tentarão obter energia do agente armazenador e por fim terão o produtor não renovável como a última alternativa energética. O objetivo para a inserção do agente armazenador nesta *micro-grid* será de reduzir os períodos do uso do produtor não renovável.



**Figura 18:** Cadeia de opção energética com a adição do agente armazenador.

No entanto o agente armazenador apenas poderá proceder ao carregamento da sua capacidade consoante algumas características, dependendo do cenário que esteja a ser simulado e do tipo de configuração que se pretenda. O agente armazenador poderá carregar as suas baterias caso todos os agentes consumidores tenham as suas necessidades energéticas satisfeitas, e ocorra excesso de energia proveniente do produtor renovável e/ou não renovável, o que pode ocorrer com alguma frequência devido ao facto de o produtor não renovável, caso seja o gerador *diesel*, ser colocado a funcionar algumas vezes a 100% de carga quando ativado.



**Figura 19:** Carregamento do agente armazenador.

Cada um dos agentes presentes no sistema apresenta um comportamento próprio para atingir os seus objectivos interagindo com os restantes agentes do sistema. A grande potencialidade dos sistemas multiagentes é a possibilidade de embeber algoritmos inteligentes em cada um dos agentes individuais, que posteriormente através da cooperação permitirão a emergência de soluções globais. Neste trabalho também foram considerados alguns métodos de previsão embebidos individualmente nos agentes, que permitem que cada um dos agentes tente prever qual a energia que vai precisar nos próximos *slots* de tempo, e assim tornar o sistema mais robusto e previsível. Basicamente esses métodos estabelecem diálogos entre os agentes do sistema, permitindo saber os consumos para as horas que ainda não estão a ser simuladas, assim o sistema pode reagir atempadamente, recalculando a melhor estratégia de produção e preparar os agentes produtores e armazenadores para as horas que ainda não foram simuladas.

Os métodos de previsão e alguns algoritmos de controlo de agentes, pertencentes ao modelo desenvolvido neste trabalho, serão descritos no capítulo 4.3, aquando da descrição da implementação do modelo de agentes em NetLogo, de forma a facilitar a sua compreensão.

O capítulo seguinte destina-se à explicação da implementação experimental, sendo descrito o caso de estudo, ferramentas de simulação baseadas em agentes e o modelo criado na plataforma NetLogo.

## 4. Implementação experimental

A abordagem baseada em agentes proposta no capítulo anterior foi implementada na plataforma de simulação NetLogo utilizando um caso de estudo apropriado. O caso de estudo será sujeito a simulação utilizando diferentes estratégias de controlo, seguindo a abordagem e mecanismos descritos no capítulo anterior. Neste capítulo será descrito o caso de estudo e apresentados detalhes técnicos da implementação experimental do modelo de agentes.

### 4.1 Descrição do caso de estudo

O caso de estudo deste projeto é inspirado na *smart grid* piloto da ilha de Kythnos, na Grécia. Esta *smart grid* comporta um pequeno grupo de 12 casas num vale da ilha de Kythnos, que pertence ao grupo de Cyclades situado no meio do Mar Egeu [2]. As especificações de rede e segurança para as ligações domésticas respeitam as soluções técnicas da Public Power Corporation, que é a companhia de eletricidade local.

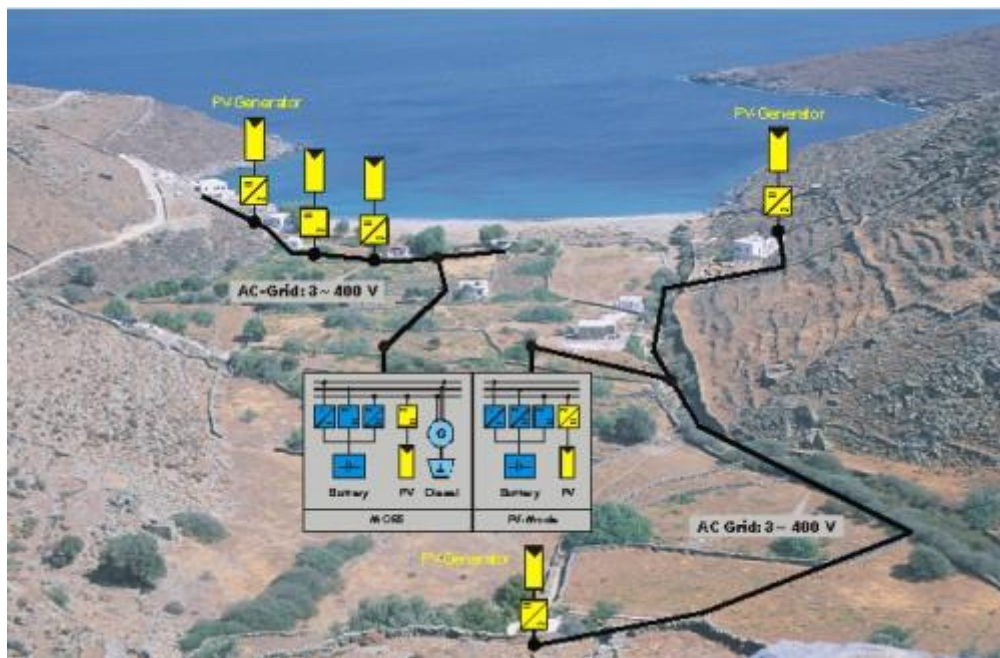
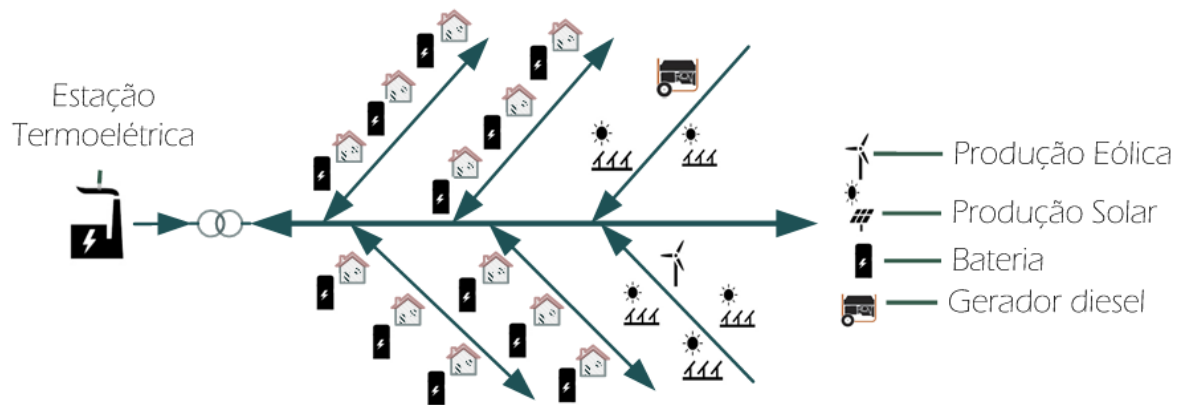


Figura 20: Smart grid de Kythnos, Grécia.

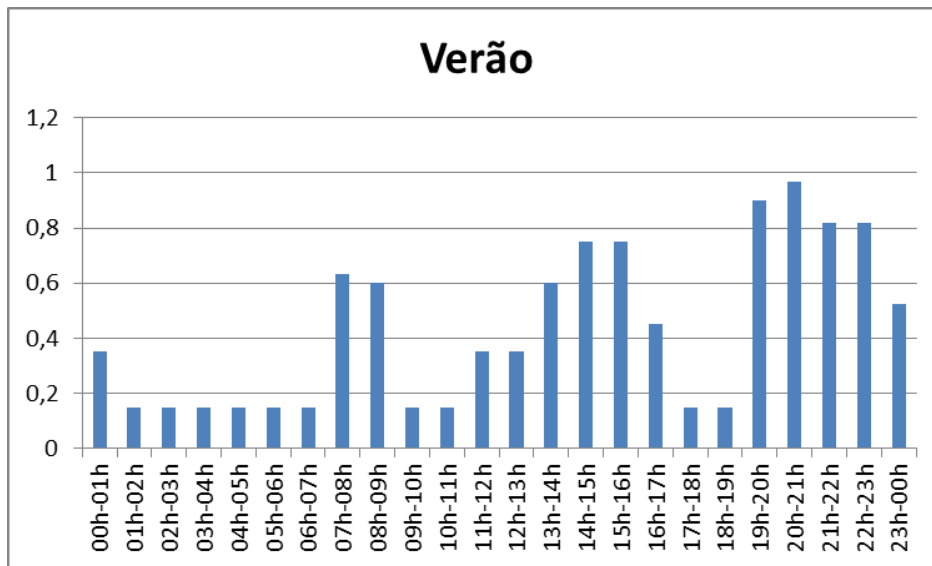
Neste projeto, o caso de estudo foi adaptado dos requisitos originais da *smart grid* piloto de Kythnos, tal como em outros projetos académicos que se basearam na *smart grid* de Kythnos, tendo sido considerados elementos adicionais que permitam uma maior riqueza na simulação da abordagem proposta. A Figura seguinte apresenta o esquema

elétrico da *micro-grid* simulada. Encontrando-se distribuídas pela rede de Baixa Tensão as tecnologias DER, não necessitando de ser injetadas na rede de Média ou Alta Tensão. A empresa distribuidora de energia elétrica é a única fonte produção de energia elétrica que se mantém na zona de Alta Tensão.



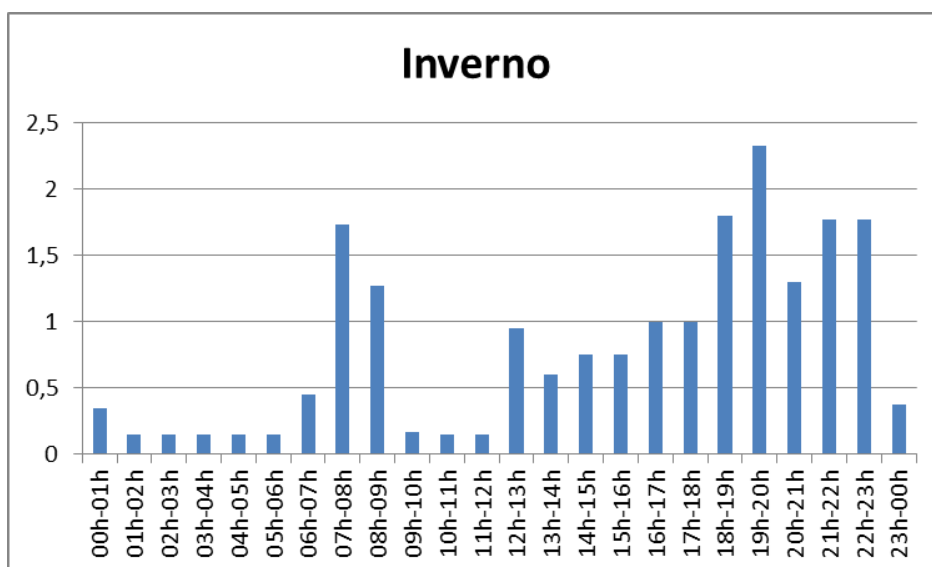
**Figura 21:** Esquema elétrico da *micro-grid* simulada.

Assim, o caso de estudo inclui, tal como a *smart grid original*, 12 habitações que correspondem aos únicos consumidores da rede elétrica. Foram criados perfis energéticos para as diversas habitações, sendo estes o mais aproximado à realidade, possuindo cada uma das habitações, algumas lâmpadas fluorescentes tubulares, termoventilador, secador, lâmpadas fluorescente compactas, lâmpadas de halogéneo, frigorífico, arca frigorífica, máquina lavar roupa, televisão plasma, torradeira/sandwicheira/varinha mágica, computador fixo e computador portátil. Na Figura 22 está apresentado o diagrama de cargas de uma das 12 habitações que foram introduzidas na rede elétrica (a habitação considerada é bifamiliar e apresenta um perfil económico).



**Figura 22:** Diagrama de cargas numa habitação para o período de verão.

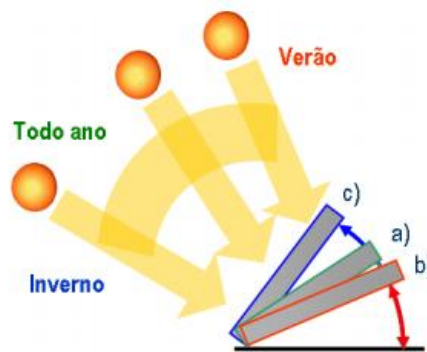
A análise do gráfico permite verificar o consumo em kW (kilo-watt) consoante as horas para uma das habitações para o período de verão. A Figura 23 apresenta o diagrama de cargas para a mesma habitação para o período de inverno. Como seria de esperar, o diagrama de cargas será um pouco diferente, apresentando um maior nível de consumo de energia elétrica.



**Figura 23:** Diagrama de cargas numa habitação para o período de inverno.

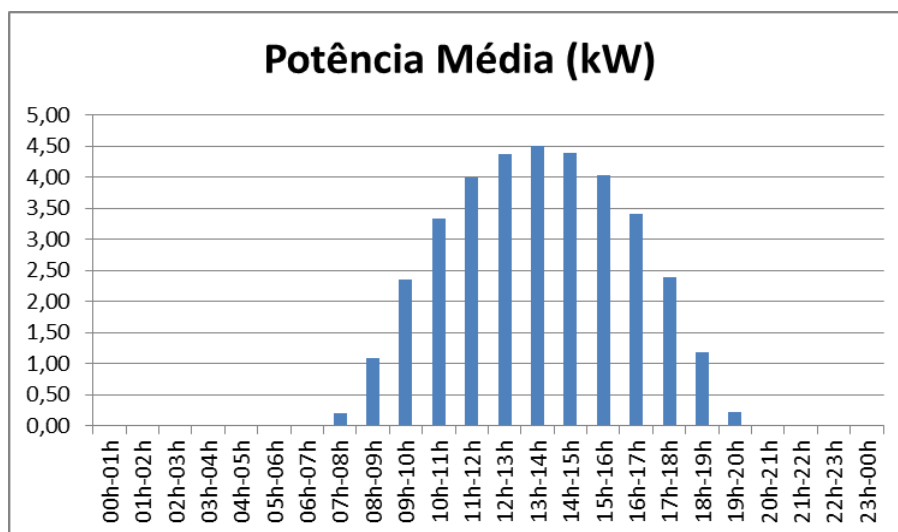
Esta *smart grid* engloba 5 unidades fotovoltaicas, cada uma das unidades possuindo uma potência de 5kW de pico. Os perfis energéticos dos produtores fotovoltaicos foram criados com base em perfis reais, tendo em consideração algumas características técnicas

para potenciar o seu rendimento, nomeadamente um perfil energético de módulos solares fixos, nos quais estes dispositivos seriam colocados a uma inclinação diferente consoante a estação do ano em que fosse testada a rede elétrica. Tal como é ilustrado na Figura 24, de modo a tirar partido do melhor rendimento possível dos painéis solares, reduzindo o ângulo de inclinação dos painéis relativamente ao solo irá favorecer a exposição à radiação durante o verão quando a altura do Sol é maior, enquanto o aumento do ângulo de inclinação favorece a exposição à radiação durante o inverno, quando a altura do Sol é menor.



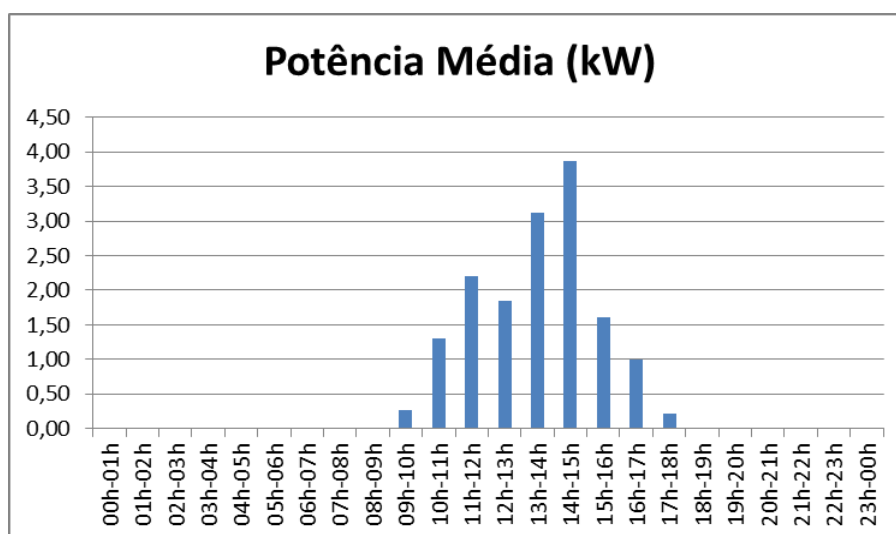
**Figura 24:** Inclinação ideal dos painéis fotovoltaicos para as estações de verão e inverno. [8]

A Figura 25 apresenta o diagrama de produção de um painel fotovoltaico fixo de 5kW para o período de verão. Como seria de esperar, constata-se uma elevada produção de energia elétrica entre as 10 horas e as 18 horas do dia em que ocorre a maior incidência de radiação solar sobre o planeta.



**Figura 25:** Diagrama de cargas de 1 unidade fotovoltaica para o período de verão.

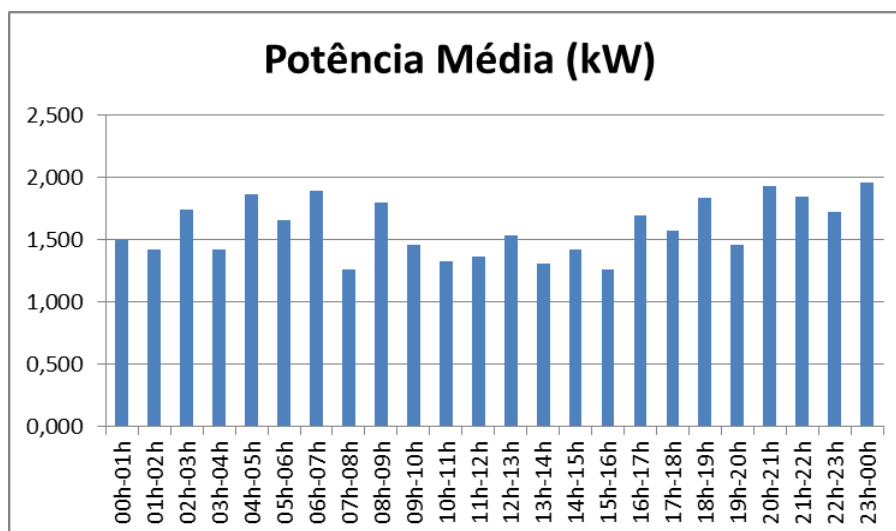
Quanto ao período de inverno, ilustrado na Figura 26, é notória uma diferença de produção de energia através dos módulos fotovoltaicos, sendo em menor quantidade e num menor período de horas ao longo do dia.



**Figura 26:** Diagrama de cargas de 1 unidade fotovoltaica para o período de inverno.

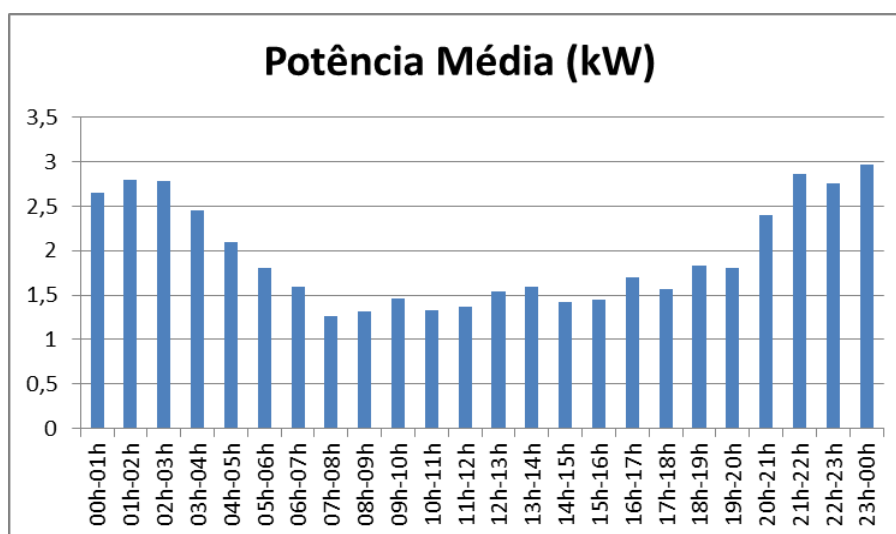
A segunda opção de produção de energia elétrica comporta um gerador eólico de 2kW de potência, por forma a criar um sistema híbrido que permita uma maior versatilidade. Este gerador encontra-se sempre a funcionar em regime ideal, isto é, durante a simulação existe sempre vento, fornecendo energia para colmatar as necessidades dos utilizadores ou para carregar as baterias em períodos de maior disponibilidade de vento.

Aquando da criação do perfil energético do gerador eólico foram considerados ventos acima dos 12 m/s e que seria instalado em pontos estratégicos, como no topo de colinas em torres de 30 m para um melhor aproveitamento da energia eólica disponível. O gráfico da Figura 27 apresenta o perfil da produção de energia elétrica média de um gerador eólico de 2kW, durante o período de verão. Verifica-se que a produção eólica mantém-se aproximadamente constante ao longo do dia.



**Figura 27:** Diagrama de cargas do gerador eólico para o período de verão.

Quanto à produção de energia no período de inverno, ilustrada na Figura 28, verifica-se um ligeiro aumento de produção principalmente durante o período da noite. Este é um aspecto que valoriza a produção eólica em relação á fotovoltaica.



**Figura 28:** Diagrama de cargas do gerador eólico para o período de inverno.

A *micro-grid* comporta ainda um gerador a *diesel* de 30 kW com o objetivo de cobrir as necessidades energéticas que os modos de produção renovável não consigam colmatar, abastecendo as necessidades dos utilizadores em períodos de maior consumo. Este gerador *diesel* quando acionado é muitas vezes colocado a funcionar à sua potência máxima de modo a obter a maior eficiência possível por parte deste dispositivo (em caso

de energia sobranete do uso do gerador diesel, é possível efetuar o carregamento das baterias).

O armazenamento de energia é obtido através de um banco de baterias contendo 48 kW de capacidade total, monitorizado por equipamentos de registo de dados em tempo real. Inicialmente foi projetado uma série de baterias individuais para cada agente consumidor mas posteriormente optou-se pela inserção de um banco de baterias comunitário com características de envio e receção de energia elétrica, não podendo fazer ambas as funções ao mesmo tempo. Este banco de baterias tem um tempo de carregamento consoante a sua capacidade, aspetos técnicos como as perdas de energia das baterias e números de ciclos de carga e descargas destas, também podem ser introduzidos nas características destes agentes para tornar as simulações e os resultados o mais aproximado da realidade.

## **4.2 Ferramentas de simulação baseadas em agentes**

Existem plataformas computacionais que simplificam e asseguram a tarefa de simular e validar estratégias que desejamos implementar durante a fase construção de uma solução baseada em agentes. Estas plataformas possuem o nome de modelação baseada em agentes, do inglês *Agent Based Modelling* (ABM), e são ferramentas que fornecem um ambiente para a programação, modelação e simulação baseada em agentes, com o objetivo de testar e comparar configurações alternativas para os agentes expostos num determinado caso de estudo [3].

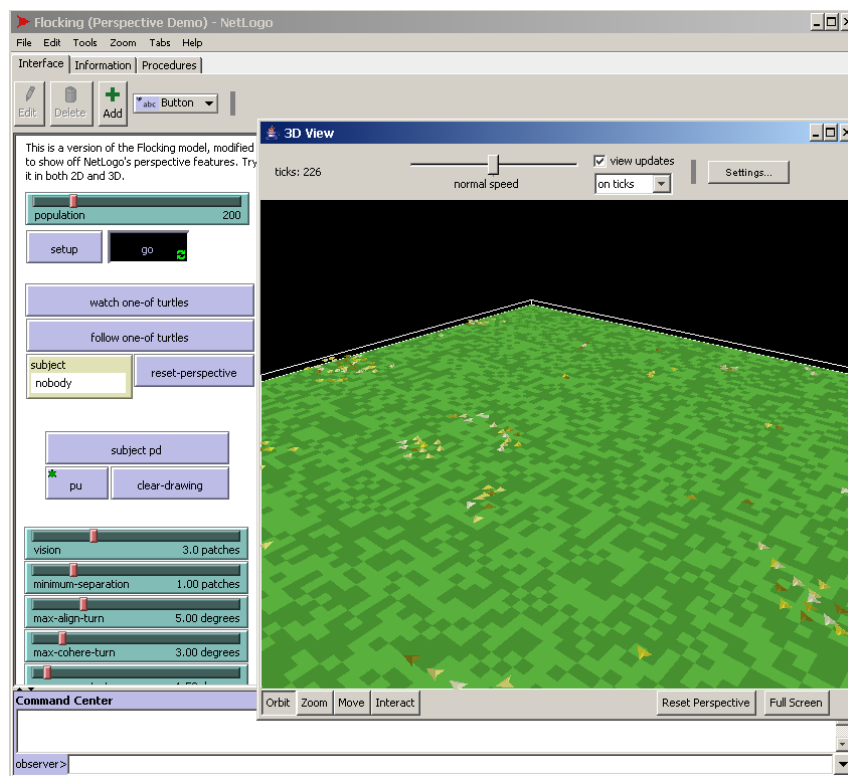
A ideia é verificar e regularizar um projeto desde a fase inicial de construção, corrigindo erros identificados e complicações que possam surgir antes de sua implementação prática. O uso deste tipo de ferramentas é muito útil no contexto de ser menos demorado do que ter que escrever um programa a partir do zero.

A modelação baseada em agentes devido às suas principais características e metodologias, tem diversas aplicações em soluções usando técnicas biológicas. De facto, a possibilidade de criar populações de indivíduos e simular as suas interações num mundo virtual, permite facilmente a adaptação de regras e conceitos que idealizamos para colónias de formigas, abelhas, peixes ou bactérias.

Algumas das ferramentas frequentemente utilizadas neste domínio são o Swarm, MASON, Repast e NetLogo. Todas estas plataformas são utilizadas para simular modelos

baseados em agentes para os mais diversos domínios de aplicação, desde economia, logística, biologia, química e comportamento social.

O NetLogo foi desenvolvido pelo *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling* na Universidade de Northwestern (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>), e funciona em qualquer plataforma que suporte Java. O NetLogo, ver Figura 29, é usado principalmente para a modelação de sistemas complexos e em particular simular fenómenos naturais e sociais, isto é analisando a ligação entre o comportamento das entidades de base e os padrões de nível macro que emergem das interações.



**Figura 29:** Screenshot do ambiente gráfico da plataforma NetLogo. [4]

Este *software* apresenta como vantagem a documentação disponibilizada na *Netlogo library* que dispõe de excelentes exemplos e tutoriais tornando-se assim na ferramenta ideal de iniciantes e estudantes académicos. Algumas desvantagens do NetLogo são a velocidade de simulação para um grande número de agentes e o facto de todo o código da aplicação estar concentrada num único arquivo.

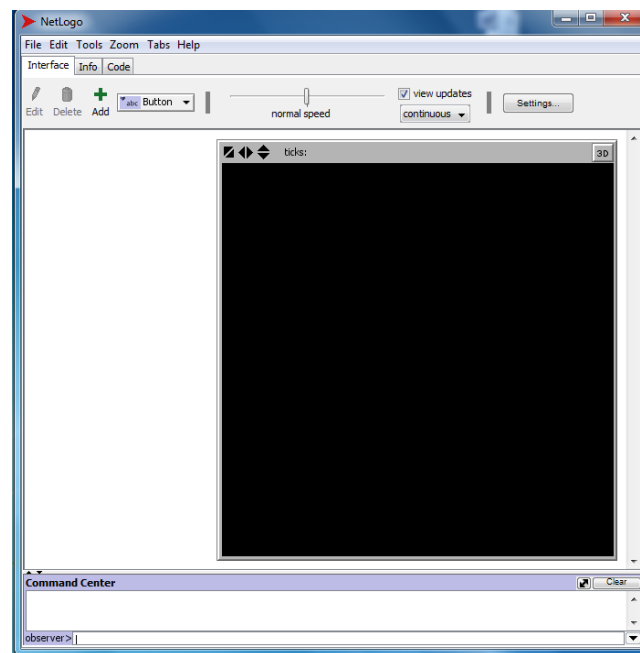
A plataforma NetLogo funciona em qualquer sistema que opere Java e na maioria das plataformas disponíveis no mercado (Windows, Mac, Linux). O NetLogo não foi desenvolvido baseado em Java mas sim em linguagem de programação Logo, o que

facilita a compreensão para pessoas com menores capacidades em programação, visto que a programação Logo foi criada para fins educacionais, ensino construtivista.

Um modelo NetLogo envolve principalmente dois elementos básicos, por um lado uma rede bidimensional que modela o ambiente e por outro, um conjunto de agentes (*turtles*) com os seus próprios atributos e uma série de procedimentos que podem executar. Este tipo de agentes são agentes móveis.

Cada elemento da rede bidimensional é chamado de *patch*, sendo agentes estacionários. Um terceiro tipo de agente é denominado de *link*, que interliga duas *turtles* entre si. Todos os agentes independentes podem operar simultaneamente numa determinada *patch*. Cada entidade pode ler e modificar alguns dos atributos associados às *patches* na sua vizinhança.

A GUI da plataforma NetLogo apresenta um ambiente amigável e intuitivo, e dispõe de 3 separadores tal como ilustrado na figura que se segue: *Interface*, *Information* e *Code*.



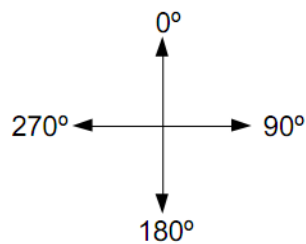
**Figura 30:** Ambiente de trabalho da plataforma NetLogo. [4]

No separador *Interface* o utilizador pode inserir botões, criar gráficos e observar o comportamento global do ambiente criado. No separador *Information*, o utilizador pode alterar e recuperar algumas informações acerca do objetivo, modo de funcionamento ou erros que o modelo possa ter. O separador *Code* é o local onde o código, representado o

modelo com as características e o comportamento desejado, é construído. Na parte inferior do ambiente de trabalho encontra-se o *Command Center* que permite introduzir comandos e/ou instruções que desejarmos, os dados introduzidos aqui podem ser executados durante o decorrer da simulação.

A taxa de atualização gráfica pode ser definida em contínua ou contagem em *ticks*, podendo um *tick* ser visto como um “passo” de simulação dado por um agente em cada avanço de tempo; é por assim dizer a medida de tempo utilizada em NetLogo e a atualização gráfica é feita progressivamente. No modo contínuo o utilizador apenas vê atualizações gráficas quando algo mudar no mundo criado graficamente.

O NetLogo possui um sistema de coordenadas próprio. Este sistema de coordenadas é utilizado para se proceder á orientação das *turtles*, definindo assim o movimento que desejarmos a cada agente. O sistema de coordenadas do Netlogo distingue-se do sistema de coordenadas cartesianas e é apresentado na Figura 31.



**Figura 31:** Sistema de coordenadas do NetLogo. [5]

A tabela seguinte mostra alguns exemplos de código em linguagem Logo utilizados no *software* NetLogo [5].

**Tabela 4:** Exemplos de código em linguagem Logo do *software* NetLogo [5].

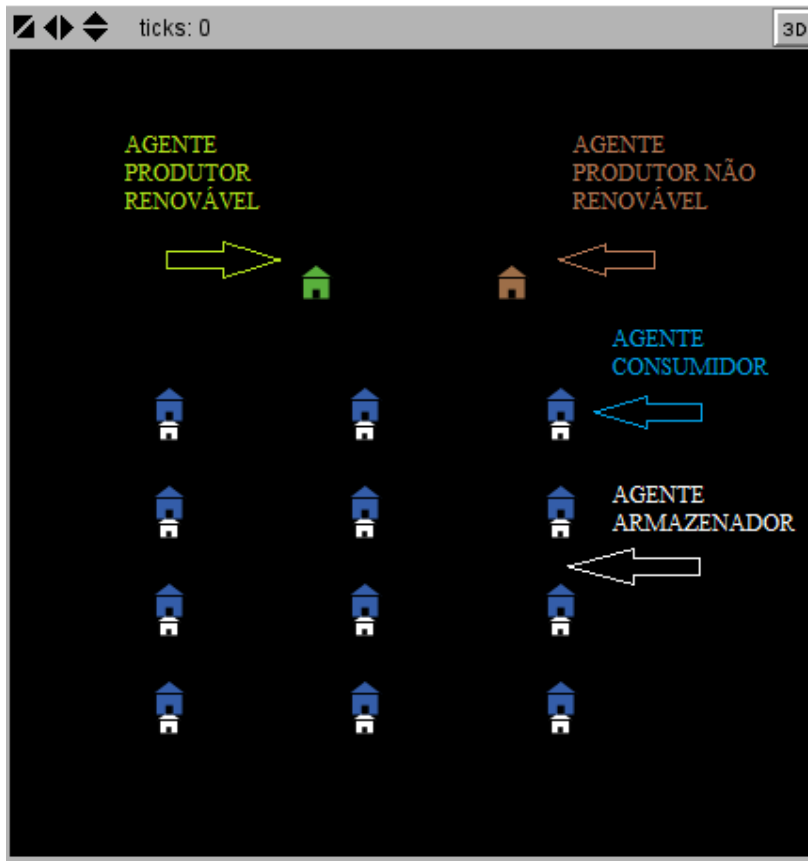
Desired action	Encoding	Comments
Create an agent	<code>crt 1</code>	Which means "Create 1 turtle"
Move agent one patch upper way	<code>set heading 0</code> <code>fd 1</code>	Faces agent in upper way Move agent 1 patch
Check if patch ahead is empty	<code>if not any? product-on patch-ahead 1 []</code>	Checks if on the next patch is any agent called product
Remove first item from an array (e.g. service-list)	<code>set service-list</code> <code>remove-item 0</code> <code>service-list</code>	Removes the first (0) item from the array named "service-list"
Count the total number of pallet on the system	<code>count product-on patches</code>	Counts the products (i.e. pallets) that are in the system (i.e. patches in NetLogo terminology)

No capítulo seguinte será descrita a implementação do modelo para a rede inteligente de Kythnos, referindo a sua constituição, características dos produtores, perfis dos consumidores e métodos de utilização das baterias utilizando a plataforma de simulação Netlogo.

### 4.3 Implementação do modelo de agentes em NetLogo

A *smart grid* da ilha de Khytnos foi a base do modelo desenvolvido na plataforma NetLogo criada neste projeto, porém a maioria das suas características são dissemelhantes.

O modelo implementado em NetLogo compreende 12 agentes consumidores (correspondentes às 12 habitações), 5 agentes produtores renováveis, graficamente representado por 1 agente, 1 agente produtor não renovável e 1 agente armazenador, representado graficamente por 12 agentes individuais a cada habitação. Todos os agentes criados são do tipo *turtle*. A Figura 32 apresenta a estrutura gráfica da *smart grid*.



**Figura 32:** Estrutura da *smart grid* no software NetLogo.

Os agentes de cor azul correspondem aos agentes consumidores, os agentes armazenadores localizados em baixo de cada agente consumidor correspondem aos agentes armazenadores, ilustrados a cor branca. Apesar de cada agente armazenador estar graficamente associado apenas a um agente consumidor, como é visível na Figura 32, estes agentes funcionam como um banco de baterias comunitário de toda a *micro-grid*. Na parte superior estão expostos os agentes produtores, sendo o objeto de cor verde representativo do conjunto de produtores renováveis e o objeto de cor castanha corresponde ao produtor *diesel*.

A Figura seguinte ilustra a interface do programa desenvolvido que apresenta uma série de botões e *sliders* de escolha disponíveis.



**Figura 33:** Interface gráfica dos botões de controlo.

Na parte superior da imagem, à esquerda, verifica-se o botão de *setup*, que é responsável pelo carregamento do aspecto gráfico criado e é também responsável pelo carregamento das variáveis globais e *arrays*. O *slider* em baixo, à direita, *Season*, permite permutar entre as estações verão e inverno. Ao permutar a estação os valores dos perfis energéticos dos consumidores e produtores serão também alterados de modo a obter testes apropriados. O botão *reset-values* executa uma limpeza de variáveis, sendo apenas um botão de teste que foi aplicado durante o desenvolvimento do algoritmo. O *slider method* permite escolher o tipo de cenário que queremos simular (no capítulo seguinte serão explicados os cenários implementados). O botão *go* faz o arranque da simulação, efetuando todas as funções criadas para este programa.

Nesta simulação é fulcral a observação do *command center*, onde serão apresentados os cálculos, observações, avisos e outros registos importantes que são constantemente atualizados durante o decorrer da simulação. Este projeto não focou em profundidade o aspeto gráfico como por norma é usual numa aplicação em NetLogo, com muitas e detalhadas animações gráficas. Ao invés, o ambiente gráfico é constante durante a simulação, sendo necessário tirar as conclusões através de toda a informação que surge no *command center*.

Os perfis energéticos dos consumidores e produtores foram introduzidos sob a forma de *array*, compreendendo as diferentes horas do dia com os seus consumos ou produção de energia elétrica. O *array* seguinte corresponde ao consumo da habitação 11: [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 0.15 0.15 0.898 0.968 0.82025 0.818 0.5225].

Pode-se verificar que para o caso da habitação 11, cada índice do *array* foi denominado *slot*, sendo assim, pela visualização da figura, das 0h-1h (*slot* 1) a casa consome cerca de 0,35 kWh, das 1h-2h (*slot* 2) consome 0,15 kWh até ao último *slot* do

*array*, dispondo de 24 slots, um por cada hora o dia. Os produtores têm um *array*, variando obviamente os valores inseridos nos *slots*. O banco de baterias é identificado com um *array* de apenas 1 *slot* sendo este atualizado todas as horas.

Os valores dos perfis energéticos das habitações e produtores variam de acordo com a estação do ano que esteja a ser simulada e com a estratégia de produção que se pretenda simular. A Figura seguinte apresenta a fase inicial de carregamento dos dados dos agentes envolvidos, nomeadamente dos perfis energéticos dos produtores, consumidores e banco de baterias.

```

Command Center
PRODUÇÃO 4F + 1E
(producer 24): [30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30]
(producer 25): [1.5 1.423 1.74 1.423 1.865 1.653 1.9 2.08 6.141 10.871 14.658 17.309 19.022 19.309]
(battery 12): [48]
(house 0): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 1): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 2): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 3): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 4): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 5): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 6): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 7): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 8): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 9): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45 C
(house 10): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45
(house 11): [0.35 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.63225 0.6 0.15 0.15 0.35 0.35 0.6 0.75 0.75 0.45

```

**Figura 34:** Informação retirada do *command center* no início da simulação.

Alguns dos mecanismos implementados serão explicados através de pseudo-código nas figuras seguintes. Optou-se pela explicação usando pseudo-código de forma a simplificar a compreensão do leitor, pois a programação da linguagem Logo é bastante específica.

O mecanismo para realizar o envio de pedidos energéticos entre os agentes consumidores e os agentes representando as diversas opções energéticas disponíveis, isto é produtores e armazenadores é executado da seguinte forma:

```

ENVIO DE PEDIDOS ENERGÉTICOS
-----
WHILE (todos os agentes consumidores)
  ENVIAR PEDIDO ENERGÉTICO
  IF (GERADOR = DESLIGADO) [
    IF (RENOVAVEL >= PEDIDO ENERGÉTICO)
      [PEDIDO SATISFEITO
       ATUALIZAR PRODUÇÃO RENOVÁVEL]

    IF (BANCO DE BATERIAS >= PEDIDO ENERGÉTICO)
      [PEDIDO SATISFEITO
       ATUALIZAR PRODUÇÃO NÃO RENOVÁVEL]
    ]

  IF (GERADOR = LIGADO) [
    IF (GERADOR OF EMPRESA ELETRICA >= PEDIDO ENERGÉTICO)
      [PEDIDO SATISFEITO
       ATUALIZAR PRODUÇÃO GERADOR
       PROCEDER A TAXA BI-HORÁRIA OU TARIFA NORMAL]
    ]
  ]

  PRÓXIMO AGENTE
END WHILE

```

**Figura 35:** Algoritmo de envio de pedidos energéticos.

No pseudo-código da Figura 35 não está descrita a função que permite efetuar o cálculo da sobra de energia do banco de baterias e da produção renovável. É possível retirar por exemplo alguma energia do banco de baterias, caso este não consiga satisfazer por completo as necessidades do agente consumidor, e o resto que falta para satisfazer as suas necessidades vai retirar ao produtor renovável ou ao gerador *diesel*. Não havendo desperdício de energia, o gerador a *diesel* só é ativado caso estejam esgotadas as outras opções ou o sistema preveja o seu uso.

A Figura 36 ilustra o mecanismo de previsão de utilização do gerador a *diesel*.

```

PREVISÃO GERADOR
-----
WHILE (todos os agentes consumidores)
  REPORTAR PREVISÃO DE CONSUMO (HORA + 1)
  GUARDAR PREVISÃO DE CONSUMO

  PRÓXIMO AGENTE
END WHILE

SOMAR TODAS AS PREVISÕES DE CONSUMO (HORA + 1)

WHILE (todos os agentes produtores)
  REPORTAR PREVISÃO DE PRODUÇÃO (HORA + 1)
  GUARDAR PREVISÃO DE PRODUÇÃO

  PRÓXIMO AGENTE
END WHILE

SOMAR TODAS AS PREVISÕES DE PRODUÇÃO (HORA + 1)

IF (PREVISÃO DE CONSUMO > PREVISÃO DE PRODUÇÃO)
  [LIGAR GERADOR PARA A HORA + 1]

```

**Figura 36:** Algoritmo de previsão do gerador.

Todo o algoritmo trabalha em função das previsões de consumo e de produção, sendo que a ativação do gerador a *diesel* só é possível caso as outras fontes de energia não consigam satisfazer os futuros pedidos de energia. Aquando da ativação do gerador, a energia proveniente dele é a primeira a ser consumida, sendo que a energia proveniente das fontes renováveis e o excesso de energia proveniente do gerador irão carregar o banco de baterias.

```

CARREGAMENTO BANCO DE BATERIAS
-----
SET HORA X
WHILE (BANCO DE BATERIAS NÃO UTILIZADO PARA A HORA X)
  IF (GERADOR LIGADO) [
    IF(EXCESSO GERADOR) [
      CARREGAR BANCO DE BATERIAS
    ]
  ]
  IF (GERADOR DESLIGADO) [
    IF(EXCESSO PRODUÇÃO RENOVÁVEL and PEDIDOS ENERGÉTICOS SATISFEITOS)[
      CARREGAR BANCO DE BATERIAS
    ]
  ]
  -----
  IF (PERÍODO BI-HORÁRIO)[ CARREGAR BANCO DE BATERIAS
  ]
END WHILE

```

**Figura 37:** Algoritmo de carregamento do banco de baterias.

Se o banco de baterias não foi utilizado para a hora de simulação corrente, pode-se proceder ao carregamento do mesmo, para isso é necessário verificar se o gerador foi ativado, se sim verifica-se a energia que sobra proveniente do gerador e carrega-se o banco de baterias através dessa energia e das fontes renováveis caso estas tenham energia disponível. Quando se constata que o gerador está desativado verifica-se primeiro se as fontes de energia renovável conseguem satisfazer os pedidos, se conseguirem e se há excesso de energia proveniente destas procede-se ao carregamento do banco de baterias.

Para a simulação com recurso à empresa distribuidora de energia elétrica, em substituição do gerador a *diesel*, verifica-se primeiro se estamos em período bi-horário e se o banco de baterias não foi utilizado, e de seguida pode-se proceder ao carregamento destes agentes armazenadores. De notar que neste, é preferível carregar as baterias à noite aproveitando o custo mais reduzido da energia elétrica.

A previsão para o dia seguinte requer um algoritmo mais complexo, e está ilustrado na Figura 38.

```

PREVISÃO DIA SEGUINTE
-----
WHILE (todos os agentes consumidores)
    REPORTAR CONSUMO GERAL DO DIA
    GUARDAR CONSUMO GERAL DO DIA
    PRÓXIMO AGENTE
END WHILE

SOMAR CONSUMOS DIÁRIOS DE TODOS OS AGENTES CONSUMIDORES

WHILE (todos os agentes produtores)
    REPORTAR PRODUÇÃO GERAL DO DIA
    GUARDAR PRODUÇÃO GERAL DO DIA
    PRÓXIMO AGENTE
END WHILE

SOMAR PRODUÇÃO DIÁRIOS DE TODOS OS AGENTES PRODUTORES

CÁLCULOS MATEMÁTICOS:
    VERIFICAR QUANTAS VEZES É NECESSÁRIO ACTIVAR GERADOR
    VERIFICAR BANCO DE BATERIAS NO FINAL DO DIA
END

IF(BANCO DE BATERIAS FINAL DO DIA <= 35% DA SUA CAPACIDADE TOTAL)
    [ACTIVAR GERADOR NA HORA DE MAIOR CONSUMO]

RECALCULAR...|

```

**Figura 38:** Algoritmo previsão do dia seguinte.

Foi estipulado um valor percentual da capacidade de energia armazenada, neste caso de 40%, que o banco de baterias tem de possuir no fim de um determinado dia. No caso de atingir o final do dia com um valor inferior a 40% será necessário ativar o gerador algumas horas extra para repor a capacidade que falta nas baterias e para haver um equilíbrio geral entre todos os agentes do sistema. Sendo assim são executados cálculos matemáticos para se prever quando se usa o gerador. Este processo é recalculado várias vezes, sendo ativado o gerador nas maiores horas de consumo já inseridas no programa, assim serão feitas várias previsões até o algoritmo obter uma percentagem do banco de baterias satisfatória para se proceder à simulação.

No capítulo seguinte, o modelo computacional desenvolvido em NetLogo será simulado utilizando diversas estratégias de controlo e diferentes cenários.

## 5. Análise de Resultados

A solução colaborativa baseada em sistemas multiagentes, e as várias estratégias de controlo possíveis de implementar, foram testadas em ambiente de simulação utilizando o modelo computacional implementado em NetLogo.

De forma a ser possível comparar as estratégias de controlo e os mecanismos desenvolvidos, foram considerados dois cenários distintos. O primeiro cenário compreende a simulação de uma *micro-grid* auto-sustentada com recurso ao gerador a *diesel*, e o segundo cenário compreende a simulação de uma *micro-grid* auto-sustentada com ligação à rede elétrica convencional quando necessário.

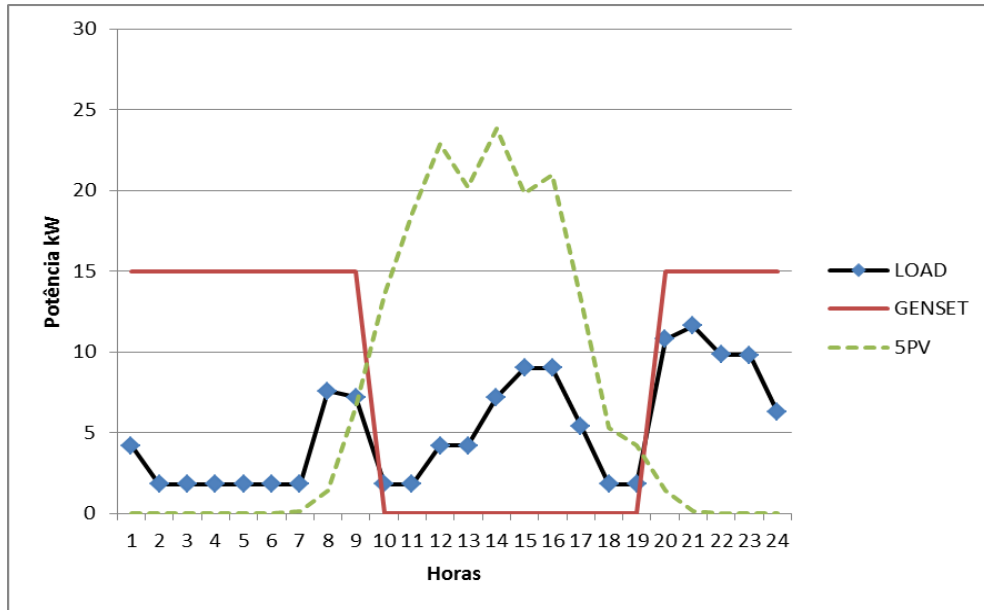
### 5.1 Simulação do cenário de auto-sustentação com gerador a *diesel*

Inicialmente foi considerada a *micro-grid* utilizando um gerador a *diesel* para complementar a energia produzida utilizando fontes de energias renováveis. Neste cenário foram utilizadas e comparadas diferentes estratégias de controlo e analisada a influência da utilização de baterias e o impacto da diversidade de recursos de produção.

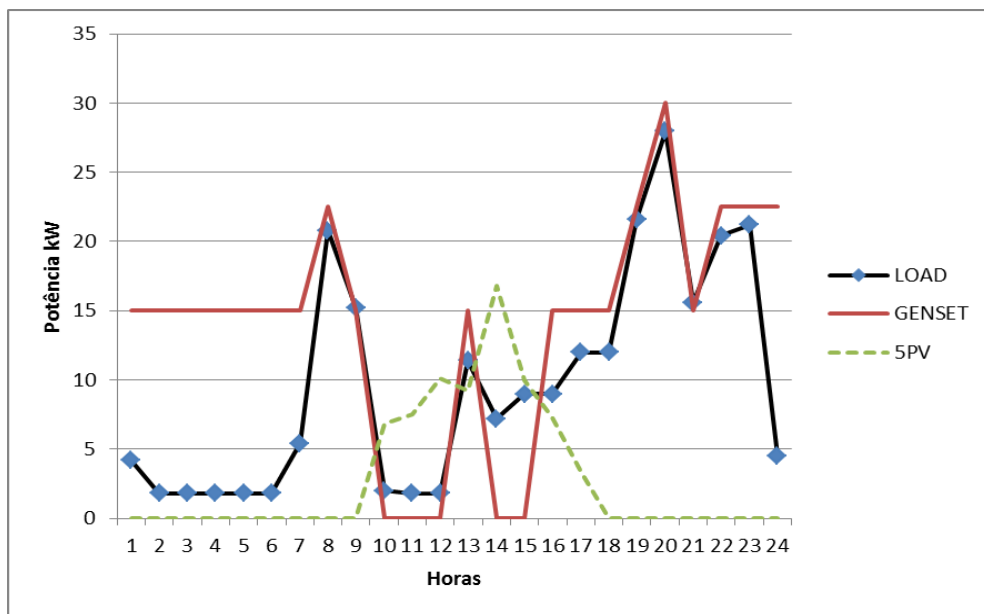
#### 5.1.1 Influência da utilização de baterias

Neste teste, o modelo computacional foi simulado inicialmente sem recurso ao banco de baterias, e mais tarde foi introduzido o banco de baterias para se perceber o impacto destes agentes na *micro-grid*. O gerador utilizado tem uma potência de 30 kW e pode trabalhar a 50%, 75% e 100% de carga.

O gráfico seguinte apresenta os resultados experimentais para o cenário sem recurso ao banco de baterias, demonstra o desenvolvimento da carga imposta pelas habitações ao longo do dia, apresenta a produção do primeiro método inserido composto pelas 5 unidades fotovoltaicas e a necessidade de se recorrer ao gerador a *diesel* de modo a cobrir todas as necessidades dos consumidores. De seguida será apresentado o gráfico para o período de inverno, com as mesmas considerações.



**Figura 39:** Resultados para cenário sem baterias, 5 unidades PV, verão.

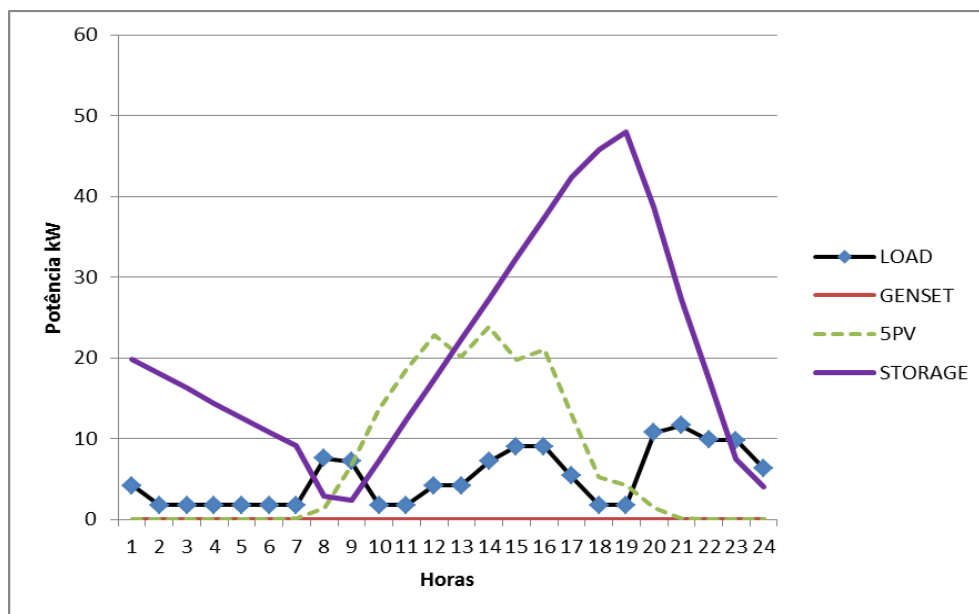


**Figura 40:** Resultados para cenário sem baterias, 5 unidades PV, inverno.

No gráfico da Figura 39 pode-se verificar uma enorme dependência do gerador *diesel* nos períodos de baixa radiação solar, nomeadamente durante o período da noite. Para esta configuração o gerador a *diesel* utilizado tem de trabalhar 14 horas por dia a 50% de carga, embora se verifique um desperdício considerável de energia proveniente do gerador. Consta-se também que a produção de energia proveniente das unidades fotovoltaicas, nesse período, excede consideravelmente a carga necessária para cobrir as necessidades, havendo o desaproveitamento dessa energia fotovoltaica.

O gráfico da Figura 40 apresenta a mesma configuração mas para o período de inverno. Verifica-se um aumento das horas de utilização do gerador a *diesel* como era de esperar, visto que as habitações têm maior consumo de energia durante o inverno. O número de horas de utilização do gerador *diesel* aumenta para 19 horas diárias, sendo que dessas 19, 13 horas o gerador funciona a 50%, 5 horas a 75% e 1 hora a 100% de carga. Como era expectável a produção fotovoltaica desceu consideravelmente devido á menor incidência de radiação solar durante o inverno, verifica-se também algum desaproveitamento de energia renovável a meio do dia.

Com a adição de baterias, nos gráficos seguintes será possível comparar as diferenças em relação aos gráficos anteriores. Das maiores diferenças destacam-se o número de horas de utilização do gerador a *diesel* para os diferentes métodos de produção, a potência a que este funciona e os resultados experimentais para os períodos de verão e inverno.

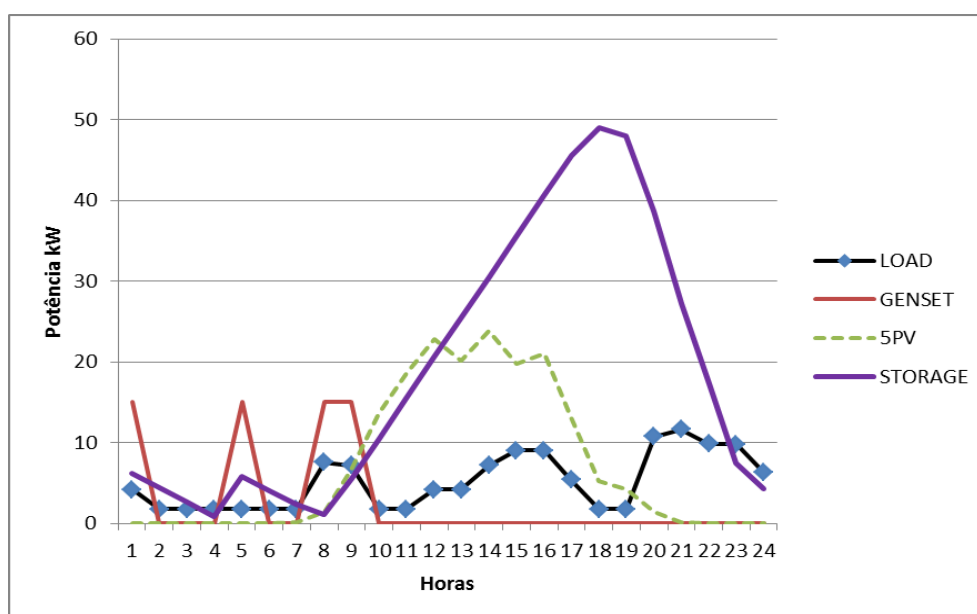


**Figura 41:** Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, verão.

Pela análise do gráfico da Figura 41 verifica-se que nunca é necessário utilizar o gerador a *diesel*, a produção renovável, juntamente com o banco de baterias conseguem satisfazer todas as necessidades dos consumidores. No final da simulação as baterias possuem menos de 10% da sua capacidade. Estes resultados verificam-se para o período de verão. Embora este resultado pareça um avanço atroz devido ao facto de nunca se utilizar o gerador *diesel*, esta solução apenas é viável para um dia, não se mantendo este

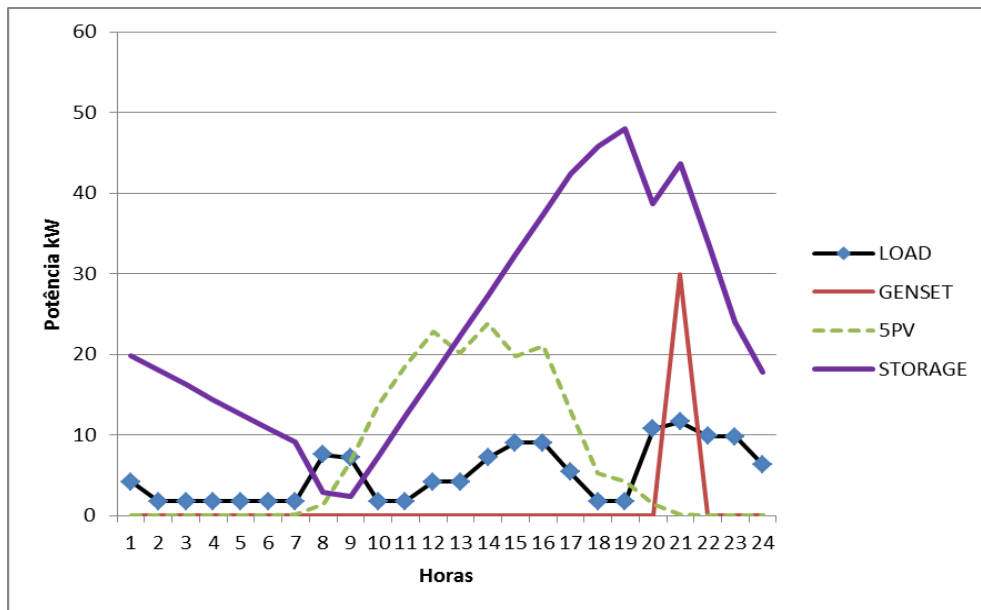
resultado para todos os dias do mês como será possível observar no gráfico seguinte que corresponde ao segundo dia de simulação.

O gráfico da Figura 42 corresponde ao dia seguinte do gráfico da Figura 41. Verifica-se no início da simulação que devido ao facto de as baterias terem terminado o dia anterior de simulação abaixo dos 10% da sua capacidade, o gerador *diesel* necessita de ser ativado 4 vezes a trabalhar a 50% de carga até haver excedente de energia renovável. Depois deste período de uso do gerador, o consumo é abastecido através da produção renovável e o banco de baterias carrega a sua capacidade através do excedente de energia renovável. A simulação decorre da mesma forma que no primeiro dia de simulação representado na Figura 41 e termina de igual modo, as baterias com uma capacidade inferior a 10% da sua capacidade.



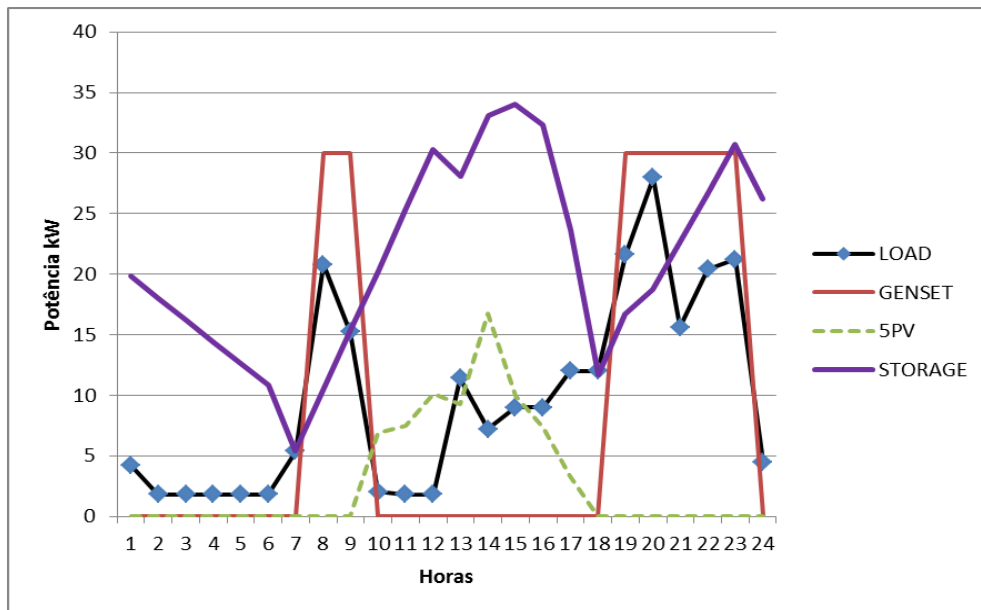
**Figura 42:** Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, verão, segundo dia.

Desta forma, é necessário criar um mecanismo ou método que vise não só um dia de simulação mas um período de simulações. Uma configuração inteligente do uso de baterias permitirá um uso mais equilibrado ao longo de todo o mês. O gráfico seguinte apresenta uma melhoria significativa como se constatará mais a frente.



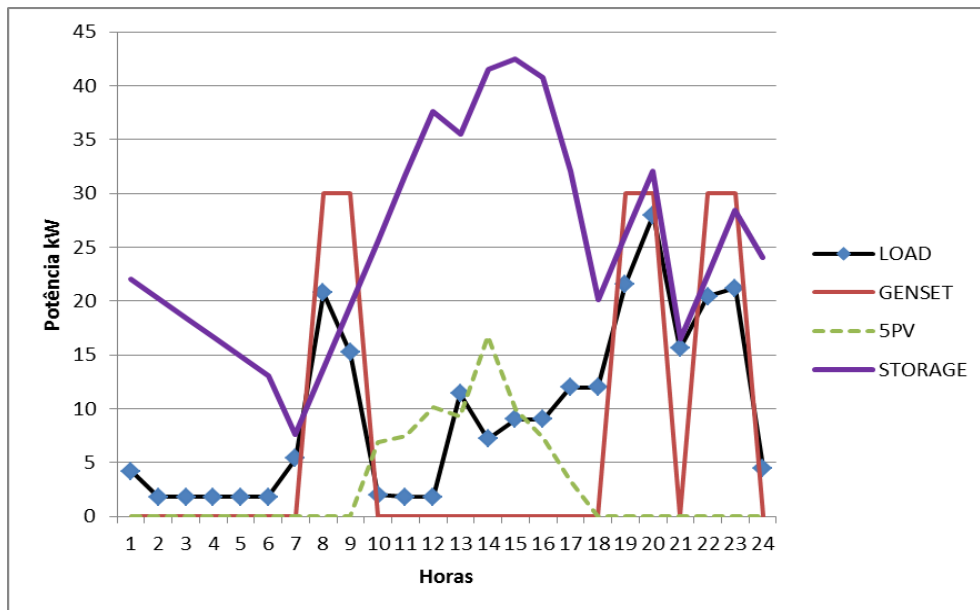
**Figura 43:** Resultados para o cenário com baterias “inteligentes”, 5 unidades PV, verão.

No gráfico da Figura 43 está apresentada uma configuração modificada do uso do banco de baterias. Nesta configuração verifica-se que o gerador a *diesel* funciona durante uma hora por dia a 100% de carga, mas o banco de baterias acaba o dia com 41% da sua capacidade total. Esta medida resulta dos métodos de previsão criados, os agentes estão a interagir inteligentemente, pensando no próximo dia, desta forma existe maior equilíbrio, não sendo necessário no dia seguinte a esta simulação ser colocado o gerador a *diesel* a funcionar durante 4 horas adicionais como iria acontecer para o caso da Figura 42. Os agentes colocaram o gerador *diesel* a funcionar na hora de maior consumo e verificaram se as baterias teriam energia suficiente (no mínimo 40% da sua capacidade) para começar o próximo dia de simulação. Se o método de previsão calculasse que as baterias terminariam a simulação abaixo dos 40%, os agentes do sistema adicionavam mais horas de uso do gerador, estas horas são definidas consoante os períodos de maior consumo das habitações. O segundo dia de simulação, ou seja, o dia que sucede a simulação do gráfico da Figura 43 apresenta resultados muito aproximados, pois o banco de baterias termina a simulação com a sua capacidade aproximada à capacidade com que começa o dia. Um controlo inteligente dos agentes pode não ser visível instantaneamente mas sim, ao longo do tempo como se verifica neste caso, o gráfico seguinte apresenta os testes experimentais da adição do banco de baterias mas para o período de inverno.



**Figura 44:** Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, inverno.

O gráfico da Figura 44 corresponde à mesma configuração de 5 unidades fotovoltaicas mas para o período de inverno. Sendo notável a diferença de horas em relação à mesma configuração sem o auxílio do banco de baterias. Para este cenário o gerador a *diesel* foi utilizado cerca de 7 horas diárias, a funcionar a 100% da carga. Neste gráfico está introduzido o controlo inteligente com a adição do método de previsão a pensar no dia seguinte, terminando as baterias o dia com 51% da sua capacidade total. Desta forma para o dia seguinte desta simulação será possível reduzir 1 hora o uso do gerador *diesel* como será possível verificar pelo gráfico da figura seguinte.



**Figura 45:** Resultados para o cenário com baterias, 5 unidades PV, verão, segundo dia.

O gráfico da Figura 45 apresenta os resultados da simulação para o segundo dia de simulação da Figura 44. Neste dia de simulação o gerador *diesel* necessita de ser ativado durante 6 horas por dia a 100% de carga. O banco de baterias termina o dia com uma capacidade de 49%, como tal para o terceiro dia de simulação e para os próximos dias de simulação os gráficos serão muito aproximados ao da Figura 45. Nesta configuração apenas o primeiro dia de simulação necessitará de 7 horas diárias de uso de gerador *diesel* e nos dias seguintes serão necessárias 6 horas de gerador *diesel*, assim sucessivamente até ao final do mês. Os agentes “concordaram” em ativar o gerador nos períodos de maiores consumos energéticos, desta forma, consegue-se equilibrar a energia armazenada para os próximos dias de simulação.

A tabela seguinte apresentará os valores a pagar individualmente para um mês de simulação de cada habitação. Os cálculos foram obtidos através das horas de consumo de combustível do gerador a *diesel*, o gerador a *diesel* consome cerca de 9,5 litros por hora a 100% de carga, 7,2 litros por hora a 75% de carga e 4,7 litros por hora a 50% de carga [16]. O preço do combustível foi taxado a 1,28€ por litro.

**Tabela 5:** Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com gerador *diesel*.

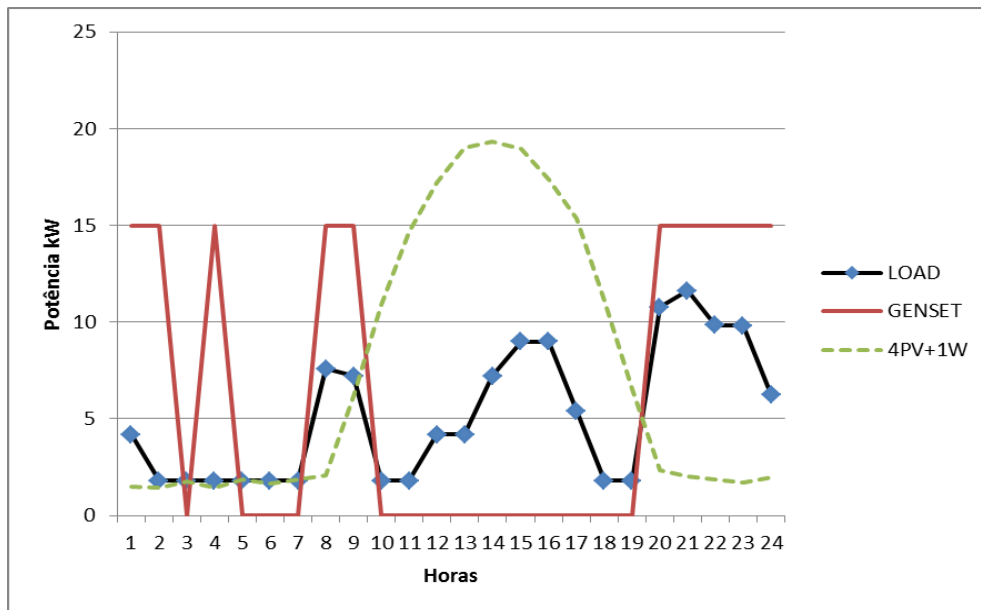
Cenário	Sem baterias	Com baterias	Com baterias (inteligente)
Verão	210,56€	58,16€	30,40€
Inverno	341,60€	-	170,24€

A tabela 5 apresenta o preço médio por mês gasto por cada habitação. Em média os preços do cenário sem baterias são muito elevados. Com a inclusão do banco de baterias verifica-se uma diferença bastante significativa quando comparada com o controlo sem baterias. A coluna correspondente ao controlo de baterias inteligente apresenta os resultados finais, que para o período de verão chega a ser 7 vezes menor em relação ao cenário sem a utilização do banco de baterias. Para o período de inverno não foram simulados testes sem um controlo inteligente e sem métodos de previsão, visto que apenas se verificam resultados mais eficazes com estes mecanismos. Segundo a experiência adquirida com a configuração feita para o período de verão foi possível concluir que não faz sentido utilizar o banco de baterias se este não for utilizado de uma forma mais eficiente, como tal, a simulação para o período de inverno com o auxílio do banco de baterias foi simulada com os mecanismos inteligentes e método de previsão.

### **5.1.2 Impacto da diversidade de recursos de produção**

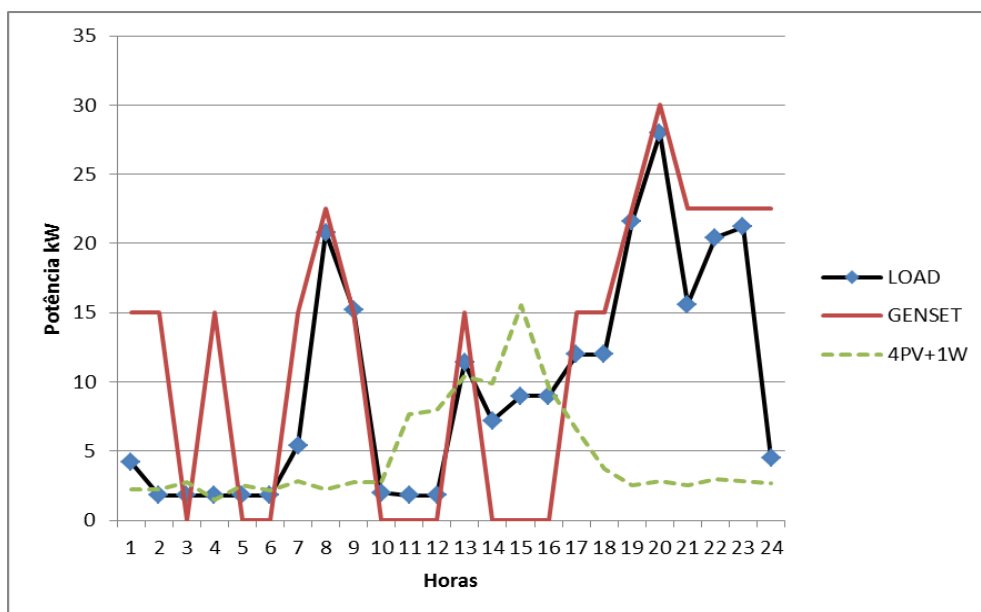
De forma a estudar o impacto da diversidade de recursos energéticos na gestão da sustentabilidade de uma *micro-grid*, foi comparado o caso de estudo com 5 unidades de produção fotovoltaicas com um segundo caso em que se consideravam 4 unidades de produção fotovoltaicas e 1 unidade eólica. Os gráficos seguintes correspondem aos períodos de verão e inverno.

O gráfico da Figura 46 apresenta uma abordagem de produção diferente com a inserção da unidade eólica, tentando expandir mais a área de produção renovável e torná-la mais independente da radiação solar, tornando este tipo de produção mais versátil e diversificada. Contudo verifica-se ainda uma dependência sólida do gerador *diesel* e um desperdício do conjunto de energias renováveis da *micro-grid*. Para esta configuração foi utilizado o gerador *diesel* a funcionar sempre a 50% da carga durante 10 horas de funcionamento diário. Verifica-se um desperdício de energia significativo proveniente do gerador *diesel*, sempre que este é ativado.



**Figura 46:** Resultado para o cenário sem baterias, verão, 4 PV + 1 W.

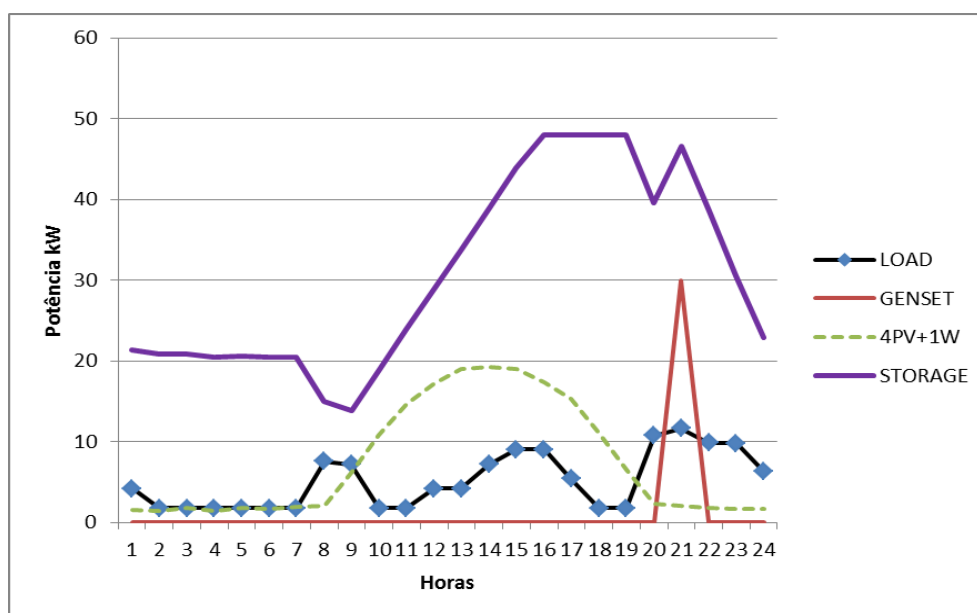
Para o período de inverno, como é visível pelo gráfico da Figura 47, a produção eólica consegue evitar o uso do gerador em algumas das primeiras horas da simulação, no entanto é necessário recorrer ao gerador *diesel* um total de 14 horas por dia.



**Figura 47:** Resultado para o cenário sem baterias, inverno, 4 PV + 1 W.

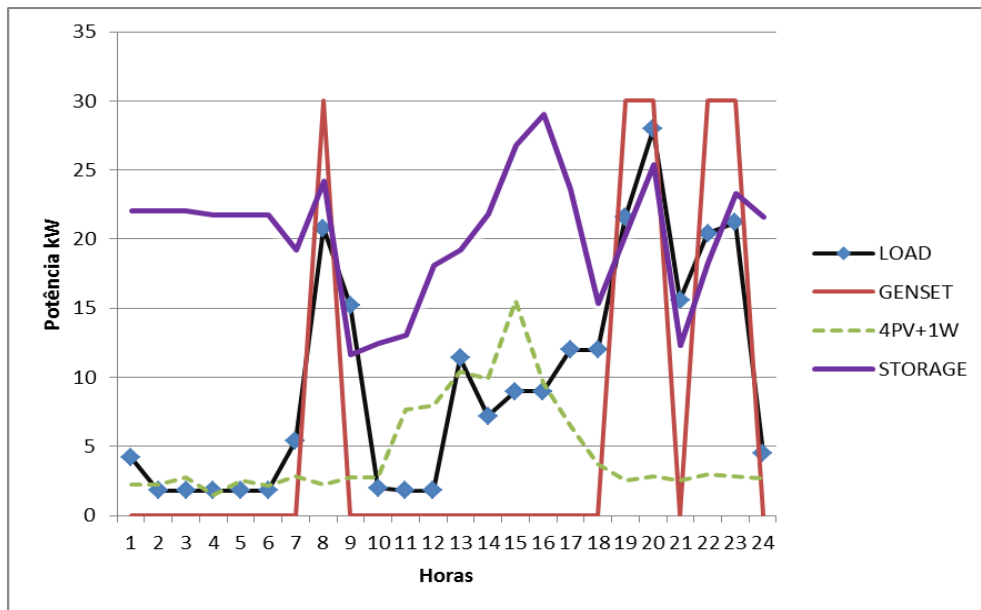
Devido ao facto de no período de inverno as habitações obterem consumos mais elevados é necessário, o gerador *diesel* a funcionar 8 horas a 50% da carga, 6 horas a 75% da carga e 1 hora a 100% da carga. Os testes a ambos os cenários e com os diversos modos de produção foram executados para 1 mês de simulação, sendo no fim calculada a

despesa que cada consumidor da *micro-grid* teria que pagar para ter as suas necessidades energéticas satisfeitas. O gráfico seguinte apresenta os resultados obtidos com a adição do banco de baterias.



**Figura 48:** Resultado para o cenário com baterias, verão, 4 PV + 1 W.

O gráfico da Figura 48 apresenta os resultados experimentais do cenário com a utilização de 4 unidades fotovoltaicas mais a unidade eólica com recurso ao banco de baterias para o período de verão. Pode-se visualizar a evolução do armazenamento das baterias ao longo do dia, de realçar que nas primeiras horas da simulação a produção eólica consegue colmatar quase por completo as necessidades energéticas dos consumidores. Para este cenário foi implementado o uso inteligente do banco de baterias, sendo assim é necessário recorrer ao gerador a *diesel* uma vez por dia para as baterias terminarem o dia acima de 40%. Neste caso obtêm-se resultados satisfatórios, acabando o banco de baterias perto dos 48% da sua capacidade. Caso não houvesse controlo inteligente do banco de baterias não seria necessário utilizar o gerador *diesel* nenhuma vez, mas iria acontecer o mesmo problema visto no subcapítulo anterior, possuindo o banco de baterias no final da simulação, para este caso, aproximadamente 15% da sua capacidade. Para a configuração de 4 unidades fotovoltaicas mais 1 eólica, no período de inverno também foi implementada a função de previsão do dia seguinte, obtendo-se os resultados apresentados no seguinte gráfico.



**Figura 49:** Resultado para o cenário com baterias, inverno, 4 PV + 1 W.

Para a mesma configuração mas durante o período de inverno, verifica-se a redução de 2 horas do uso do gerador a *diesel* em relação a mesma configuração utilizada mas para o método de produção sem o aerogerador. O aerogerador permite mais versatilidade nas estações de inverno por isso é possível preencher algumas lacunas energéticas durante o período da noite e evitar desta forma o uso do gerador a *diesel* por 2 horas, sendo para este caso utilizado cerca de 5 horas diárias. O gerador *diesel* para esta configuração sempre que ativado, funciona a 100% da carga. O banco de baterias termina a simulação com 47% de energia armazenada. A tabela seguinte apresenta os resultados experimentais para se visualizar o impacto da diversidade dos recursos de produção na simulação. Os consumos dos geradores *diesel* e o preço do combustível foram mantidos iguais, assim como o tempo de testes aplicados, simulações para 1 mês.

Na tabela 6 estão apresentados os valores que cada habitação teria que pagar para ter as suas necessidades energéticas satisfeitas por mês, nesta tabela pretende-se comparar os diferentes modos de produção, 5 unidades fotovoltaicas e 4 unidades fotovoltaicas mais 1 eólica.

**Tabela 6:** Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com gerador *diesel*.

Cenário	5 PV (sem baterias)	4 PV + 1 W (sem baterias)	5 PV (com baterias)	4 PV + 1 W (com baterias)
Verão	210,56€	150,40€	30,40€	30,40€
Inverno	341,60€	288,96€	170,24€	152€

De um modo geral, o modo de produção 4 unidades fotovoltaicas mais 1 unidade eólica permite uma redução do preço médio mensal. Aquando da adição do banco de baterias não se verifica nenhuma alteração do preço individual para o período de verão pois as habitações têm como seu auxílio a energia armazenada nestes dispositivos e portanto o preço não tem impacto como nos restantes cenários.

O capítulo seguinte apresenta os resultados da simulação da *micro-grid*, sem o recurso ao gerador *diesel* mas com ligação à rede elétrica.

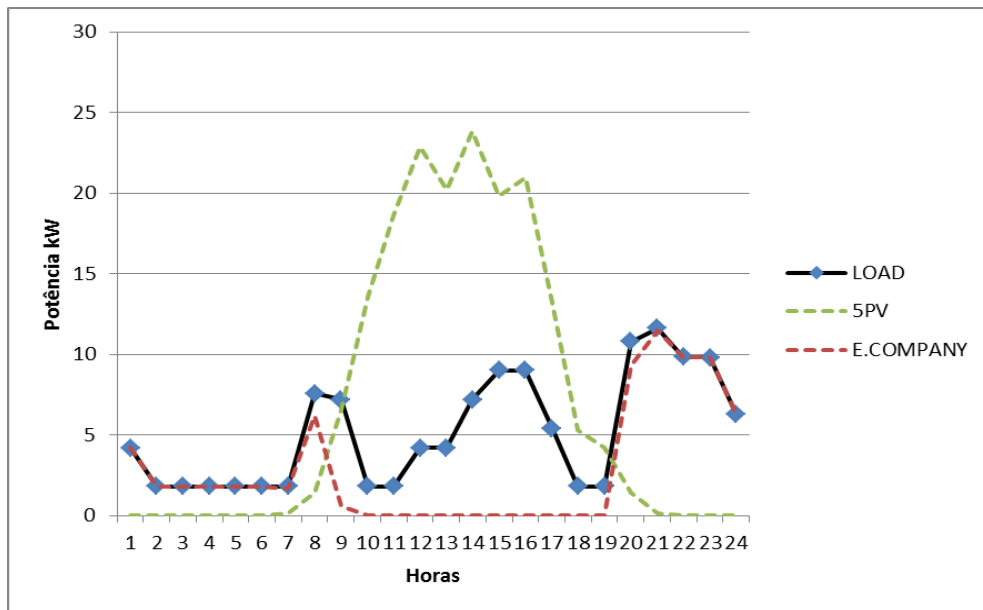
## **5.2 Simulação do cenário de auto-sustentação com ligação á rede**

Este cenário compreende a simulação de uma *micro-grid* auto-sustentada com ligação à rede elétrica convencional. Este cenário foi sujeito à mesma série de testes e simulações que o cenário anterior, nomeadamente com e sem baterias, inverno e verão, apenas unidades fotovoltaicas e sistema híbrido. Adicionalmente foram considerados alguns mecanismos de previsão de carregamento de baterias utilizando o modo bi-horário da rede convencional.

### **5.2.1 Influência da utilização de baterias**

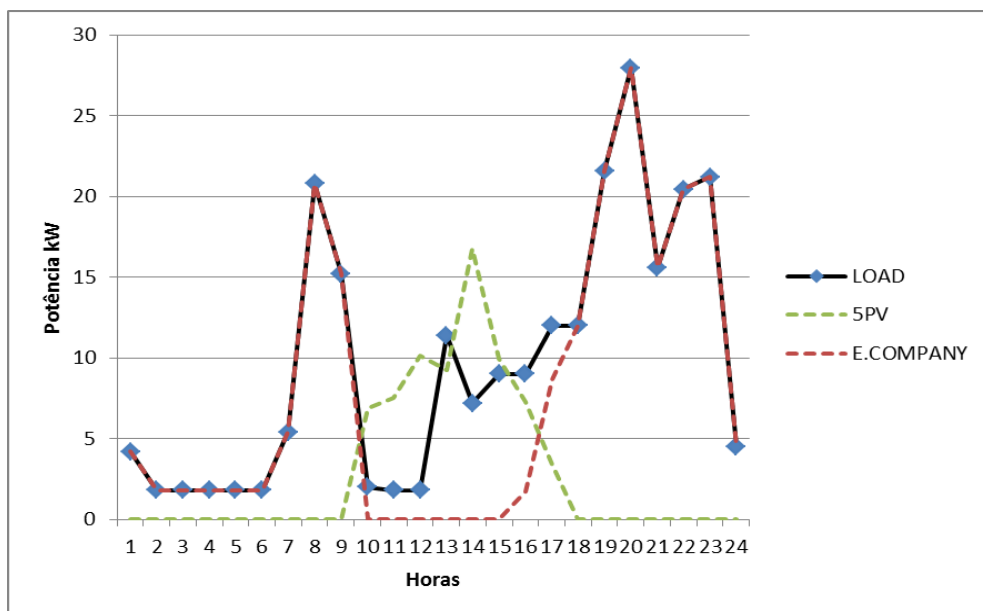
Nos gráficos seguintes já não será possível ver a entrada em uso do gerador a *diesel* pois este foi substituído pela empresa distribuidora de energia. Aquando da introdução do banco de baterias foram aplicados métodos inteligentes de carregamento, permitindo procederem ao carregamento durante o período da noite, privilegiando a tarifa bi-horária enquanto as habitações estarão elas também a usufruírem desta tarifa para satisfazerem as suas necessidades.

O gráfico da Figura 50 apresenta os resultados para a *micro-grid* sem recurso ao banco de baterias, período de verão e modo de produção 5 unidades fotovoltaicas. Verifica-se um grande desperdício de energia proveniente de fontes de energia renovável e visualiza-se também o recurso à empresa distribuidora de energia elétrica, principalmente nas horas de baixa produção de energia renovável.



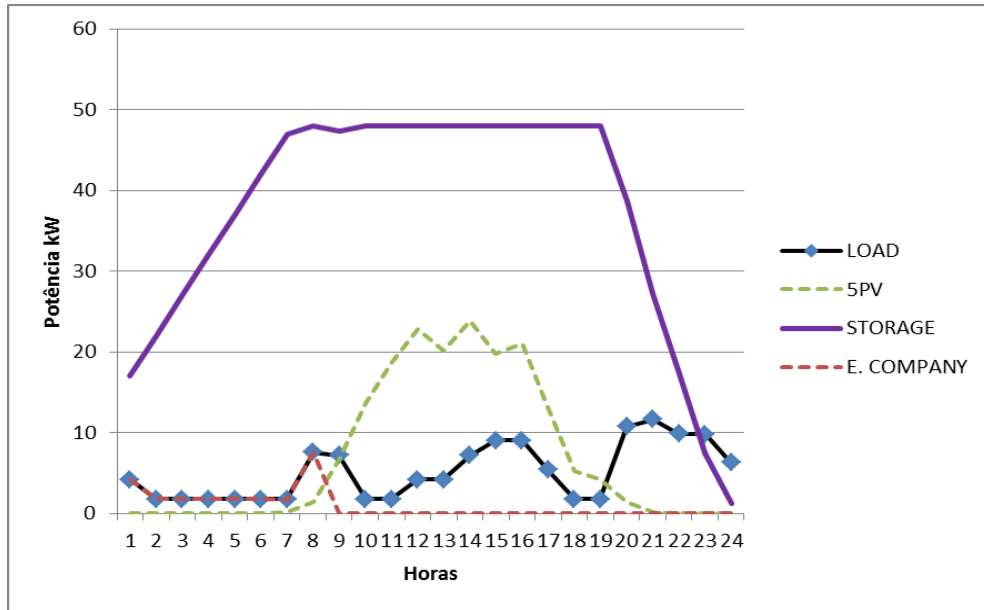
**Figura 50:** Resultados do cenário sem baterias, verão, 5 PV.

O gráfico da Figura 51 apresenta as mesmas características relativamente às entidades intervenientes que o gráfico da Figura 50 mas para o período de inverno, verifica-se menor produção de energia renovável devido ao período do ano que se está a simular e um constante recurso há empresa distribuidora de energia elétrica.

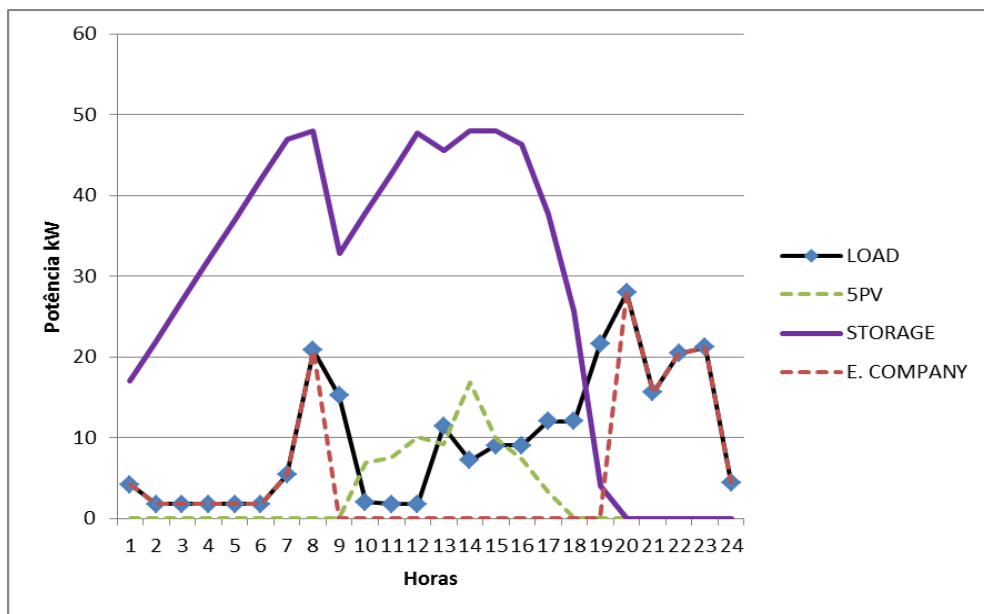


**Figura 51:** Resultados do cenário sem baterias, inverno, 5 PV.

Nos gráficos seguintes serão apresentados os resultados da introdução do banco de baterias apoiado com o sistema inteligente criado.



**Figura 52:** Resultados do cenário com baterias, verão, 5 PV.



**Figura 53:** Resultados do cenário com baterias, inverno, 5 PV.

Os gráficos das Figuras 52 e 53 apresentam os resultados experimentais da inserção do banco de baterias para o modo de produção 5 unidades fotovoltaicas nos períodos de verão e inverno respectivamente. Verifica-se em ambos os casos um aumento da capacidade do banco de baterias no período de bi-horário nas primeiras 8 horas do dia, neste período as habitações serão fornecidas de energia através da empresa distribuidora de energia elétrica. Depois do período bi-horário as habitações recorrem ao banco de baterias e às fontes de energia renovável para sustentar as suas necessidades. No final do dia,

para o período de inverno as habitações necessitam de recorrer à empresa distribuidora de energia elétrica, neste período já não usufruirão da tarifa bi-horária, tendo de pagar a tarifa normal. Para estes cenários os métodos de controlo das baterias focam apenas o seu carregamento durante o período bi-horário, enquanto estas carregam a sua capacidade, as habitações recorrem também elas à empresa distribuidora de energia elétrica.

A tabela seguinte apresenta os valores com os resultados obtidos para um mês de simulação, pretendendo-se comparar os valores dos preços com e sem o banco de baterias. Os preços taxados correspondem ao preço da energia elétrica cobrada pelas empresas distribuidoras em Portugal continental, tarifa normal 0,14€/kWh e tarifa bi-horária 0,08€/kWh.

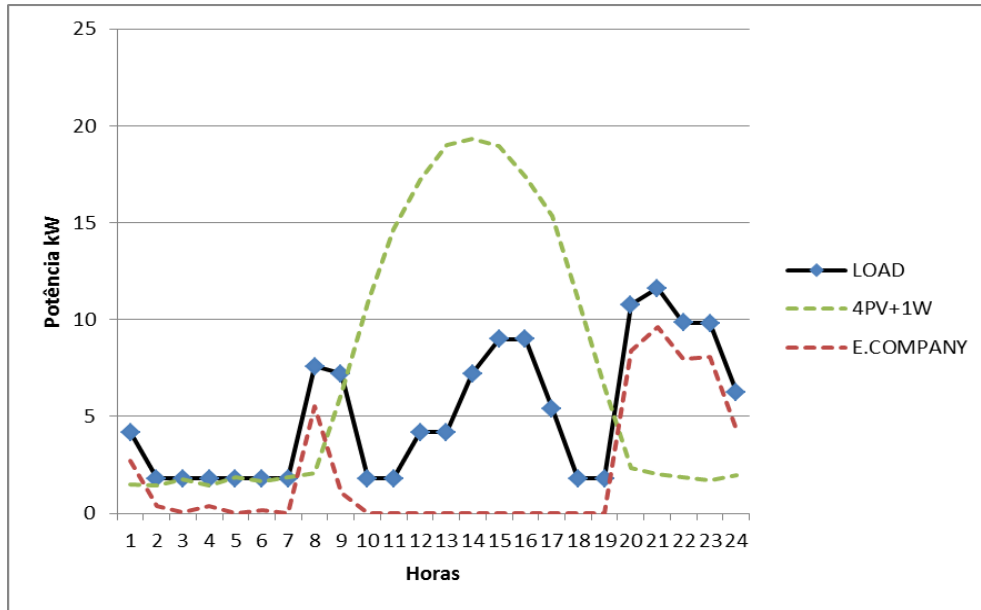
**Tabela 7:** Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com ligação à rede.

<b>Cenário</b>	<b>Sem baterias</b>	<b>Com baterias</b>
Verão	20,79€	12,49€
Inverno	59,94€	47,26€

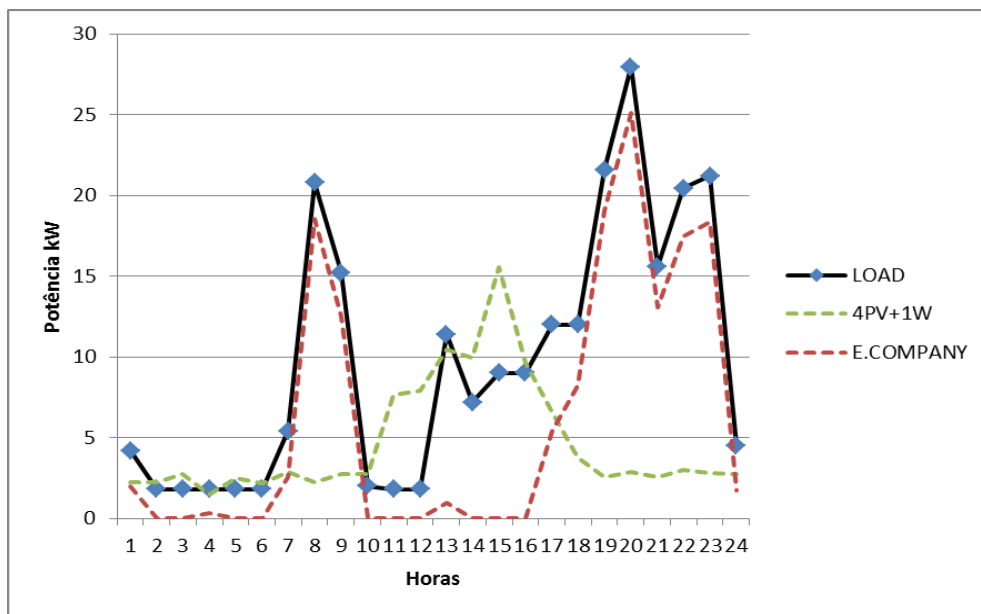
A tabela 7 apresenta o preço que cada habitação teria de pagar à empresa distribuidora de energia elétrica para obter as suas necessidades energéticas satisfeitas. Verifica-se em relação à *micro-grid* com recurso ao gerador *diesel* uma diferença muito grande quando estas são submetidas à simulação sem recurso ao banco de baterias. Esta simulação, com a adição do banco de baterias apresenta uma diferença de preços mais sugestiva, sendo que esta simulação está provida do mecanismo de controlo do banco de baterias inteligentes que privilegiam o período bi-horário.

### **5.2.2 Impacto da diversidade de recursos de produção**

Também para esta *micro-grid* com recurso à rede elétrica foi implementada outra forma alternativa de produção, foi comparado o caso de estudo com 5 unidades de produção fotovoltaicas com um segundo caso em que se consideravam 4 unidades de produção fotovoltaicas e 1 unidade eólica. Os gráficos seguintes correspondem aos períodos de verão e inverno.



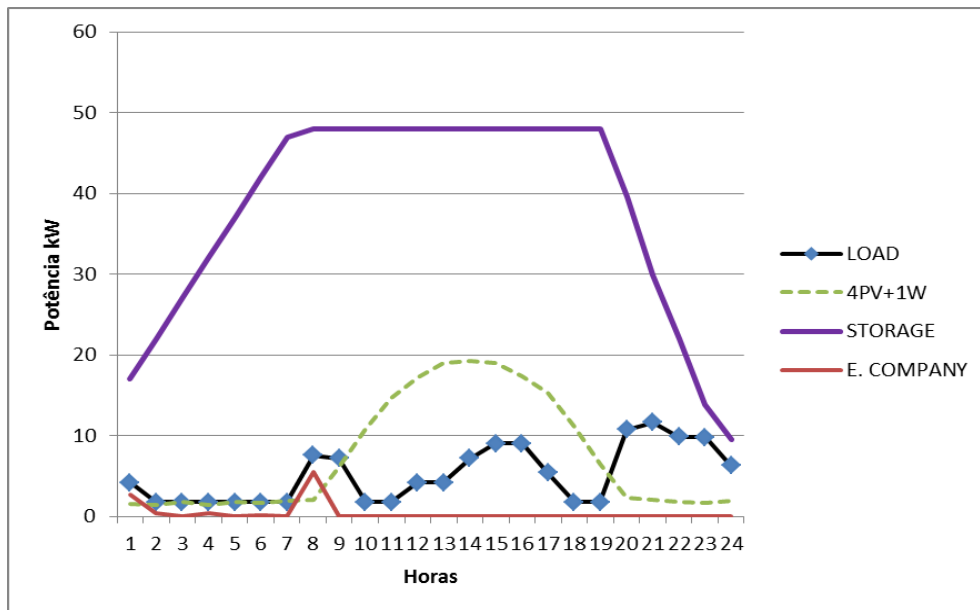
**Figura 54:** Resultados do cenário sem baterias, verão, 4 PV + 1 W.



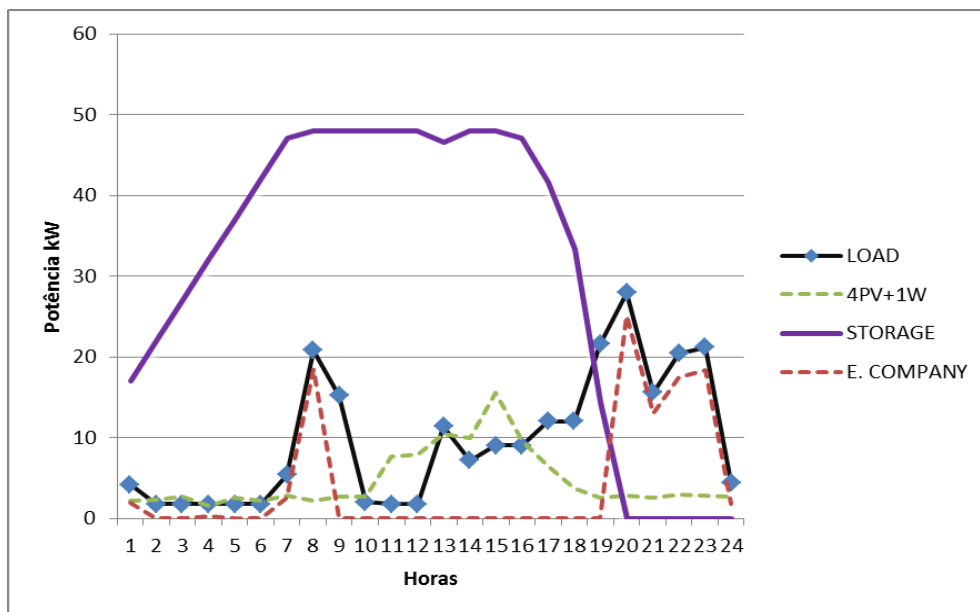
**Figura 55:** Resultados do cenário sem baterias, inverno, 4 PV + 1 W.

Os gráficos das Figuras 54 e 55 correspondem aos períodos de verão e inverno respectivamente para o modo de produção renovável de 4 unidades fotovoltaicas mais uma unidade eólica. Nestes gráficos evidencia-se principalmente uma redução ao recurso de energia proveniente da empresa distribuidora de energia elétrica face ao modo de produção de 5 unidades fotovoltaicas. Para o período de verão ocorre um desperdício significativo de energia renovável. Ambos os gráficos apresentam os resultados sem o

recurso ao banco de baterias. Os gráficos seguintes apresentam o modo de produção 4 unidades fotovoltaicas mais 1 unidade eólica com recurso ao banco de baterias.



**Figura 56:** Resultados do cenário com baterias, verão, 4 PV + 1 W.



**Figura 57:** Resultados do cenário com baterias, inverno, 4 PV + 1 W.

As Figuras 56 e 57 apresentam os resultados experimentais da *micro-grid* auxiliada pelo banco de baterias para a configuração de produção 4 unidades fotovoltaicas mais 1 unidade eólica para os períodos de verão e inverno respectivamente. Tal como na configuração de 5 unidades fotovoltaicas, verifica-se nas primeiras horas do dia um

carregamento contínuo do banco de baterias durante o período bi-horário, estando as habitações limitadas a produção proveniente do aerogerador e da empresa distribuidora de energia elétrica pois corresponde ao período da noite. As baterias, por sua vez carregam diretamente da empresa produtora de energia elétrica embora nos gráficos não apareça o desenvolvimento do consumo de energia das baterias, estas carregam através da empresa distribuidora de energia elétrica. Nos seguintes períodos verifica-se o uso do banco de baterias e o carregamento deste quando o existe excedente de energia renovável. Em todas as configurações simuladas, o banco de baterias consegue carregar a sua capacidade em média 84% durante o período bi-horário.

A tabela 8 apresenta os resultados experimentais dos preços cobrados pela empresa distribuidora de energia elétrica a cada habitação da *micro-grid* simulada, os quais incluem o preço de carregamento do banco de baterias. Os preços taxados pela empresa distribuidora de energia elétrica foram taxados de 0,14€ por kWh e 0,08€ por kWh para a tarifa normal e tarifa bi-horária respectivamente.

**Tabela 8:** Tabela com os resultados do cenário auto-sustentação com ligação á rede.

<b>Cenário</b>	<b>5 PV (sem baterias)</b>	<b>4 PV + 1 W (sem baterias)</b>	<b>5 PV (com baterias)</b>	<b>4 PV + 1 W (com baterias)</b>
Verão	20,79€	15,65€	12,49€	9,83€
Inverno	59,94€	47,33€	47,26€	39,18€

Pode-se constatar que, tal como sem baterias o preço mais atrativo corresponde ao modo de produção renovável de 4 unidades fotovoltaicas mais 1 unidade eólica. Conclui-se também que, em todos os casos, os preços individuais que cada habitação teria de pagar são bastante inferiores em relação á simulação sem o auxílio do banco de baterias. O período de verão apresenta como era de esperar preços muito inferiores em relação ao período de inverno devido ao aumento dos consumos das habitações.

### 5.3 Análise comparativa

A tabela seguinte resume os resultados obtidos nos diferentes cenários, sendo que o *Cenário 1* corresponde ao cenário de auto-sustentação com auxílio do gerador a *diesel* e o *Cenário 2* corresponde ao cenário de auto-sustentação com ligação á rede elétrica. O parâmetro *Preço* é apresentado individualmente por habitação no final do mês. O parâmetro *Horas* corresponde ao número de horas do uso do gerador *diesel* por mês para

o cenário 1 e para o cenário 2 apresenta o número de horas que se recorre á rede elétrica por mês. O parâmetro *Baterias (%)* corresponde á percentagem de energia armazenada que as baterias acabam em média um dia de simulação.

**Tabela 9:** Tabela com os resultados experimentais dos cenários testados.

Resultados experimentais			Verão			Inverno		
			Preço	Horas	Baterias(%)	Preço	Horas	Baterias(%)
Cenário 1	5PV	Sem Baterias	210,56€	420h	-	341,12€	570h	-
		Com Baterias	30,40€	30h	41%	170,24€	187h	49%
	4PV + 1W	Sem Baterias	150,40€	300h	-	288,96€	450h	-
		Com Baterias	30,40€	30h	48%	152€	156h	47%
Cenário 2	5PV	Sem Baterias	20,79€	420h	-	59,94€	540h	-
		Com Baterias	12,49€	240h	2,56%	47,26€	390h	0%
	4PV + 1W	Sem Baterias	15,65€	360h	-	47,33€	420h	-
		Com Baterias	9,83€	240h	19%	39,18€	390h	0%

Segundo a tabela conclui-se que em ambos os cenários, o recurso ao banco de baterias é a melhor opção para uma *micro-grid* auto-sustentada com recurso a um gerador a *diesel* ou com ligação á rede elétrica. Foram obtidos melhores resultados quando foi utilizado um controlo inteligente do banco de baterias com recurso aos mecanismos de previsão, como tal na tabela apenas são apresentados os resultados dos resultados com métodos e mecanismos inteligentes. O modo de produção híbrido também revelou melhores resultados, permitiu maior versatilidade e diversidade de produção renovável principalmente durante o período de inverno.

No cenário 2, foram contabilizadas as horas de recurso á rede elétrica para carregar o banco de baterias e o preço cobrado por esta energia foi somado aos preços individuais mensais para cada habitação. Ainda para o cenário 2, em todas as configurações o banco de baterias carrega a sua capacidade em média 84% por dia graças ao período bi-horário.

Através dos resultados experimentais pode-se concluir que o cenário com recurso ao gerador *diesel* apenas é viável para casos em que não existam outras alternativas de

produção, como zonas de difícil acessibilidade. O gerador *diesel* apenas poderá ser utilizado como alternativa de produção e não a principal fonte de produção da *micro-grid*. Para evitar esta situação devem ser implementadas mais tecnologias de produção (eólica, fotovoltaica, hídrica, biomassa) e aumentar a capacidade de armazenamento de energia. Deve-se optar por uma *micro-grid* com ligação á rede elétrica sempre que seja possível. A construção de uma via de transmissão de energia elétrica carece de elevado investimento inicial, por isso deve ser feita uma análise do mercado e um estudo do período de amortização detalhado para se proceder á ligação da *micro-grid* á rede elétrica. Neste estudo foi perceptível que os encargos individuais de cada consumidor para uma *micro-grid* auto-sustentada com recurso á rede elétrica são muito inferiores comparados com uma perspectiva de auto-sustentação com auxílio a um gerador *diesel*.

Para alguns cenários poder-se-ia proceder á diminuição da potência do gerador *diesel*, visto que em alguns períodos das simulações ocorre um elevado desperdício de energia proveniente deste recurso. Como tal foram efetuados testes ao cenário de auto-sustentação com recurso ao gerador a *diesel* com um gerador de 20 kW de potência e foram recolhidos alguns dados. No cenário de auto-sustentação com recurso ao gerador é possível recorrer á redução de gerador para os períodos de verão com e sem recurso ao banco de baterias e para ambas as configurações (5PV e 4PV + 1W). Para o período de inverno apenas é possível recorrer a um gerador *diesel* de 20 kW se a *micro-grid* possuir o banco de baterias. Durante o período de inverno as habitações têm consumos muito elevados e só seria possível recorrer a um gerador *diesel* de potência inferior caso houvesse um acrescento de tecnologias de produção, (por exemplo: fotovoltaica, eólica ou outras) adicionadas ás já existentes na *micro-grid*.

Com recurso ao gerador a *diesel* de 20 kW e com o auxílio do banco de baterias é possível diminuir os encargos monetários das habitações no final do mês para quase todos os cenários menos para o cenário da configuração de 5 unidades fotovoltaicas. A tabela seguinte apresenta os resultados comparativos dos preços a pagar por cada habitação relativamente ao uso do gerador de 20 kW no final de um mês de simulação. O gerador utilizado possui uma potência de 20 kW e 3 modos de funcionamento, a 50% de carga consome 3,5 litros de combustível por hora, a 75% de carga consome 4,8 litros por hora e a 100% de carga consome 6,2 litros de combustível por hora. [16]

**Tabela 10:** Resultados comparativos do uso de gerador.

<b>Cenário sem recurso ao banco de baterias</b>		<b>30 kW</b>	<b>20 kW</b>
Verão	5PV	210,56€	165,12€
	4PV + 1W	150,40€	112,00€
Inverno	5PV	341,12€	-
	4PV + 1W	288,96€	-
<b>Cenário com recurso ao banco de baterias</b>		<b>30 kW</b>	<b>20 kW</b>
Verão	5PV	30,40€	19,84€
	4PV + 1W	30,40€	19,84€
Inverno	5PV	170,24€	178,56€
	4PV + 1W	152,00€	119,04€

Sem recurso ao banco de baterias apenas é possível simular o cenário para o período de verão com as duas opções energéticas criadas. Obtiveram-se melhores resultados com o gerador de 20 kW devido ao menor consumo deste. Nestes cenários já não ocorre tanto desperdício de energia como acontecia para o cenário do gerador de 30 kW.

Verifica-se que para o cenário com recurso ao banco de baterias, período de inverno, e configuração de 5 unidades fotovoltaicas que o preço não é favorável, sofre um pequeno acréscimo. Para este cenário é necessário recorrer a mais horas de funcionamento do gerador *diesel*, devido á menor potência deste gerador. Nesta situação há menos desperdício de energia e assim o banco de baterias muitas vezes carrega a sua capacidade apenas do excedente de energia renovável. O preço ao final do mês de simulação com o gerador de 20 kW sofre um acréscimo de 8,32€ para cada habitação, em relação ao cenário em que se utiliza o gerador a *diesel* de 30 kW.

Para os restantes cenários verifica-se um melhoramento considerável dos preços. Desta forma aquando da projeção do plano de produção de qualquer *micro-grid* auto-sustentada deve ser feito um estudo das alternativas existentes e disponíveis no mercado. Para a *micro-grid* simulada, considerando que esta possui um banco de baterias e sistema de produção híbrido era mais vantajoso recorrer ao gerador *diesel* de 20 kW. O preço de mercado do gerador *diesel* de 20 kW é 8.064€ [35] e o do gerador *diesel* de 30 kW é 13.023€ [35], uma diferença significativa de 4.959€ tem um peso acentuado na escolha do gerador e para além disso os consumos do gerador de 20 kW apresentam resultados muito mais baixos. O dinheiro que se poupa no investimento de um gerador de menor potência poderia ser utilizado no investimento de por exemplo um aerogerador ou de outro tipo de tecnologia de produção, de modo a ser possível utilizar o gerador *diesel* de 20 kW em todos os cenários estudados nesta *micro-grid*.

De acordo com as características iniciais da *micro-grid* de estudo, para ser possível simular todos os restantes cenários com o gerador *diesel* de 20 kW seria necessário aumentar o número de tecnologias de produção ou aumentar a capacidade instalada de alguns recursos energéticos. Esta alteração também teria de se verificar na capacidade de energia armazenada, através da expansão do banco de baterias.

## Conclusões

O trabalho desenvolvido neste projeto teve como objetivo compreender o conceito e a estrutura das *smart grids* e *micro-grids*, e analisar o comportamento de uma solução baseada em agentes para a gestão colaborativa de *micro-grids* auto-sustentadas, que permita flexibilizar e otimizar o fluxo de energia e aumentar a sustentabilidade da *micro-grid*.

Para o efeito, e após a introdução dos conceitos, recursos e tecnologias associados às *smart grids* e *micro-grids*, foi apresentada a arquitetura do sistema baseado em agentes para a gestão colaborativa numa *micro-grid* auto-sustentada, baseada em três tipos de agentes (consumidores, produtores e armazenadores), que interagem para atingir os objetivos globais do sistema.

A abordagem proposta foi aplicada ao caso de estudo da ilha de Khytnos na Grécia, tendo o modelo computacional sido desenvolvido e implementado na plataforma de simulação de agentes NetLogo. Durante o desenvolvimento deste projeto implementaram-se dois cenários experimentais de controlo para simular o fluxo de energia elétrica entre os diversos agentes da *micro-grid* de modo a obter uma harmonia energética global. Estes dois cenários foram sujeitos a diversas simulações e testes que comprovaram que mecanismos baseados em agentes podem obter bons resultados em relação a métodos ótimos e fixos.

A inserção de variados tipos de produção renovável e agentes de armazenamento veio permitir uma maior diversidade, versatilidade e capacidade de resposta face às exigências energéticas impostas pelo mercado energético. De fato, os sistemas multiagente permitem uma maior heterogeneidade do sistema e uma maior simplicidade na inserção/remoção/modificação de outros agentes no sistema, por exemplo estender a *micro-grid* com um gerador hídrico ou produção biomassa, ou adicionar mais habitações. Adicionalmente, a capacidade de adaptação e previsão que os agentes individuais fornecem, permite atingir sistemas flexíveis, adaptativos e reativos.

Através da análise dos resultados obtidos pode-se concluir que uma *micro-grid* auto-sustentada através da rede elétrica permite encargos inferiores para os seus utilizadores em relação a uma *micro-grid* auto-sustentada através de um gerador *diesel*. Uma *micro-grid* necessita de um sistema de armazenamento de energia elétrica como um banco de

baterias. Estes dispositivos permitem evitar o constante recurso a tecnologias de produção poluentes e a colmatar as lacunas energéticas que as fontes de produção renovável não consigam sustentar. Um sistema híbrido de produção de energia permite melhor versatilidade e flexibilidade do ponto de vista de produção e sendo assim melhores vantagens para os consumidores. Vários testes permitiram concluir que para alguns cenários seria possível reduzir a potência do gerador *diesel* de modo a obter menores encargos para os consumidores.

Como trabalho futuro, algumas características técnicas poderão ser introduzidas aos agentes armazenadores de energia, como por exemplo aperfeiçoar os tempos de carregamento que estão dependentes da forma de uso das baterias, número de ciclos de uma bateria, perdas associadas ao armazenamento das mesmas. Pormenores técnicos de conversores de tensão, reguladores de carga eólicos e fotovoltaicos e outros aspetos que aproximem a simulação da realidade podem ser introduzidos no modelo de simulação criado.

Outro ponto a ser considerado no futuro é a consideração de mecanismos mais complexos de negociação de preços na compra/venda de energia, que permitirão aumentar a competitividade dos produtores. Estes mecanismos podem ser baseados em leilões de energia, em que os agentes produtores e os agentes consumidores interagem diretamente.

Por fim, seria interessante desenvolver mecanismos de gestão colaborativa entre diversas *micro-grids* auto-sustentadas, replicando os mecanismos desenvolvidos para um nível conceptual mais elevado.

## Referências

- [1] A policy framework for the 21st century grid: a progress report, Fevereiro 2013.
- [2] Kythnos smart grid, disponível URL em:  
[http://www.nieuwenuts.nl/actueel/kythnos\\_micro\\_grid.html](http://www.nieuwenuts.nl/actueel/kythnos_micro_grid.html). Acedido ao longo do ano de 2013.
- [3] Giovanna di Marzo Serugendo Marie-Pierre Gleizes and Anthony Karageorgos. Self-organization in multi-agent systems. In *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 20:2, 165 – 189 Cambridge University Press. 2005.
- [4] J. Barbosa, P. Leitão. Enhancing Service-oriented Holonic Multi-agent Systems with Self-organization. In *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*. May 25 - 27, 2011.
- [5] Netlogo, disponível em URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Acedido ao longo do ano 2013.
- [6] Paulo Leitão, Pavel Vrba, Thomas Strasser. Multi-Agent Systems as Automation Platform for Intelligent Energy Systems.
- [7] Nuno Silva. Smart grids e veículos elétricos – experiências em Portugal.
- [8] Solar Stand-Alone Power and Backup Power Supply. [www.sma.de](http://www.sma.de). Sonnenallee 134266 Niestetal, Germany.
- [9] Paulo Jorge Soares Ribeiro. Otimização de Estratégias de Operação de Sistemas Híbridos. Repositório aberto FEUP. Julho de 2009.
- [10] Susana Filipa Almeida Castro Viana. Modelação de Micro-Sistemas Híbridos/Fotovoltaicos/Eólicos para Produção descentralizada. Repositório LNEG. Junho de 2010.
- [11] J. Barbosa. Use of Bio-inspired Techniques to Solve Complex Engineering Problems: Industrial Automation Case Study. Tese de Mestrado, IPB, Setembro, 2010.
- [12] João C. Ferreira, Alberto Rodrigues da Silva, João L. Afonso. Agent Based Approaches for Smart Charging Strategy for Electric Vehicles. February, 24, 2011.

- [13] Thomas D. Voice and Perukrishnen Vytelingum and Sarvapali D. Ramchurn Alex Rogers and Nicholas R. Jennings. Decentralised Control of Micro-Storage in the Smart Grid. School of Electronics and Computer Science University of Southampton.
- [14] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman. Multi-Agent Systems in a Distributed Smart Grid: Design and Implementation.
- [15] Paricio García, Alvaro. Oliver, Juan, Gosch, David. An Intelligent Agent-Based Distributed Architecture for Smart-Grid Integrated Network Management.
- [16] Indradip Mitra, Thomas Degner and Martin Braun. Distributed Generation and Microgrids for Small Island Electrification in Developing Countries: A Review.
- [17] Zhong Fan, Georgios Kalogridis, Costas Efthymiou, Mahesh Sooriyabandara, Mutsumu Serizawa, and Joe McGeehan. The New Frontier of Communications Research: Smart Grid and Smart Metering.
- [18] Arnaldo Pereira, Nelson Rodrigues, Paulo Leitão. Deployment of Multi-agent Systems for Industrial Applications.
- [19] The InovGrid Project, Distribution Network Evolution as a Decisive Answer to the Distribution Network Evolution as a Decisive Answer to the New Challenges in the Electrical Sector. Brussels, September 25th 2009.
- [20] Smart Grids: from innovation to deployment COM(2011)202 of 12 April 2011.
- [21] Hugh Outhred. The smart grid: getting the incentives right, University of New South Wales National Smart Grids Summit, Sydney 10-11/9/08.
- [22] Miguel João Lopes Veloso Ribeiro da Silva. Smart Grids em Portugal Plano de Negócio para Serviço de Planeamento e Gestão Remota de Consumos Eléctricos, Julho de 2011.
- [23] Fangxing (Fran) Li, Wei Qiao, Hongbin Sun, Hui Wan, Jianhui Wang, Yan Xia, Zhao Xu, and Pei Zhang. Smart Transmission Grid: Vision and Framework.
- [24] Ian Mauro Concha Chia, Vitor Teles Correia. Interface de gestão ativa de consumo de energia eléctrica para smart-grids. Curitiba – BR, 2011.

- [25] Saraansh Dave, Mahesh Sooriyabandara, Mike Yearworthy. A Systems Approach to the Smart Grid.
- [26] Bora Akyol, Jereme Haack, Cody Tews, Brandon Carpenter, Anand Kulkarni, Philip Craig. An intelligent sensor framework for the power grid.
- [27] Iva Bojic, Tomislav Lipic and Vedran Podobnik. Bio-inspired Clustering and Data Diffusion in Machine Social Networks.
- [28] Pedro Pereira Rodrigues. João Gama. Distributed Clustering in Smart Grids.
- [29] Hugo Gabriel Valente Morais. Gestão de Recursos Energéticos nas SmartGrids. Outubro de 2010.
- [30] Matthew J. Berryman. Simon D. Angus. Tutorials on agent-based modelling with NetLogo and network analysis with Pajek. 2010.
- [31] Rui Duan, Geert Deconinck. Future Electricity Market Interoperability of a Multi-agent Model of the Smart Grid.
- [32] *Smartest Smart Grid in the World* pode ser acedido no website:  
<http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/the-smartest-greenest-grid>
- [33] Janez Potočnik, Comissário Europeu para a Ciência e Investigação, in *European Commission's Communication on "Smart Grids: from Innovation to Deployment"*
- [34] EcoGrid EU, A Prototype for European Smart Grids, Guide to the large-scale project. [www.eu-ecogrid.net](http://www.eu-ecogrid.net).
- [35] URL: <http://www.plurienergia.pt/pt/component/content/article/193-oferta-microgeracao-plurienergia-maior-5-kw-.html>. Acedido em Junho de 2013.
- [36] URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361511000650>. Acedido em Julho de 2013.