



REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS E APLICAÇÕES PARA A GESTÃO DO LADO DA PROCURA

Rita Marcos Fontes Murta Pereira

Tese apresentada à Universidade de Évora
para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecatrónica e Energia
Especialidade: Mecatrónica

ORIENTADORES: *Professor Doutor João Manuel Gouveia Figueiredo,*
Professor Doutor José Carlos Lourenço Quadrado,
Professor Doutor Mário Rui Melício da Conceição,
Professor Doutor João Francisco Alves Martins

ÉVORA, JULHO DE 2015





REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS E APLICAÇÕES PARA A GESTÃO DO LADO DA PROCURA

Rita Marcos Fontes Murta Pereira

Tese apresentada à Universidade de Évora
para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecatrónica e Energia
Especialidade: Mecatrónica

ORIENTADORES: *Professor Doutor João Manuel Gouveia Figueiredo,*
Professor Doutor José Carlos Lourenço Quadrado,
Professor Doutor Mário Rui Melício da Conceição,
Professor Doutor João Francisco Alves Martins

ÉVORA, JULHO DE 2015

'Existem três classes de pessoas que são infelizes: a que não sabe e não pergunta, a que sabe e não ensina e a que ensina e não faz'

Siddhartha

À Inês

Resumo

Esta tese incide sobre o desenvolvimento de modelos computacionais e de aplicações para a gestão do lado da procura, no âmbito das redes elétricas inteligentes. É estudado o desempenho dos intervenientes da rede elétrica inteligente, sendo apresentado um modelo do produtor-consumidor doméstico. O problema de despacho económico considerando previsão de produção e consumo de energia obtidos a partir de redes neuronais artificiais é apresentado. São estudados os modelos existentes no âmbito dos programas de resposta à procura e é desenvolvida uma ferramenta computacional baseada no algoritmo de fuzzy-clustering subtrativo. São analisados perfis de consumo e modos de operação, incluindo uma breve análise da introdução do veículo elétrico e de contingências na rede de energia elétrica. São apresentadas aplicações para a gestão de energia dos consumidores no âmbito do projeto piloto InovGrid. São desenvolvidos sistemas de automação para, aquisição monitorização, controlo e supervisão do consumo a partir de dados fornecidos pelos contadores inteligente que permitem a incorporação das ações dos consumidores na gestão do consumo de energia elétrica.

Palavras-chave

Rede elétrica inteligente

Produtor-consumidor

Resposta à procura

Aplicações para a gestão de energia

SMART GRIDS - COMPUTATIONAL MODELS DEVELOPMENT AND DEMAND SIDE MANAGEMENT APPLICATIONS

Abstract

This thesis focuses on the development of computational models and its applications on the demand side management within the smart grid scope. The performance of the electrical network players is studied and a domestic prosumer model is presented. The economic dispatch problem considering the production forecast and the energy consumption obtained from artificial neural networks is also presented. The existing demand response models are studied and a computational tool based on the fuzzy subtractive clustering algorithm is developed. Energy consumption profiles and operational modes are analyzed, including a brief analysis of the electrical vehicle and contingencies on the electrical network. Consumer energy management applications within the scope of InovGrid pilot project are presented. Computational systems are developed for the acquisition, monitoring, control and supervision of consumption data provided by smart meters allowing to incorporate consumer actions on their electrical energy management.

Keywords

Smart Grids

Prosumers

Demand response

Energy Management Applications

Agradecimentos

Alguns acontecimentos marcantes pautaram o período de duração desta tese, razão pela qual os meus agradecimentos assumem uma dimensão que vai muito além de uns simples parágrafos dedicados aos agradecimentos.

Ao Professor Doutor João Figueiredo agradeço a sua orientação científica, os seus conselhos e toda a disponibilidade. Agradeço sobretudo a confiança depositada em mim, a facilidade de comunicação e a sua objetividade. O seu apoio e incentivo foram cruciais para levar este trabalho até ao fim.

Ao Professor Doutor José Carlos Quadrado agradeço a sua orientação científica, as suas sugestões, o seu apoio e disponibilidade. E porque me orienta há mais de uma década, agradeço o seu incentivo para a docência e investigação. Agradeço todas as oportunidades de aprendizagem que me proporciona, bem como a sua enorme paciência para não me ter deixado desistir algumas vezes deste trabalho.

Ao Professor Doutor Rui Melício, agradeço a sua orientação científica, as críticas construtivas e disponibilidade. O seu apoio foi crucial para ultrapassar uma fase crítica no início deste trabalho. Agradeço a sua persistente motivação para as publicações, bem como os contributos que valorizaram este trabalho.

Ao Professor Doutor João Martins agradeço a sua orientação científica, sugestões, esclarecimentos e contributos, sobretudo nas fases mais críticas do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a disponibilidade demonstrada.

Ao Professor Doutor Victor Mendes agradeço todo o apoio científico prestado, todas sugestões e o rigor científico sempre demonstrado. Muito agradeço a sua disponibilidade, compreensão e cordialidade.

Ao colega João Lagarto, agradeço todo o apoio científico, sugestões, esclarecimentos e amizade.

À minha colega e amiga Carla Viveiros agradeço todos os momentos de partilha e apoio sempre demonstrado.

Aos meus colegas e amigos, Pedro Fonte, Ricardo Luís e Filipe Barata, agradeço todo o apoio científico, incentivo constante, todas as vossas opiniões e sobretudo o vosso sentido de humor. Sem a vossa amizade jamais teria conseguido terminar esta tese. Desejo-vos os maiores sucessos e felicidades.

Aos meus orientandos, sobretudo aos mais recentes, Mestre André Fagundes e Mestre David Pereira, agradeço toda a vossa colaboração. Faço votos de muito sucesso para a vossa vida pessoal e profissional.

Aos colegas do grupo disciplinar de máquinas elétricas agradeço a disponibilidade em apoiar o desenvolvimento deste trabalho. Uma palavra de especial agradecimento ao Engenheiro Paulo Almeida pelo apoio às aulas laboratoriais e ao Professor Abrantes Machado pelo incentivo demonstrado ao longo destes anos.

Aos meus pais cujo apoio altruísta claramente transcende esta tese. Para além de todo o incentivo, agradeço o apoio familiar e o contributo no aumento do meu tempo de dedicação a esta tese. Agradeço a infinita compreensão demonstrada durante os momentos menos bons.

Ao Nuno agradeço a compreensão e paciência demonstradas. Agradeço a sua estoica perseverança nos momentos difíceis que atravessámos e todo o apoio prestado, sobretudo aquele que permitiu acrescentar algum tempo para me dedicar a este trabalho.

À minha filhota Inês, que tem tantos anos quantos os de duração desta tese, tenho que agradecer a motivação e a compreensão. Sei que não negligenciei nenhum momento importante, mas sei que perdi tantos outros. Lamento profundamente a falta de paciência que, algumas vezes, demonstrei.

A todos aqueles e aquelas que não mencionei e que indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho de doutoramento, apresento os meus sinceros agradecimentos.

Índice

Capítulo 1	Introdução	1
1.1	A Rede Elétrica - Contextualização Nacional	2
1.2	Enquadramento do Trabalho	6
1.3	Motivação.....	25
1.4	Estado da Arte	29
1.4.1	Modelo do Produtor-Consumidor	30
1.4.2	Modelo de Resposta à Procura	31
1.4.3	Aplicações Inteligentes para Gestão da Procura.....	34
1.5	Caraterização Global da Tese	36
1.5.1	Objetivos.....	36
1.5.2	Contribuições Científicas.....	36
1.5.3	Estrutura.....	37
1.5.4	Notação e estrangeirismos	40
1.6	Conclusões	41
Capítulo 2	Modelização do Produtor-Consumidor	43
2.1	Introdução	44
2.2	Problema de Despacho Económico.....	51
2.3	Previsão da Produção e do Consumo	59
2.4	Análise dos Casos de Estudo	69
2.5	Análise do Trânsito de Energia	98
2.6	Conclusões	103

Capítulo 3	Modelo de <i>demand response</i>	105
3.1	Introdução	106
3.2	Gestão da Procura	107
3.3	Programas de <i>demand response</i>	110
3.4	Modelo de <i>Demand Response</i>	115
3.5	Controlo <i>Fuzzy Clustering</i> Subtrativo	120
3.6	Implementação do Modelo	129
3.7	Análise do Modelo	134
3.8	Impacte do Modelo na Rede Elétrica	152
3.9	Conclusões	160
Capítulo 4	Aplicações de Gestão de Energia para Consumidores	163
4.1	Introdução	164
4.2	Contadores inteligentes e o projeto EDP-InovGrid	165
4.2.1	Contadores Inteligentes	165
4.2.2	Contexto Técnico do Projeto EDP-InovGrid	166
4.3	Modelização do sistema	168
4.4	Desenvolvimento do controlador	173
4.4.1	Modelo de Controlo Preditivo	174
4.4.2	Identificação de Parâmetros	177
4.4.3	Função de Custo	180
4.4.4	Restrições da Função de Custo	184
4.5	Integração dos contadores inteligentes	185
4.5.1	Contador Inteligente Propriedade do Distribuidor (EDP)	185

4.5.2 Contador Inteligente de Baixo Custo – Desenvolvimento e Implementação.....	188
4.6 Implementação do Sistema de Gestão da Energia	193
4.6.1 Implementação do Controlador Preditivo.....	193
4.6.2 Configuração e Programação do <i>Hardware</i>	199
4.6.3 Desenvolvimento da Aplicação SCADA	201
4.7 Conclusões	203
Capítulo 5 Conclusões	205
5.1 Contribuições	206
5.2. Publicações.....	211
5.3 Linhas de Investigação	212
Referências Bibliográficas	215

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Evolução da REE [IEA11].....	7
Figura 1.2 - Representação de uma REI [Yu11].	7
Figura 1.3 – Intervenientes da REI e suas funções [Momoh12].	10
Figura 1.4 – Potência instalada por regime de produção e fonte de energia.	11
Figura 1.5 – Potência térmica instalada referente a PRO e PRE.....	11
Figura 1.6 – Geração por regime de produção e fonte de energia.....	12
Figura 1.7 – Geração térmica referente a PRO e PRE.	12
Figura 1.8 - Capacidade de geração em 2025 [ERSE13].	14
Figura 1.9 – Evolução das perdas na RNT [ERSE14d].	20
Figura 1.10 – Evolução das perdas na RND [ERSE14e].	21
<hr/>	
Figura 2.1 – Comportamento dos <i>prosumers</i> e a sua interação com a REE [Lampropoulos10].	45
Figura 2.2 – Pormenor da camada física [Lampropoulos10].	47
Figura 2.3 – Esquema de interligação dos <i>prosumers</i> com a REE [Rathanayaka14].	49
Figura 2.4 - Evolução dos preços em relação à procura de energia eléctrica [Sun13].	52
Figura 2.5 – Representação genérica da RNA para previsão da radiação.....	61
Figura 2.6 – Curvas P-V em função da variação da radiação solar [Silva08].....	64

Figura 2.7 – Comparação entre potência produzida medida e prevista no dia 1 de julho de 2010.	65
Figura 2.8 – Representação genérica da RNA para previsão de consumo.....	66
Figura 2.9 – Comparação entre potência de consumo medida e prevista no dia 1 de julho de 2012.	68
Figura 2.10 – Resolução do PDE diário (janeiro).	71
Figura 2.11 – Resolução do PDE diário considerando venda da energia (janeiro).	72
Figura 2.12 – Resolução do PDE diário com venda da energia e compra em MLE (janeiro).	73
Figura 2.13 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (janeiro).	74
Figura 2.14 – Comparação entre valores de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (janeiro).....	75
Figura 2.15 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga e redução orçamental (janeiro).....	75
Figura 2.16 – Comparação entre valores de potência referentes a redução e deslastre de carga (janeiro).....	76
Figura 2.17 – Resolução do PDE diário (julho).	78
Figura 2.18 – Resolução do PDE diário considerando venda da energia (julho).	78
Figura 2.19 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (julho).	79

Figura 2.20 – Comparação entre valores de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (julho).....	80
Figura 2.21 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga e redução orçamental (julho).....	81
Figura 2.22 – Comparação entre valores de potência referentes a redução e deslastre de carga (julho).....	82
Figura 2.23 – Resolução do PDE mensal considerando venda da energia (janeiro).	83
Figura 2.24 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE (janeiro).....	84
Figura 2.25 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE com aumento do orçamento (janeiro).	85
Figura 2.26 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (janeiro).	86
Figura 2.27 – Comparação entre valores mensais de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (janeiro).....	87
Figura 2.28 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga e redução orçamental (janeiro).....	87
Figura 2.29 – Comparação entre valores mensais de potência referentes a redução e deslastre de carga (janeiro).	88
Figura 2.30– Resolução do PDE mensal considerando venda da energia (julho).	90

Figura 2.31 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE (julho).....	90
Figura 2.32 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE com aumento do orçamento (julho).	91
Figura 2.33 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (julho).	92
Figura 2.34 – Comparação entre valores mensais de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (julho).....	93
Figura 2.35 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga e redução orçamental (julho).....	94
Figura 2.36 – Comparação entre valores mensais de potência referentes a redução e deslastre de carga (julho).	94
Figura 2.37 – Comparação entre valores mensais e diários de potência e custo..	96
Figura 2.38 – Valores mensais de potência e custo referentes ao cenário C3.....	97
Figura 2.39 – Comparação entre valores mensais de potência, custo e utilidade referentes aos cenários C3 e C4.....	98
Figura 2.40 – Sistema elétrico constituído por 4 barramentos.	99
Figura 2.41 – Resultado do trânsito de energia para o 1.º cenário.	100
Figura 2.42 – Resultado do trânsito de energia para o 2.º cenário.	101
Figura 2.43 – Resultado do trânsito de energia para o 3.º cenário.	102

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia de implementação do modelo DR....	130
Figura 3.2 – Representação do modelo de DR implementado em Simulink.	133
Figura 3.3 – Diagrama de consumo sem influência do modelo de DR.....	140
Figura 3.4 – Diagrama de carga das CC sem influência do modelo de DR.....	141
Figura 3.5 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível e do preço da energia elétrica para o regime normal.	142
Figura 3.6 – Evolução da potência de consumo base, potência de consumo total e disponível para o perfil económico.	143
Figura 3.7– Diagrama de carga das CC para o perfil económico.....	144
Figura 3.8 – Evolução da potência de consumo base, potência de consumo total e disponível para o perfil moderado.....	144
Figura 3.9 – Diagrama de carga das CC para o perfil moderado.	145
Figura 3.10 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível, potência de consumo total e do preço da energia elétrica.	147
Figura 3.11 – Diagrama de carga das CC para o perfil ideal.	148
Figura 3.12 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível e da potência de consumo total.	149
Figura 3.13 – Diagrama de carga das CC e do PEV.	149
Figura 3.14 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível e do preço da energia elétrica em regime de contingência.....	150
Figura 3.15 – Evolução da potência de consumo base, potência de consumo total e do preço em regime de contingência.	151

Figura 3.16 – Diagrama de carga das CC em regime de contingência.	151
Figura 3.17 – Modelo da REE.	153
Figura 3.18 – Potência de geração no regime desregado.	154
Figura 3.19 – Perdas por efeito de Joule no regime desregado.	155
Figura 3.20 – Potência de geração no regime desregado incluindo o PEV.	155
Figura 3.21 – Perdas por efeito de Joule no regime desregado incluindo o PEV.	156
Figura 3.22 – Potência de geração no regime normal.	157
Figura 3.23 – Perdas por efeito de Joule no regime normal.	157
Figura 3.24 – Potência de geração no regime normal com inclusão do PEV. ...	158
Figura 3.25 – Comparação entre potências de geração.	159
Figura 3.26– Perdas por efeito de Joule no regime normal com inclusão do PEV.	159
<hr/>	
Figura 4.1 – Arquitetura do controlo e supervisão com dois níveis.	170
Figura 4.2 – Nível operacional de controlo.	173
Figura 4.3– Representação da comunicação ModBus.	187
Figura 4.4 – Esquema do sistema implementado.	188
Figura 4.5 – Unidade de sensores ligados ao quadro elétrico principal.	189
Figura 4.6 – <i>Shield</i> Arduido LCD a cores.	190
Figura 4.7 – Microprocessador da unidade de sensores com o dispositivo de transmissão (a); Monitor móvel inserido na plataforma Arduino com rede de comunicação ZigBee (b).	190

Figura 4.8 – Sistema SCADA centralizado com recetor sem fios.	190
Figura 4.9– Interface HMI do contador inteligente de baixo custo.....	193
Figura 4.10 – Modelo de controlo preditivo em Matlab.	194
Figura 4.11 – Modelo do sistema AVAC em Matlab.....	195
Figura 4.12 – Modelo de luminosidade em Matlab.....	195
Figura 4.13 – Modelo do controlador em Matlab.	196
Figura 4.14 – Modelo para geração de referências em Matlab.	196
Figura 4.15 – Resultado do controlo de temperatura em ambiente laboratorial.	197
Figura 4.16 – Resultado do controlo de luminosidade em ambiente laboratorial.	197
Figura 4.17– Resultado de simulação do controlo de luminosidade natural.....	198
Figura 4.18 – Resultado de simulação do controlo de luminosidade artificial. .	199
Figura 4.19 – Visualização da interface HMI.	200
Figura 4.20 – Interface gráfica do sistema SCADA.....	202
Figura 4.21 – Protótipo desenvolvido em ambiente laboratorial.	203

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Comparação entre a REE tradicional e a REI	9
Tabela 1.2 - Valores de potência instalada existente e metas de potência instalada a atingir em 2020	13
Tabela 1.3– Tecnologias incluídas na AMI [Xu11]	24
<hr/>	
Tabela 2.1 – Ciclos horários correspondentes ao verão e inverno [ERSE14f]	57
Tabela 2.2– Valores dos preços de compra energia para o primeiro e último dia janeiro e de julho [ERSE14f]	58
Tabela 2.3 – Fator de correção da potência produzida em função da temperatura [Gokmen12].....	64
Tabela 2.4 – Potência produzida em função da radiação e temperatura	65
Tabela 2.5 – Parâmetros das linhas de transmissão.....	100
<hr/>	
Tabela 3.1– Lista de prioridades das cargas controláveis para o modo asseio ..	118
Tabela 3.2 – Lista de prioridades das cargas controláveis para o modo conforto	118
Tabela 3.3– Quantidade de cargas controláveis e respetiva potência	120
Tabela 3.4–Regras associadas a cada perfil, modo e correspondente valor de r_a	132
<hr/>	

Tabela 4.1– Tecnologias de comunicação [Güngör11].....	167
Tabela 4.2–Tecnologias de comunicação utilizadas no projeto EDP-InovGrid	168

Lista de Siglas

AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASM	<i>Ancillary Services Market</i>
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar-condicionado
BAS	<i>Building Automation Systems</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BT	Baixa tensão
BTN	Baixa tensão normal
CC	Carga(s) Controlável(eis)
CCGT	<i>Combined Cycle Gas Turbine</i>
CM	<i>Capacity Market</i>
CPP	<i>Critical Peak Pricing</i>
CPR	<i>Critical Peak Rebates</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DBB	<i>Demand Bidding/Buyback</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DL	Decreto Lei

DLC	<i>Direct Load Control</i>
DMS	<i>Distributed Management System</i>
DR	<i>Demand Response</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
DTC	<i>Distribution Transformer Controller</i>
EB	<i>Energy Box</i>
EB BTN	<i>Energy Box Baixa Tensão Normal</i>
ED-CPP	<i>Extreme Day CPP</i>
EDP	Energias de Portugal
EMDR	<i>Emergency DR</i>
ExDP	<i>Extreme Day Pricing</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
GPRS	<i>General Packed Radio Source</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
IBP	<i>Incentive-Based Program</i>
IC	<i>Interruptible/Curtailable</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>

IEC	<i>International Electrotechnical Comission Strategy Group</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Data Network</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MAS	<i>Master Actuator System</i>
MEE	Mercado de Energia Elétrica
MDMS	<i>Meter Data Management System</i>
MIBEL	Mercado Ibérico de Eletricidade
MIMO	<i>Multiple input, Multiple output</i>
MLE	Mercado Liberalizado de Eletricidade
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MT	Média Tensão
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i>
OPC	<i>Object Linking and Embedding for Process Control</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PBP	<i>Price-Based Program</i>
PDE	Problema de Despacho Económico

PEV	<i>Plug-in Electric Vehicles</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles</i>
PI	Proporcional Integral
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
PRE	Produção em Regime Especial
PRO	Produção em Regime Ordinário
REE	Rede de energia elétrica
REI	Rede elétrica inteligente
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RND	Rede Nacional de Distribuição
RNT	Rede Nacional de Transporte
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RTP	<i>Real-Time Pricing</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEN	Sistema Elétrico Nacional

SISO	<i>Single input, Single output</i>
TBR	<i>Time-Based Rated Programs</i>
TBP	<i>Time-based Program</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TOU	<i>Time Of Use</i>
UE	União Europeia
VPP	<i>Virtual Power Plant</i>
VPkP	<i>Variable Peak Pricing</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

Lista de Símbolos

Índices

- i Regra do controlador *fuzzy*
- n Número de pontos de informação
- k Período de tempo

Constantes e variáveis

- A_j Função de pertença
- A_T Área transversal da parede
- a Conjunto genérico de valores
- \bar{a} Média das amostras do conjunto genérico de valores
- b Conjunto genérico de valores
- \bar{b} Média das amostras do conjunto genérico de valores
- B_j Valor de saída do controlador *fuzzy*
- C_p Calor específico do ar
- C_{pt} Capacitância térmica
- C_t Condutância térmica
- C_{t1} Condutância térmica na sala 1

C_{ip}	Condutância térmica da parede
d	Espessura da parede
d_{min}	Constante que representa a mais pequena distância entre o ponto x_k e os outros <i>cluster centers</i> encontrados
E	Luminosidade natural
E_l	Luminosidade natural na sala 1
E_{nec}	Energia necessária para carregar as baterias
E_{bat}	Capacidade das baterias
H_p	Horizonte preditivo
H_u	Horizonte de controlo
H_w	Parâmetro da janela de previsão
h	Hora
h_{car}	Número de horas de carregamento das baterias
I	Corrente total que transita na REE
I_A	Luminosidade artificial
I_{A1}	Luminosidade artificial na sala 1
L_i	Luminosidade interior
L_{i1}	Luminosidade interior na sala 1
N	Número de salas

$n_{bairros}$	Número de bairros ligados à REE
n_d	Número de horas do dia
n_{res}	Número de residências por bairro
n_u	Variável de saída u
n_y	Variável de saída y
P	Potência de perdas por efeito de Joule
P	Consumo
P_b	Potência comprada à REE
P_g	Potência de geração
$\overline{P_g}$	Valor fixo de potência de geração
P_i	Potencial do ponto de informação x_i ser <i>cluster center</i>
P_l	Potência da carga
$P_l(k)$	Potência da carga durante o período de tempo k
P_{md}	Potência máxima disponível
P_{red}	Valor de potência na REE durante o período de contingência
P_s	Potência vendida à REE
P_k^*	Potencial ponto de informação x_k^* ser <i>cluster center</i>
P_1^*	Valor do potencial do ponto de informação com maior potencial de ser <i>cluster center</i>

P_{tom}	Potência tipicamente disponível numa tomada de uma residência
q	Elemento do universo de discurso
R_{med}	Radiação média
R_t	Resistência térmica
R_{t1}	Resistência térmica na sala 1
R_{11}	Radiação mensal do ano 1 na hora 1
R_{21}	Radiação mensal do ano 2 na hora 1
R_{31}	Radiação mensal do ano 3 na hora 1
R_{41}	Radiação mensal do ano 4 na hora 1
r	Tempo de amostragem
r_a	Constante positiva que representa o raio que define até que distância é que um ponto de informação é considerado vizinho
r_b	Constante positiva cujo valor ditará até que distância é que um ponto de informação sofrerá a redução do valor potencial de ser um <i>cluster center</i>
S	Ordem do sistema
s	Fluxo térmico
s_1	Fluxo térmico na sala 1
T_i	Temperatura interior

T_{i1}	Temperatura interior na sala 1
T_e	Temperatura exterior
T_{e1}	Temperatura exterior à sala 1
\bar{U}	Utilidade mínima
V	Volume da sala de conferência
\bar{W}	Orçamento dos <i>prosumers</i>
x	Variável de estado
x_i	i -enésimo ponto de informação de um conjunto de dados
x_j	Ponto de informação vizinho de x_i
x_c^*	c -enésimo <i>cluster center</i> no espaço de dimensão M
x_k^*	k -enésimo <i>cluster center</i>
x_1^*	<i>Cluster center</i> com maior valor potencial
y_i^*	Coordenadas das variáveis de entrada do <i>cluster center</i>
y_{ij}^*	j -enésimo elemento de y_i^*
Y_j	j -enésima variável de entrada
Y_k	Valor real da rede neuronal artificial
\hat{Y}_k	Valor previsto da rede neuronal artificial
z	Variável de saída

z_i^*	Coordenadas das variáveis de saída do <i>cluster center</i> x_i
z_{ij}^*	j -enésimo elemento de z_i^*
Z_j	j -enésima variável de saída
α	Constante auxiliar para o cálculo do potencial ser <i>cluster center</i>
β	Constante auxiliar para cálculo da redução do potencial de ser <i>cluster center</i>
$\gamma(k)$	Preferência do consumidor durante um período de tempo k
ε	Fator de relaxação
$\bar{\varepsilon}$	Potencial a partir do qual se aceita definitivamente o ponto de informação como <i>cluster center</i>
$\underline{\varepsilon}$	Potencial abaixo do qual se rejeita definitivamente o ponto de informação como <i>cluster center</i>
λ_b	Preço de venda da energia elétrica
λ_s	Preço de compra da energia elétrica
η	Rendimento dos inversores
μ_i	Grau de pertença do vetor y em relação à regra i
ρ	Multiplicador de Lagrange
ρ_{ar}	Densidade do ar
ρ_i	Média ponderada dos μ_i

$\rho_{i,j}$ ρ_i avaliado por y_j

Vetores e matrizes

A Matriz de estado

B Matriz de entrada

B_1 Matriz de entrada 1

B_2 Matriz de entrada 2

C Matriz de saída

c Vetor dos valores de trajetória de referência

c_{uc} Vetor dos valores de referência da ação de controle

G_i Matriz constante

h_i Vetor coluna constante

Q Matriz dos pesos de seguimento

R Matriz dos pesos da ação de controle

u Vetor de entrada ou de controle

\hat{u}_c Vetor das ações de controle estimadas

$u_{controle}$ Vetor de controle

$u_{perturbações}$ Vetor das perturbações

W Matriz de pesos de seguimento

y	Vetor de entrada
Y	Vetor de saída
\hat{y}	Vetor de saídas estimadas
$\Delta \hat{u}$	Vetor das variações das ações de controlo estimadas

Funções

$U(P_l)$	Função de utilidade do problema de despacho económico
V_C	Função de custo
$\pi_s(P_s)$	Lucro resultante da venda de energia eléctrica

CAPÍTULO

1

Introdução

Neste capítulo é apresentada uma contextualização histórica da evolução da rede elétrica nacional, evoluindo para o contexto da rede elétrica inteligente. É apresentado o enquadramento e o estado da arte do conhecimento. Finalmente é apresentada a caracterização global da tese, sendo apresentados os seus objetivos, as contribuições científicas, a estrutura e a notação e estrangeirismos utilizados.

1.1 A Rede Elétrica - Contextualização Nacional

No final do século XIX decorreram as primeiras experiências de produção de energia elétrica cuja aplicação esteve destinada à iluminação pública. Nessa altura surgiram as primeiras empresas de produção e distribuição de energia elétrica [Rollo05]. A utilização de recursos hídricos começou a ser promovida e numa primeira instância, a produção de energia elétrica esteve perto dos centros urbanos e posteriormente foi estendida às zonas industriais [AICEP08].

Em comparação com o desenvolvimento da rede elétrica ao nível internacional, era evidente a existência de um atraso quer na utilização quer na produção de energia elétrica em Portugal. Este atraso foi mantido devido à agitação política que se verificou no período que decorreu entre o fim da Monarquia e a implantação da República. Durante este período, ficaram para segundo plano os objetivos de industrialização e a consequente necessidade de produção e utilização da energia elétrica, que começavam a ser discutidos por alguns defensores da industrialização nacional [Rollo05].

Em Portugal, durante o período correspondente à I Guerra Mundial, houve um estímulo ao desenvolvimento industrial, embora pouco significativo, não só devido a crises externas, como também às crises internas. Onde decorriam acesos debates entre os apoiantes da industrialização do país, que se contrapunha aos debates entre os apoiantes do desenvolvimento da agricultura, alertando para os presumíveis perigos que advinham dessa industrialização [Rollo05].

Na década de 20 do século passado, o atraso económico de Portugal resultava de uma crise internacional associada ao agravamento do défice português e à falta de uma política de desenvolvimento estratégico para o país. Os apelos dos apoiantes da industrialização para a existência de eletricidade abundante e barata como estratégia de desenvolvimento económico, contribuiu para a

implementação de indústrias fundamentais, mas deixou por concretizar projetos de industrialização mais arrojados. Até ao período transitório decorrido entre a primeira República e a institucionalização do estado novo, pequenos progressos foram verificados ao nível do aproveitamento hidroelétrico e da rede de transporte de energia [Rollo05].

Na década de 30 do século passado, voltaram a emergir propostas de industrialização de Portugal e da sua eletrificação. Contudo, e no sentido de dar resposta aos efeitos negativos da II Guerra Mundial, foi no princípio da década de 40 do século passado, que se iniciou o processo efetivo de eletrificação do país com a publicação da Lei n.º 2002, da Eletrificação do País, de dezembro de 1944, que estabeleceu as regras da produção, transporte e distribuição de energia elétrica, tendo como preferência a produção hidroelétrica [Rollo05].

Em meados da década de 40 do século passado começou o processo de eletrificação do país surgindo a Companhia Nacional de Eletricidade (CNE) como primeira entidade responsável pela eletrificação nacional [Rollo05]. Os objetivos da CNE eram “o estabelecimento e exploração de linhas de transporte e subestações destinadas ao fornecimento de energia elétrica aos concessionários de grande distribuição ou aos consumidores cujo abastecimento direto se justifique nos termos da base da Lei n.º 2002, Diário do Governo, série I, 26 de dezembro 1944, referente às indústrias eletroquímicas, eletrometalúrgicas, tração elétrica e planos de rega; bem como à interligação dos rios Cávado e Zêzere entre si e com os sistemas existentes”[Rollo96].

A década de 50 do século passado foi marcada pela construção e entrada em funcionamento de aproveitamentos hidroelétricos, nomeadamente Castelo de Bode, Venda Nova, Pracana e Belver, tendo sido triplicada a produção de energia elétrica. Neste período foi significativa a prevalência da produção de energia elétrica de origem hidroelétrica face à produção de origem termoelétrica [Rollo05].

Na década de 60 do século passado a produção hidroelétrica foi responsável pelo abastecimento de 90% do consumo nacional de energia elétrica, contudo o aumento da procura conduziu a um aumento da produção termoelétrica [Rollo05].

No final da década de 60 do século passado foi criada a Companhia Portuguesa de Eletricidade (CPE), cujo objetivo consistia em dar continuidade aos projetos de construção de aproveitamentos hidroelétricos em curso e das centrais termoelétricas utilizando o fuel e o carvão como combustível, bem como promover o desenvolvimento da rede de transporte de energia elétrica e suas interligações [Rollo05].

Nas décadas de 80 e 90 do século passado foram construídos os grandes aproveitamentos hidroelétricos nacionais, contudo em meados da década de 80, devido à crescente procura de energia elétrica foi verificada a transição de uma produção maioritariamente de origem hidroelétrica para uma produção de origem térmica [Rollo05].

Em meados da década de 90 do século passado, com a publicação dos DL 182/95 a 188/95, é aprovada a legislação sobre a organização do setor elétrico nacional na qual se traduz a separação jurídica entre a produção, transporte e distribuição da energia elétrica, na diferenciação entre sistema de serviço público e independente [Melício10] e na definição de um sistema elétrico que permite o acesso de terceiros às redes de transporte e de distribuição [Lourenço10]. No âmbito na união europeia foram definidas regras comuns que visavam a criação do mercado interno da eletricidade, alavancando a liberalização do setor elétrico [AICEP08].

A primeira década do presente século consolidou o processo de liberalização global do setor elétrico nacional, através da aprovação da Estratégia Nacional para a Energia e da organização dos mercados de eletricidade [AICEP08,

Melício10]. O DL 29/2006 consubstancia a Estratégia Nacional para a Energia, através do estabelecimento das novas bases em que assenta a organização do Sistema Elétrico Nacional (SEN) [Melício10]. Posteriormente os DL 172/2006 e DL 264/2007 legislam sobre o estabelecimento dos princípios de organização e funcionamento do SEN, assim como as regras gerais aplicáveis ao exercício das atividades de produção, transporte, distribuição e comercialização, e também a organização dos mercados de eletricidade [Melício10]. Os DL 172/2006 e DL 264/2007 permitem a transposição para a legislação nacional, dos princípios da Diretiva 2003/54/CE que tinha como objetivo a criação de um mercado livre e concorrencial na área da energia [Melício10].

A primeira década do presente século, foi ainda marcada pela introdução das redes elétricas inteligentes (REI) nomeadamente, o projeto piloto na cidade de Évora, denominado InovGrid. O projeto InovGrid tem por objetivo contribuir para dar resposta ao aumento da procura da energia elétrica [EDP09]. Designadamente, dar resposta a problemas de estabilidade da rede, os quais têm impacte na qualidade da energia e que ocorrem devido às frequentes oscilações entre a oferta e a procura de energia elétrica [Kanjiya13,Kumar11], nomeadamente devido aos picos de procura, caracterizados por uma elevada concentração da procura de energia elétrica em determinados intervalos de tempo [EDP09], bem como devido à penetração crescente de produção de origem renovável na rede de energia elétrica [Melício10]. Os problemas de estabilidade estão relacionados com a estabilidade da tensão, a estabilidade transitória e a estabilidade de pequenos sinais [Kumar11]. O problema da estabilidade da tensão ocorre quando existe uma cava tensão que se propaga pela rede de energia elétrica podendo causar a sua falência [EIOC14]. A estabilidade transitória está relacionada com a estabilidade dos geradores. Se geradores instáveis não forem rapidamente isolados da restante rede de energia elétrica, podem causar a instabilidade de geradores vizinhos e provocar apagões generalizados [Hazra12]. A estabilidade de pequenos sinais está relacionada com a dinâmica de pequenas

perturbações que podem ocorrer sem que os operadores da rede se apercebam, podendo comprometer o bom funcionamento da rede de energia elétrica [EIOC14].

No período correspondente à primeira e segunda década deste século foram sendo disseminados sobretudo na Europa e Estados Unidos da América, os projetos piloto no âmbito das REI [Smartgridnews13], permitindo testar em pequena escala o comportamento das REI e possibilitando a preparação da sua implementação e disseminação em larga escala nas redes elétricas. É consensual que a transição das redes elétricas tradicionais para as REI, é o caminho apontado no que diz respeito à solução dos problemas atuais das redes elétricas [Farhangi10].

1.2 Enquadramento do Trabalho

A rede de energia elétrica (REE) tal como a conhecemos foi dimensionada para um funcionamento baseado numa estrutura vertical definida pela geração, transmissão e distribuição de energia suportada por dispositivos de controlo que asseguram a sua fiabilidade, estabilidade e eficiência. Esta rede de energia elétrica é referida ao longo do texto como rede de energia elétrica tradicional [Momoh12].

Atualmente a REE tradicional utiliza um sistema sustentado em tecnologia que remonta às décadas de 50 e 60 do século passado [Collier10]. Simultaneamente enfrenta desafios provenientes do aumento do consumo, da menor acessibilidade e encarecimento dos combustíveis fósseis, da penetração da geração a partir de fontes de origem renovável, das alterações tecnológicas, dos tipos de mercados de energia elétrica e seus intervenientes. Permitir uma participação ativa do consumidor na gestão da rede, reduzir as emissões de gases de efeito de estufa e

minimizar a construção de centrais de fontes de energia de origem não renovável, constituem outros desafios a enfrentar [Collier10, Lo11, Momoh12]. Neste sentido, a REI é considerada como sendo o agente motivacional para o projeto dos sistemas de energia elétrica do futuro [Gangale13]. A evolução da REE ao longo do tempo e antecipando o futuro [IEA11], está representada na Figura 1.1. Uma representação esquemática da REI [Yu11] está representada na Figura 1.2.

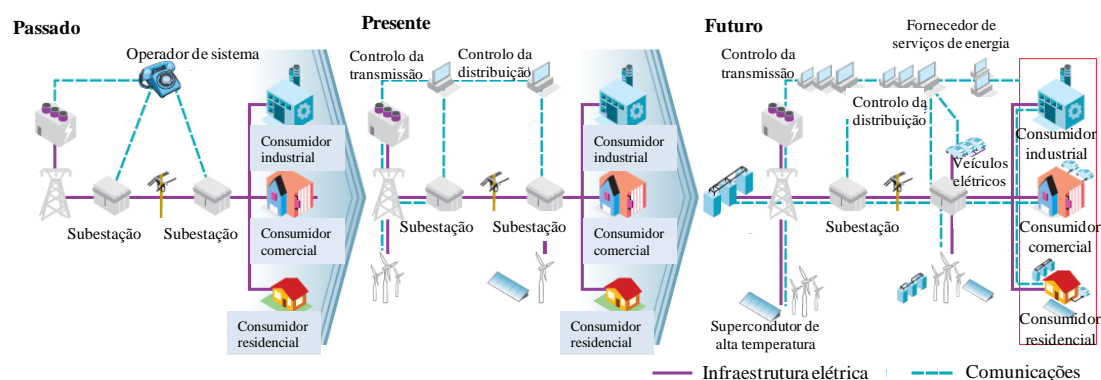


Figura 1.1 - Evolução da REE [IEA11].

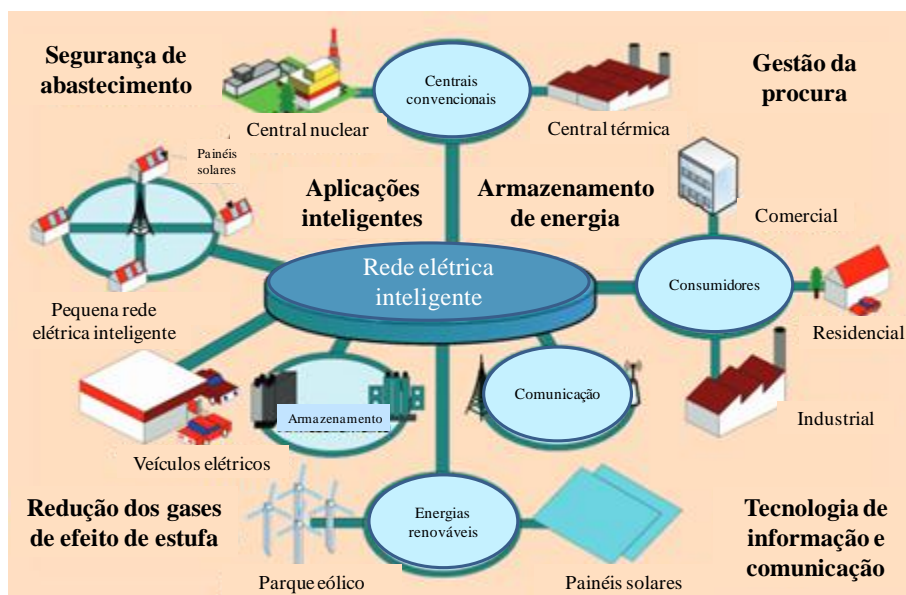


Figura 1.2 - Representação de uma REI [Yu11].

A gestão dos sistemas de energia elétrica, permitem a integração da produção descentralizada, permitindo também que os consumidores assumam ações proactivas na gestão da procura, comumente designadas de *demand side management* (DSM) [Mah13]. Estas ações proactivas do consumidor são essenciais para o desenvolvimento e funcionamento das REI na medida em que o envolvimento do consumidor permite tirar partido do potencial das REI [Gangale13]. A Tabela 1.1 apresenta uma comparação entre a REE tradicional e a REI, considerando as características mais significativas [Momoh12].

A identificação dos intervenientes na REE e o conhecimento das suas funções são importantes para o desenvolvimento da REE. Independentemente da agregação dos intervenientes em estruturas definidas pelas políticas nacionais, existe um conjunto de intervenientes com funções definidas, representados na Figura 1.3.

Para a caracterização dos intervenientes da rede elétrica nacional são considerados os produtores, os consumidores, os operadores e os reguladores da REE. A caracterização dos serviços e tecnologia é igualmente considerada seguidamente.

Caraterização dos produtores

Em Portugal a produção de energia elétrica é feita a partir de fontes tradicionais, nomeadamente, grandes centrais térmicas a carvão, gás e fuel, centrais hídricas e fontes de energia renováveis, nomeadamente, centrais de energia eólica, fotovoltaica e biomassa.

A potência instalada em 2013 foi 18.117 GW [EDP13]. A potência instalada correspondente à produção em regime ordinário (PRO) e à produção em regime especial (PRE), discriminada por fontes de energia [EDP13], está representada na Figura 1.4.

Tabela 1.1 – Comparação entre a REE tradicional e a REI

Caraterísticas	REE tradicional	REI
Participação do consumidor	Os consumidores não têm uma participação ativa na gestão da rede	Os consumidores são esclarecidos e participam ativamente na gestão da rede através de programas de <i>demand response</i> e estão envolvidos na produção descentralizada.
Gestão da produção e do armazenamento	Dominada pela produção centralizada; existem restrições na interligação da geração distribuída;	Existe produção descentralizada maioritariamente proveniente de fontes de energia renováveis.
Novos produtos, serviços e mercados	Utilização limitada de novos produtos; integração deficiente do mercado de eletricidade; oportunidades limitadas para os consumidores	A utilização de novos produtos é abundante; existe boa integração dos mercados de eletricidade; existe uma oferta crescente de novos mercados para os consumidores.
Qualidade de energia	É focada nas interrupções e existe uma resposta lenta aos problemas da qualidade da energia.	A qualidade da energia é um fator prioritário e existe uma variedade de opções baseadas na relação qualidade-preço.
Otimização de recursos e eficiência de operação	Existe pouca integração dos dados de operação na gestão de recursos; existe uma comunicação unidirecional	Existe bastante aquisição de dados dos parâmetros da rede, focada na prevenção e minimização de impacte aos consumidores; existe uma comunicação bidirecional.
Antecipação de respostas a perturbações do sistema	Resposta à prevenção de eventos futuros; focada na proteção de recursos após a perturbação.	Deteta automaticamente e responde ao problema; é focada na prevenção, minimizando o impacte aos consumidores.
Resiliência contra ciberataques e desastres naturais	Vulnerável a atos de terrorismo e desastres naturais; Tem resposta lenta a estes fatores	Resiliente a ciberataques e a desastres naturais; Capacidade de restabelecimento rápido.

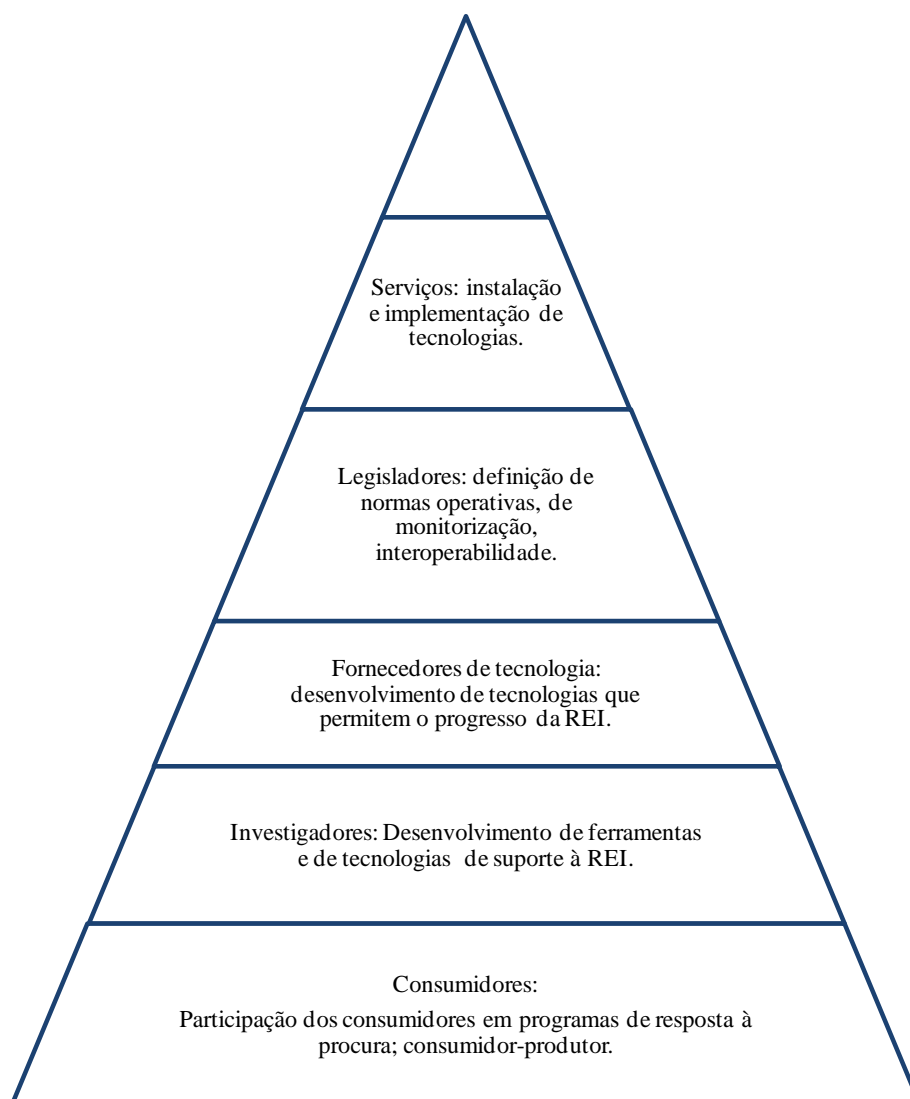


Figura 1.3 – Intervenientes da REI e suas funções [Momoh12].

A PRO corresponde à produção de eletricidade com base em fontes tradicionais não renováveis e em grandes centros electroprodutores hídricos. A PRE corresponde à cogeração e à produção elétrica a partir da utilização de fontes de energia renováveis, tais como a energia eólica, pequenas centrais hídricas, solar fotovoltaica, biomassa e ondas [ERSE14a, REN14].

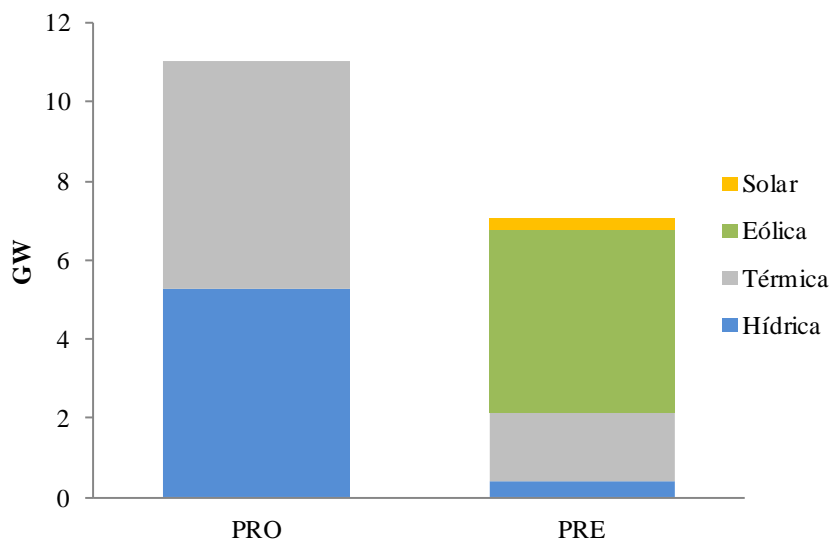


Figura 1.4 – Potência instalada por regime de produção e fonte de energia.

A potência instalada referente à PRO térmica e PRE térmica, provém de fontes distintas, nomeadamente biomassa e resíduos, cogeração, fuel/gasóleo, carvão e ciclo combinado turbo gás (CCTG) [EDP13] e está representada na Figura 1.5.

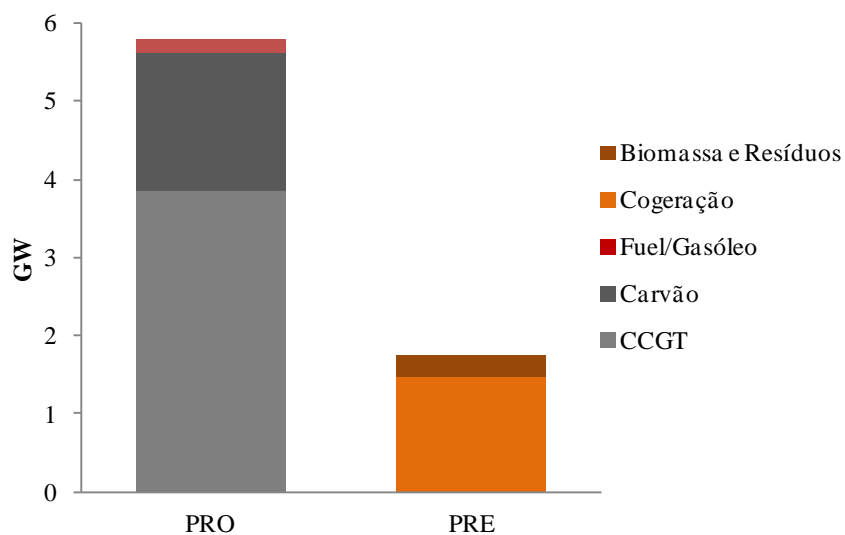


Figura 1.5 – Potência térmica instalada referente a PRO e PRE.

A geração de energia elétrica referente à PRO e PRE, por fonte de energia, nomeadamente, solar, térmica, eólica e hídrica está representada na Figura 1.6. Em 2013, foi produzido em Portugal, 47.836 TWh de energia elétrica [EDP13].

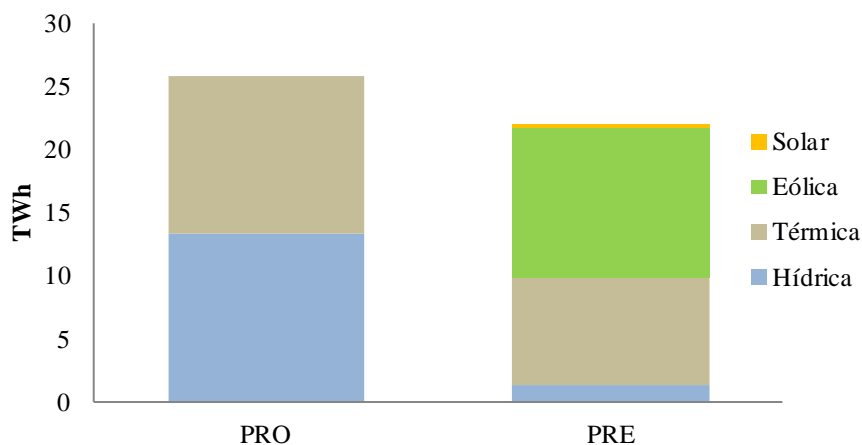


Figura 1.6 – Geração por regime de produção e fonte de energia.

A geração térmica referente à PRO e PRE está representada na Figura 1.7.

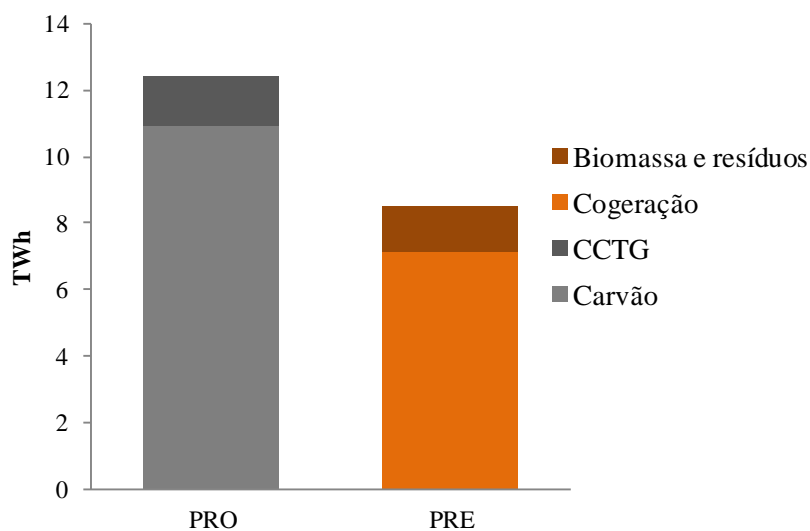


Figura 1.7 – Geração térmica referente a PRO e PRE.

Em 2013, 58.3% das necessidades de energia elétrica foram produzidas a partir de fontes de energias renováveis [APREN13]. Contudo, atendendo aos objetivos traçados para 2020 é necessário aumentar esta produção por forma a reduzir as perdas na Rede Nacional de Distribuição (RND), diminuir a dependência externa [ENEI14] e ainda incentivar o papel ativo do consumidor. Os valores da potência instalada existente em Portugal e as metas a atingir em 2020 [APREN14, EDP14, ERSE12, PER14] são apresentados na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Valores de potência instalada existente e metas de potência instalada a atingir em 2020

Fonte ou tecnologia	Potência instalada existente (MW)	Metas de potência instalada em 2020 (MW)
Grande hídrica	5271	8600
Mini-hídrica	413	250
Eólica	4630	6800
Solar	282	1500
Ondas	0.4	250
Biomassa	267	250
Geotérmica	235.5	250

A capacidade de geração do sistema elétrico nacional prevista para 2025 [ERSE13] está representada na Figura 1.8.

O cumprimento das metas propostas na Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013 não apresenta o mesmo grau de complexidade para todas as tecnologias, no entanto, se for verificado um aumento considerável associado a todas elas, esse comportamento irá contribuir para a redução da dependência externa de energia elétrica.

O futuro perfil da geração inclui centrais de energia intermitente proveniente de fontes de energia renovável. O grande desafio está em utilizar estas centrais para fazer face ao consumo de forma fiável e sustentável [ERSE13]. Nomeadamente,

porque grande parte da energia provinda de fontes renováveis é gerada em horas de pouco consumo e que o armazenamento de energia a larga escala ainda não é viável, à exceção das centrais hídricas reversíveis [Almeida13].

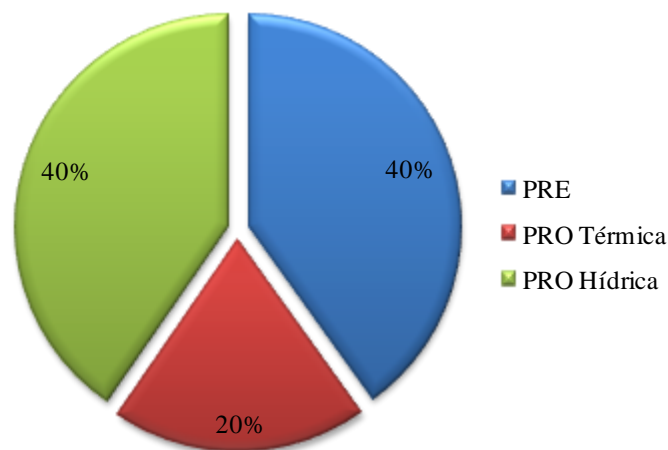


Figura 1.8 - Capacidade de geração em 2025 [ERSE13].

Uma REE dependente de centrais a combustíveis fósseis e de energias renováveis aumenta a necessidade de uma REI que permita a monitorização da transmissão e distribuição para desta forma poder aumentar a eficiência e reduzir perdas no sistema de transmissão de energia elétrica [Ramani10]. Além disso, as REI permitem a descentralização e a cooperação da geração através de comunicação de informação em tempo real [Phuangpornpitak13].

A eliminação gradual da tecnologia de geração nuclear em alguns países europeus associada à falta de capacidade de investimento em energias renováveis para cumprir as metas comunitárias, pode trazer oportunidades para países como Portugal. Na medida em que pode ser feita a transferência da produção para esses mesmos países, i.e., com o excesso de produção em determinadas horas essa energia pode ser vendida aos países da Europa que necessitem, através dos mecanismos de flexibilidade previstos pela União Europeia [ERSE13]. No entanto e porque o Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL) funciona à margem

dos restantes países europeus dada a escassez de potência de interligação entre Espanha e França, o que torna difícil o escoamento de produção renovável para o restante mercado europeu, torna essencial o reforço das interligações da Península Ibérica ao resto da Europa, através de França. O reforço desta interligação para níveis adequados permitirá a Portugal escoar o excesso que possa vir a ter de produção renovável, aproveitando o seu potencial [ERSE13].

Em geral, os consumidores não têm as mesmas motivações, compreensão ou sensibilidade acerca da tecnologia como os produtores e as ações são mais eficazes quando projetadas a partir da perspetiva do consumidor. Uma vez que é impossível realizar uma análise individual de cada um dos consumidores, é fundamental reconhecer a importância de aspetos contextuais, pessoais e comportamentais, a fim de compreender a interação dos produtores consumidores com a REE [Lampropoulos10].

Caraterização dos produtores-consumidores

Os produtores-consumidores, comumente designados de *prosumers*, palavra formada pela abreviação de *producer-consumer*, são a evolução dos consumidores passivos de energia elétrica para consumidores que desempenham um papel ativo na REE, nomeadamente através da produção de energia elétrica. Os consumidores têm vindo a ser incentivados a reduzir o consumo e a produzirem a sua própria energia a partir de fontes de energia renováveis, devolvendo o excesso de energia produzida à REE [Yu11].

Em Portugal, no ano 2007, a entrada em vigor do DL n.º 363/2007 de 2 de novembro que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de eletricidade por intermédio de unidades de microprodução, permitiu aos consumidores de energia elétrica também a produção de energia elétrica. Os consumidores optaram por se tornar produtores não só em resposta às mudanças climáticas que

exigem um maior consumo energético, mas também devido ao programa de incentivo do governo às energias renováveis. Este DL contribui assim para o incentivo da produção descentralizada.

O DL nº 25/2013, de 19 de fevereiro, veio dar início ao processo de revisão do regime jurídico da microprodução e miniprodução, tendo sido adotadas soluções que permitem superar dificuldades práticas e operacionais.

A legislação é aplicada à microprodução e miniprodução de eletricidade a partir de fontes renováveis e à microprodução de eletricidade e calor em cogeração, ainda que não renovável, mediante a utilização de uma unidade, em baixa tensão (BT), com potência de ligação até 5.75 kW. Contudo, no regime bonificado, a potência de ligação da respetiva unidade de microprodução não poderá ser superior a 3.68 kW [DecretoLei13].

A microprodução e miniprodução têm que ter por base uma só tecnologia de produção, que poderá ser solar, eólica, hídrica, cogeração a biomassa, pilhas de combustível com base em hidrogénio proveniente de microprodução renovável e cogeração não renovável. Existem dois regimes de remuneração: o regime geral e o regime bonificado. No regime geral o produtor vende a energia por si produzida, no caso da microprodução, ao custo da energia do tarifário aplicável pelo comercializador de último recurso ao fornecimento da instalação de consumo, e, no caso da microprodução, de acordo com as regras estabelecidas para a comercialização de eletricidade em mercado de energia elétrica. No regime bonificado, o produtor é remunerado com base na tarifa de referência que vigorar à data da emissão do certificado de exploração. A tarifa é aplicável durante um total de 15 anos contados desde o primeiro dia do mês seguinte ao do início do fornecimento, subdivididos em dois períodos: o primeiro com a duração de 8 anos e o segundo com a duração dos subsequentes 7 anos. Fazem parte do regime geral, todos aqueles que não tenham acesso ao regime bonificado [DecretoLei13].

Nesta tese a modelização e análise do *prosumer* é considerada, utilizando técnicas de previsão de geração e de consumo e é apresentada uma abordagem do seu impacte no trânsito de energia na REE.

Caraterização dos consumidores

De acordo com a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), existem vários tipos de consumidores. Estão divididos em grandes consumidores, consumidores industriais, residenciais e pequenos negócios [ERSE14b]. No caso dos consumidores residenciais, é assumido que deve ser tido em conta o estrato social em que se inserem, porque desta forma existe a possibilidade de agrupar diferentes tipologias de consumo de acordo com perfis de consumo comuns.

A pesquisa sobre o comportamento individual revela grande variedade, tanto nos comportamentos relevantes como nos fatores que os influenciam. A fim de lidar com essa variedade, foram caraterizados os fenómenos que afetam o impacto previsto em indivíduos considerando três domínios: o domínio pessoal, comportamental e contextual [Lampropoulos10].

No domínio pessoal estão considerados os valores individuais básicos, crenças e várias outras cognições, motivações e sentimentos. No domínio comportamental, a partir de uma perspetiva de previsão, uma eventual situação que ocorre é dependente tanto dos domínios pessoais como dos domínios contextuais. O domínio contextual influencia o domínio comportamental através de uma ampla gama de atributos, como a base de cada indivíduo, nomeadamente os dados demográficos socioculturais, os dados religiosos, os dados financeiros, os dados educacionais e o estado atual do indivíduo, tal como ambiente residencial urbano ou rural, a propriedade de veículos e dispositivos. Há também o contexto social, que consiste nas infraestruturas disponíveis, a política e regulação, e ainda o

contexto económico, tal como a renda, a disponibilidade financeira, os preços dos serviços e outros aspetos, tais como tempo e parâmetros externos do indivíduo [Lampropoulos10].

Com a entrada em vigor do mercado liberalizado, surgiu a possibilidade de existir uma livre concorrência no mercado energético, constituído pelo conjunto eletricidade e gás, suscitando assim o aparecimento de vários comercializadores de energia e possibilitando uma maior escolha por parte dos consumidores [ERSE14c]. Consequentemente o processo de liberalização deu origem ao aparecimento de novos agentes nos segmentos de produção e comercialização, contribuindo desta forma para o aumento de concorrência no setor e concedeu aos consumidores um papel muito mais ativo no mercado, visto que têm a possibilidade de escolher a entidade fornecedora dos serviços que pretendem [Santos12].

O papel do consumidor, no domínio da REI é dotado de considerável relevância no contexto de uma gestão da REE que cumpre os requisitos de promover a eficiência energética e a calendarização e deslastre das cargas que melhor serve o consumidor [Fagundes13]. O consumidor inserido na REI será convidado ao envolvimento na gestão da energia elétrica, bem como na sua utilização. Com a ampla aplicação do mercado de energia elétrica e com o sistema *Virtual Power Plant* (VPP), o preço da energia elétrica passa a ser disponibilizado em tempo real e a potência disponível deixa de seguir a carga, passando a carga a ser ajustada à potência disponível, sendo este um dos caminhos apontados para a sustentabilidade da rede [Fagundes13]. O aumento da potência requerida pelo consumidor, o aumento dos gases de efeito de estufa bem como o aumento do preço dos combustíveis fósseis e o seu provável desaparecimento num futuro próximo, levam a que sejam procuradas soluções no sentido de diminuir os efeitos prejudiciais destes fatores tanto ao nível económico como ao nível ambiental. A introdução de mais geração de fonte renovável na REE, bem como

generalizar a utilização do veículo elétrico são algumas das soluções apontadas para mitigar os referidos efeitos [Fagundes13].

No âmbito desta tese a ênfase é dada aos consumidores residenciais, para os quais se destina a ferramenta de apoio à *demand response* (DR) desenvolvida.

Caraterização dos operadores

Antes da liberalização do setor elétrico, a empresa EDP era o único operador da REE que detinha o monopólio do setor. Esta empresa era responsável por todos os serviços desde a geração, transporte, distribuição e comercialização de energia elétrica. A liberalização veio permitir a concorrência na geração e comercialização, contudo no transporte e distribuição foi decidido que não deveria ser permitida a existência concorrência por se entender que poderia gerar potenciais conflitos de interesse, indesejáveis num mercado que se pretende aberto e transparente. A Rede Elétrica Nacional, atualmente designada de Redes Energéticas Nacionais (REN) foi criada em 1994, sendo responsável pela operação da Rede Nacional de Transporte (RNT), sendo a EDP apenas responsável pela RND.

Os operadores da RND e da RNT têm contribuído para aumentar a eficiência da REE nacional tentando reduzir as perdas ativas na rede. A evolução das perdas na RNT está representada na Figura 1.9.

Passados 12 anos, houve uma redução de 44% ao nível das perdas ativas. O nível atual das perdas ativas ronda 1% o que indicia a eficácia do operador para a redução das perdas ao nível da RNT.

Ao nível da RND, a evolução tem sido mais lenta comparativamente à evolução verificada na RNT. Esta discrepância pode ser devida ao facto da RND ser mais

dispersa e extensa que a RNT. A evolução das perdas na RND está representada na Figura 1.10.

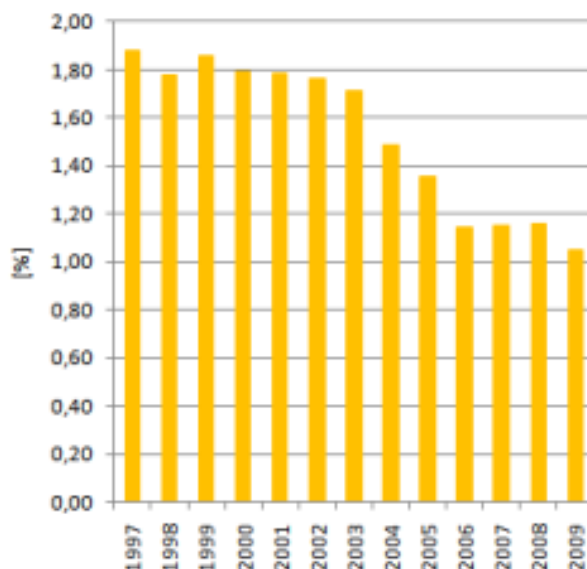


Figura 1.9 – Evolução das perdas na RNT [ERSE14d].

Na Figura 1.10, o valor das perdas na RND foi superior a 7% no ano de 2009. Este valor pode ser reduzido através de investimentos na RND por forma a melhorar a qualidade de serviço e reduzir os custos de operação, com vista à promoção da eficiência energética e do aumento da produção descentralizada [Aguar10].

Os operadores da rede elétrica têm um papel preponderante na medida em que contribuem para o adequado funcionamento da REE potenciando a sua eficiência e a inclusão da produção descentralizada.

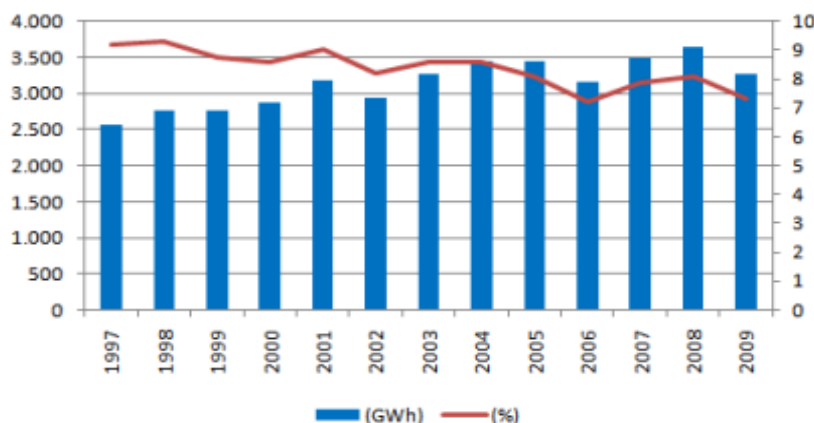


Figura 1.10 – Evolução das perdas na RND [ERSE14e].

Caraterização dos reguladores

Os reguladores têm o poder de influenciar os comportamentos dos indivíduos, principalmente, por tomarem ações no domínio pessoal e contextual, através de informação, incentivos e apoio institucional. Sendo que as informações ou a educação são ações no domínio pessoal e incentivos de vários tipos são ações no domínio contextual. Além disso, a eficácia dessas ações depende fortemente do grupo-alvo, i.e., depende do comportamento particular e do horizonte de planeamento, uma vez que os seus efeitos a longo prazo podem ser diferentes, ou mesmo opostos aos dos efeitos a curto prazo [Aguiar10].

A ERSE surgiu em 1997 em sequência da liberalização do mercado elétrico nacional e consequente necessidade de criação de uma entidade com competência para produzir regulamentação do setor elétrico e publicar tarifas da energia elétrica fornecida pela entidade concessionária da RNT e pelos distribuidores vinculados [Melício10]. Porque, com a liberalização da produção e da comercialização de energia elétrica advém a necessidade de passar a regular o desempenho dessas empresas, por forma a controlar os preços praticados,

protegendo assim o consumidor num mercado livre. Em 2002 a ERSE, passou a regular também as tarifas do gás.

A ERSE contribui para o aumento da capacitação do consumidor de energia na defesa dos seus direitos e interesses e na promoção da sustentabilidade energética, fazendo com que a linguagem tecnocrática da regulação seja perceptível por todos. Por outro lado, motiva o reforço de mecanismos e instrumentos que visam a proteção dos consumidores através de ações cujo intuito é aumentar a participação dos consumidores em atividades de regulação. O desempenho da ERSE no sentido de informar e educar o consumidor tem por objetivo permitir uma maior eficiência energética e aumentar a produção descentralizada [Aguiar10].

Atendendo à transição da REE tradicional para a REI, é previsível que a ERSE seja impelida a atuar de forma descentralizada e com proximidade ao consumidor, concretizando atividades regulatórias no domínio do desenvolvimento sustentável e da responsabilidade social [Aguiar10].

O papel da entidade reguladora contribui para a proximidade entre os demais intervenientes na REE e define as políticas que conduzem a uma adequada operação da REE .

Caraterização dos serviços e tecnologias

A ampla aplicação do mercado elétrico, bem como a implementação do sistema VPP dependem da inovação tecnológica e da capacidade dos países superarem barreiras regulamentares que atualmente são muito diferentes de país para país. Sumariamente, uma VPP consiste num aglomerado de unidades de geração

distribuída dispersas, cargas controláveis e sistemas de armazenamento agregados por forma a operar como uma única central [Saboori11].

De acordo com [Xu11], existem várias entidades que já desenvolveram trabalho no sentido de harmonizar as normas que regem as tecnologias que permitem a evolução da REE para a REI. A *International Electrotechnical Commission Strategy Group*, IEC, é uma dessas entidades que desenvolveu normas para tecnologias que abrangem áreas tão distintas como: *Advance Metering Infrastructure* (AMI), *Distribution Automation*, *Distribution Management System* (DMS), DR, *Substation Automation*, *Smart Home*, entre outras.

O conjunto das tecnologias relacionadas com AMI desempenha um papel fundamental na troca de dados entre o consumidor e a geração, que constitui uma das bases da REI.

Esta infraestrutura é baseada em tecnologias de comunicação e está diretamente relacionada com os programas de DR. Para que seja tirado o máximo proveito desta infraestrutura é necessário que o preço no mercado elétrico seja obtido em tempo real e que os contadores inteligentes sejam amplamente instalados de forma a permitir a leitura e envio dos dados do consumo recorrendo à comunicação bidirecional. Na Tabela 1.3 são apresentadas as tecnologias que integram a AMI [Xu11].

Através da AMI o consumidor tem acesso à informação dos preços e à potência disponível ao longo do dia, podendo decidir a que horas deve colocar os seus equipamentos domésticos em funcionamento por forma a minimizar a fatura de energia elétrica. Por outro lado, a AMI também permite melhorar a eficiência da REE uma vez que permite influenciar o consumidor de forma a, por exemplo, reduzir o seu consumo nas horas de ponta aumentando o preço da energia elétrica nessas horas. Adicionalmente a AMI permite o acesso aos diagramas de consumo, o que auxilia na decisão sobre o planeamento da rede.

Tabela 1.3 – Tecnologias incluídas na AMI [Xu11]

Equipamento	Descrição
<i>Smart Meter</i>	É um aparelho programável que permite um maior número de leituras e funções que os contadores de energia tradicionais.
<i>Wide-area communication infrastructure</i>	Esta infraestrutura será responsável pela comunicação contínua entre o consumidor, geração e as cargas controláveis.
<i>Home area networks (HANs)</i>	Permite controlar os <i>contadores inteligentes</i> e as cargas controláveis ao nível local.
<i>Meter Data Management System (MDMS)</i>	É responsável por guardar e analisar a informação recolhida.
<i>Operational Gateways</i>	Esta componente AMI permite o relacionamento entre o consumidor a aplicações exteriores ao sistema.

O conceito de REI é aplicado em diversos projetos a nível mundial. A nível europeu, os projetos no âmbito das REI estão a ser testados e analisados com vista à sua ampla aplicação [SGP14]. A implementação de contadores inteligentes é um ponto comum aos países que estão envolvidos em projetos de REI.

Em Portugal, através da EDP, o projeto InovGrid substituiu os contadores de energia elétrica tradicionais pelas *energy boxes*, ou contadores inteligentes. Este projeto permitiu a instalação dos *Distributed Transformer Controller*, com o objetivo de gerir a informação enviada pelas *energy boxes*.

Em Espanha, a Iberdrola Distribución lançou o projeto Star, que visa a instalação de contadores inteligentes com o objetivo de criação de um sistema de *Advanced Metering Management*, que permite a gestão da informação dos contadores inteligentes.

Em França, a Electricité Réseau Distribution France intentou a instalação de 300 mil contadores inteligentes, até 2011, com vista à criação um sistema de *Advanced Metering Management*.

Fora da Europa, também existe a implementação de vários projetos piloto. Em [SGIC14] é referida a existência de projetos sobre REI a nível mundial.

1.3 Motivação

Na última década tem sido verificado um aumento da consciência ambiental e tem sido notória a responsabilidade das indústrias energéticas no sentido de minimizar as alterações ambientais. Consequentemente os níveis de produção recorrendo a fontes de energia renováveis tem aumentado [MacDonald09].

Por outro lado, o crescimento incessante da consciência energética e ambiental conduz à procura de uma rede elétrica segura e estável, de elevada qualidade e fiabilidade no serviço prestado aos consumidores e neste sentido, a REI tem sido um objetivo comum no desenvolvimento da energia elétrica a nível global [Xin-Wei10].

As redes de energia elétrica foram concebidas para transportar e distribuir energia e atualmente apresentam dificuldades na capacidade de resposta, causadas pelo aumento da procura de eletricidade, devido a eletrodomésticos cada vez mais potentes e pela crescente inclusão de veículos elétricos [EDP09]. A manutenção da estabilidade da rede representa atualmente um desafio, devido às constantes oscilações entre a oferta e a procura de energia elétrica e sobretudo devido à grande concentração de procura em períodos específicos [EDP09], bem como devido à crescente penetração de produção de origem renovável na REE [Melício10]. Com o aprofundamento das reformas orientadas para os mercados, nomeadamente a liberalização do mercado e a organização do próprio setor e das suas atividades e o desenvolvimento de uma economia digital, os recursos disponíveis a nível mundial, bem como os problemas ambientais têm sido uma preocupação generalizada, sendo as exigências de regulação ambiental cada vez

mais rigorosas [Wei09]. A nível nacional, o PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética e o PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis concretizam cumprimento dos objetivos nacionais e europeus no que diz respeito ao aumento da eficiência energética e redução do consumo energético, bem como o aumento da produção de origem renovável [ADENE14]

As REI apresentam soluções para estes novos desafios e exigências de regulamentação. São redes bidirecionais que potenciam a utilização de todos os recursos energéticos e um tratamento da informação relativa do trânsito de energia, passando a permitir a gestão da rede em tempo real, potenciando a otimização dos fluxos de energia elétrica [EDP09].

Em 2007 o conceito de REI foi descrito através das seguintes características: os consumidores finais serão significativamente mais interativos com os mercados e as redes; a eletricidade será produzida por fontes centralizadas e dispersas; e os sistemas existentes na rede serão mais interoperáveis a um nível europeu acrescentando segurança e melhorando o custo real [Chebbo07].

Atualmente a gestão ativa da rede para a geração, armazenamento e transporte é uma das bases do conceito de REI, onde a ação dos agentes ligados ao sistema elétrico, geradores e consumidores, podem ser inteligentemente integrados no sentido de obter um sistema de abastecimento elétrico sustentável, eficiente e seguro [Blanquet09].

A REI permite uma interação apropriada entre aplicações do lado do consumidor e da REE que o abastece a nível local, quer regional quer nacional. Torna possível agendar as ações do consumidor, permitindo usufruir do preço da energia em tempo real ou permitir a obtenção de uma resposta à procura em relação às necessidades locais ou regionais [Davis10]. A REI possibilita ainda o melhoramento da globalidade da rede elétrica através das implementações científicas e tecnológicas que têm vindo a ser desenvolvidas, ao nível da geração,

transmissão, distribuição e fornecimento de energia [Xin-Wei10]. Contribui ainda para sistemas elétricos mais seguros, com maior proteção ambiental, mais económicos e que permitem racionalizar a utilização da energia [Xin-Wei10].

As REI são baseadas na tecnologia digital que vem acrescentar capacidade de comunicação e de controlo que conduz a uma otimização da operação de toda a REE. Por outro lado, as REI permitem tirar partido de novas tecnologias tais como, ligação de veículos elétricos híbridos, várias formas de geração distribuída, energia solar e eólica, medição inteligente, gestão de sistemas de iluminação, distribuição e automação, entre outras [Wei09]. A REI requer, portanto, que a rede elétrica seja compatível com o modelo de geração centralizado e distribuído e auxilia o acesso à geração a partir de fontes de energias renováveis e a dispositivos de armazenamento de energia elétrica [Xin-Wei10].

A REI será portanto interativa, para ambos os lados, da produção e do consumo. Em 2020 as companhias elétricas vão permitir aos consumidores, o acesso ao fornecimento de energia elétrica bem como a capacidade de gestão da procura [Smartgrids10]. A gestão do abastecimento local vai ser uma parte importante no estabelecimento de novos serviços, os quais vão criar mais-valias para as partes envolvidas. Nomeadamente, a geração a partir de fontes de energia renováveis, a redução de custos com centrais destinadas a cobrir picos de consumo, a disponibilização planos de redução de preços ao consumidor e a promoção da liberalização do setor elétrico. Os novos serviços que envolvem os consumidores são suportados pela medição inteligente, tecnologias de controlo eletrónico, meios de comunicação modernos e pela crescente consciência dos consumidores [Smartgrids10].

No contexto das REI, os serviços de medição vão representar a porta de entrada para o acesso à rede elétrica do futuro e vão ter uma consequência crítica na evolução da procura energética. Por esta razão os equipamentos de medição

eletrônicos, a gestão automatizada de sistemas de medição e telecomunicações, associadas com outros sistemas de comunicação bem como as infraestruturas associadas, constituem as tecnologias que permitem essa interatividade. Tecnologias de informação e comunicação (TIC) associadas ao processo de integração, vão ser ferramentas de grande valor na gestão em tempo real dos produtores, redes, equipamentos de medição, consumidores e sistemas associados [Smartgrids10].

A principal característica das REI é nomeadamente, a utilização bidirecional da rede de distribuição de energia, permitindo conhecer em qualquer momento o que está a acontecer [Wei09].

O contador inteligente é considerado um elemento relevante na REI uma vez que, sendo instalado em casa do consumidor, permite o cálculo do consumo instantâneo de energia elétrica [Wei09].

Face ao exposto, tendo em consideração o enquadramento apresentado e os estudos realizados no âmbito das REI, pode ser considerada a divisão em três grupos [Power08]:

- Geração inteligente;
- Rede elétrica inteligente;
- Consumidor inteligente.

De forma sucinta é possível afirmar que a coordenação da geração distribuída é essencial à gestão energética das redes e neste sentido estudos recentes apresentam os sistemas de múltiplos agentes aplicados às redes de energia, no qual todos os agentes envolvidos têm funções e objetivos distintos e são inteligentes na medida em que se coordenam para garantir uma operação da rede de energia em segurança.

As REI, devem por isso considerar os desenvolvimentos tecnológicos associados à geração inteligente bem como ao consumidor inteligente [Power08] e

consequentemente às *interfaces* entre geração-rede e consumidor-rede, existentes nesse modelo.

Esta tese está enquadrada no âmbito da investigação do projeto nacional InovGrid, projeto piloto de REI, cuja localização principal é o município de Évora [InovGrid10], visando contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta que possibilita ao utilizador de energia elétrica tirar partido dos benefícios da REI, quantificar o nível de produção descentralizada e estudar a REE, consubstanciando o estudo da perspectiva da evolução da REI.

As seguintes considerações foram adotadas ao longo desta tese: é considerado para o estudo do problema de despacho económico e para o desenvolvimento do modelo de *demand response* um utilizador de energia elétrica residencial com uma potência instalada de 6.9 kVA. Para a implementação da rede elétrica inteligente foi utilizada uma implementação laboratorial e para a validação do modelo de controlo preditivo desenvolvido foi considerada uma sala de conferências de um edifício.

1.4 Estado da Arte

Neste subcapítulo é apresentada a contextualização científica internacional relativamente aos domínios das REI, que são desenvolvidos nesta tese, nomeadamente: Modelo do produtor-consumidor e despacho económico; Modelo de resposta à procura (*Demand Response*); Aplicações inteligentes para gestão da procura.

Porque os domínios referidos são vastos, esta contextualização geral é posteriormente detalhada e enquadrada no âmbito da introdução referente ao desenvolvimento apresentado para cada um dos domínios das REI patentes nesta tese.

1.4.1 Modelo do Produtor-Consumidor

Em [Vale10] são apresentados algoritmos genéticos e modelos de otimização por exame de partículas para aplicação no problema de otimização do despacho económico, considerando as fontes de energia disponíveis numa VPP. A lógica *fuzzy* é utilizada para prever a potência de geração e de carga. Para o caso de estudo apresentado, a resolução do problema de despacho económico utilizando programação linear inteira mista é aquela apresenta melhores resultados.

Em [Shi11], para a resolução do problema de despacho económico, primeiro é modelizada a correlação estocástica da procura, sendo posteriormente integrada no modelo de despacho económico, constituindo um modelo estocástico que inclui restrições de contingência da REI.

Em [Arif13] é apresentada a gestão de cargas de um consumidor residencial considerando uma abordagem baseada em algoritmos genéticos, que combina a resolução do problema de despacho económico com técnicas de gestão do lado da procura. O problema de despacho económico pretende a redução de custos de acordo com a procura existente e a gestão do lado da procura pretende a redução de custos através de realização de ações de DR.

Em [Sun13] é apresentado o modelo de despacho económico considerando a variação da potência da carga com o preço da energia elétrica. O modelo do *prosumer* considera uma agregação do modelo de despacho económico do produtor e do consumidor. Para a resolução do problema são utilizados os multiplicadores de Lagrange.

Em [Lazzerini14] o problema de despacho económico em micro-redes elétricas inteligentes é resolvido com recurso a redes neuronais artificiais. Para a resolução do problema de despacho económico são considerados quatro objetivos: o custo da energia elétrica, a distância a que se encontra a fonte de energia, o balanço da carga e o impacte ambiental. A rede neuronal artificial é

treinada para aprender a importância relativa entre os quatro objetivos considerados.

Em [del Real14] é apresentado um modelo de despacho económico que inclui a minimização dos custos de produção e a redução das emissões. O modelo utilizado é baseado em controlo preditivo. São considerados sub-modelos de despacho económico da REE a nível local que partilham informação entre si.

Em [Kellerer14] o problema de despacho económico é resolvido com recurso a grafos. A diferença entre o consumo e o custo de produção é maximizado. São utilizados modelos gráficos probabilísticos, que consistem no desenvolvimento de algoritmo para cálculo das probabilidades marginais. O algoritmo recorre a uma topologia de rede radial por forma a ser possível decompor o problema de despacho económico em partes que são computadas separadamente.

1.4.2 Modelo de Resposta à Procura

Em [Ferreira12], a gestão da procura subentende a identificação e implementação de iniciativas que permitem melhorar utilização da capacidade instalada pelo operador da REE, através de alterações nas características da procura de energia elétrica.

Em [Delgado85] a gestão da procura está associada ao planeamento e implementação de atividades dos operadores da REE, que permite influenciar o consumidor para a alteração do diagrama de consumo.

Em [Darbur12] a gestão da procura representa os comportamentos dos consumidores e operadores da REE que promovem a alteração da quantidade ou da duração do consumo de energia elétrica.

Em [Torriti10] a DR representa um conjunto de ações que podem ser adotadas pelo consumidor em resposta a condições específicas do sistema elétrico, nomeadamente, períodos de pico, congestionamento da rede ou preços elevados.

Em [Stromback10] a DR é qualquer programa que permita ou incentive o consumidor para a diminuição ou alteração das horas de consumo de energia, evitando o consumo durante as horas em que o preço da energia é mais elevado.

Em [Goel06] o modelo de DR considera a interação do preço da energia elétrica com a procura. A modelização inclui matrizes de elasticidade própria e de elasticidade cruzada. Para a modelização dos preços nodais é utilizado o modelo de trânsito de potência otimizado com recurso ao método de Newton, apresentado o efeito da DR nos preços nodais. Esta metodologia tem como resultado uma redução da volatilidade dos preços e uma aumento da fiabilidade dos preços nodais em sistemas com produção descentralizada.

Em [Albadi08] é apresentado o desenvolvimento de um código de trânsito de potência em *software* GAMS, em que a função objetivo corresponde à minimização do custo total de produção para uma maximização do bem-estar social. Considera dois tipos de formulação de preços de energia elétrica em mercado. É considerada a elasticidade da carga e a variação da carga foi modelizada com recurso a uma fator de escala de potência. O estudo apresentado inclui a análise de uma contingência resultante do corte de uma linha de transmissão de energia elétrica.

Em [Chen12] o modelo de DR é interpretado como um consumo que é incluído no modelo de despacho económico. Incorpora o bem-estar numa função determinada de acordo com a minimização do desconforto do utilizador de energia elétrica. É utilizado um algoritmo heurístico para resolução do problema de programação dinâmica, onde são avaliadas se as decisões do utilizador de energia elétrica são cumpridas e se maximizam a função de bem-estar.

Em [Venkatesan12] a modelização comportamental do consumidor é obtida através de matrizes de elasticidade da procura em relação ao preço de energia elétrica. São apresentados modelos de elasticidade para diferentes tipos de consumidores e é avaliado o impacto dos modelos determinados na tensão e nas perdas do sistema de energia elétrica.

Em [Setlhaolo14] é apresentado um modelo de otimização para determinar o agendamento do equipamento elétrico existente numa residência. Para a resolução do problema de otimização é considerada a minimização de custos associada à existência de incentivos ao consumidor. É tido em consideração o nível de inconveniência de utilização das cargas pelo consumidor. É entendido como nível de inconveniência a medida da disparidade entre o agendamento de base e o agendamento ótimo das cargas.

Em [Song14] é apresentado um modelo de simulação de previsão de cargas e de um programa de agendamento de equipamentos elétricos numa residência. É considerado que a residência dispõe de meios técnicos para realizar a coordenação das ações de DR com a eficiência energética. Para a simulação das curvas de carga sujeitas ao programa de DR foi utilizado um modelo baseado em cadeias de Markov.

Em [Shi14] é apresentada a formulação do modelo de DR ao nível residencial, como um problema de trânsito de potência sendo proposta a existência de comunicação entre uma entidade que efetua a gestão das cargas e a residência, para permitir o agendamento ótimo da procura. O problema de trânsito de potência é não convexo devido às restrições consideradas e por forma a permitir uma resolução mais fácil é realizada uma relaxação. Esta relaxação, corresponde genericamente à transformação de uma REE malhada numa rede radial.

1.4.3 Aplicações Inteligentes para Gestão da Procura

Em [Vukmirovic10] é apresentada uma estrutura de implementação de contadores inteligentes baseada em infraestruturas AMI. As medições obtidas através de AMI são consideradas importantes para a gestão de outros sistemas, nomeadamente no sistema de gestão de interrupções, sistemas de gestão de utilizadores e sistemas de gestão de distribuição. Os contadores inteligentes comunicam via *wireless* com concentradores de dados que utilizam uma interface de comunicação com um sistema de *Master Data Management* que está interligado a um centro de controlo através de *Enterprise Service Bus*.

Em [Benzi11] são apresentadas várias interfaces possíveis entre o contador inteligente e a residência, projetando as redes de comunicação, equipamentos específicos e protocolos adequados aos utilizadores de energia elétrica. Como solução para implementação do sistema são apresentadas as seguintes opções de comunicação entre o contador inteligente e a residência: existência de uma linha de comunicação dedicada; existência de uma ligação *wireless*, comunicação através da linha de transporte de energia elétrica e comunicação baseada na *internet*.

Em [Depuru11] as tecnologias de comunicação são consideradas essenciais para o cumprimento de requisitos de comunicação exigentes entre os contadores inteligentes, a empresa distribuidora de energia elétrica e os equipamentos elétricos existentes numa residência. Os requisitos de comunicação são exigentes porque os dados de comunicação são sensíveis, confidenciais e o acesso deve ser restrito. As tecnologias de comunicação referidas são: *Bluetooth* para a comunicação dos dados referentes aos contadores inteligentes, *Power Line Carrier* e *Broadband Power Line* para a transferência de dados a um nível de comunicação superior, nomeadamente, TCP/IP. Considera como tecnologia mais utilizada a *Power Line Carrier* uma vez que é bastante eficiente para automação de dados nas aplicações nos contadores inteligentes. Para a comunicação dos

contadores inteligentes é referida uma rede ZigBee *ponto-a-ponto*, que permite a comunicação com HAN. A tecnologia GPRS é referida para a transferência de dados e de sinais de controlo via *wireless* e a longas distâncias. É referido que os contadores inteligentes permitem melhorar a operação dos sistemas SCADA.

Em [Vale13] os sistemas SCADA são considerados vitais para o desenvolvimento da REI, sobretudo devido à produção descentralizada. É considerado que os sistemas SCADA devem suportar ações e decisões descentralizadas incorporando o comportamento de agentes que incluem fontes de energia, consumidores, equipamentos inteligentes, controlo e redes de comunicação.

Em [Usman13] é afirmado que a rápida evolução das REI se deve à melhoria verificada nas tecnologias de comunicação. A tecnologia *Power Line Carrier* é referida como sendo a mais utilizada. Associadas a *Narrowband Power Line Carrier* são referidas as tecnologias: LonWorks, KNX, BUS, CEBUS, DLMS. Associadas a *Broadband Power Line Carrier* são referidas as tecnologias: IEEE 1901, HomePlug 1.0, HD- *Power Line Carrier*. Em comparação com a *Broadband Power Line Carrier* a *Narrowband Power Line Carrier* é considerada mais adequada às REI por permitir aplicações de AMI; a *Broadband Power Line Carrier* mais adequada a aplicações de *internet* associadas às REI. O protocolo de comunicação ZigBee é utilizado no desenvolvimento da HAN para monitorização e utilização inteligente da energia elétrica ao nível do consumidor. O protocolo ZigBee é referido como tecnologia de comunicação utilizada nos contadores inteligentes e em equipamentos elétricos inteligentes. No âmbito das comunicações *wireless* as tecnologias Wi-Fi e WLAN são consideradas as mais utilizadas. No âmbito da segurança das REI e em aplicações *point-to-multipoint*, é considerada a tecnologia *World Wide Interoperability for Microwave Access* como sendo a mais utilizada. É referido que a comunicação *Global System for Mobile* (GSM) e GPRS, tem várias aplicações em ambiente HAN,

nomeadamente na monitorização e controlo de cargas. Apresenta a rede DASH7 como uma alternativa à aplicação do protocolo ZigBee em REI.

1.5 Caraterização Global da Tese

1.5.1 Objetivos

Conforme anteriormente argumentado, as REI abordam uma multiplicidade imensa de temas, tecnologias e metodologias. Este trabalho aborda o consumo inteligente no âmbito das REI.

Ainda no âmbito do consumo inteligente foram definidos três objetivos específicos para a abordagem científica neste trabalho.

1. Modelizar o produtor-consumidor apresentando a resolução do problema de despacho económico e o resultado da previsão da produção e consumo com recurso a redes neuronais artificiais;
2. Desenvolver uma ferramenta computacional de apoio à resposta da procura baseada no algoritmo de *fuzzy clustering* subtrativo;
3. Desenvolver aplicações inteligentes para a gestão da procura.

1.5.2 Contribuições Científicas

As contribuições da tese podem ser agrupadas em três grandes áreas: modelização do produtor-consumidor; modelização da resposta à procura; e implementação da REI.

Em relação à modelização do produtor-consumidor, as contribuições são:

- Adequação do modelo apresentado em [Sun13] utilizando modelos de previsão de radiação solar e de consumo recorrendo a redes neuronais artificiais [Pereira15b];
- Resolução do problema de despacho económico considerando a existência de sazonalidade e diferentes limites orçamentais para horizontes temporais distintos [Pereira15b];
- Determinação do trânsito de potência e análise do impacte na REE de uma VPP [Pereira15b].

Em relação à modelização da resposta à procura, as contribuições são:

- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional baseada em sistemas inteligentes, para apoiar as decisões do consumidor na gestão de cargas [Pereira15c];
- Desenvolvimento de técnica de padronização de consumos baseada na definição de perfis de consumo e de modos de operação para consumidores domésticos [Pereira15c].

Em relação à implementação da REI, as contribuições são:

- Desenvolvimento de uma arquitetura de comunicação de suporte à instalação de contadores inteligentes [Pereira15];
- Desenvolvimento da estratégia de controlo e supervisão baseada no sistema SCADA [Pereira15];
- Desenvolvimento de interface de comunicação entre o contador inteligente e o produtor-consumidor e de aplicações SCADA [Pereira15];

1.5.3 Estrutura

É pretendido que a escrita deste trabalho contribua para uma fácil interpretação por parte do leitor e que a sequência do trabalho apresentado seja lógica e esteja

em linha com os objetivos apresentados. Desta intenção resultou a organização do texto em cinco capítulos.

No Capítulo 1 é ainda apresentada a notação utilizada ao longo da dissertação, bem como o estado da arte, cujo objetivo consiste na apresentação dos desenvolvimentos científicos no âmbito das REI, nomeadamente no domínio rede elétrica, da geração inteligente e do consumidor inteligente. É apresentado o estado da arte dos serviços e tecnologias da REI. É apresentada uma caracterização dos intervenientes da REE, nomeadamente dos produtores, consumidores, consumidores-produtores, operadores e reguladores.

No Capítulo 2 é apresentado o modelo de despacho económico do produtor-consumidor do tipo doméstico. A produção é solar fotovoltaica e é considerada a inexistência de dispositivos de armazenamento de energia elétrica. A resolução do problema de despacho económico inclui a sensibilidade da variação do preço da energia elétrica em relação à procura, sendo a solução obtida com recurso ao *software* GAMS. É apresentada a previsão da produção e do consumo do produtor-consumidor com recurso às redes neuronais artificiais. Os resultados da previsão fornecem os dados de potência produzida e/ou consumida, necessários para a resolução do problema de despacho económico. O comportamento do produtor-consumidor é analisado em quatro casos de estudo considerando um horizonte temporal diário e mensal, incluindo ainda o fator de sazonalidade ao estudo apresentado. São analisados quatro a cinco cenários em cada caso de estudo considerado. É apresentada a análise do trânsito de energia considerando o agrupamento dos produtores-consumidores em comunidades. São apresentados três cenários distintos, simulados com recurso ao *software* PSS/E.

No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do modelo de *demand response* enquanto ferramenta que suporta as ações do consumidor doméstico na gestão das cargas consideradas controláveis. É apresentada uma descrição sucinta dos programas de *demand response* que existem atualmente por forma a enquadrar o

modelo de *demand response* desenvolvido. No modelo são consideradas as necessidades de consumo, preferência de consumo e os possíveis benefícios económicos que advêm da gestão das cargas controláveis pelo consumidor. Por forma a permitir uma padronização do consumo, bem como a abrangência da aplicação do modelo a consumidores domésticos, o modelo desenvolvido é baseado em técnicas de *fuzzy clustering* subtrativo. São analisados diversos cenários onde se considera a potência disponível, o preço da energia elétrica e a potência de consumo das cargas controláveis. É analisada a influência da introdução do veículo elétrico no modelo de *demand response* e é ainda analisado um cenário referente à existência de uma contingência na REE resultante de um decréscimo da potência disponível. Por fim é analisado o impacto do modelo de *demand response* na REE.

No Capítulo 4 é apresentada a implementação da rede elétrica inteligente. São caracterizados os contadores inteligentes afetos ao *prosumer* e ao distribuidor de energia elétrica, apresentando o seu enquadramento no projeto EDP-InovGrid. É apresentada arquitetura de controlo e supervisão com dois níveis, denominados nível de controlo e nível interativo. É desenvolvido e apresentado o modelo de controlo preditivo no âmbito de uma aplicação de controlo de temperatura de uma divisão de um edifício. É apresentada a implementação dos dois controladores inteligentes num processo constituído pelo sistema de controlo e supervisão, sistema de comunicação e atuadores.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões globais do trabalho, as perspetivas futuras de investigação e as publicações científicas referentes a este trabalho de investigação.

1.5.4 Notação e estrangeirismos

Em cada um dos capítulos desta dissertação é utilizada a notação mais usual na literatura especializada, harmonizando, sempre que possível, aspetos comuns a todos os capítulos. Contudo, quando necessário, em cada um dos capítulos é utilizada uma notação apropriada. As expressões matemáticas, figuras e tabelas são identificadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas de forma sequencial no capítulo respetivo, sendo a numeração reiniciada quando se transita para o capítulo seguinte. A identificação de expressões matemáticas é efetuada através de parênteses curvos () e a identificação de referências bibliográficas é efetuada através de parênteses retos [].

Ao longo desta dissertação são utilizados alguns estrangeirismos fundamentalmente por dois motivos. O primeiro diz respeito a palavras que ainda não se encontram, segundo os conhecimentos da autora, definidas na língua portuguesa ou a sua tradução não é consensual, e o segundo diz respeito a palavras em que a mera tradução linguística faz perder todo o significado técnico atribuído às mesmas no original.

O caso da palavra *fuzzy* está enquadrado nesta segunda situação, em que a tradução linguística, para difuso, não é aplicada cientificamente por perder algum significado face à palavra original. A utilização de palavras inglesas como *software*, já há algum tempo se generalizou, não sendo por esse motivo traduzidas. Também no meio técnico científico restrito da engenharia são utilizadas frequentemente palavras inglesas, as quais representam conceitos largamente difundidos, motivo pelo qual não se traduzem neste trabalho, como são, por exemplo, os casos das palavras *clustering*, *demand response* e *demand side management*.

Todos os estrangeirismos, referidos ao longo deste trabalho, estão assinalados em itálico.

1.6 Conclusões

A REE é o principal agente para a implementação da REI, uma vez que é responsável pelo trânsito de energia que possibilita ao consumidor utilizar a energia elétrica disponibilizada pelos geradores e será também a responsável pela interação entre todas as entidades da REE, desde a geração ao consumidor, através da comunicação bidirecional. De acordo a bibliografia consultada é consensual que o sistema de gestão da rede tenderá a evoluir do sistema atual de gestão de energia elétrica para o sistema VPP permitindo aumentar o controlo sobre o trânsito de energia para assegurar a integração da geração distribuída de forma eficaz. O sistema VPP irá contribuir para a implementação de programas e serviços, nomeadamente a DR, uma vez que possibilita determinar que geração é admissível e em que locais, de acordo com o estado da rede.

A REI potencia o aumento da geração partir de fontes de energia renovável associadas à produção descentralizada. Este tipo de produção apesar de estar alocada perto dos centros de consumo tem um carater intrinsecamente intermitente.

O consumidor, enquanto elemento integrante da REI assume um papel ativo na gestão da rede, por exemplo, através dos programas de DR e do seu desempenho enquanto *prosumer*.

Os operadores são uma entidade importante na REE na medida em que contribuem para o conforme funcionamento da REE potenciando a sua eficiência e a inclusão da produção descentralizada.

A entidade reguladora da rede elétrica define as políticas que conduzem a uma adequada operação da REE, contribuindo para a aproximação dos seus diversos intervenientes.

CAPÍTULO

2

Modelização do Produtor-Consumidor

Neste capítulo é apresentado um modelo do produtor-consumidor e a correspondente análise comportamental baseada em cenários. É apresentada a resolução do problema de despacho económico para os casos de estudo, sendo incluída a informação proveniente da previsão de produção solar fotovoltaica e a previsão de consumo obtida a partir de redes neuronais artificiais. É apresentada a análise do trânsito de energia considerando o agrupamento de produtores-consumidores em comunidades.

2.1 Introdução

Para a modelização do *prosumer* importa definir o tipo de consumidor considerado, a disponibilidade de dados referentes à produção e ao consumo, os limites de estudo e as hipóteses e limitações consideradas [Lampropoulos10].

No âmbito desta tese são considerados os consumidores domésticos, que são simultaneamente produtores de energia solar fotovoltaica, sendo abordadas as características da interação entre os *prosumers* e a REI. Uma descrição do comportamento dos *prosumers* e da sua interação com a REI, está representada na Figura 2.1, sendo seguidamente apresentada uma breve descrição dos fatores intervenientes nesta caracterização.

A descrição comportamental dos *prosumers*, é apresentada em [Lampropoulos10] e dada a heterogeneidade do comportamento de indivíduos, foi caracterizada em três domínios; o domínio pessoal, comportamental e contextual, descritos na seção caracterização dos produtores-consumidores, no subcapítulo 1.2 desta tese. O estabelecimento de grupos de *prosumers* é considerada fundamental para uma eficiente alocação de custos de produção, transmissão e de distribuição de energia elétrica [Chen00], sendo que para a definição dos grupos de *prosumers* é importante considerar a similaridade do padrão de consumo e a proximidade geográfica [Chen00].

As diretivas e a regulação existentes permitem influenciar o comportamento dos indivíduos, através de intervenções baseadas em informações, ações educativas, apoios institucionais ou incentivos que podem ser financeiros ou não. Genericamente os consumidores não possuem o mesmo nível de consciencialização tecnológica, o mesmo nível de conhecimento, ou as mesmas motivações que os produtores de energia elétrica, pelo que as intervenções realizadas têm por objetivo minimizar estas características diferenciadoras. Acresce o fato de que a heterogeneidade dos consumidores dificulta a sua análise

individualizada, razão pela qual é relevante agrupar os consumidores de acordo com alguns critérios, nomeadamente os de domínio pessoal, comportamental e contextual, por forma a permitir a análise da interação dos *prosumers* com a REE [Lampropoulos10].

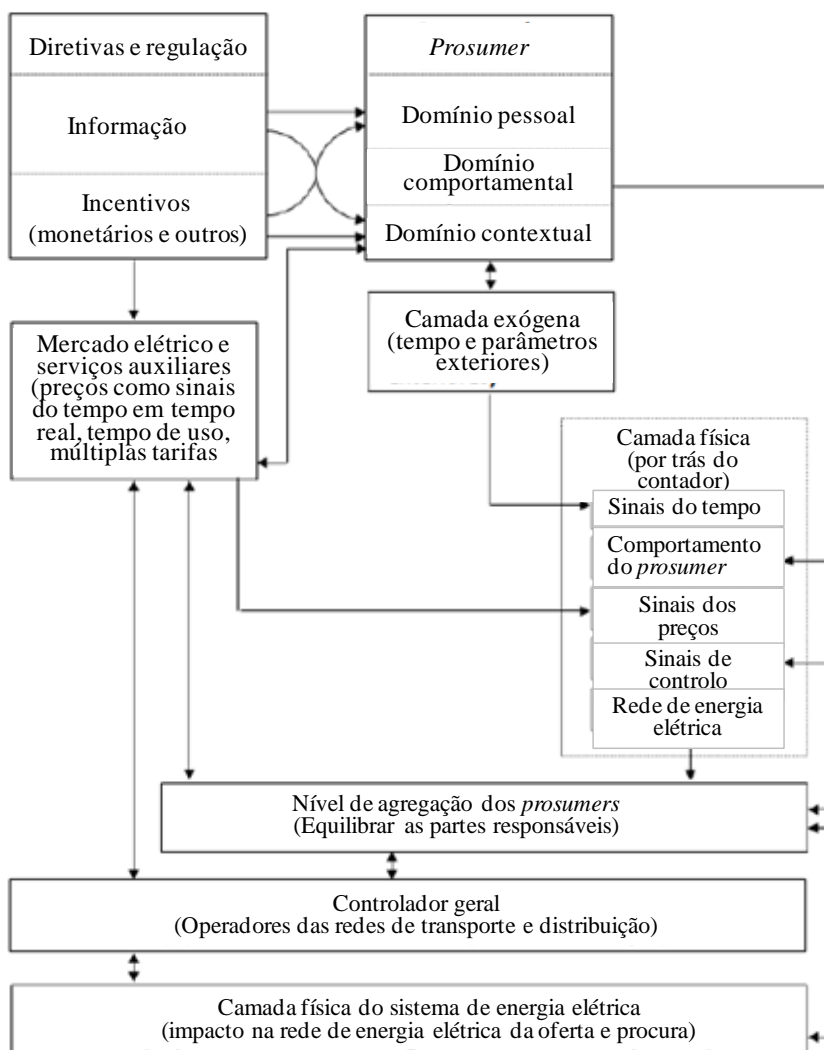


Figura 2.1 – Comportamento dos *prosumers* e a sua interação com a REE [Lampropoulos10].

O mercado de energia elétrica e serviços auxiliares representa a interação entre o utilizador de energia elétrica e os mercados através de quaisquer acordos comerciais, nomeadamente através de contratos bilaterais [Lampropoulos10].

A utilização dos sinais dos preços em tempo real, associada a tarifas com vários níveis e associada ao tempo de utilização da energia elétrica em períodos específicos de ponta, cheia e vazio, contribui para melhorar o modelo de mercado de energia elétrica e facilitar a sua interação com o *prosumer* [Lampropoulos10].

A camada exógena representa as condições meteorológicas e outras condicionantes externas [Lampropoulos10], nomeadamente capacidade de produção instalada, tipologia da produção, existência ou não de armazenamento de energia, as quais influenciam o comportamento do *prosumer* e a sua interação com a REI.

O nível de agregação dos *prosumers* é condicionado por restrições espaciais e temporais, pelo operador da rede e pela REI [Lampropoulos10]. As restrições espaciais dependem dos critérios geográficos escolhidos para a agregação dos *prosumers* e as restrições temporais dependem do número de *prosumers* existentes aquando da constituição da agregação. O equilíbrio entre as partes envolvidas é obtido através da ação mediadora do agregador entre as empresas concessionárias de energia elétrica e os consumidores finais, permitindo a inclusão controlada de grandes quantidades de produção descentralizada na REE [Lampropoulos10].

O controlador centralizado é constituído pelos operadores das redes de transporte e de distribuição de energia elétrica. A camada física dos sistema de energia elétrica representa o impacte da produção e do consumo na REE .

A camada física por trás do contador engloba os sinais meteorológicos, o comportamento do consumidor, os sinais dos preços, os sinais de controlo e a potência da rede. Uma descrição detalhada desta camada física está representada na Figura 2.2.

A interface do dispositivo permite a interação do *prosumer* com a entidade fornecedora de energia elétrica através dos serviços que esta entidade

disponibiliza. Nomeadamente, a informação do consumo em tempo real e a possibilidade de gestão das cargas através da sua colocação e/ou retirada de serviço. A classificação dos requisitos e das restrições dos utilizadores é condicionada pelo comportamento dos *prosumers*. Os dispositivos de interface incluem para além do contador, a fonte de energia, nomeadamente, a solar fotovoltaica e as cargas que podem ser geridas pelo *prosumer*. As saídas dos dispositivos referentes às fontes de energia e às cargas dependem de entradas definidas pelos requisitos dos *prosumers*, de sinais meteorológicos e de sinais de controlo. De acordo com a Figura 2.1, os sinais de controlo dependem do nível de agregação dos *prosumers* e do impacte da produção e do consumo na REE .

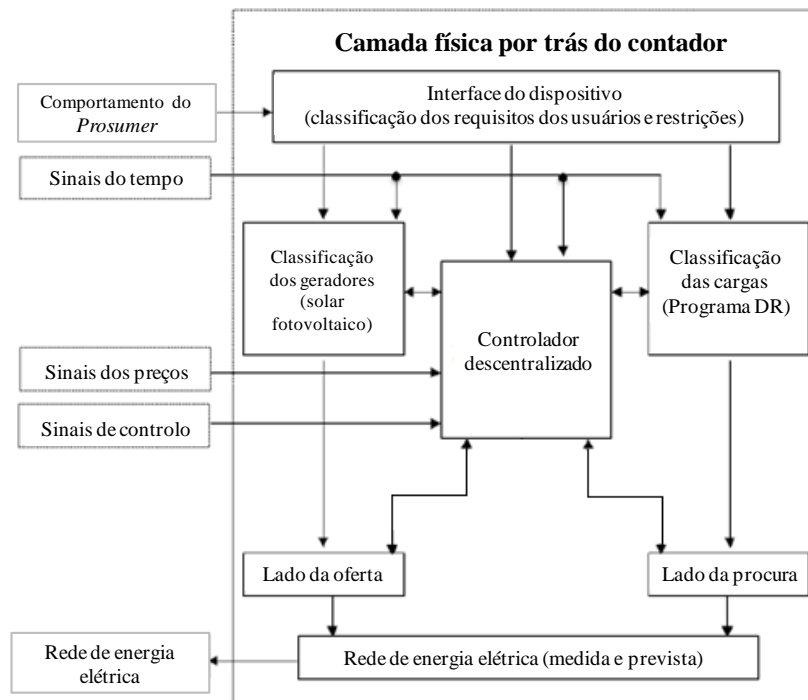


Figura 2.2 – Pormenor da camada física [Lampropoulos10].

Como saída das fontes de energia correspondentes ao lado da produção e das cargas correspondentes ao lado do consumo, é obtida a potência medida pelo

contador e a potência alocada à carga ou à geração. Sendo a potência resultante da soma da potência da produção e da carga, medidas e previstas.

A classificação das cargas pode ser diversa [Lampropoulos10], no entanto são consideradas as cargas residenciais de um consumidor doméstico, que podem ser geridas pelo utilizador. Tanto a produção como o consumo têm características sazonais e geográficas [Lampropoulos10], dependentes das variações climáticas e da duração da hora solar.

A utilização de tarifas em tempo real implica uma alteração do comportamento dos *prosumers*. O seu comportamento enquanto consumidor tem por objetivo reduzir o custo e enquanto produtor, tem por objetivo maximizar o lucro. Portanto, genericamente o *prosumer* define a melhor estratégia associada à produção e ao consumo, de acordo com os preços da energia elétrica e com a existência ou não de capacidade de armazenamento.

No entanto, devido ao caráter intermitente das fontes de energia renováveis não é fácil incluir os *prosumers* no mercado de energia elétrica, uma vez que dificilmente se tornam fornecedores de energia regulares e fiáveis para os consumidores [Rathanayaka14]. Para além disso, não menos importante é o facto dos *prosumers* não serem detentores de poder negocial devido às pequenas quantidades de energia vendida.

A criação de grupos de *prosumers* permite um aumento coletivo da energia produzida possibilitando a venda de energia em mercado. O agrupamento de *prosumers* permite a criação de micro redes ou de VPP. As micro redes caracterizam um agrupamento localizado de *prosumers* e são de menor dimensão que as VPP. As VPP envolvem um maior número de *prosumers* e estão mais direcionadas para a localidade onde se inserem e operam [Rathanayaka14]. A inserção de grupos simples de *prosumers* e de comunidades de *prosumers* na REE está representada na Figura 2.3.

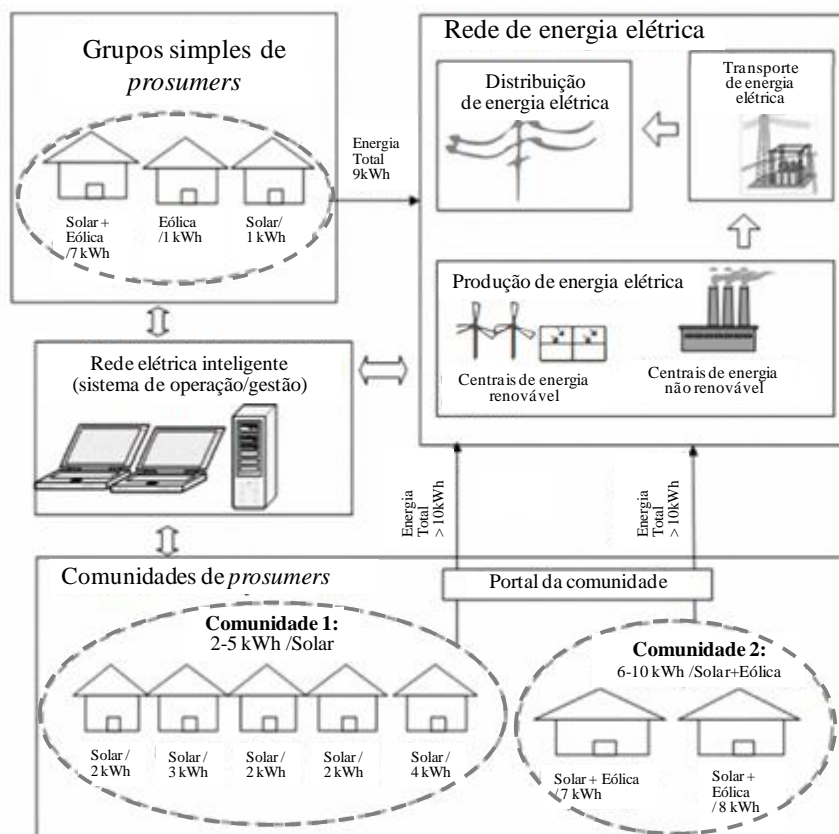


Figura 2.3 – Esquema de interligação dos *prosumers* com a REE [Rathanayaka14].

Os grupos simples são formados pela agregação de *prosumers* em rede e permitem aumentar a quantidade de energia vendida à REE. Estes grupos não são formados com o objetivo de cumprir um limite mínimo de produção pelo que podem falhar no cumprimento do valor mínimo necessário de energia produzida para fornecer à rede. Podem englobar *prosumers* da mesma localização geográfica, mas com características distintas, nomeadamente, com fontes de energia distintas ou com diferentes quantidades de energia fornecida à rede [Rathanayaka14]. As VPP são formadas pela agregação de *prosumers* com comportamentos semelhantes independentemente da sua localização geográfica. Por exemplo, *prosumers* que utilizam o mesmo tipo de fonte de energia, ou que produzam um determinada quantidade de energia fiável num determinado intervalo de tempo para fornecer à REE, pertencem à mesma VPP. As VPP têm

por objetivo o cumprimento de uma quantidade mínima de energia produzida, solicitada para obtenção de poder de negociação no mercado de energia elétrica [Rathanayaka14].

Os grupos simples de *prosumers* ou as comunidades de *prosumers* interagem com a REE ou com a entidade distribuidora de energia elétrica, através do portal da comunidade. O portal da comunidade atua como intermediário que promove a interligação entre a REI e a produção descentralizada referente à comunidade [Rathanayaka14]. O sistema de operação de gestão promove a interligação entre as comunidades e grupos de *prosumers* com a REE, i.e., promove a interligação entre a produção descentralizada e a produção de energia elétrica provinda de grandes centros de produção.

Nesta tese é apresentado um modelo para obtenção da solução do problema de despacho económico de um *prosumer* do tipo doméstico em que a produção é obtida a partir de um sistema solar fotovoltaico com uma potência instalada de 5 kW, definida com base nas soluções disponíveis no mercado [EDP14]. O consumo é referente à carga residencial de consumidor doméstico com uma potência contratada de 6.9 kVA e que não dispõe de dispositivos de armazenamento de energia. É apresentado um estudo do trânsito de energia considerando uma VPP constituída por 30 000 *prosumers*, em que este número se baseia na quantidade e consumidores abrangidos pelo projeto EDP-InovGrid [EDP09].

Uma vez que a produção descentralizada tem características intermitentes, importa incluir a previsão da produção e do consumo do modelo utilizado para a obtenção da solução do problema de despacho económico. A previsão apresentada é obtida com recurso a redes neuronais artificiais (RNA).

2.2 Problema de Despacho Económico

O acréscimo de produção descentralizada origina um novo desafio na modelização das decisões económicas na REE, sobretudo em resultado da capacidade dos consumidores se tornarem produtores de energia. A produção pode ser utilizada para consumo próprio, para armazenamento ou venda à REE [Sun13].

Tradicionalmente os mercados de energia eléctrica são analisados por forma garantir um equilíbrio entre a oferta e a procura de energia eléctrica. A análise da procura é baseada na otimização da utilização da energia pelos consumidores. A análise da oferta é baseada na otimização do lucro dos produtores. Em resposta à falta de capacidade de armazenamento, o balanço entre a oferta e a procura deve ser equilibrado em tempo real, i.e., em cada hora a quantidade de energia produzida deve igualar a quantidade de energia consumida [Sun13].

Em contraponto com a REE tradicional, a REI torna possível que o consumidor passe a ter capacidade de produção e de armazenamento de energia e que esteja apto para a licitação em mercado de energia eléctrica. Portanto, no âmbito da REI, o modelo do problema de despacho económico deve incluir o comportamento dos *prosumers* [Sun13]. Os *prosumers* enquanto consumidores híbridos, conduzem a uma redefinição da função de utilidade, por forma a que, ao consumo seja subtraído a receita obtida a partir da sua capacidade de produção descentralizada [Gokmen12]. Em alternativa, devem ser utilizados modelos do problema de despacho económico que incluem uma dupla otimização correspondente a uma minimização de custos e a uma maximização de lucros [Sun13]. Em ambas as abordagens, o valor absoluto de cada função de utilidade não possui significado físico, é adimensional e não pode ser diretamente relacionado com a receita monetária.

O modelo de despacho económico estudado, apresenta apenas uma função de utilidade [Sun13]. Considera para a modelização do problema, a evolução dos preços da energia eléctrica face à procura, representada na Figura 2.4, onde λ representa o preço da energia eléctrica e P_l representa a potência da carga.

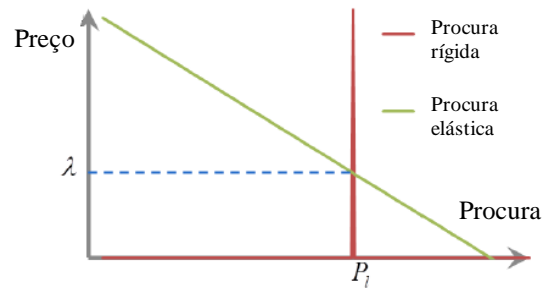


Figura 2.4 - Evolução dos preços em relação à procura de energia eléctrica [Sun13].

Considerando uma procura elástica, a sensibilidade da variação ao preço da energia em relação à procura altera a inclinação da reta, i.e., se o preço variar a carga varia e como resultado varia a taxa de inclinação.

Assumindo uma função de utilidade do consumidor dada por: um consumo definido por $\mathbf{P} \subseteq \mathfrak{R}^{n \times m}$. Para todo $\mathbf{P} \in \mathbf{P}$, seja $U(\mathbf{P}): \mathfrak{R}^{n \times m} \rightarrow \mathfrak{R}$ um índice de utilidade. Assumindo $P_l \in \mathbf{P}$ como a carga de um sistema de energia [Sun13].

Considerando os consumidores de energia com uma função de utilidade dada por $U(P_l)$, o modelo utilizado para a resolução do problema de despacho económico é dado por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max}_{P_b, P_l} U(P_l) \\
 & \text{s. a. } \lambda_b P_b \leq \bar{W} \\
 & \quad P_b = P_l
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Onde λ_b é o preço de compra da energia, P_l é a potência da carga, P_b é a potência comprada à rede e \bar{W} é o orçamento dos *prosumers*. A barra por cima da letra indica que se trata um parâmetro constante.

Considerando os produtores de energia com uma função de utilidade dada por $\pi_s(P_s)$, a qual correspondente ao lucro resultante da venda da energia, o modelo utilizado para resolução do problema de despacho económico é dado por:

$$\text{Max}_{P_s} \pi_s(P_s) = \lambda_s P_s \quad (2.2)$$

Onde λ_s é o preço de venda da energia e P_s é a potência vendida à rede.

A representação do modelo de despacho económico para o *prosumer* resulta da agregação de (2.1) e (2.2). Por forma a permitir essa agregação, (2.1) é reescrita no modelo dual, minimizando os custos dos consumidores, resultando a expressão dada por:

$$\begin{aligned} \text{Min}_{P_b, P_l} \quad & \lambda_b P_b \\ \text{s.a.} \quad & U(P_l) \geq \bar{U} \\ & P_b = P_l \end{aligned} \quad (2.3)$$

Onde \bar{U} é a utilidade mínima que o consumidor pretende alcançar. As expressões (2.1) e (2.3) são equivalentes e têm a mesma solução. A expressão (2.2) é reescrita por forma a possibilitar a sua conversão num problema de minimização, dado por:

$$\text{Min}_{P_s} -\pi_s(P_s) = -\lambda_s P_s \quad (2.4)$$

As expressões (2.2) e (2.4) são equivalentes e apresentam a mesma solução.

Da agregação de (2.3) e (2.4) resulta o modelo de despacho económico do *prosumer*, dado por:

$$\begin{aligned} \text{Min}_{P_b, P_l, P_s} \quad & \lambda_b P_b - \lambda_s P_s \\ \text{s.a.} \quad & U(P_l) \geq \bar{U} \\ & P_b + P_s = P_l + P_g \end{aligned} \quad (2.5)$$

Onde \overline{P}_g é um valor fixo da potência de geração. Por forma a garantir que o *prosumer* não compra energia a um preço baixo e a venda a um preço superior, mesmo sem produção ou consumo, é considerado que $\lambda_b \geq \lambda_s$.

O modelo (2.5) escrito na forma dual, é dado por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max}_{P_b, P_l, P_s} U(P_l) \\
 & \text{s.a. } \lambda_b P_b - \lambda_s P_s \leq \overline{W} \\
 & P_b + \overline{P}_g = P_l + P_s \\
 & P_{l \min} \leq P_l \leq P_{l \max} \\
 & P_s \leq \overline{P}_g
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Os modelos (2.5) e (2.6) são equivalentes e apresentam a mesma solução. A resolução do problema de despacho económico é obtida com recurso aos multiplicadores de Lagrange [Ito08, Jahn07].

Sejam ρ os multiplicadores de Lagrange. O modelo apresentado em (2.6) apresenta a mesma solução da maximização dada por:

$$L(U) = U(P_l) + \rho_1 (\lambda_b P_b - \lambda_s P_s - \overline{W}) + \rho_2 (P_b + \overline{P}_g - P_l - P_s) \tag{2.7}$$

Onde $L(U)$ é a função de Lagrange da função de utilidade. O significado dos multiplicadores de Lagrange ρ_1 e ρ_2 correspondem ao valor do orçamento e ao valor da energia, respetivamente [Ito08, Jahn07].

As derivadas parciais de primeira ordem da função de Lagrange, são dadas por:

$$\frac{\partial L(U)}{\partial P_l} = \frac{\partial U(P_l)}{\partial P_l} + \rho_2 = 0 \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial L(U)}{\partial P_b} = \rho_1 \lambda_b + \rho_2 = 0 \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial L(U)}{\partial P_s} = -\rho_1 \lambda_s - \rho_2 = 0 \tag{2.10}$$

$$\frac{\partial L(U)}{\partial \rho_1} = \lambda_b P_b - \lambda_s P_s - \bar{W} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial L(U)}{\partial \rho_2} = P_b + \bar{P}_g - P_l - P_s = 0 \quad (2.12)$$

As expressões (2.8) a (2.12) expressam as condições necessárias para a obtenção da solução do problema de otimização correspondente ao modelo do problema de despacho económico apresentado em (2.6). As equações (2.8) a (2.10) são reescritas e dadas por:

$$\frac{\partial L(U)}{\partial P_l} = \rho_2 = -\rho_1 \lambda_b = -\rho_1 \lambda_s \quad (2.13)$$

Onde (2.13) representa a relação existente entre o preço da energia e a avaliação da decisão do *prosumer*.

Algumas considerações devem ser tidas em conta uma vez que preço de compra e de venda da energia podem ser diferentes. Para esta situação deve ser considerado que: Quando $\rho_1 \neq 0$ de (2.13) e (2.10) resulta a igualdade dada por [Sun13]:

$$\lambda_b = \lambda_s \quad (2.14)$$

Pelo que o *prosumer* vende a energia ao preço de compra.

Quando $\rho_1 = 0$ de (2.13) e (2.10) [Sun13], resulta a expressão dada por:

$$\frac{\partial L(U)}{\partial P_l} = \rho_2 = 0 \quad (2.15)$$

Pelo que a melhor estratégia a adotar pelo *prosumer* é vender, tanta energia quanto possível quando o preço de venda for superior ao preço de compra, ou consumir a energia produzida, quando o preço de compra é superior ao preço de venda [Sun13].

Do ponto de vista do *prosumer*, o valor da produção deveria igualar o valor da compra de energia. No entanto, caso esta igualdade não se verifique, os *prosumers* vão optar pela decisão economicamente mais vantajosa [Sun13].

A resolução do problema de despacho económico permite analisar de que forma o *prosumer* ajusta o seu comportamento, de acordo com as suas necessidades de consumo e de capacidade de produção, face a um valor de orçamento previamente definido. Sob o ponto de vista da REI, a resolução do problema de despacho económico permite alterar o perfil de consumo, através da deslocação do consumo de umas horas para outras e/ou na redução do consumo, i.e., através do deslocamento e do deslastre da carga, tendo em conta a preferência do consumidor. A modelização da utilização da carga, que representa o perfil de utilização é representada pela função de utilidade dada por:

$$U(P_l) = \sum_{k=1}^N \gamma(k)P_l(k) = [\gamma(1) \dots \gamma(N)] \begin{bmatrix} P_l(1) \\ \vdots \\ P_l(N) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Onde $P_l(k)$ é a potência da carga durante o período de tempo k e $\gamma(k)$ é a preferência do *prosumer* em consumir energia durante o período de tempo k correspondentes aos vetores, relativos a 24 h, dados por:

$$\gamma(k) = [3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3] \quad (2.17)$$

$$\gamma(k) = [3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 2 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3] \quad (2.18)$$

Onde os algarismos correspondem a níveis de preferência, sendo o nível 1 aquele de corresponde a uma menor preferência de consumo e o nível 3 à maior preferência de consumo. Ou seja, o nível 1 representa a hora de ponta, o nível 2 hora cheia e o nível 3 a hora de vazio. O vetor (2.17) representa a preferência do *prosumer* durante um dia de verão e o vetor (2.18) representa a preferência do

prosumer durante um dia de inverno, determinados de acordo com os ciclos horários para o verão e inverno [ERSE14f] apresentados na Tabela 2.1.

Para a resolução do problema de despacho económico é considerado que o preço de venda de energia é fixo, correspondendo a 0.142 €/kWh e que o preço de compra de energia é dinâmico. É ainda considerado que ambos os preços são conhecidos pelo *prosumer à priori*. São escolhidos os meses de janeiro e de julho para representar a sazonalidade referente ao inverno e verão, respetivamente.

Os valores dos preços de compra de energia para o primeiro e último dia dos meses de janeiro e julho são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Ciclos horários correspondentes ao verão e inverno [ERSE14f]

Ciclo diário tri-horário para BTN em Portugal continental	
Período de hora legal de inverno	Período de hora legal de verão
Ponta: 9:00h - 10:30h; 18:00h - 20:30h	Ponta: 10:30h - 13:00h; 19:30h - 21:00h
Cheias: 8:00h - 9:00h; 10:30h - 18:00h; 20:30h - 22:00h	Cheias: 8:00h - 10:30h; 13:00h - 19:30h; 21:00h - 22:00h.
Vazio: 22:00h - 8:00h;	Vazio: 22:00h - 8:00h;

O orçamento dos *prosumers* condiciona o seu comportamento através da alteração das horas de consumo ou da redução da carga. O orçamento é portanto uma restrição ao modelo de despacho económico apresentado. Considerando que a análise da resolução do problema de despacho económico é efetuada para um horizonte temporal diário e mensal, o orçamento diário estipulado é 1 € e o orçamento mensal estipulado é 30 €.

É considerado que, para todas as horas do horizonte temporal considerado para a análise do problema de despacho económico, a potência comprada e vendida têm um limite inferior correspondente a 0 kW e um limite superior correspondente a 6 kW. Os valores da potência da carga e da potência gerada correspondem ao

consumo e à produção do *prosumer*, que resultam dos modelos de previsão. A resolução do problema de despacho económico corresponde à solução do problema de otimização obtida com recurso ao *software General Algebraic Modeling System (GAMS)*.

Tabela 2.2– Valores dos preços de compra energia para o primeiro e último dia janeiro e de julho [ERSE14f]

Hora	Preço de compra (€/kWh)			
	1 de janeiro	31 de janeiro	1 de julho	31 de julho
01:00	0.020	0.028	0.045	0.056
02:00	0.010	0.020	0.046	0.045
03:00	0.005	0.015	0.047	0.043
04:00	0.005	0.018	0.048	0.446
05:00	0.001	0.020	0.049	0.446
06:00	0.000	0.022	0.040	0.446
07:00	0.000	0.029	0.045	0.050
08:00	0.000	0.030	0.048	0.056
09:00	0.000	0.034	0.055	0.057
10:00	0.000	0.053	0.057	0.058
11:00	0.002	0.050	0.060	0.058
12:00	0.005	0.049	0.056	0.059
13:00	0.005	0.048	0.059	0.059
14:00	0.005	0.047	0.056	0.059
15:00	0.001	0.046	0.054	0.057
16:00	0.000	0.042	0.047	0.057
17:00	0.000	0.040	0.047	0.057
18:00	0.000	0.033	0.049	0.057
19:00	0.005	0.033	0.050	0.057
20:00	0.008	0.035	0.049	0.057
21:00	0.019	0.042	0.054	0.058
22:00	0.020	0.035	0.056	0.059
23:00	0.020	0.033	0.058	0.059
24:00	0.009	0.031	0.056	0.057

2.3 Previsão da Produção e do Consumo

Para modelização e análise do comportamento dos *prosumers*, importa conhecer e prever a quantidade de energia consumida e produzida por um consumidor doméstico ao longo de um determinado horizonte temporal. Esta informação possibilita identificar os períodos em que o *prosumer* se comporta como consumidor e/ou produtor de energia elétrica. O envio dos dados resultantes da previsão do comportamento dos *prosumers* ao operador da rede, permite o ajuste da REI ao longo do horizonte temporal considerado.

Nesta tese a previsão da produção e do consumo é realizada com recurso a RNA considerando a existência de características sazonais. A sazonalidade intrínseca à produção solar fotovoltaica depende maioritariamente da duração da hora solar. A sazonalidade intrínseca ao consumo depende de fatores, como temporalidades rítmicas e que estão relacionadas com a repetição dinâmica de comportamentos sociais [Walker14]. A RNA utilizada para a previsão da radiação solar é treinada utilizando valores médios horários de radiação e de temperatura, registados durante 4 anos, referentes a 2005, 2007, 2008 e 2009, na estação meteorológica de Alcáçovas e a RNA utilizada para a previsão do consumo é treinada utilizando valores médios de consumo e temperatura, registados durante 1 ano, referentes a 2012, por corresponder à quantidade de dados disponíveis. Ambas as redes são testadas para um mês de inverno e outro de verão, nomeadamente para os meses de janeiro e julho de um ano cujos valores não foram apresentados à rede neuronal na fase de aprendizagem.

Previsão da produção

A previsão da produção é obtida a partir dos resultados de previsão da radiação solar são posteriormente convertidos em valores de potência de produção,

recorrendo às curvas características do sistema solar fotovoltaico em função da variação da radiação.

Para a previsão da radiação é utilizada uma RNA *feedforward* do tipo perceptron multicamada cuja arquitetura é definida por 19 entradas, 43 unidades na camada escondida e uma saída. A definição do número de neurónios da camada escondida foi determinado com base na análise dos resultados dos ensaios apresentados no Anexo 2.1. Nas unidades da camada escondida, a função de ativação foi do tipo sigmoide e na unidade da camada de saída foi utilizada uma função de ativação do tipo identidade. O treino da RNA é supervisionado utilizando o método da descida do gradiente através do algoritmo de Levenberg-Marquard, sendo o conjunto de treino constituído por valores médios de radiação horária e de temperatura registados ao longo de 4 anos. Uma vez que o consumo diário apresenta periodicidade, para além dos valores médios de radiação e temperatura, são consideradas duas entradas adicionais [Ramezani05] dadas por:

$$\cos(2h\pi/24) \quad (2.19)$$

$$\sin(2h\pi/24) \quad (2.20)$$

Onde h é a hora.

Durante a fase de aprendizagem, o desempenho da rede neuronal é analisado através da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e do valor do erro médio absoluto (MAPE) que resultam entre os valores desejados e observados do conjunto de treino. De modo a evitar a sobre aprendizagem, a paragem do treino feita por validação cruzada.

O RMSE é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{k=1}^{n_d} (\hat{Y}_k - Y_k)^2} \quad (2.21)$$

O MAPE é dado por:

$$MAPE = \frac{100}{n_d} \sum_{k=1}^{n_d} \left| \frac{Y_k - \hat{Y}_k}{Y_k} \right| \quad (2.22)$$

Onde em (2.21) e (2.22), n_d é o número de dados, y_i é o valor real e \hat{y}_i é o valor previsto.

Os valores da radiação média horária utilizados na RNA de previsão de radiação são calculados através da equação dada por:

$$R_{med} = \frac{R_{11} + R_{21} + R_{31} + R_{41}}{4} \quad (2.23)$$

Onde R_{11} é a radiação no mês do ano 1 na hora 1, R_{21} é a radiação no mês do ano 2 na hora 1, R_{31} é a radiação no mês do ano 3 na hora 1 e R_{41} é a radiação no mês do ano 4 na hora 1.

A RNA genérica implementada para a previsão da radiação está representada na Figura 2.5.

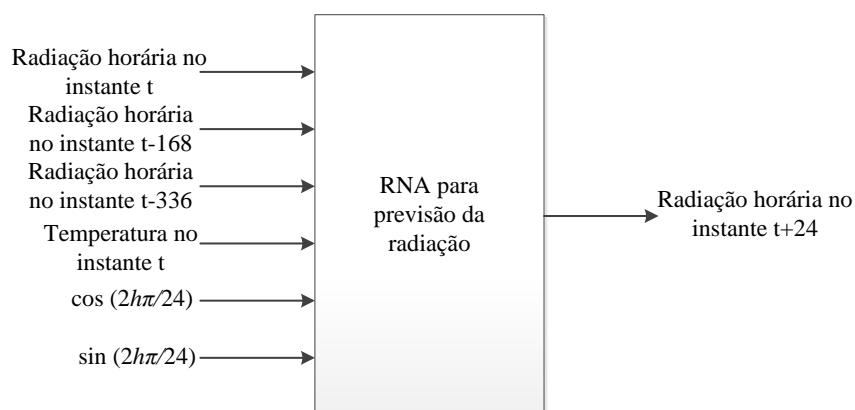


Figura 2.5 – Representação genérica da RNA para previsão da radiação.

Depois de determinados, os dados de entrada da RNA representados na

Figura 2.5, são previamente processados por forma criar os padrões de entrada da RNA. Uma vez que as grandezas de entrada são séries temporais é necessário determinar quais os valores que contêm informação suficiente para caracterizar a variável a prever. A sua determinação resulta do cálculo dos coeficientes de auto correlação de cada variável de entrada e representa a correlação existente entre valores de uma série temporal observados em diferentes instantes de tempo [Barros10].

A auto correlação é calculada através da correlação de Pearson dada por:

$$Correl(a,b) = \frac{\sum (a - \bar{a})(b - \bar{b})}{\sqrt{\sum (a - \bar{a})^2 (b - \bar{b})^2}} \quad (2.24)$$

Onde a e b são dois conjuntos de valores e \bar{a} e \bar{b} são as médias das amostras dos dois conjuntos de valores considerados. Um valor próximo de 1, indica a existência de uma forte correlação positiva e um valor próximo de -1 uma forte correlação negativa, enquanto que o valor zero indica a inexistência de correlação, i.e., uma completa aleatoriedade. Nesse sentido, os padrões de cada variável de entrada foram formados com os valores que apresentaram coeficientes de auto correlação superior a 0.4.

Os padrões de entrada na RNA, representada na Figura 2.5, são definidos por uma matriz $[19 \times 24]$ e os dados de saída por uma matriz $[1 \times 24]$. Os dados da entrada da radiação horária para a hora t , são compostos por 4 valores referentes à hora t e às 3 horas anteriores a esse instante, i.e., corresponde a uma matriz coluna constituída pelos elementos $t, t-1, t-2, t-3$. Os dados da entrada radiação horária para a hora $t-168$, são compostos por 4 valores, referentes às últimas 4 horas dos 7 dias anteriores, i.e., $t-168, t-169, t-170, t-171$. Os dados da entrada radiação horária na hora $t-336$, são compostos por 4 valores, referentes às últimas 4 horas dos 14 dias anteriores, i.e., $t-336, t-337, t-338, t-339$. Os dados da entrada temperatura na hora t , são compostos por 5 valores referentes à temperatura para

a hora t e para as 4 horas anteriores. Os dados das entradas correspondentes a (2.19) e (2.20) são compostas por 1 valor cada, referentes à periodicidade do consumo diário.

Os dados de saída correspondem aos valores de radiação nas 24 horas seguintes à hora considerada.

A RNA considerada para a previsão de radiação no mês de julho de 2010 apresenta um RMSE de 94.25 W/m^2 e um MAPE de 31.2%. O valor médio do erro entre o valor medido e o valor previsto, designado de *bias*, é de -1.8 W/m^2 , o que significa que existe um baixo valor de erro sistemático no treino da RNA. Os resultados da previsão de radiação para julho são apresentados no Anexo 2.2.

A RNA considerada para a previsão de radiação no mês de janeiro de 2010 apresenta um RMSE de 55.9 W/m^2 e um MAPE de 33.1%. O valor de *bias* é de 0.42 W/m^2 , o que significa que existe um valor baixo de erro sistemático no treino da RNA. Os resultados da previsão de radiação para janeiro são apresentados no Anexo 2.3.

Para o cálculo da produção, a partir dos dados de saída da RNA é calculada a potencia elétrica [Gokmen12] e de acordo com as curvas P-V do sistema solar fotovoltaico BP 7071 [Silva08] em função da variação da radiação, representadas na Figura 2.6. Sendo que a relação entre outros valores de radiação e de potência é obtida através de interpolação.

Uma vez que a temperatura afeta o rendimento do sistema solar fotovoltaico alterando o valor da potência produzida, é considerado o fator de correção apresentado na Tabela 2.3.

De acordo com a Figura 2.6 e com os resultados da interpolação dos valores de potência em função da radiação e atendendo aos fatores de correção apresentados na Tabela 2.3, resultam os valores de potência produzida em função da radiação solar e da temperatura apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 – Fator de correção da potência produzida em função da temperatura
 [Gokmen12]

Fator de correção (%)		Radiação (W/m ²)				
		200	400	600	800	1000
Temperatura (°C)	25	17	37	58	79	1
	40	16	34	54	73	93

A comparação entre a potência medida e a potência prevista pela RNA considerando um horizonte temporal de 24 horas, para o dia 1 de julho de 2010 está representada na Figura 2.7.

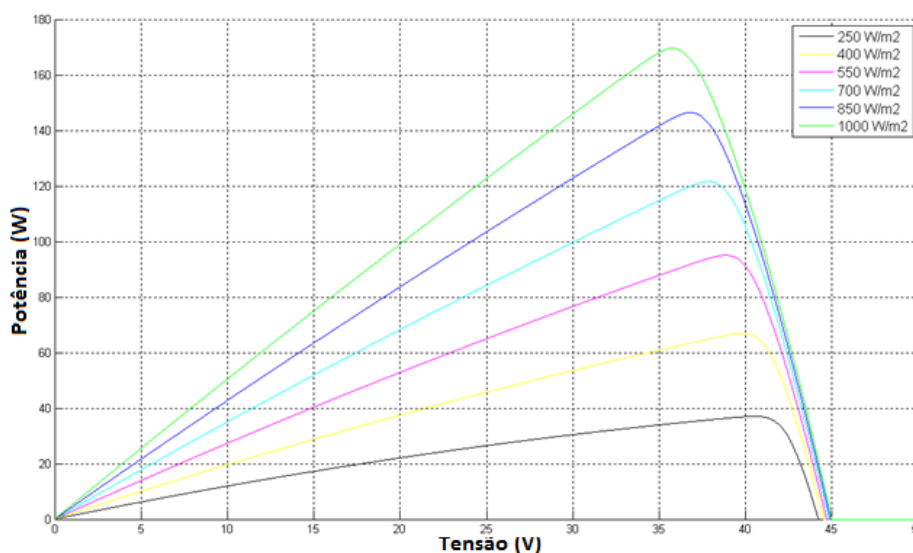


Figura 2.6 – Curvas P-V em função da variação da radiação solar [Silva08].

Nesta situação, o RMSE da previsão da potência produzida é de 0.36 kW, sendo praticamente nulo o valor médio do erro entre a potência medida e a potência prevista, podendo ser considerado que os erros de previsão existentes são aleatórios.

Tabela 2.4 – Potência produzida em função da radiação e temperatura

Potência (kW)		Temperatura (°C)				
		25	30	35	40	45
Radiação (W/m ²)	1000	5.000	4.913	4.825	4.738	4.650
	900<Rad<1000	4.429	4.351	4.274	4.196	4.119
	800<Rad<900	4.071	4.000	3.929	3.858	3.786
	700<Rad<800	3.571	3.482	3.393	3.346	3.300
	600<Rad<700	3.000	2.925	2.850	2.811	2.772
	500<Rad<600	2.500	2.458	2.415	2.370	2.328
	400<Rad<500	2.000	1.966	1.932	1.896	1.862
	300<Rad<400	1.429	1.390	1.390	1.351	1.313
	200<Rad<300	0.929	0.904	0.904	0.878	0.853
	100<Rad<200	0.614	0.597	0.597	0.581	0.564
	30<Rad<100	0.300	0.292	0.209	0.284	0.276

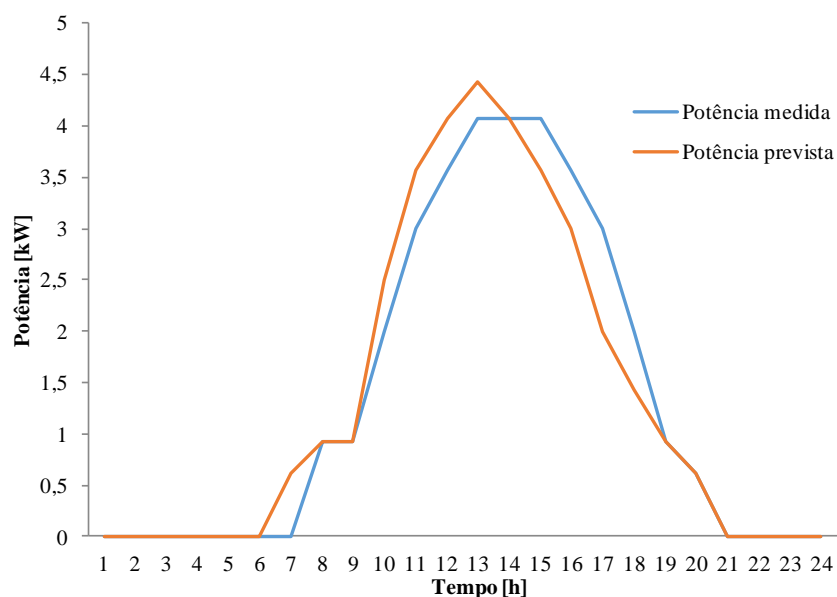


Figura 2.7 – Comparação entre potência produzida medida e prevista no dia 1 de julho de 2010.

Previsão do consumo

Para a previsão do consumo é utilizada uma RNA *feedforward* do tipo percetron multicamada cuja arquitetura é definida por 19 entradas, 49 unidades na camada

escondida e uma saída. A definição do número de neurónios da camada escondida foi determinado com base na análise dos resultados dos ensaios apresentados no Anexo 2.4. Nas unidades da camada escondida, a função de ativação foi do tipo sigmoide e na unidade da camada de saída foi utilizada uma função de ativação do tipo identidade. O treino da RNA é supervisionado utilizando o método da descida do gradiente através do algoritmo de Levenberg-Marquard, sendo o conjunto de treino constituído por valores médios de consumo e de temperatura registados ao longo de 1 ano. Uma vez que o consumo diário apresenta periodicidade, para além dos valores médios de radiação e temperatura, são consideradas mais duas entradas cujos valores resultam de (2.19) e (2.20).

Durante a fase de aprendizagem, o desempenho da RNA é analisado através do RMSE e do MAPE que resultam entre os valores desejados e observados do conjunto de treino. De modo a evitar a sobre aprendizagem, a paragem do treino é feita por validação cruzada.

A RNA genérica implementada para a previsão do consumo está representada na Figura 2.8.

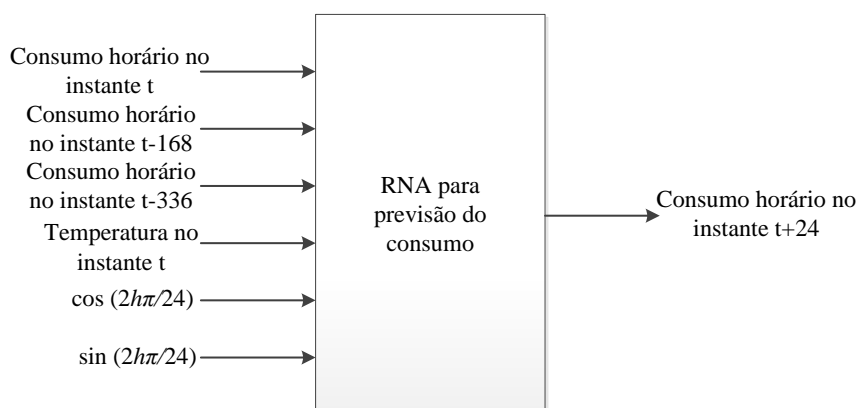


Figura 2.8 – Representação genérica da RNA para previsão de consumo.

Depois de determinados, os dados de entrada da RNA representada na Figura 2.8,

são previamente processados por forma a criar os padrões de entrada na RNA. Uma vez que as grandezas de entrada são séries temporais é necessário determinar quais os valores que contém informação suficiente para caracterizar a variável a prever. A sua determinação resulta do cálculo dos coeficientes de auto correlação de cada variável de entrada e representa a correlação existente entre valores de uma série temporal observados em diferentes instantes de tempo.

Os padrões de entrada da RNA representada na Figura 2.8 são definidos por uma matriz $[22 \times 24]$ e os dados de saída por uma matriz $[1 \times 24]$. Os dados da entrada consumo horário para a hora t , são compostos por 5 valores referentes à hora t e às 4 horas anteriores a essa hora, i.e., corresponde a uma matriz coluna constituída pelos valores $t, t-1, t-2, t-3, t-4$. De forma idêntica à descrita em relação à RNA utilizada para a previsão da radiação, os dados da entrada consumo horário na hora $t-168$ e $t-336$, são compostos por 5 valores cada, referentes às últimas 5 horas dos 7 dias anteriores e dos 14 dias anteriores, respetivamente. Os dados da entrada temperatura no instante t , são compostos por 5 valores referentes ao valor de temperatura para a hora t e para as 4 horas anteriores. Os dados das entradas correspondentes a (2.19) e (2.20) são compostos por 1 valor cada, referentes à periodicidade do consumo diário.

Os dados de saída correspondem aos valores de consumo nas 24 horas seguintes à hora considerada.

A RNA considerada para a previsão de consumo no mês de julho de 2012 apresenta um valor de RMSE de 0.045 kW e um valor de MAPE de 8.09 %. O valor do *bias* é de 0.08 kW, o que significa que os erros sistemáticos da previsão podem ser considerados desprezáveis. Os resultado da previsão de consumo para julho são apresentados no Anexo 2.5.

A RNA considerada para a previsão de consumo no mês de janeiro de 2012 apresenta um valor de RMSE de 0.061 kW e um valor de MAPE de 7.62 %. O valor do *bias* é de 0.04 kW, o que significa que os erros sistemáticos da previsão

também podem ser considerados desprezáveis. Os resultado da previsão de consumo para janeiro são apresentados no Anexo 2.6.

A comparação entre o consumo medido e o consumo previsto pela RNA considerando um horizonte temporal de 24 horas, para o dia 1 de julho de 2012 está representada na Figura 2.9.

Nesta situação, o RMSE da previsão da potência produzida é de 0.36 kW e o valor de *bias* de -0.21 kW, sendo que os erros de previsão existentes se devem maioritariamente a erros de previsão sistemáticos.

Da análise dos erros realizada para as RNA utilizadas para a previsão de radiação solar e de consumo, é considerado que os valores previstos são adequados para a aplicação na resolução do problema de despacho económico.

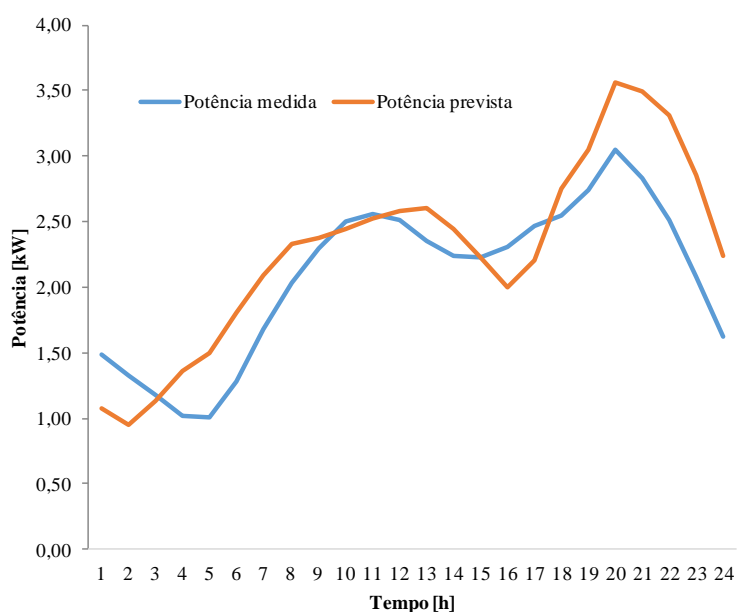


Figura 2.9 – Comparação entre potência de consumo medida e prevista no dia 1 de julho de 2012.

2.4 Análise dos Casos de Estudo

É apresentada a análise de quatro casos de estudos referentes à resolução do problema de despacho económico para um horizonte temporal diário e mensal para janeiro e julho.

Na análise dos casos de estudo é assumido que o *prosumer* pode, em todas as horas, comprar ou vender a totalidade da energia necessária para cumprimento da carga e que dispõe de um limite orçamental diário e mensal a cumprir.

São considerados cinco cenários; o primeiro cenário, Cenário C1, é aplicado apenas à resolução do problema de despacho económico para o horizonte temporal diário. Os restantes cenários são comuns a todos os casos de estudo:

- **Cenário C1 – Situação com autoconsumo e preço de compra de energia em MEE:** Resolução do problema de despacho económico considerando a existência de consumo da energia produzida e compra remanescente de energia em MEE;
- **Cenário C2 – Sistema com venda da energia produzida e compra em MEE:** Considera preços de compra de energia em MEE, sendo assumido que o *prosumer* vende a totalidade da energia gerada e compra a energia necessária para satisfazer a carga;
- **Cenário C3 – Situação com venda da energia produzida e compra em MLE:** considera preços de compra de energia a uma empresa do mercado liberalizado de eletricidade (MLE), refletindo um aumento do preço de energia face ao cenário anterior. É assumido que o *prosumer* vende a totalidade da energia gerada e compra a energia necessária para satisfazer a carga;
- **Cenário C4 – Situação com deslocamento da carga, venda da totalidade da energia produzida e compra em MLE:** considera preços de compra de

energia a uma empresa do MLE e é assumida a existência de deslocamento da carga, realizada pelo *prosumer* de acordo com as suas preferências de consumo;

- **Cenário C5 – Situação com deslocamento da carga, venda e compra de energia em MLE e redução orçamental:** considera a existência de deslocamento da carga realizada pelo *prosumer*, quando sujeito a uma redução orçamental de 50%.

Para a análise do resultado do problema de despacho económico são consideradas a potência vendida, P_s , a potência comprada, P_b , a potência produzida, P_g e a potência da carga, P_l .

Resolução do problema de despacho económico diário para janeiro

Para resolução do problema de despacho económico é considerado o valor do preço de venda de energia de 0.142 €/kWh e o valor do preço de compra apresentado na Tabela 2.2, referente ao dia 1 de janeiro.

Cenário C1 – Situação com autoconsumo e preço de compra de energia em MEE

O resultado do problema de despacho económico (PDE) está representado na Figura 2.10.

Na Figura 2.10, P_s é nula porque o *prosumer* consome toda a potência produzida, representando o autoconsumo. No intervalo de tempo compreendido entre as 9 h e as 19 h, a diferença entre P_l e P_b corresponde ao valor de P_s . Este cenário é caracterizado por um preço de compra de energia baixo de acordo com a Tabela 2.2.

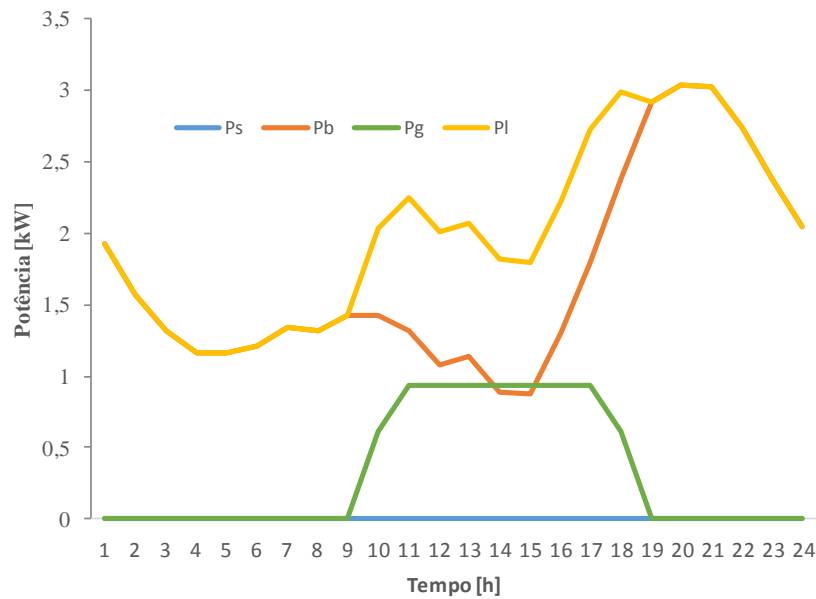


Figura 2.10 – Resolução do PDE diário (janeiro).

O valor do custo total da energia é de 0.30 € e a utilidade tem um valor de 100.01. Assim, considerando a hipótese de venda da energia produzida à rede ao preço estipulado de 0.142 €/kWh, teria resultado em lucro para o *prosumer*.

Cenário C2 – Sistema com venda da energia produzida e compra em MEE

O resultado do PDE está representado na Figura 2.11.

Na Figura 2.11 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . Neste cenário o *prosumer* tem lucro de 0.78 € resultante da venda da energia produzida e a utilidade tem um valor de 102.16.

Cenário C3 – Situação com venda da energia produzida e compra em MLE

Admitindo a compra de energia elétrica a uma empresa do MLE, é considerado um incremento de 0.04 €/kWh ao preço de compra apresentado na Tabela 2.2. O resultado do PDE está representado na Figura 2.12.

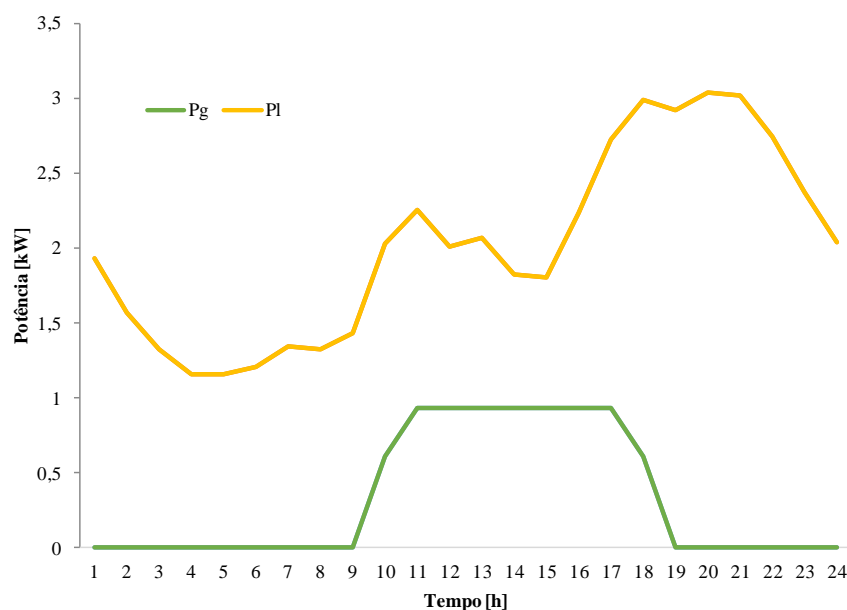


Figura 2.11 – Resolução do PDE diário considerando venda da energia (janeiro).

Na Figura 2.12 e com exceção da última hora do dia, as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . A partir das 23 horas, a solução obtida indicia que, devido ao aumento do preço de compra de energia e face às restrições orçamentais exista um problema convergência que possibilite ao *software* de otimização a determinação de uma solução viável, resultando um valor de utilidade de 1.43.

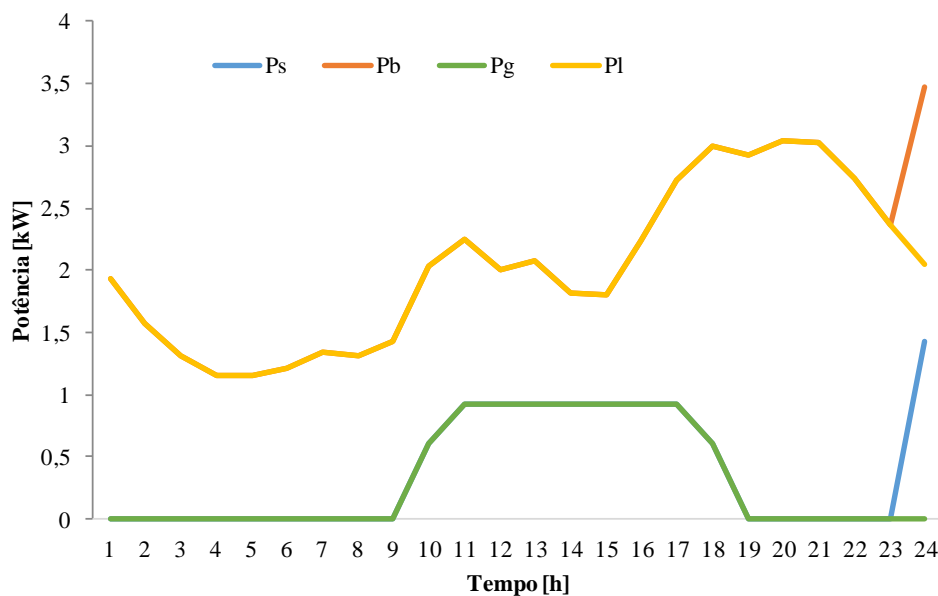


Figura 2.12 – Resolução do PDE diário com venda da energia e compra em MLE (janeiro).

Cenário C4 – Situação com deslocamento da carga, venda da totalidade da energia produzida e compra em MLE

Neste cenário é considerado que o *prosumer* promove o deslocamento da carga de acordo com as suas preferências de consumo. À semelhança do cenário C3, é considerado que a totalidade da energia produzida é vendida e que a compra da energia é realizada a uma empresa do MLE. O resultado do PDE está representado na Figura 2.13.

Na Figura 2.13 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . A comparação entre a Figura 2.12 e a Figura 2.13 evidencia uma deslocação da potência da carga.

O modelo de otimização convergiu, apresentando um custo de 1 € e um valor de utilidade de 102.08. Nesta situação o valor da utilidade sofreu um ligeiro decréscimo face ao valor de 102.16 apresentado no cenário C3, em resultado do ajuste da REI e consequente resolução do PDE face à variação da potência

resultante do deslocamento da carga.

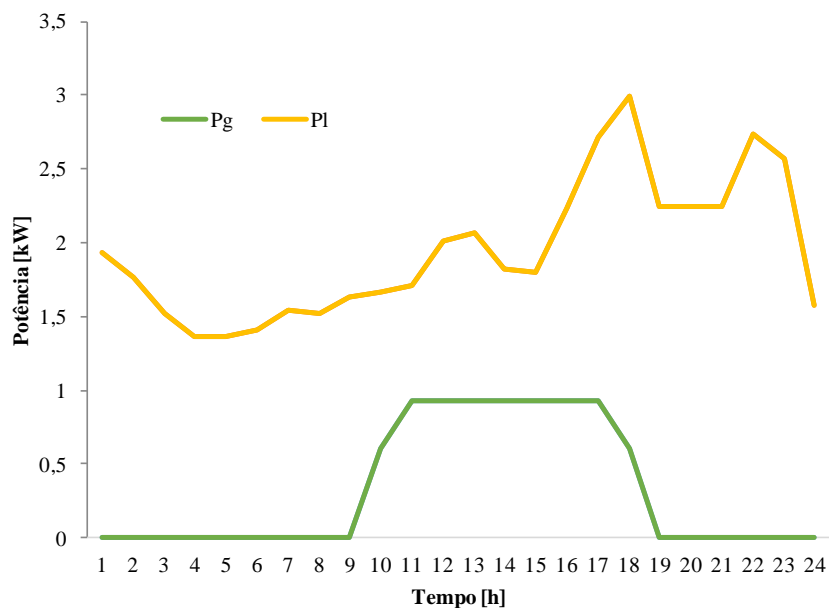


Figura 2.13 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (janeiro).

A comparação entre o valor da potência da carga considerando os cenários com e sem o deslocamento de carga realizado pelo *prosumer*, está representada na Figura 2.14.

Na Figura 2.14 é possível observar uma redução da potência da carga nas horas de ponta e um aumento nas horas de vazio. Este deslocamento de carga resultou da resolução do PDE, que incorpora as preferências de consumo do *prosumer*.

Cenário C5 – Situação com deslocamento da carga, venda e compra de energia em MLE e redução orçamental

Para análise deste cenário é considerada uma redução de 50% do orçamento do *prosumer*, em janeiro. O resultado do PDE está representado na Figura 2.15.

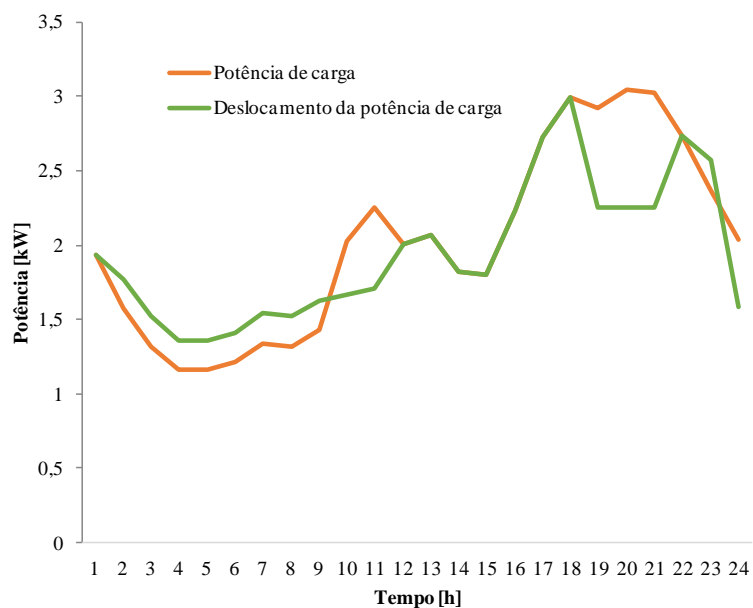


Figura 2.14 – Comparação entre valores de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (janeiro)

Na Figura 2.15 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l .

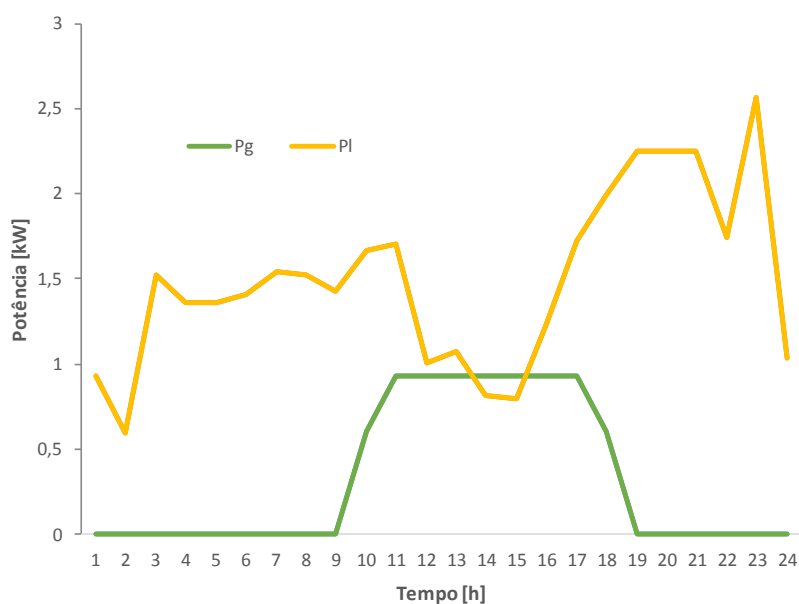


Figura 2.15 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga e redução orçamental (janeiro).

Neste cenário o *prosumer* tem um valor de custo de 0.50 € e a utilidade tem um valor de 77.54. Em resposta à redução orçamental, a utilidade apresenta um valor inferior comparativamente aos cenários anteriores. Da comparação entre a Figura 2.15 e a Figura 2.13 é possível observar uma redução da potência da carga como resultado do deslastre de cargas realizado por forma a ser possível cumprir as restrições do PDE. A comparação entre os valores de potência da carga face a um deslocamento de carga e ao deslastre de carga está representada na Figura 2.16.

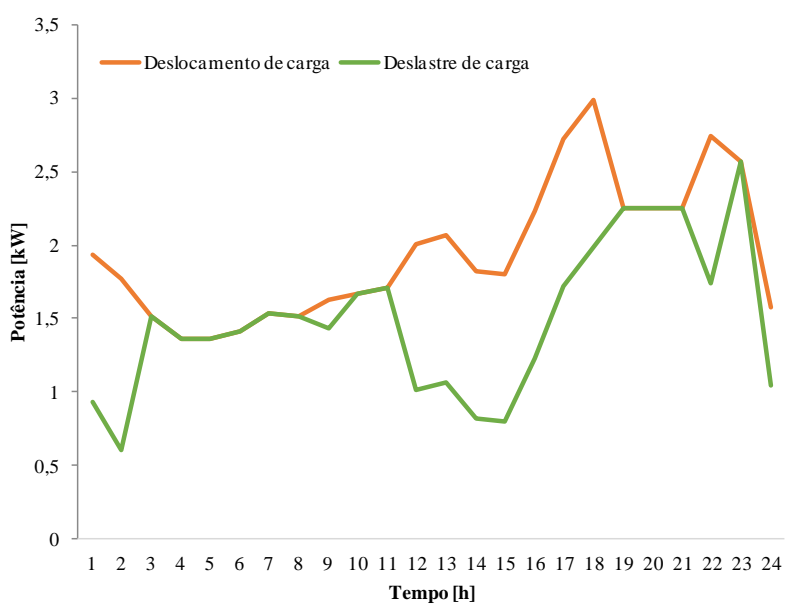


Figura 2.16 – Comparação entre valores de potência referentes a redução e deslastre de carga (janeiro).

Na Figura 2.16 é possível observar que para além do deslocamento da carga, a redução orçamental incitou a existência de um deslastre de carga que ocorreu sobretudo nas horas de cheia e de ponta, contribuindo para uma redução de consumo e para um maior alisamento do diagrama de carga do que o observado no cenário anterior.

Resolução do problema de despacho económico diário para julho

Para resolução do problema de despacho económico é considerado o valor do preço de venda de energia de 0.142 €/kWh e o valor do preço de compra apresentado na Tabela 2.2, referente ao dia 1 de julho. Neste caso de estudo o valor do preço de compra de energia é superior ao preço de compra verificado em janeiro, contudo continua a assumir valores bastante inferiores ao preço de venda da energia.

Cenário C1 – Situação com autoconsumo e preço de compra de energia em MEE

O resultado do PDE para julho está representado na Figura 2.17.

Da análise da Figura 2.17, é verificado que o consumo é satisfeito à custa da compra de energia nas horas em que não há produção e nas horas em que a produção existente não é suficiente para suprir as necessidades de consumo. Entre as 10 h e as 16 h a energia produzida é utilizada para suprir as necessidades de consumo sendo a energia remanescente vendida. O valor do custo da energia é 0.63 € e o valor da utilidade é 112.3.

Cenário C2 – Sistema com venda da energia produzida e compra em MEE

Neste cenário é considerada a venda de toda a energia produzida e a compra de energia em MEE. O resultado do PDE em julho está representado na Figura 2.18.

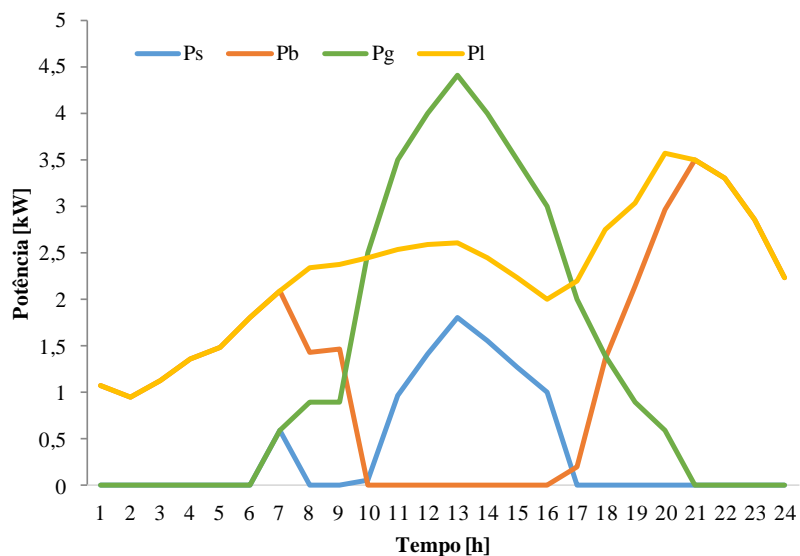


Figura 2.17 – Resolução do PDE diário (julho).

Na Figura 2.18 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . Neste cenário o *prosumer* tem um valor de lucro de 1.13 € resultante da venda da energia produzida e a utilidade tem um valor de 112.3, que se mantém inalterado face ao cenário anterior.

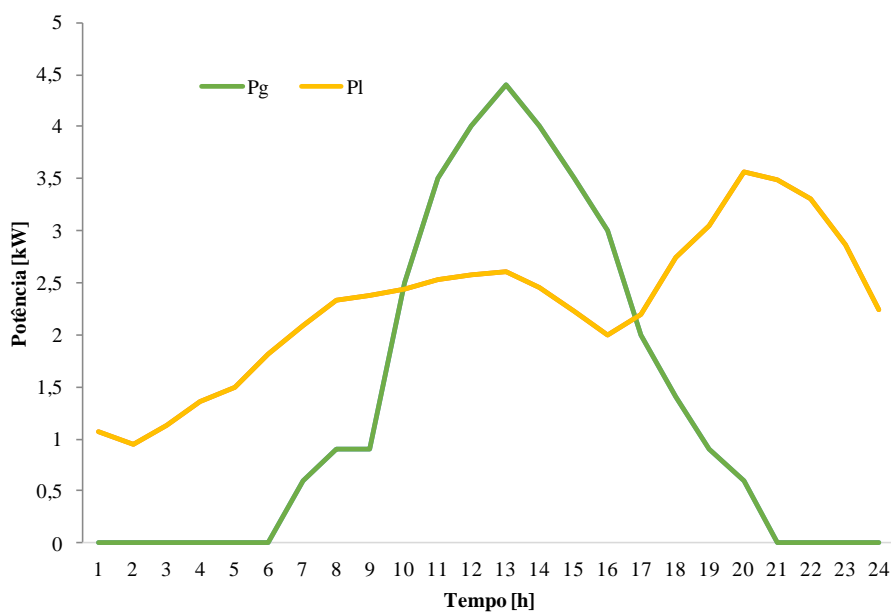


Figura 2.18 – Resolução do PDE diário considerando venda da energia (julho).

Cenário C3 – Situação com venda da energia produzida e compra em MLE

Admitindo a compra energia elétrica a uma empresa do MLE, é considerado um incremento de 0.04 €/kWh ao preço de compra apresentado na Tabela 2.2. O resultado do PDE está representado na Figura 2.18, uma vez que face ao cenário anterior a única alteração ocorreu no valor do custo, que assume um valor de 0.74 €.

Cenário C4 – Situação com deslocamento da carga, venda da totalidade da energia produzida e compra em MLE

Neste cenário é considerado que o *prosumer* promove o deslocamento da carga de acordo com as suas preferências de consumo. À semelhança do cenário C3, é considerado que a totalidade da energia produzida é vendida e que a compra da energia é realizada a uma empresa do MLE. O resultado do PDE está representado na Figura 2.19.

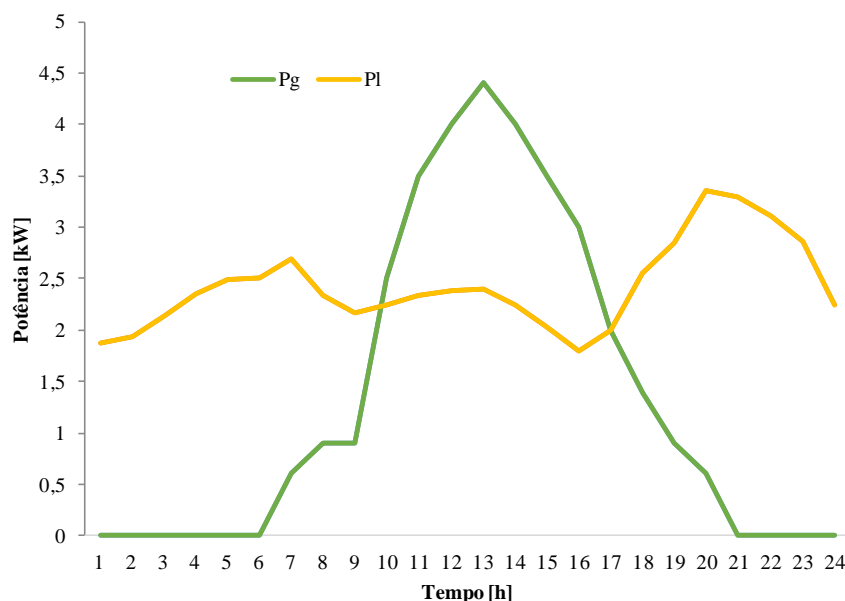


Figura 2.19 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (julho).

Na Figura 2.19 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . A comparação entre a Figura 2.19 e a Figura 2.18 evidencia o deslocamento da potência da carga. Neste cenário o valor do custo é de 1 € e a utilidade tem um valor de 126.03. Em comparação com o valor da utilidade no cenário anterior, foi verificado um aumento do valor em resultado do ajuste da REI e consequente resolução do PDE face à variação da potência resultante do deslocamento da carga.

A comparação entre o valor da potência da carga considerando os cenários com o deslocamento e sem o deslocamento de carga realizado pelo *prosumer*, está representada na Figura 2.20.

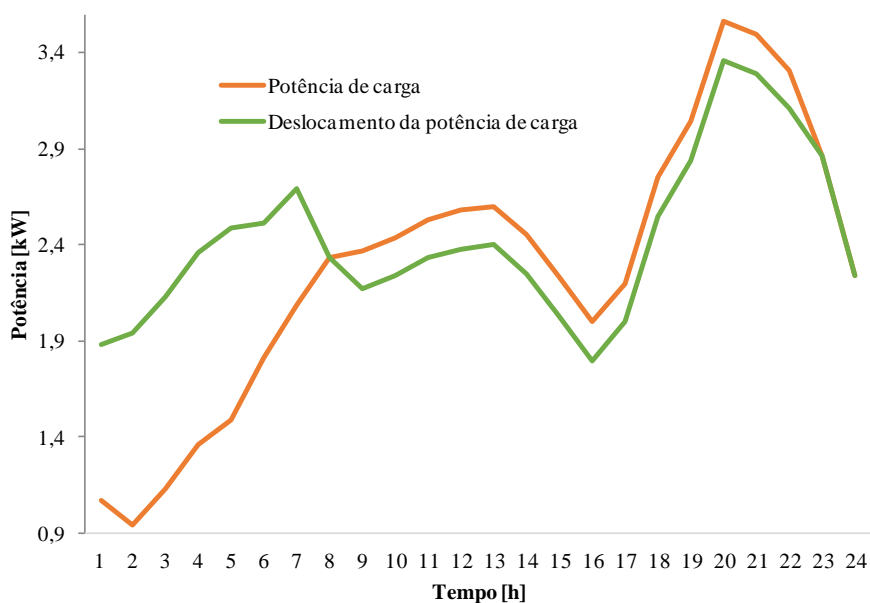


Figura 2.20 – Comparação entre valores de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (julho).

Na Figura 2.20 é possível observar uma ligeira redução da potência da carga nas horas de ponta e cheia, ocorrendo um aumento significativo nas horas de vazio. Este deslocamento de carga resultou da resolução do PDE, que incorpora as preferências de consumo do *prosumer*.

Cenário C5 – Situação com deslocamento da carga, venda e compra de energia em MLE e redução orçamental

Para a análise deste cenário é considerada uma redução de 50% do orçamento do *prosumer*. O resultado do PDE está representado na Figura 2.21.

Na Figura 2.21 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l .

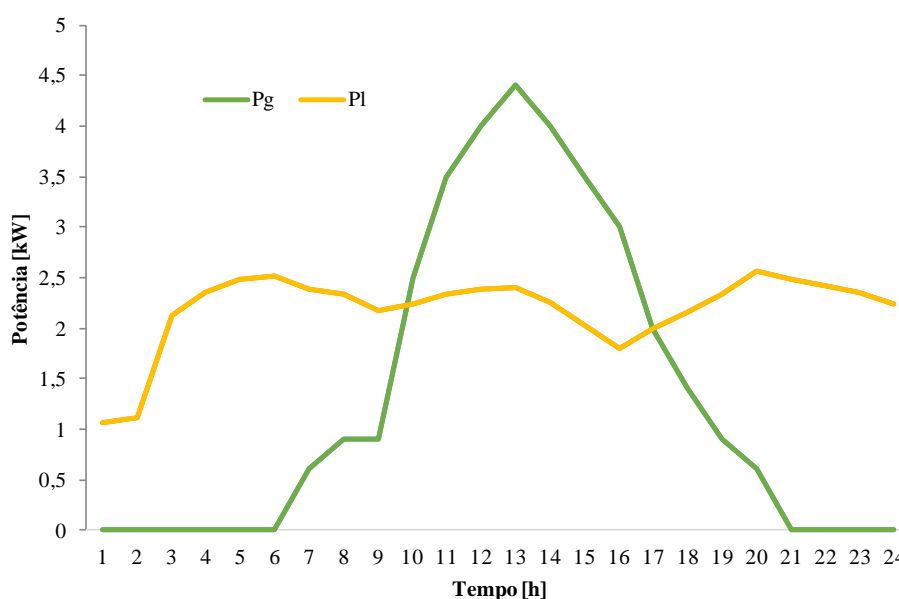


Figura 2.21 – Resolução PDE diário com deslocamento da carga e redução orçamental (julho).

Neste cenário o *prosumer* tem um custo com um valor de 0.50 € e a utilidade tem um valor de 113.91. Em resposta à redução orçamental, a utilidade apresenta um valor inferior comparativamente aos cenários anteriores. Da comparação entre a Figura 2.21 e a Figura 2.19 é possível observar uma redução da potência da carga como resultado do deslastre de cargas realizado por forma a ser possível cumprir as restrições do PDE. A comparação entre os valores de potência da carga face a um deslocamento de carga e ao deslastre de carga está representada na Figura 2.22.

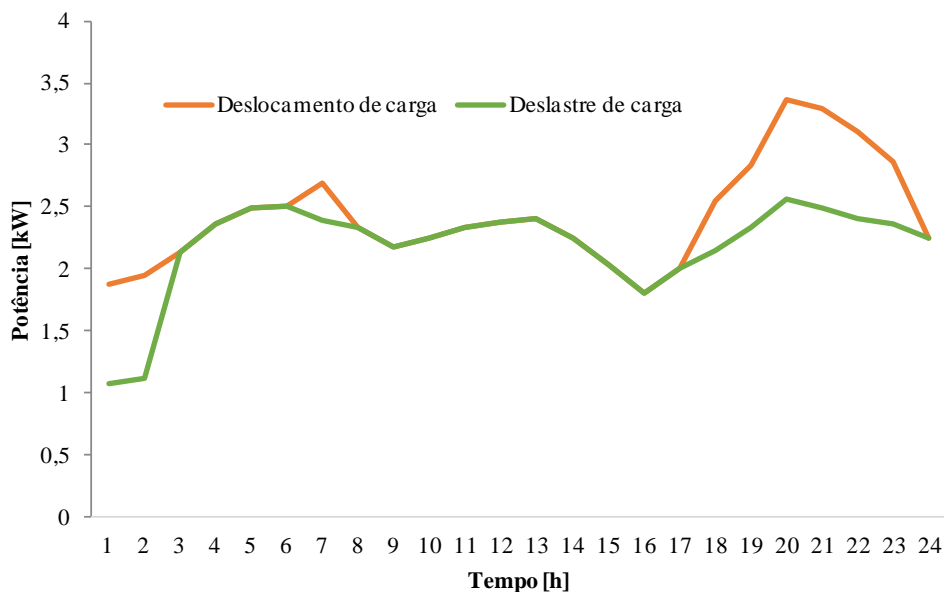


Figura 2.22 – Comparação entre valores de potência referentes a redução e deslastre de carga (julho).

Na Figura 2.22 é possível observar que para além do deslocamento da carga, a redução orçamental incitou a existência de um deslastre de carga que ocorreu sobretudo nas horas ponta, contribuindo para uma redução de consumo e para um maior alisamento do diagrama de carga do que o observado no cenário anterior.

Resolução do problema de despacho económico mensal para janeiro

Para resolução do problema de despacho económico são consideradas 744 h, contudo graficamente apenas são representadas as primeiras e as últimas 24 h do mês. Como existem 744 preços de compra de energia a considerar, são apresentados na Tabela 2.2, os preços referentes ao dia 1 e 31 de janeiro. O preço de venda é 0.142 €/kWh. Os preços de compra do dia 31 são superiores aos preços praticados no dia 1 de janeiro. Este aumento pode ser justificado com a ocorrência de uma diminuição na produção a partir de fontes de energia renováveis nesse dia.

É estipulado um orçamento mensal de 30 € e que a compra da energia em MLE tem um custo acrescido de 0.02 €/kWh.

Cenário C2 – Sistema com venda da energia produzida e compra em MEE

Neste cenário é considerada a venda de toda a energia produzida sendo a compra de energia em MEE. O resultado do PDE está representado na Figura 2.23.

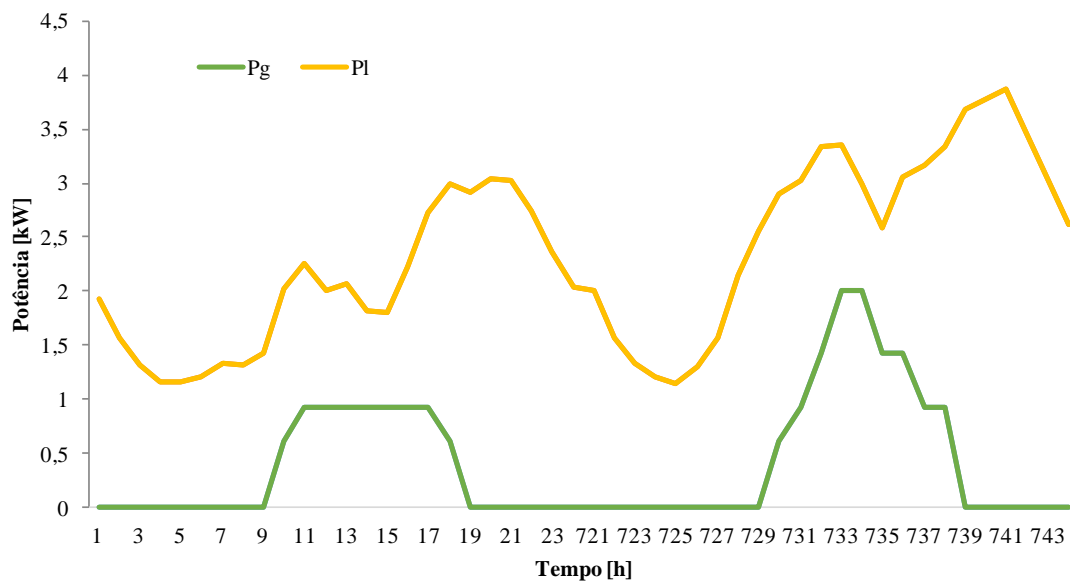


Figura 2.23 – Resolução do PDE mensal considerando venda da energia (janeiro).

Na Figura 2.23 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . Neste cenário o custo tem o valor de 17.51 € e a utilidade tem um valor de 3596.53.

Cenário C3 – Situação com venda da energia produzida e compra em MLE

Admitindo a compra de energia elétrica a uma empresa do MLE, é considerado um incremento de 0.02 €/kWh ao valor do preço de compra apresentado na Tabela 2.2. O resultado do PDE está representado na Figura 2.24.

Da análise da Figura 2.24 na hora 68 é possível observar que a potência comprada e a potência vendida assumem valores anormalmente elevados. De referir que tanto a potência comprada como a vendida estão referenciadas ao eixo de ordenadas secundário. A solução obtida indicia que exista um problema de convergência que possibilite ao *software* de otimização a determinação de uma solução viável.

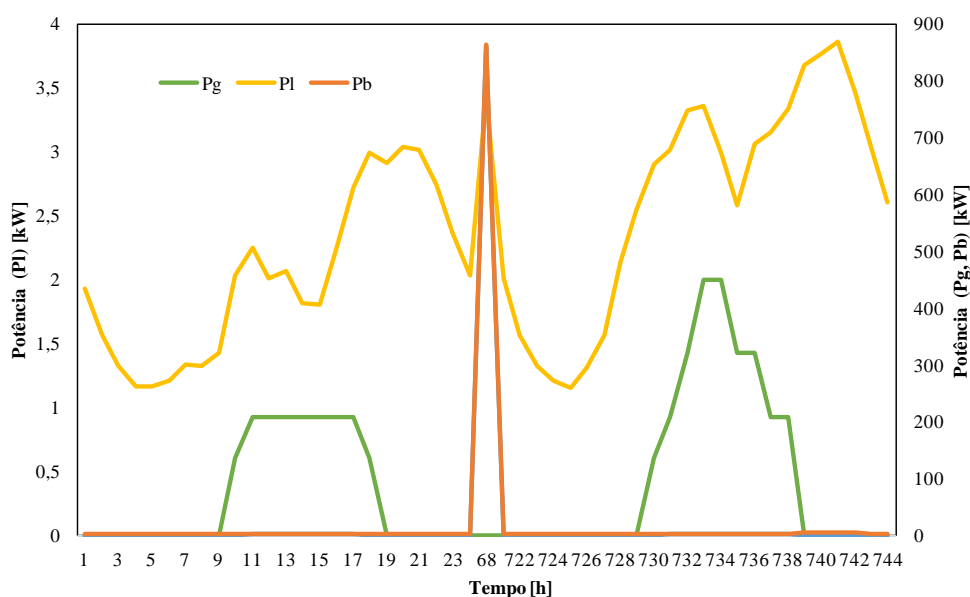


Figura 2.24 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE (janeiro).

Por forma a obviar o problema de convergência verificado, foi considerado um aumento do valor do orçamento, nesta situação, de 100 €. O resultado do PDE está representado na Figura 2.25.

Na Figura 2.25 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são

coincidentes as curvas da P_b e P_l . Neste cenário o custo tem o valor de 52.13 € e a utilidade tem um valor de 3596.53.

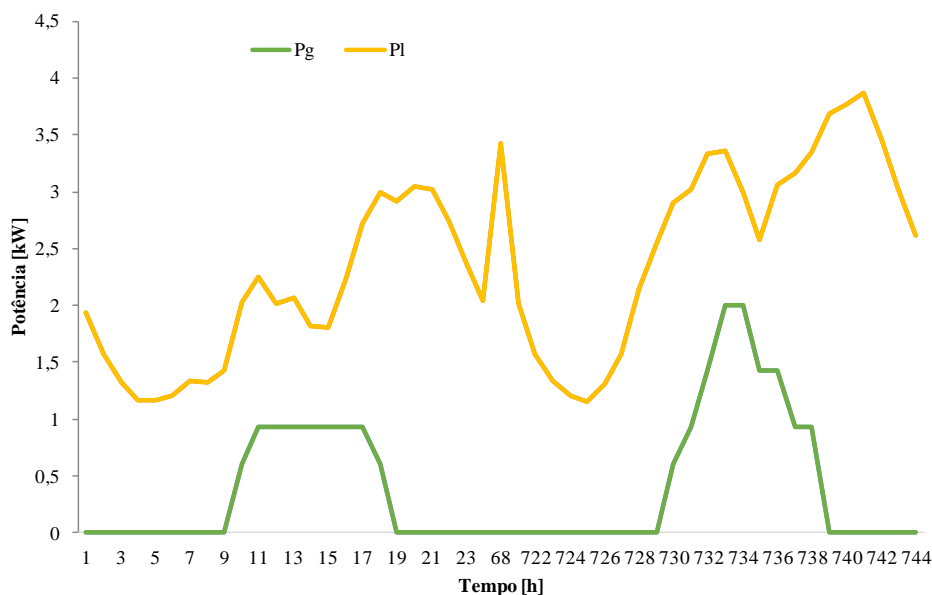


Figura 2.25 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE com aumento do orçamento (janeiro).

Cenário C4 – Situação com deslocamento da carga, venda da totalidade da energia produzida e compra em MLE

Neste cenário é considerado que o *prosumer* promove o deslocamento da potência da carga de acordo com as suas preferências de consumo. À semelhança do cenário C3, é considerado que a totalidade da energia produzida é vendida e que a compra da energia é realizada a uma empresa do MLE. O resultado do PDE está representado na Figura 2.26.

Na Figura 2.26 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . A comparação entre a Figura 2.26 e a Figura 2.23 evidencia o deslocamento da potência da carga. Neste cenário o custo tem um valor de 30 € e a utilidade tem um valor de 3065.45. Em comparação com o valor da utilidade no cenário C2, foi verificado uma redução

do valor em resultado do ajuste da REI e consequente resolução do PDE face à variação da potência resultante do deslocamento da potência da carga.

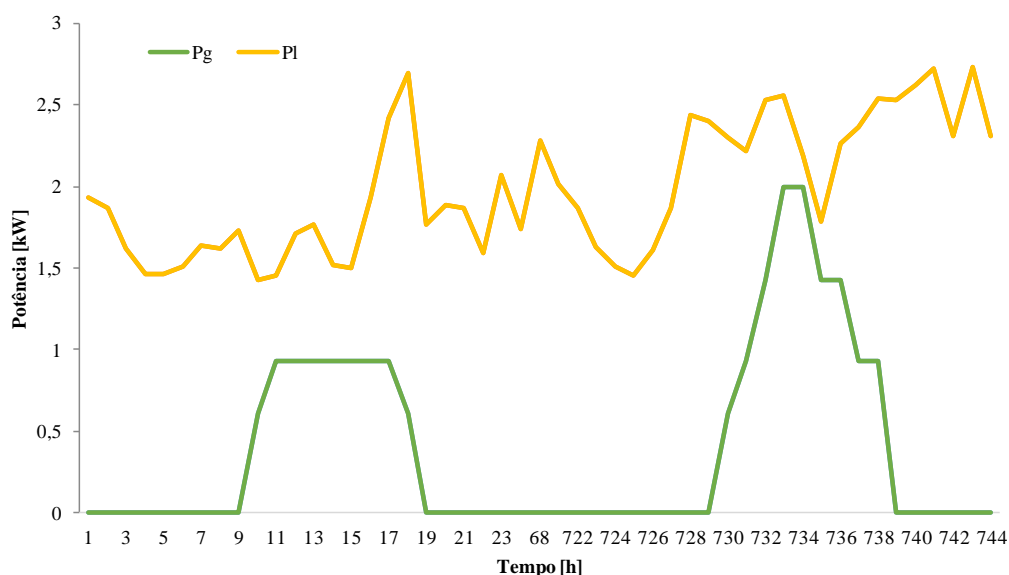


Figura 2.26 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (janeiro).

A comparação entre o valor da potência da carga, considerando os cenários com o deslocamento e sem o deslocamento de carga realizado pelo *prosumer*, está representada na Figura 2.27.

Na Figura 2.27 é possível observar uma redução da potência da carga nas horas de ponta e cheia, ocorrendo um ligeiro aumento nas horas de vazio. Este deslocamento de carga resultou da resolução do PDE, que incorpora as preferências de consumo do *prosumer*.

Cenário C5 – Situação com deslocamento da carga, venda e compra de energia em MLE e redução orçamental

Para a análise deste cenário é considerada uma redução de 50% do orçamento do

prosumer, em janeiro. O resultado do PDE está representado na Figura 2.28.

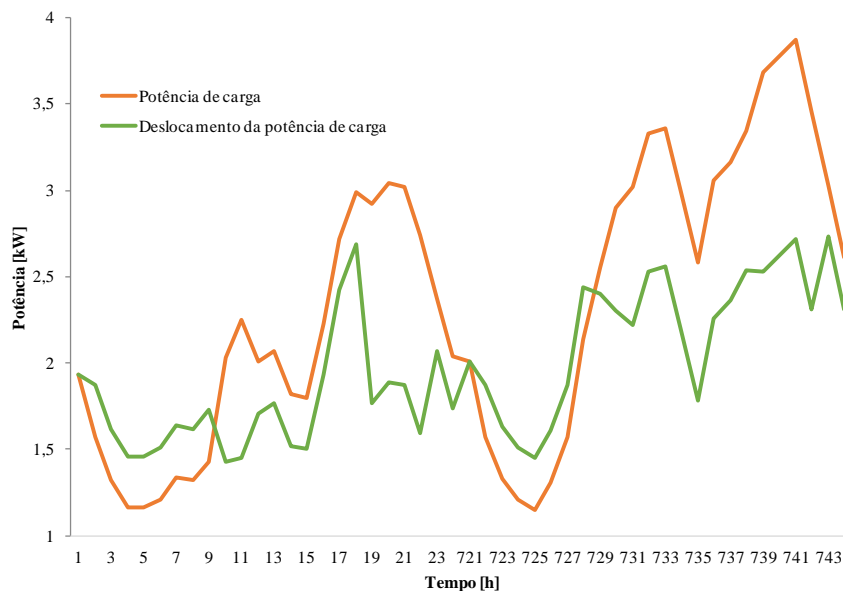


Figura 2.27 – Comparação entre valores mensais de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (janeiro).

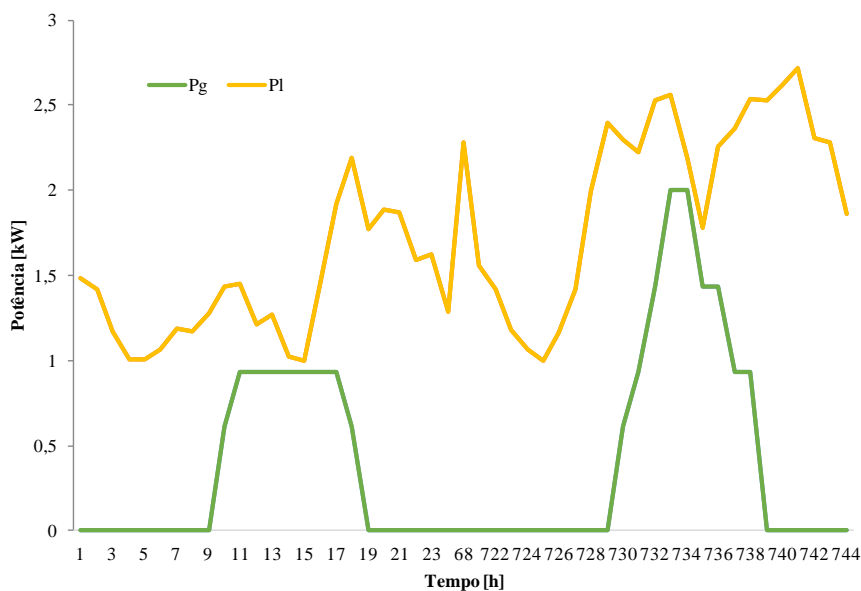


Figura 2.28 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga e redução orçamental (janeiro).

Na Figura 2.28 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l .

Neste cenário o *prosumer* tem um valor de custo de 15 € e a utilidade tem um valor de 1077.82. Em resposta à redução orçamental, a utilidade apresenta um valor inferior comparativamente aos cenários anteriores. Da comparação entre a Figura 2.28 e a Figura 2.26 é possível observar uma redução da potência da carga como resultado do deslastre de cargas realizado por forma a ser possível cumprir as restrições do PDE. A comparação entre os valores de potência da carga face a um deslocamento de carga e ao deslastre de carga está representada na Figura 2.29.

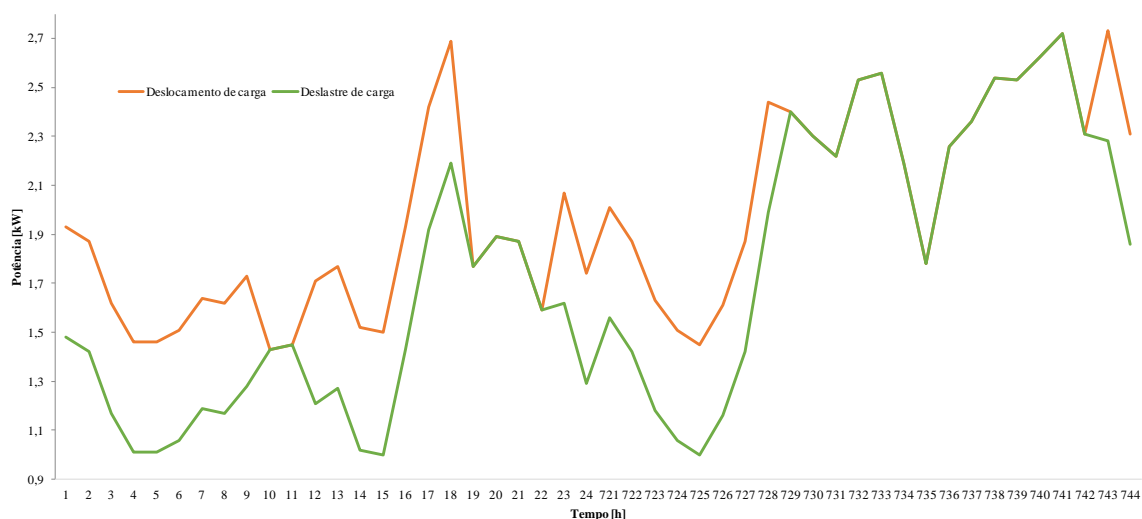


Figura 2.29 – Comparação entre valores mensais de potência referentes a redução e deslastre de carga (janeiro).

Na Figura 2.29 é possível observar que para além do deslocamento da carga, a redução orçamental provocou a existência de um deslastre de carga que ocorreu sobretudo nas horas de ponta, contribuindo para uma redução de consumo e para um maior alisamento do diagrama de carga em comparação com o cenário anterior. É possível verificar que em determinadas horas do primeiro e último dia

de janeiro, não houve deslastre de carga. Estes períodos coincidem com o valor mínimo de potência da carga.

Resolução do problema de despacho económico mensal para julho

De forma idêntica ao caso de estudo apresentado anteriormente, para a resolução do problema de despacho económico são consideradas 744 h, sendo apenas representadas graficamente apenas as primeiras e as últimas 24 h do mês. São apresentados na Tabela 2.2, os preços de compra referentes ao dia 1 e 31 de julho. O valor do preço de venda é 0.142 €/kWh. É estipulado um orçamento mensal de 30 € e que a compra da energia em MLE tem um custo acrescido, com um valor de 0.02 €/kWh.

Cenário C2 – Sistema com venda da energia produzida e compra em MEE

Neste cenário é considerada a venda de toda a energia produzida sendo a compra de energia em MEE. O resultado do PDE está representado na Figura 2.30.

Na Figura 2.30 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . Neste cenário o custo tem o valor de 0.95 € e a utilidade tem um valor de 5522.9.

Cenário C3 – Situação com venda da energia produzida e compra em MLE

Admitindo a compra de energia elétrica a uma empresa do MLE, é considerado um incremento de 0.02 €/kWh ao preço de compra apresentado na Tabela 2.2. O resultado do PDE está representado na Figura 2.31.

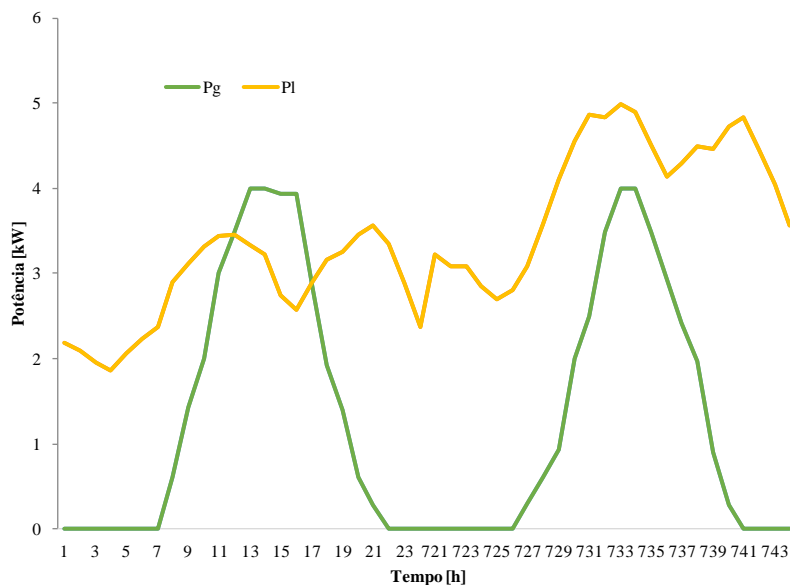


Figura 2.30– Resolução do PDE mensal considerando venda da energia (julho).

Da análise da Figura 2.31 na hora 322 é possível observar que a potência comprada e a potência vendida assumem valores anormalmente elevados. De referir que tanto a potência comprada como a vendida estão referenciadas ao eixo secundário das ordenadas. A solução obtida indicia que exista um problema de convergência que possibilite ao *software* de otimização a determinação de uma solução viável.

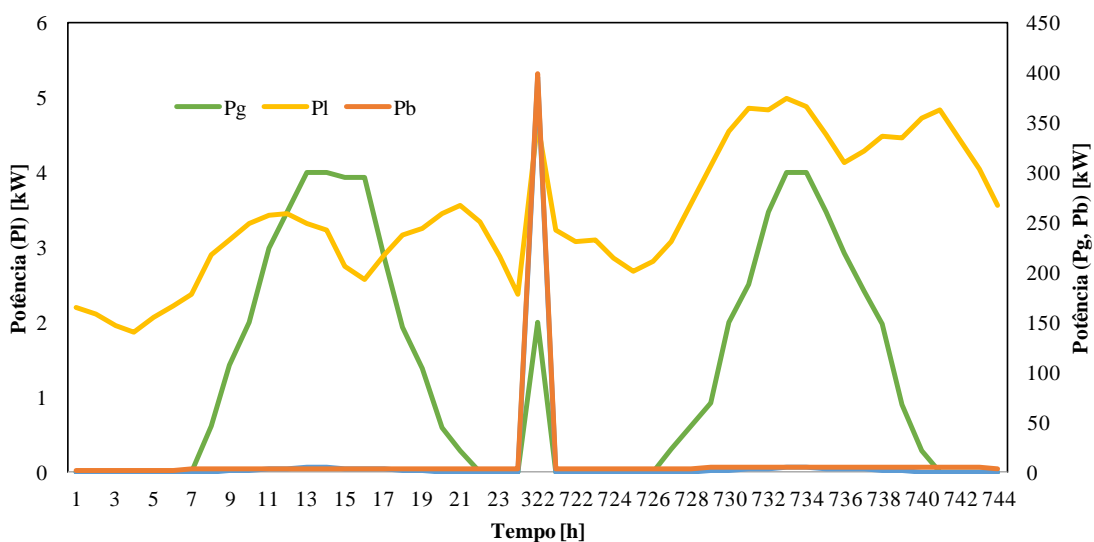


Figura 2.31 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE (julho).

Por forma a obviar o problema de convergência verificado, foi considerado um aumento do valor do orçamento, nesta situação, de 100 €. O resultado do PDE está representado na Figura 2.32.

Na Figura 2.32 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . Neste cenário o custo tem o valor de 54.28 € e a utilidade tem um valor de 2666.73.

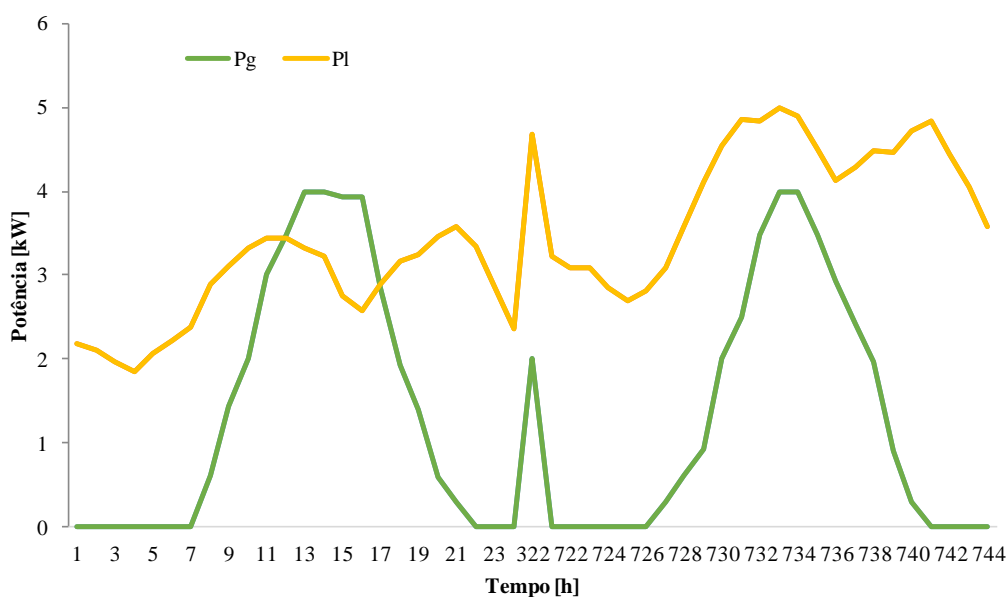


Figura 2.32 – Resolução do PDE mensal com venda da energia e compra em MLE com aumento do orçamento (julho).

Cenário C4 – Situação com deslocamento da carga, venda da totalidade da energia produzida e compra em MLE

Neste cenário é considerado que o *prosumer* promove o deslocamento da carga de acordo com as suas preferências de consumo. À semelhança do cenário C3, é considerado que a totalidade da energia produzida é vendida e que a compra da energia é realizada a uma empresa do MLE. O resultado do PDE está representado na Figura 2.33.

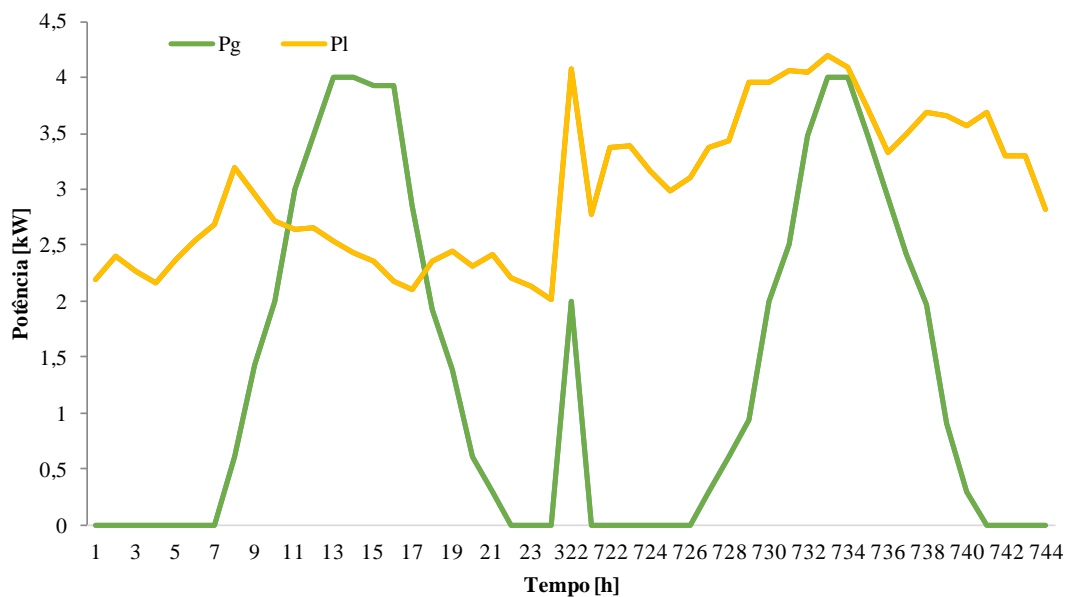


Figura 2.33 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga, venda da energia e compra em MLE (julho).

Na Figura 2.33 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l . A comparação entre a Figura 2.33 e a Figura 2.30 evidencia o deslocamento da potência da carga. Neste cenário o custo tem um valor de 30 € e a utilidade tem um valor de 2338.12. Em comparação com o valor da utilidade no cenário C2, foi verificada uma redução do valor em resultado do ajuste da REI e consequente resolução do PDE face à variação da potência resultante do deslocamento da potência da carga.

A comparação entre o valor da potência da carga considerando os cenários com o deslocamento e sem o deslocamento de carga realizado pelo *prosumer*, está representada na Figura 2.34.

Na Figura 2.34 é possível observar uma redução da potência da carga nas horas de ponta e cheia, ocorrendo um ligeiro aumento nas horas de vazio. Este deslocamento de carga resultou da resolução do PDE, que incorpora as preferências de consumo do *prosumer*.

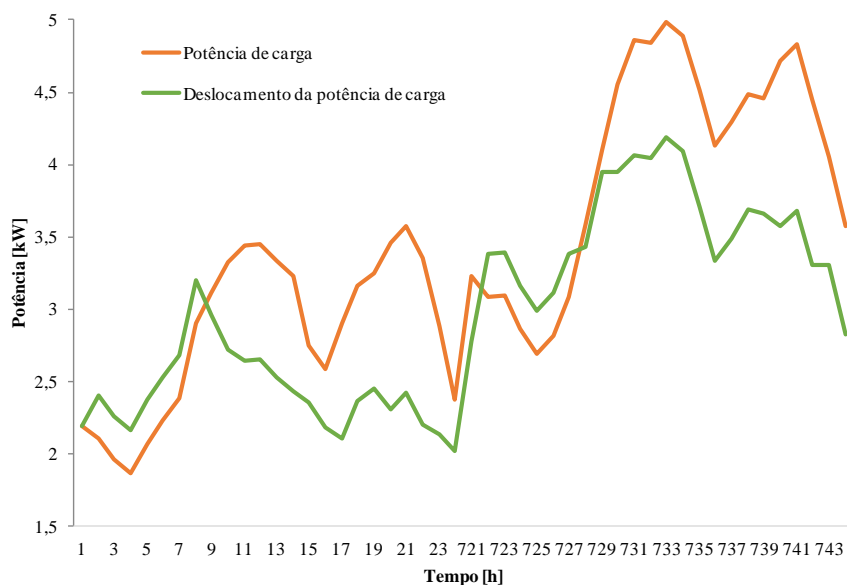


Figura 2.34 – Comparação entre valores mensais de potência com inclusão e exclusão do deslocamento da carga (julho).

Cenário C5 – Situação com deslocamento da carga, venda e compra de energia em MLE e redução orçamental

Para análise deste cenário é considerada uma redução de 50% do orçamento do *prosumer*, em julho. O resultado do PDE está representado na Figura 2.35. Na Figura 2.35 as curvas P_s e P_g são coincidentes, assim como também são coincidentes as curvas da P_b e P_l .

Neste cenário o *prosumer* tem um valor de custo de 15 € e a utilidade tem um valor de 4491.95. Em resposta à redução orçamental, a utilidade apresenta um valor inferior comparativamente aos cenários anteriores. Da comparação entre a Figura 2.35 e a Figura 2.33 é possível observar uma redução da potência da carga como resultado do deslastre de cargas realizado por forma a ser possível cumprir as restrições do PDE. A comparação entre os valores de potência da carga face a um deslocamento da carga e ao deslastre da carga está representada na Figura 2.36.

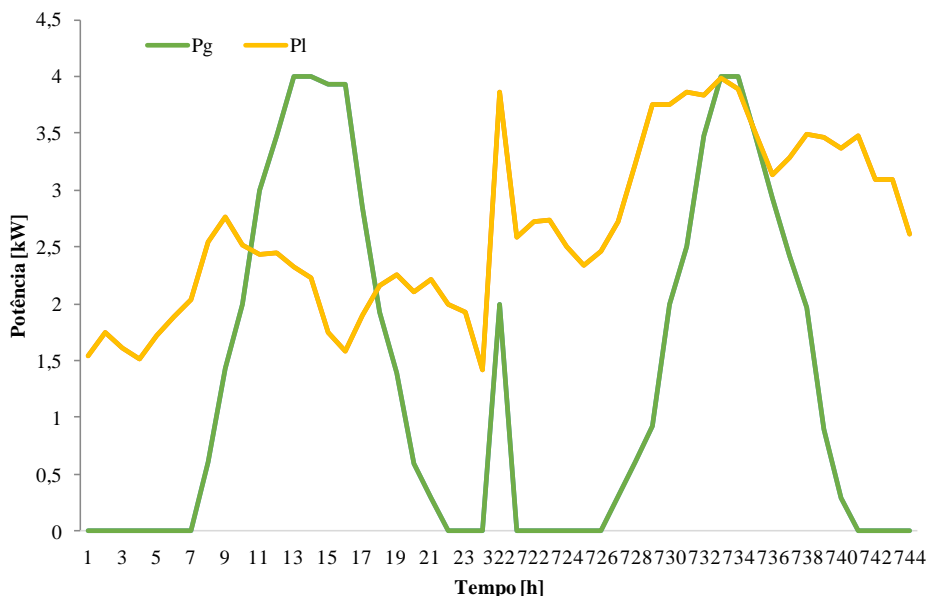


Figura 2.35 – Resolução PDE mensal com deslocamento da carga e redução orçamental (julho).

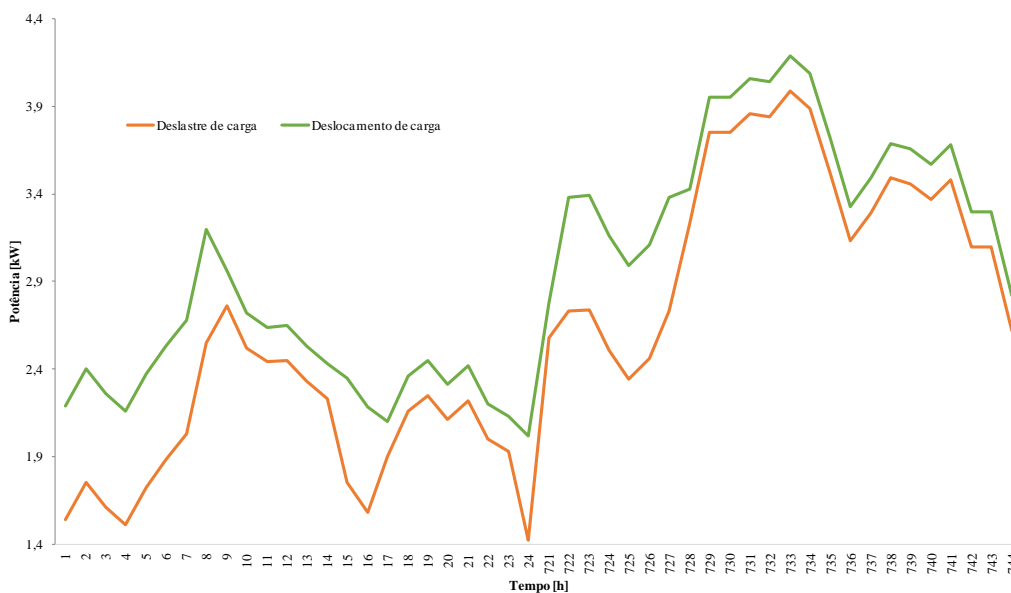


Figura 2.36 – Comparação entre valores mensais de potência referentes a redução e deslastre de carga (julho).

Na Figura 2.36 é possível observar que para além do deslocamento da carga, a redução orçamental incitou a existência de um deslastre de carga que ocorreu em

todas as horas consideradas, contribuindo para uma redução de consumo e para um maior alisamento do diagrama de carga do que o observado no cenário anterior.

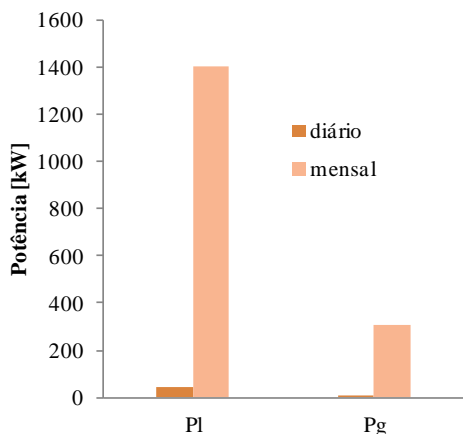
A análise dos quatro cenários dos casos de estudo, permite efetuar um estudo comparativo que evidencie o impacto da sazonalidade bem como a influência dos horizontes temporais considerados para a resolução do PDE.

Análise comparativa dos casos de estudo

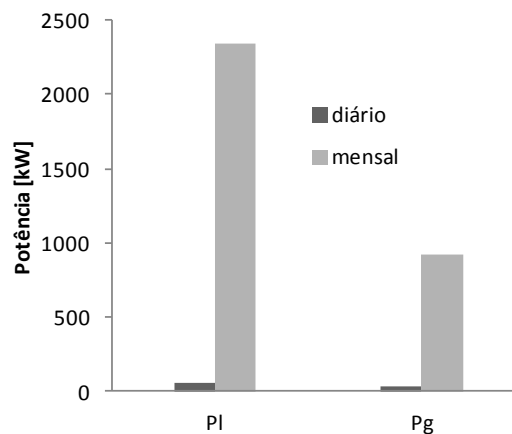
O estudo comparativo entre alguns casos de estudo analisados, evidencia que a escolha de um horizonte temporal mensal para a resolução do PDE, permite um ajuste horário da REI e contribui para aumentar as possibilidades de gestão da carga pelo *prosumer*. É considerado que um horizonte temporal mensal contribui para uma melhor percepção do *prosumer* em relação à potência total de consumo, ao custo da energia elétrica e ao orçamento necessário para satisfazer as necessidades de consumo. Uma comparação entre os valores de potência gerada, potência da carga e custo de energia para os dois horizontes temporais e meses considerados neste estudo estão representados na Figura 2.37a a Figura 2.37d.

A escolha de um horizonte temporal diário facilita a identificação dos limites máximos e mínimos de potência da carga e por conseguinte facilita a identificação dos instantes de tempo onde o ajuste deve ser realizado.

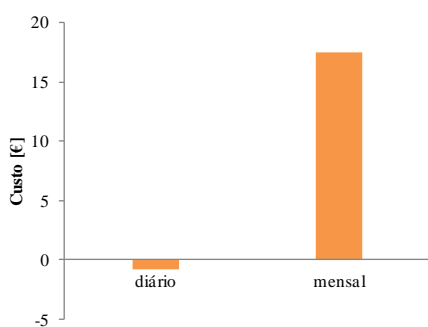
No verão a potência produzida e a potência da carga são superiores à potência produzida e potência da carga no inverno.



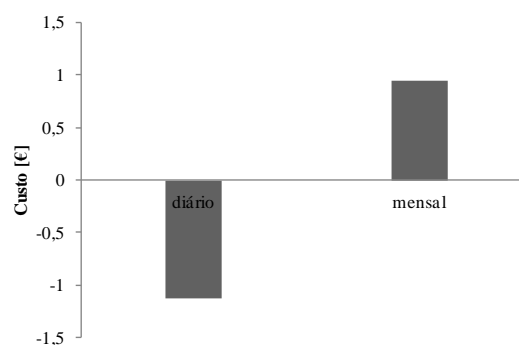
(a) – Potência em janeiro



(b) – Potência em julho



(c) – Custo da energia em janeiro



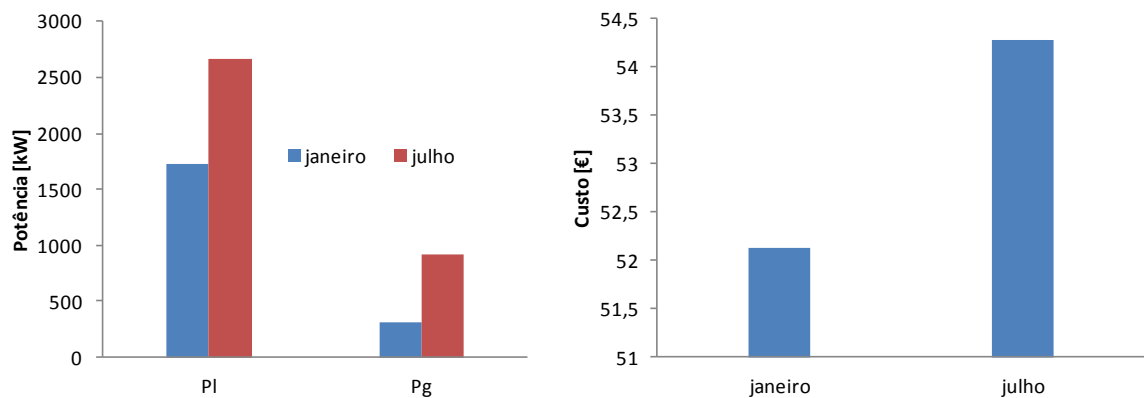
(d) – Custo da energia em julho

Figura 2.37 – Comparação entre valores mensais e diários de potência e custo.

Considerando o cenário C3, e apesar de ser assumida a venda da energia produzida, o custo da energia elétrica no mês de julho é superior ao verificado em janeiro, uma vez que o preço de compra de energia e a potência da carga em julho são superiores aos valores homólogos referentes a janeiro.

A comparação entre os valores da potência da carga e da potência produzida para janeiro e julho está representada na Figura 2.38 (a). A comparação entre o custo mensal da energia para janeiro e julho está representada na Figura 2.38 (b).

Considerando o cenário C4 e em comparação com o cenário C3, é possível verificar que o custo da energia baixa quando é considerado o deslocamento da potência da carga. Uma comparação entre os valores potência da carga, custo de energia e utilidade estão representados na Figura 2.39a a Figura 2.39c.

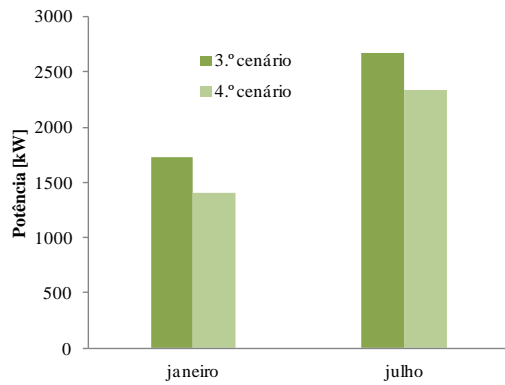


(a) – Comparação entre valores mensais de potência

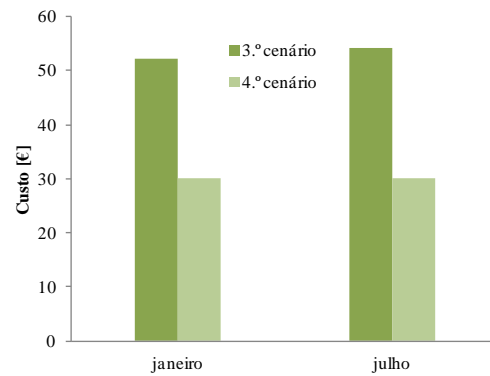
(b) – Comparação entre valores mensais de custo da energia elétrica

Figura 2.38 – Valores mensais de potência e custo referentes ao cenário C3.

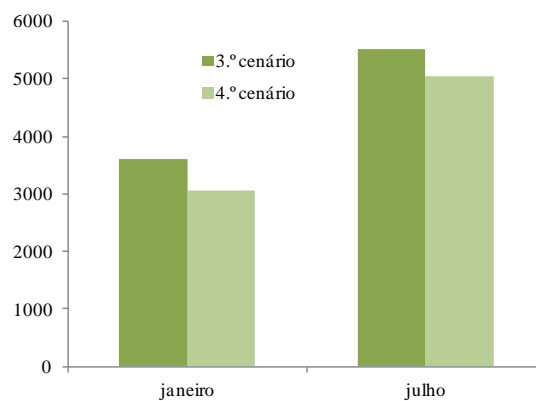
Para esta situação é verificado que, para além do deslocamento da potência da carga, ocorreu um ligeiro deslastre de carga por forma ser possível cumprir o orçamento estabelecido. A redução da potência da carga contribui para a diminuição do valor da utilidade.



(a) – Comparação entre valores mensais de potência da carga



(b) – Comparação entre valores mensais de custo de energia



(c) – Comparação entre valores mensais de utilidade

Figura 2.39 – Comparação entre valores mensais de potência, custo e utilidade referentes aos cenários C3 e C4.

2.5 Análise do Trânsito de Energia

Para a análise do trânsito de energia é considerado um sistema elétrico constituído por quatro barramentos. A REE principal está ligada no barramento 1. Os grupos de *prosumers*, representados por geradores e cargas estão ligados aos restantes barramentos, formando três comunidades de

prosumers. O sistema elétrico considerado no estudo é baseado no modelo *IEEE 4 bus* [Indian12], representado na Figura 2.40.

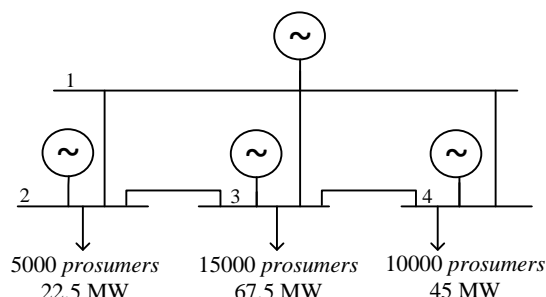


Figura 2.40 – Sistema elétrico constituído por 4 barramentos.

São considerados 30 000 *prosumers* alocados em cada barramento, por corresponder ao número de consumidores afetos ao projeto EDP-InovGrid [EDP09]. Por forma a definir um sistema elétrico desequilibrado, é considerado que o barramento 2 tem associado 5000 *prosumers*, o barramento 3, 15 000 *prosumers* e o barramento 4, 10 000 *prosumers*. Esta distribuição corresponde a uma potência da carga de 22.5 MW no barramento 2, 67.5 MW no barramento 3 e 45 MW no barramento 4.

São considerados três cenários para a análise do trânsito de energia: no 1.º cenário é considerado que os *prosumers* se comportam como consumidores; no 2.º cenário é considerado que os *prosumers* apresentam valores de produção de energia inferiores ao consumo; no 3.º cenário é considerado que os *prosumers* apresentam valores de produção de energia superiores ao consumo.

Em todos os cenários é considerada uma potência da carga de 4.5 kW associada a cada *prosumer*. No 2.º cenário é considerado que cada *prosumer* apresenta um valor de produção de 3.5 kW e no 3.º cenário é considerado que o valor de produção de cada *prosumer* é 5 kW. A escolha dos valores de produção é baseada no valor da potência instalada do sistema de painéis fotovoltaicos considerado para análise dos casos de estudo.

Os cenários são simulados recorrendo ao *software* PSS/E e os parâmetros das linhas de transmissão de energia do sistema elétrico representado na Figura 2.40, são apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Parâmetros das linhas de transmissão

Do barramento	Para o barramento	Resistência (p.u)	Comprimento (km)
1	2	0.08	3
1	3	0.02	3
1	4	0.04	3
2	3	0.01	1
3	4	0.08	1

As reatâncias e admitâncias das linhas de transmissão não são consideradas na análise porque se assume uma REE em BT que não apresenta distâncias consideráveis.

1.º cenário – Os prosumers enquanto consumidores

Considerando que os *prosumers* não têm produção de energia associada e se comportam apenas como consumidores, o resultado do trânsito de energia está representado na Figura 2.41.

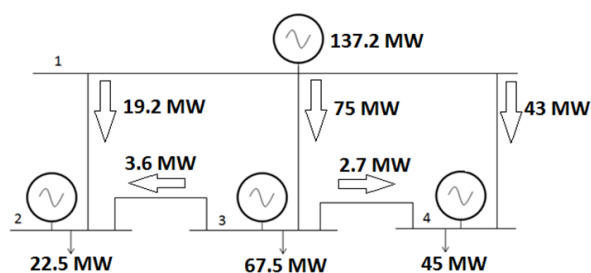


Figura 2.41 – Resultado do trânsito de energia para o 1.º cenário.

Da análise da Figura 2.41 é possível verificar que o valor total da potência da carga é 135 MW e que a REE fornece 137.2 MW, sendo a potência de perdas ativas de 2.2 MW. A linha de transmissão entre o barramento 1 e 3, apresenta um trânsito de potência superior ao valor de carga do barramento 3, que promove o fluxo de potência para os restantes barramentos. A linha de transmissão 1-3 está em sobrecarga face às restantes por apresentar menor resistência elétrica, contribuindo para uma redução da potência de perdas ativa.

2.º cenário – Os prosumers apresentam valores de produção inferiores ao consumo

Considerando que os *prosumers* apresentam valores de energia produzida inferiores ao consumo, o resultado do trânsito de energia está representado na Figura 2.42.

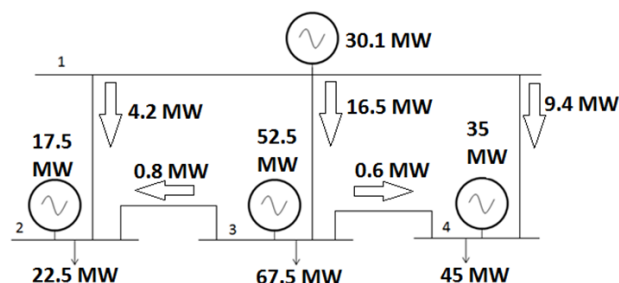


Figura 2.42 – Resultado do trânsito de energia para o 2.º cenário.

Da análise comparativa entre a Figura 2.42 e Figura 2.41, é possível verificar que no 2.º cenário o trânsito de energia baixou para o valor de 135.1 MW. Esta redução no fluxo de energia ocorre em consequência da existência de produção descentralizada. A produção de energia elétrica junto aos locais de consumo contribui para a diminuição das perdas por efeito de Joule no transporte de energia elétrica. O valor da potência de perdas de 2.2 MW verificada no 1.º

cenário baixou para o valor de 0.1 MW no 2.º cenário. A existência de produção descentralizada contribui para a redução da perdas de transporte de energia elétrica. Face ao 1.º cenário, a existência de produção considerada no 2.º cenário contribui para a redução da fatura de energia elétrica.

3.º cenário – Os prosumers apresentam valores de produção superiores ao consumo

Considerando que os *prosumers* apresentam valores de energia produzida superiores ao consumo, o resultado do trânsito de energia está representado na Figura 2.43.

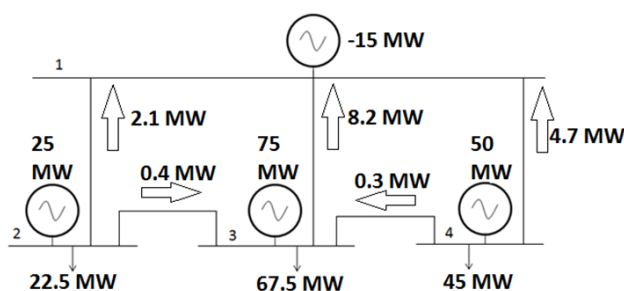


Figura 2.43 – Resultado do trânsito de energia para o 3.º cenário.

Da análise da Figura 2.43 é possível verificar que o fluxo de energia total é de 150 MW, sendo que 135 MW são consumidos localmente e 15 MW são fornecidos à REE. O trânsito de energia diminuiu face aos cenários anteriores, tendo como consequência uma diminuição acentuada da potência de perdas por efeito de Joule no sistema elétrico considerado.

2.6 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o modelo matemático utilizado para a resolução do problema de despacho económico e a previsão da produção e do consumo de energia eléctrica pelo *prosumer* com recurso a RNA. Foi apresentada uma análise dos casos de estudo com o intuito de fornecer elementos suficientes para uma análise adequada do comportamento do sistema, tendo em consideração os limites do modelo apresentado.

A análise do estudo realizado permite afirmar que a compra de energia diretamente em MEE, quando comparada com a compra de energia a uma empresa do MLE, contribui para a diminuição da fatura de energia eléctrica. Foi considerado um aumento do preço de compra da energia eléctrica em MLE de 0.04 €/kWh para um horizonte temporal diário e de 0.02 €/kWh para um horizonte temporal mensal. A diferença de preços foi atribuída por forma a evidenciar a alteração da margem de lucro da empresa comercializadora de energia em MLE e o seu impacte na análise do problema de despacho económico. É considerado que, para horizontes temporais reduzidos a obtenção de lucro pela empresa comercializadora implica um aumento dos preços da energia, enquanto que um horizonte temporal mais alargado permite uma diluição do preço, permitindo praticar preços de compra de energia mais baixos.

Na análise do problema de despacho económico são apresentados dois limites orçamentais, referentes ao horizonte temporal diário e mensal. Uma redução orçamental tem como consequência o deslocamento da potência da carga e o deslastre da carga, que ocorre tendo em consideração a preferência do consumo do *prosumer* ao longo do dia.

Na análise do trânsito de energia é considerado como cenário mais previsível aquele onde o *prosumer* apresenta um valor de potência de consumo superior ao de produção. No entanto é possível verificar que qualquer valor de potência de

produção contribui para uma redução das perdas de energia ao nível de transporte e distribuição de energia elétrica, uma vez que promove a diminuição do fluxo de energia na REE.

CAPÍTULO

3

Modelo de *Demand Response*

Neste capítulo é apresentado um modelo de demand response utilizado como ferramenta de suporte às decisões de gestão de cargas controláveis por consumidores domésticos. O modelo de demand response desenvolvido é enquadrado nos programas de demand response que existem atualmente. São consideradas as necessidades de consumo e benefícios económicos que advêm dessa gestão de cargas controláveis. O modelo é baseado em técnicas de fuzzy clustering e considera a caracterização do consumo em grupos, por forma aumentar a abrangência do modelo aos consumidores domésticos. São analisados vários cenários, os quais consideram a potência disponível e o preço da energia elétrica.

3.1 Introdução

A REI é o principal agente motivacional para futuros projetos de sistemas de energia elétrica [Gangale13], os quais são reconhecidos como sistemas de gestão de energia que proporcionam a integração de produção descentralizada, maioritariamente proveniente de fontes de energia renováveis e que permitem aos consumidores adotar medidas proactivas na gestão da procura [Mah13].

O desempenho dos consumidores é considerado fundamental para o sucesso das REI, pelo que devem ser persuadidos a participar nas iniciativas associadas à gestão da procura [Gangale13].

No âmbito da gestão da procura, está incluída a *demand response* (DR) a qual se associa ao desempenho dos consumidores na gestão da REI, nomeadamente no que se refere ao melhoramento do diagrama de carga e na redução do consumo [Darbur12]. O objetivo da DR, consiste na promoção da alteração do padrão de consumo dos consumidores [Song14], através de programas específicos que suportam as decisões na gestão das suas cargas elétricas controláveis.

O melhoramento do diagrama de carga contribui para evitar a entrada em funcionamento de unidades de geração por um curto período de tempo, evitar a construção de novas unidades de geração destinadas a suportar o consumo durante as horas de ponta ou para satisfazer aumentos previstos nas necessidades de consumo [Dave13]. Consequentemente, os programas de DR contribuem para a redução da poluição atmosférica [Gilbraith13], sobretudo quando é considerado que as unidades de geração referidas recorrem a fontes de energia não renováveis [Pereira13, Zakariazadeh14].

Em [Setlhaolo14], a DR é definida como a redução do consumo de energia elétrica em relação ao consumo exetável, resultante do aumento do preço da energia elétrica ou em resposta ao pagamentos de incentivos.

3.2 Gestão da Procura

A gestão da procura enquanto mecanismo utilizado para promover a alteração da curva de consumo, surgiu antes do conceito de REI.

Na década de 70 do século passado, a crise petrolífera potenciou a discussão sobre a gestão da energia elétrica [Haney10].

Na década de 80 do século passado, era discutido qual o impacto da gestão da procura bem como as alternativas existentes para realizar essa gestão [Delgado85]. Passadas pouco mais de duas décadas, algumas das alternativas apresentadas continuam válidas, nomeadamente aquelas que se referem ao preenchimento das horas de vazio, à redução dos picos de consumo ou à conservação de energia resultante do aumento da eficiência na sua utilização, produção e distribuição. As REI permitiram retomar a discussão da gestão da procura, sobretudo devido à comunicação bidirecional disponível neste tipo de redes e à existência de contadores inteligentes em edifícios residenciais e de serviços.

Na literatura, existem algumas definições de gestão da procura. Nomeadamente em [Ferreira12], a gestão da procura pressupõe a identificação e implementação de iniciativas que melhoram a utilização da capacidade instalada pelo operador da REE, através da alteração das características da procura de energia elétrica.

Em [Delgado85] a gestão da procura está relacionada com o planeamento e implementação de atividades dos operadores da REE, que influenciam o consumidor por forma a alterar a curva de consumo. Em [Darbur12] a gestão da procura representa os procedimentos dos consumidores e operadores da REE que promovem a mudança na quantidade ou no tempo de consumo de energia elétrica.

O objetivo da gestão da procura consiste na redução dos picos de consumo de energia elétrica, na promoção da eficiência energética e na integração de fontes

de energia renováveis [Malik11]. A redução do consumo de energia elétrica é preconizada pela redução dos custos de operação da REE, conseguida através da alteração dos consumos energéticos dos consumidores, beneficiando os consumidores e os operadores da REE [Ferreira12].

A redução dos picos de consumo contribui para minimizar o investimento em centros produtores de energia elétrica, em linhas de transmissão e permite facilitar a utilização de energia armazenada para compensar a falta de produção em situações de aumento de procura de energia elétrica. A promoção da eficiência energética visa mitigar as perdas de energia e a integração de fontes de energia renováveis, enquadrada em mecanismos de resposta à procura, pretende incitar a alteração dos padrões de consumo dos consumidores de acordo com a disponibilidade da geração provinda de fontes de energia renováveis.

Para o cumprimento dos objetivos da gestão da procura foram definidas estratégias complementares que são relevantes para a diminuição da fatura energética, nomeadamente a eficiência energética, a conservação da energia e a DR [Boshell08].

Em Portugal a estratégia da eficiência energética está presente no Programa E4 – Programa de Eficiência Energética e Energias Endógenas, aprovado em 2001 e no Programa PNAC – Programa Nacional para as Alterações Climáticas, aprovado em 2003, os quais promovem a produção e energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis e a eficiência energética [Melício10]. Mais recentemente o plano PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 e a sua integração com o PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para a período 2013-2020, permite uma ação concertada para o cumprimento dos objetivos nacionais e europeus, minimizando o investimento e aumentando a competitividade [ADENE14]. A integração do PNAER no PNAEE potencia a integração de fontes de energias renováveis em três setores, nomeadamente, aquecimento e

arrefecimento, eletricidade e transporte. Além disso, potencia a redução do consumo energético em seis áreas específicas, nomeadamente, transporte, residencial e serviços, indústrias, comportamentos e agricultura [ADENE14]. A nível internacional e de forma resumida, a estratégia da eficiência energética é traduzida em ações que visam a diminuição do consumo energético através de ajustes ou substituição de equipamentos por outros equivalentes que consomem menos energia, diminuindo as perdas energéticas [Boshell08].

Em Portugal, a estratégia da conservação da energia está associada à utilização racional dos recursos energéticos e ao incremento da produção a partir de fontes de energia renováveis. Em 1988 foi criado o Sistema de Incentivos à Utilização Racional de Energia de Base Regional, que juntamente com o Decreto-Lei n.º 189/88, potenciaram o desenvolvimento da produção de energia elétrica por produtores independentes, valorizando a utilização de recursos endógenos [Antunes03]. Em 1997 as Nações Unidas lançaram a “Iniciativa para a Conservação da Energia”, que analisa a utilização da energia em 53 países, incluindo Portugal [Antunes03]. A nível internacional e de forma resumida, a estratégia da conservação da energia consiste em reduzir o consumo ou prescindir de um equipamento ou serviço para poupar energia [Boshell08].

Em Portugal, a estratégia de DR está em desenvolvimento. Em [Almeida13], o impacto da integração das fontes de energia renováveis é potenciado pela integração complementar da gestão da procura e do controlo dinâmico das cargas, i.e., DR. A DR permite o controlo do ciclo de funcionamento de determinadas cargas, em resposta aos operadores do sistema de energia elétrica, para a obtenção de uma redução “instantânea” de consumos no momento exato em que ocorrem situações críticas de intermitência da energia elétrica. A nível internacional e de forma resumida, a estratégia da DR permite adaptar a carga à geração existente, incentivando a integração de geração provinda de fontes de energia renováveis [Siano14].

3.3 Programas de *demand response*

A DR permite moldar o diagrama de carga por forma a ser mais uniforme, contribuindo para uma diminuição do consumo e otimizando os recursos disponíveis [Batlle09].

Definições

Na literatura existem algumas definições de DR. Nomeadamente em [Torriti10] a DR representa um conjunto de ações que poderão ser tomadas pelo consumidor em resposta a condições particulares do sistema elétrico, designadamente períodos de pico, congestionamento da rede ou preços elevados. Em [Stromback10] a DR consiste em qualquer programa que permita ou incentive o consumidor a diminuir ou alterar horas de consumo de energia, evitando o consumo durante os períodos em que o preço da energia é mais elevado.

A implementação de programas de DR depende da adesão dos consumidores, uma vez que é uma solução intrinsecamente relacionada com hábitos de consumo, incitando os consumidores a apresentarem flexibilidade no horário de utilização dos seus equipamentos elétricos. Esta gestão dos horários de consumo é realizada de acordo com as características operacionais da REE, no entanto, as preferências do consumidor serão salvaguardadas.

Os programas de DR têm por objetivo, constituir uma ferramenta que permita, num curto e médio prazo, minimizar o impacto das restrições técnicas, nomeadamente as sobrecargas nas linhas, a sobrelevação da tensão ou o colapso do sistema elétrico, ajustando o consumo à geração disponível [Batlle10]. A longo prazo, permitir reduzir as necessidades de investimento no sistema elétrico, bem como contribuir para o descongestionamento da REE [Batlle10]. Outro

objetivo dos programas de DR consiste na redução da fatura energética do consumidor, sem modificar o seu grau de conforto, alterando o consumo das cargas elétricas para intervalos de tempo em que o preço da energia elétrica é mais baixo.

Os programas de DR são classificados de acordo com diferentes critérios. No entanto, porque a maioria dos programas desenvolvidos pretendem dar resposta a cenários específicos, a comparação entre os diferentes tipos de programas existentes não é direta e a sua classificação não é uniforme [Dave13]. Contudo, é possível encontrar algumas similaridades em cada classificação [Song14, Palensky11, Albadi08, Aalami08, Han08, Aalami10]. Genericamente os programas são classificados em dois tipos: *Time-based Programs* (TBP) [Song14, Albadi08, Aalami08, Han08], também designado por *Price-Based Programs* (PBP) [Song14, Albadi08] ou *Time-Based Rated Programs* (TBR) [Wang10] e *Incentive-Based Programs* (IBP).

Recentemente estes programas de DR foram caracterizados em três subtipos: *Price Options*, *Incentive-Based Options* ou *Event-Based Options* e *Demand Reduction Bids* [Siano14].

Programas de DR do tipo TBP

Os programas do tipo TBP, são aqueles em que o preço da energia elétrica é alterado em diversos períodos temporais de acordo com o preço da fonte de energia elétrica [Moghaddam11]. Nestes programas o diagrama de carga é melhorado, não só devido ao aumento do preço da energia elétrica durante os períodos de pico, mas também à redução dos preços da energia elétrica fora desses períodos. Num contexto de sistema de energia elétrica, os programas TBP têm como objetivo aumentar a competição, diminuir o poder dos mercados de

energia, melhorar a fiabilidade e permitir a utilização de tecnologias subjacentes às fontes de energia renováveis [Wang10]. Os TBP abrangem os programas [Albadi08, Han08, Siano14, Aalami10]: *Time Of Use* (TOU), *Critical Peak Pricing* (CPP), *Real-Time Pricing* (RTP), *Extreme Day Pricing* (ExDP), *Extreme Day CPP* (ED-CPP), *Variable Peak Pricing* (VPkP) [DEUSA14] e *Critical Peak Rebates* (CPR) [DEUSA14].

Assim, o programa TOU consiste na existência de conjuntos de taxas com preços fixos, os quais diferem ao longo do dia por forma a apresentarem o preço elevado na produção durante o período de pico e um preço mais reduzido fora desses períodos [Siano14]; o programa CPP tem por objetivo transmitir ao consumidor o valor real dos custos de produção através de taxas que incluem valores elevados durante um período de tempo limitado, sendo o valor da taxa estipulado pela utilidade. Nas restantes horas, os consumidores têm descontos se conseguirem deslocar as cargas, para períodos onde o preço da energia elétrica é mais baixo [Siano14, Faruqui10]; o programa RTP consiste na aplicação de taxas que variam, comumente de hora-em-hora, em resposta ao preço do mercado grossista de eletricidade [Siano14]; o programa ExDP é similar ao programa CPP, porque consiste na aplicação de taxas elevadas, embora no programa ExDP o período considerado corresponda a 24 h de um dia não determinado, conhecido com um dia de antecedência [Albadi08]; o programa ED-CPP consiste na aplicação de taxas estabelecidas para horas de ponta e taxas para fora dessas horas de ponta, em dias considerados extremos, embora nos restantes dias seja aplicada uma taxa fixa; o programa VPkP consiste na aplicação de diferentes preços da energia elétrica, em determinados períodos, variando o preço estabelecido para as horas de ponta de acordo com as condições de mercado de energia e com a utilidade [DOE14]; o programa CPR consiste no reembolso ao consumidor de um valor previamente estipulado, caso este apresente um decréscimo no consumo em relação ao consumo que seria expectável pela utilidade, em situações em que a utilidade antecipa ou verifica o aumento do

preço em MEE, ou a ocorrência de situações de emergência no sistema de energia elétrica, ou a ocorrência de eventos críticos durante períodos de tempo previamente determinados [DOE14].

Programas de DR do tipo IBP

Os programas do tipo IBP, são aqueles em que o preço da energia elétrica é alterado em determinados períodos de tempo previamente estabelecidos ou, é alterado de forma dinâmica, de acordo com o dia, semana ou ano, e de acordo com a margem de reserva de energia elétrica existente [Siano14]. De forma análoga, aos programas do tipo TBP, os programas do tipo IBP apresentam um preço da energia elétrica mais elevado durante os períodos de pico e um valor mais baixo fora desses períodos. O valor do preço da energia elétrica pode ser estipulado antecipadamente com um espaço temporal de um dia, de uma hora ou em tempo real, adaptando o consumidor o seu consumo, de acordo com a alteração estipulada, ou verificada, do preço da energia elétrica [Siano14]. Os IBP abrangem os programas: *Direct Load Control* (DLC), *Interruptible/Curtailable* (IC), *Demand Bidding/Buyback* (DBB), *Emergency DR* (EMDR), *Capacity Market* (CM), *Ancillary Services Market* (ASM) [Albadi08, Aalami08, Han08]. Os programas DLC e IC são considerados IBP clássicos, enquanto que os programas EMDR, CM e ASM são considerados IBP baseados em mercado de energia [Albadi08].

O programa DLC consiste no pagamento de incentivos ao consumidor para permitir que a utilidade tenha algum grau de controle sobre determinados equipamentos [Siano14]; o programa IC consiste na obtenção de taxas de redução do preço de energia pelo consumidor, por concordar em diminuir o seu consumo quando solicitado [Siano14]; o programa DBB consiste na oferta de preços pelo consumidor para restringir o consumo em situações onde o preço, em

mercado de energia, é elevado [Siano14]; o programa EMDR consiste no pagamento de incentivos ao consumidor, para este restringir o seu consumo quando exista necessidade de garantir a fiabilidade do sistema de energia elétrica [Siano14]; o programa CM consiste no pagamento de incentivos ao consumidor para restringir o seu consumo [Siano14]; o programa ASM consiste no pagamento de incentivos ao consumidor por parte do operador da REE, pelo seu compromisso em restringir o consumo sempre que seja necessário apoiar o funcionamento da REE [Siano14].

Vantagens e inconvenientes dos programas de DR

Os programas de DR, do ponto de vista da REE, apresentam as vantagens de contribuir para a redução de energia elétrica durante as horas de ponta, contribuir para auxiliar o equilíbrio entre a oferta e a procura de energia elétrica e em situações de contingência evitam interrupções no sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica. Os programas de DR contribuem para o adiamento de investimentos no reforço da REE e contribuem também para o aumento da sua fiabilidade. Permitem ainda: i) evitar investimentos em centros de produtores de energia, para garantir picos de procura de energia elétrica; ii) reduzir os requisitos em capacidade de reserva e iii) permitem também uma maior penetração das fontes de energia renováveis na REE [Siano14].

Do ponto de vista dos consumidores, os programas de DR permitem a redução de fatura de energia elétrica ou o pagamento de incentivos [Siano14].

Do ponto de vista dos MEE, o programas de DR contribuem para a redução da volatilidade dos preços e proporcionam mais opções de escolha ao consumidor [Siano14].

Aos programas de DR, são apontadas desvantagens, nomeadamente, a falta de conhecimento dos consumidores ou a falta de informação que permita tirar partido da variação do preço da energia elétrica, a dificuldade na análise dos diferentes programas de DR e a escolha mais adequada para o consumidor [Rastegar12]. Uma vez que os principais destinatários dos programas de DR têm sido os setores industriais e comerciais, para o setor doméstico a informação disponibilizada, os requisitos de comunicação e os métodos de acesso não se encontram no mesmo nível de desenvolvimento [Gyamfi12]. Apesar das desvantagens, a crescente implementação da REI propicia o desenvolvimento dos programas de DR [Setlhaolo14].

3.4 Modelo de *Demand Response*

O modelo de DR é aplicado a consumidores domésticos, os quais são caracterizados por perfis que dependem do comportamento do consumidor e dos equipamentos elétricos existentes. Os equipamentos elétricos existentes podem ser classificados em grupos. Assim, no modelo de DR apresentado em [Chen12, Setlhaolo14] é considerada a classificação dos equipamentos elétricos em quatro grupos principais. A similaridade entre perfis de consumo domésticos depende de determinados fatores, nomeadamente, do agregado familiar, do tipo de residência e do estrato social do consumidor. O consumo doméstico em contraponto com o consumo industrial é caracterizado por uma considerável variabilidade. Os consumidores industriais são caracterizados por terem perfis de consumo que dependem do tipo e da dimensão da indústria considerada, i.e., é expectável que indústrias semelhantes apresentem perfis de consumo semelhantes. Enquanto que a determinação de perfis de consumo entre consumidores domésticos é mais complexa.

O programa de DR considerado é do tipo TBP/ RTP e tem por objetivo suportar as decisões e ações do consumidor doméstico na gestão de cargas que são designadas por cargas controláveis. É considerada carga controlável (CC) aquela carga em que o consumidor pretende racionalizar a sua utilização. A gestão das CC é conseguida através da alteração do horário de funcionamento das cargas ou através de métodos de redução de carga [Pereira13]. Esta gestão tem associados potenciais benefícios económicos, os quais advêm do preenchimento das horas de vazio e da diminuição do consumo nas horas de ponta. O modelo de DR desenvolvido tem em consideração a potência disponível e o preço da energia elétrica, tendo o propósito de permitir flexibilidade aos consumidores para explorar os potenciais benefícios económicos considerando uma gestão das CC que se apresente mais adequada à vida quotidiana do consumidor ou ao seu perfil de consumo.

Considerações ao modelo DR

É considerado o consumo diário correspondente a um dia de semana, de uma família que está ausente da sua residência durante dez horas. É considerado que cada CC tem que cumprir todos os programas previamente estipulados, i.e., por exemplo, o programa da máquina de lavar roupa não pode ser interrompido ou cancelado, entre outros. De acordo com as necessidades de consumo, a família escolhe uma lista de prioridades de CC a ser seguida. O modelo de DR desenvolvido considera que o consumidor recebe informação horária da potência disponível e do preço da energia elétrica. O ajuste do diagrama de consumo às necessidades de consumo durante um determinado horizonte temporal e em relação ao preço da energia elétrica correspondente, está sujeito às seguintes considerações [Pereira13]:

- a potência disponível é variável no horizonte temporal definido, por forma a reproduzir o comportamento da geração distribuída, permitindo uma modelização adequada da DR;
- o consumidor pode optar por não utilizar uma das CC da lista de prioridades selecionada por forma a alocar a potência disponível à CC prioritária seguinte, i.e., a hierarquia da lista de prioridades de CC é sempre obedecida, de acordo com o exemplificado na Tabela A3.1 no Anexo 3.1 e descrito na alínea a) ;
- caso exista potência disponível para colocação em funcionamento de uma CC, mas que implique o desrespeito da hierarquia da lista de prioridades, essa potência disponível não é utilizada, de acordo com o exemplificado na Tabela A3.1 no Anexo 3.1 e descrito na alínea b) ;
- quando a soma da potência das CC coincide com o valor da potência disponível, não pode ser colocada em funcionamento outra CC.

São definidos perfis de consumo e modos de operação de acordo com uma padronização do consumo dos consumidores. Os perfis de consumo e modos de operação são definidos de forma a assegurar uma cobertura alargada ao modelo de DR e apoiar os consumidores na gestão das CC em vários períodos do dia. Os perfis de consumo permitem estabelecer os intervalos de preço da energia elétrica que melhor se adequam às necessidades do consumidor e os modos de operação permitem estabelecer hierarquias de prioridades para as CC auxiliando o consumidor na gestão do consumo, face à potência disponível. Os três perfis de consumo são: económico, moderado e exigente. Os modos de operação são: asseio e conforto. O perfil económico é selecionado para permitir a utilização das CC apenas quando o preço da energia elétrica é baixo, representado pelo intervalo de preço 1. O perfil económico é selecionado para permitir a utilização das CC apenas quando o preço da energia baixo ou médio, representado pelo intervalo de preço 2 . O perfil exigente é selecionado para permitir a utilização das CC independentemente do preço da energia elétrica.

As listas de prioridades para os modos asseio e conforto estão representadas na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respetivamente. São considerados os dois modos de operação para cada perfil de consumo, por forma a atribuir maior grau de flexibilidade de utilização das CC ao consumidor, garantindo desta forma que possa selecionar a mesma hierarquia da lista de prioridades de CC, ao preço que for mais conveniente. Ambas, Tabela 3.1 e Tabela 3.2, contêm a informação necessária que permite ao consumidor tirar partido do modelo de DR, pelo que são consideradas ferramentas de apoio na decisão do consumidor. A Tabela 3.1 e a Tabela 3.2, apresentam a mesma lista de prioridades de CC para os perfis de consumo, económico, moderado e exigente. Desta forma é possível garantir que a lista prioridade de CC definida pelo consumidor é obedecida, mesmo em situações em que diferentes perfis de consumo são selecionados.

Tabela 3.1– Lista de prioridades das cargas controláveis para o modo asseio

Perfil económico	Perfil moderado	Perfil exigente
	1. Máquina de lavar loiça 2. Máquina de lavar roupa 3. Máquina de secar 4. Ar condicionado 5. Termoventilador	
Preço baixo	Preço baixo ou médio	Preço baixo, médio ou elevado

Tabela 3.2 – Lista de prioridades das cargas controláveis para o modo conforto

Perfil económico	Perfil moderado	Perfil exigente
	1. Ar condicionado 2. Termoventilador 3. Máquina de lavar roupa 4. Máquina de lavar loiça 5. Máquina de secar	
Preço baixo	Preço baixo ou médio	Preço baixo, médio ou elevado

As listas de prioridades presentes na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 são as mesmas

para os diferentes casos de estudo a apresentar, de modo a possibilitar uma análise comparativa do modelo de DR desenvolvido.

Para a determinação das CC da Tabela 3.1 ou da Tabela 3.2 foram selecionadas cargas que têm associado um maior consumo de energia elétrica ou cargas que têm uma utilização reduzida, mas que apresentam flexibilidade no horário de funcionamento a partir de informação disponibilizada em [DGGE04]. A qual resulta de um estudo sobre a repartição da energia elétrica pelos vários equipamentos elétricos existentes numa residência. Uma vez que os equipamentos que apresentam maior consumo, nomeadamente os equipamentos de refrigeração não têm flexibilidade de alteração do seu horário de funcionamento ou de alteração da carga, são selecionados por ordem decrescente de consumo os equipamentos utilizados na climatização, nomeadamente o ar condicionado e termoventilador. Os equipamentos que têm associada uma utilização irregular, nomeadamente os equipamentos afetos à iluminação e os equipamentos afetos a meios audiovisuais e informáticos, foram preteridos para a classificação de CC. Por último, as máquinas de lavar roupa, loiça e de secar, por representarem 10 % do total de consumo de energia elétrica residencial e uma vez que permitem uma flexibilização do seu horário de funcionamento de acordo com as rotinas do consumidor, são selecionadas como CC.

O modelo de DR desenvolvido é tipificado para um consumidor doméstico com uma potência contratada de 6.9 kVA e com a quantidade e potência associada às CC apresentada na Tabela 3.3.

Os valores de potência apresentados na Tabela 3.3, foram atribuídos de acordo com os valores apresentados no simulador da ERSE [ERSE12a].

A associação da padronização do consumo com a implementação de um controlador que apoie as decisões do consumidor, é realizada através do método *fuzzy clustering* subtrativo.

Tabela 3.3– Quantidade de cargas controláveis e respetiva potência

Cargas controláveis	Potência [kW]	Quantidade
Ar condicionado	1.8	1
Máquina de lavar loiça	2.0	1
Máquina de lavar roupa	2.0	1
Máquina de secar	3.5	1
Termoventilador	2.0	1
Total	11.3	5

3.5 Controlo *Fuzzy Clustering* Subtrativo

Foram adotadas técnicas de *clustering* para implementação do controlador, uma vez que permitem a identificação de padrões em conjuntos de dados. A alternativa de estabelecimento das regras para o controlador *fuzzy* seria em grande número, devido às relações existentes entre as entradas e as saídas do controlador.

Técnicas de clustering

As técnicas de *clustering* consistem num processo utilizado para encontrar similaridades num conjunto de dados e agrupar os dados similares num *cluster* por forma a garantir uma generalização substancial do conjunto de dados [Bonner64, Hammouda00].

Cada *cluster* tem associado um centro, caracterizado por um ponto de informação ou dado, designado por *cluster center*. O *cluster center* é um ponto do grupo de dados contido no *cluster* que capta as similaridades entre todos os pontos do *cluster*, i.e., a similaridade entre pontos de um grupo representado por um *cluster center* é superior à similaridade de outros quaisquer pontos representados por

cluster centers diferentes [Hammouda00].

As técnicas de *clustering* quando aplicadas a um conjunto de pontos representados por um vetor de entrada, através da medição de uma distância dada pela similaridade métrica entre o vetor de entrada e todos os *cluster centers* existentes, permitem identificar a que *cluster center* pertence esse ponto, através da identificação do *cluster* que se encontra mais próximo, ou do *cluster* que é mais similar [Hammouda00].

O conjunto de dados considerado para a implementação do controlador *fuzzy* é constituído pelos pontos de informação que representam o comportamento de DR. Considerando como exemplo, os parâmetros de entrada, caracterizados pelos estados A, B e C e os parâmetros de saídas caracterizados pelos estados D e E, então o ponto de informação correspondente é constituído pelos estados (A, B, C, D, E), sendo que na realidade as letras serão representadas pelos pesos associados a cada variável, de entrada e de saída, do controlador.

As técnicas de *clustering* podem ser do tipo *on-line* ou do tipo *off-line* [Hammouda00]. Na técnica do tipo *on-line*, cada vetor de entrada representativo do ponto de informação é utilizado para atualizar os *cluster centers*, i.e., os *cluster centers* são calculados à medida que mais vetores de entrada são introduzidos. A técnica do tipo *off-line* utiliza um conjunto de dados representativo do sistema. Os *cluster centers* são identificados através da análise dos vetores de entrada contidos no conjunto de dados e após a sua identificação, os *cluster centers* são fixados e utilizados posteriormente para a classificação de novos vetores de entrada [Hammouda00].

Para a implementação do controlador *fuzzy* é utilizada a técnica *clustering* do tipo *off-line* uma vez que se pretende padronizar um comportamento de DR, sendo desejável realizar um controlador que ajuste as condições de entrada aos parâmetros definidos, garantindo um desempenho consistente do modelo de DR.

Existem várias técnicas *clustering* do tipo *off-line*, nomeadamente, *fuzzy K-means clustering*, *fuzzy C-means clustering*, *mountain clustering* e *subtractive clustering*, descritas e comparadas na literatura [Hammouda00, Parnphumeesup11, Wang10a, Pryono05]. Nesta tese foi utilizada a técnica de *subtractive clustering* para o desenvolvimento do controlador.

Descrição da técnica de subtractive clustering

A técnica de *subtractive clustering* [Chiu94] é uma extensão da técnica de *mountain clustering* [Yager94] apresentada no Anexo 3.2, em que a diferença entre o *subtractive clustering* e o *mountain clustering*, reside no método de cálculo dos *cluster centers* e no tempo de computação associado. Enquanto na técnica de *mountain clustering* o cálculo dos *cluster centers* é efetuada para todas as interseções das redes criadas, na técnica de *subtractive clustering* é considerado que todos os pontos de informação são candidatos à definição de *cluster center*. Assim, o tempo de computação associado à técnica de *mountain clustering*, por depender da quantidade dos dados de entrada e do número de redes criadas, é superior ao tempo de computação da técnica de *subtractive clustering*, que apenas depende da quantidade de dados de entrada.

A técnica de *subtractive clustering*, é baseada num conjunto de dados avaliados pela função de montanha. Após realizada a avaliação, os *cluster center* obtidos são analisados para determinar a sua validade [Chiu94]. Dado um conjunto de n pontos de informação num espaço M -dimensional, a técnica de *subtractive clustering* começa por assumir cada ponto de informação x_i como um potencial *cluster center* com um potencial dado em função das distâncias Euclidianas entre todos os pontos de informação [Chiu94]. A função montanha avalia a possibilidade de cada ponto de informação ser um *cluster center* através do cálculo da densidade de pontos à sua volta [Chiu94], dado por:

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (3.1)$$

Onde x_i é o i -enésimo ponto de informação, P_i é o seu potencial para ser *cluster center*, x_j é o j -enésimo ponto de informação vizinho de x_i e α é dado por:

$$\alpha = \frac{4}{r_a} \quad (3.2)$$

Onde r_a é uma constante positiva que representa o raio que define até que distância um ponto de informação é considerado vizinho. De acordo com (3.1) um ponto de informação que tenha muitos pontos vizinhos terá um valor potencial superior, r_a é diretamente proporcional ao número de regras definidas para o controlador *fuzzy*. Quanto maior for o valor de r_a menos *cluster centers* são definidos. Após a realização deste processo para todos os pontos de informação do conjunto de dados, é selecionado o ponto de informação com o maior valor potencial para ser *cluster center*. Assumindo que x_l^* é a localização desse *cluster center* e P_l^* o seu valor potencial, são novamente analisados os valores potenciais de cada ponto de informação x_i dado por:

$$P_i \Leftarrow P_i - P_l^* e^{-\beta \|x_i - x_l^*\|^2} \quad (3.3)$$

Onde β é dado por:

$$\beta = \frac{4}{\eta r_b^2} \quad (3.4)$$

Onde r_b é uma constante positiva cujo valor ditará até que distância um ponto de informação sofrerá a redução do valor potencial de ser um *cluster center*. Assim, com recurso a (3.3) é subtraída uma quantidade do potencial de cada ponto de informação em função da sua distância do *cluster center*, x_l^* . Os pontos de informação próximos desse *cluster center* ficam com o seu valor potencial de

serem um *cluster center* reduzido, sendo por isso pouco provável que sejam selecionados como o próximo *cluster center*. Este procedimento evita que surjam *cluster centers* similares. Para evitar a obtenção de *cluster centers* muito similares é recomendado utilizar um valor de r_b superior ao r_a . No controlador implementado é considerado $R_b = 1.5R_a$, por ser considerada uma escolha adequada [Clement-Nyns10].

Após a reavaliação de todos os pontos de informação de acordo com a equação (3.3), é selecionado como segundo *cluster center* o ponto de informação com maior potencial remanescente. Seguidamente é reduzido o potencial de cada ponto de informação de acordo com a sua distância ao segundo *cluster center* obtido. Genericamente, depois de determinado o k -enésimo *cluster center*, o potencial de cada ponto de informação é dado por:

$$P_i \Leftarrow P_i - P_k^* e^{-\beta \|x_i - x_k^*\|^2} \quad (3.5)$$

Onde x_k^* é a localização do k -enésimo *cluster center* e P_k^* é o seu valor potencial de ser *cluster center*.

Neste método, a aceitação ou a rejeição de um *cluster center* obedece ao seguinte algoritmo:

```

if  $P_k^* > \bar{\varepsilon} P_l^*$ 
    Aceitar  $x_k^*$  como cluster center e continuar.
else if  $P_k^* < \underline{\varepsilon} P_l^*$ 
    Rejeitar  $x_k^*$  como cluster center terminar o processo de clustering.
else
    Considerar  $d_{min}$  = menor distância entre o ponto  $x_k^*$  e os cluster centers previamente determinados.
    if  $\frac{d_{min}}{r_a} + \frac{P_k^*}{P_l^*} \geq 1$ 
        Aceitar  $x_k^*$  como cluster center e continuar.
    else
        Rejeitar  $x_k^*$  e atribuir o seu valor potencial zero.
        Selecionar o ponto de informação subsequente que apresenta maior

```

```

        valor potencial como novo  $x_k^*$  e voltar a testar.
    end if
end if

```

No algoritmo descrito previamente, $\bar{\varepsilon}$ e $\underline{\varepsilon}$ são 0.5 e 0.15, respetivamente. Sendo que $\bar{\varepsilon}$ é o potencial a partir do qual se aceita definitivamente o ponto de informação como *cluster center*, enquanto $\underline{\varepsilon}$ é o potencial abaixo do qual se rejeita definitivamente o ponto de informação como *cluster center*. O algoritmo executa um procedimento de verificação para avaliar qualquer ponto de informação que não satisfaça as condições preliminares de aceitação ou de rejeição de ser *cluster center*. Caso o ponto de informação tenha um valor de potencial suficiente, ou esteja a uma distância adequada de outros *cluster centers*, o algoritmo decide a aceitação ou rejeição com base na distância mais curta entre este ponto de informação e todos os *clusters centers* definidos previamente [Chiu94].

Cada *cluster center* representa uma característica comportamental do sistema e origina uma regra do controlador *fuzzy* que caracteriza o comportamento do sistema.

Fuzzy subtractive clustering

Considerando um conjunto de *cluster centers* definidos num espaço M -dimensional, dados por $\{x_1^*, x_2^*, \dots, x_c^*\}$, é considerado que as variáveis de entrada correspondem às primeiras N dimensões e que as variáveis de saída correspondem às últimas $M-N$ dimensões [Chiu94]. Cada vetor x_i^* é decomposto em duas componentes vetoriais, y_i^* e z_i^* . y_i^* é constituído pelas coordenadas de entrada dos *cluster centers*, as quais contêm os primeiros N elementos de x_i^* e z_i^*

são constituídos pelas coordenadas de saída dos *cluster centers*, as quais contêm os últimos $M-N$ elementos de x_i^* . Dado um vetor de entrada y , o grau de pertinência da regra i [Chiu94] é dado por:

$$\mu_i = e^{-\alpha \|y - y_i^*\|^2} \quad (3.6)$$

Onde μ_i é o grau de pertinência do vetor y em relação à regra i , sendo α uma constante definida em (3.2).

O vetor de saída [Chiu94] é dado por:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^c \mu_i z_i^*}{\sum_{i=1}^c \mu_i} \quad (3.7)$$

Esta metodologia pode ser interpretada como um sistema de inferência da lógica *fuzzy* implementado às regras do tipo *if-then*, em que cada regra apresenta o seguinte formato [Chiu94]:

If Y_1 is A_1 and Y_2 is A_2 and ... and Y_j is A_j , then Z_1 is B_1 and Z_2 is B_2 and ... and Z_j is B_j .

Onde Y_j é a j -enésima variável de entrada e Z_j é a j -enésima variável de saída; A_j é a j -enésima função de pertinência exponencial e B_j é o j -enésimo valor único. Para a regra i , representada pelo *cluster center* x_i^* , as variáveis A_j e B_j são dados pela equações (3.8) e (3.9), respetivamente:

$$A_j(q) = e^{-\alpha (q - y_{ij}^*)^2} \quad (3.8)$$

Onde q é o elemento do universo de discurso, i.e., é o valor da abcissa das funções de pertinência e y_{ij}^* é o j -enésimo elemento de y_i^* .

$$B_j = z_{ij}^* \quad (3.9)$$

Onde z_{ij}^* é o j -enésimo elemento de z_i^*

Uma vez que (3.6) e (3.7) são representativas de uma fórmula de composição de regras do tipo *if-then*, uma otimização destas regras é efetuada recorrendo ao método dos mínimos quadrados recursivos [Chiu94]. Assim, a variável z_i^* presente em (3.7), passa a ser representada por uma função linear das variáveis de entrada [Chiu94], dada por:

$$z_i^* = G_i y + h_i \quad (3.10)$$

Onde G_i é uma matriz constante de dimensões $(M - N) \times N$ e h_i é um vetor coluna constante com $(M - N)$ elementos. A equivalência das regras *if-then* são do tipo Takagi-Sugeno, onde os consequentes de cada regra correspondem a uma equação linear das variáveis de entrada [Takagi85].

Expressar z_i^* como uma função linear das variáveis de entrada permite um grau de otimização significativo das regras a serem calculadas sem adicionar complexidade computacional a essa ação [Takagi85]. Dado um conjunto de regras com premissas fixas, a otimização dos parâmetros nas equações consequentes tendo em conta os dados de treino, é reduzido a um problema de mínimos quadrados recursivos [Takagi85].

Para a conversão do problema de otimização dos parâmetros da equação num problema de otimização através do método dos mínimos quadrados recursivos, é definido ρ_i dado por:

$$\rho_i = \frac{\mu_i}{\sum_{j=1}^c \mu_j} \quad (3.11)$$

Onde ρ_i é a média ponderada dos μ_i .

De acordo com (3.11), (3.7) pode ser reescrita e dada por:

$$z = \sum \rho_i z_i^* = \sum \rho_i (G_i y + h_i) \quad (3.12)$$

Sendo que (3.12) pode ser reescrita e dada por:

$$z^T = \begin{bmatrix} \rho_1 y^T & \rho_1 & \dots & \rho_c y^T & \rho_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1^T \\ h_1^T \\ \vdots \\ G_c^T \\ h_c^T \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Onde z^T e y^T são vetores linha.

Dado um conjunto de n pontos de entrada $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, o conjunto resultante das saídas é dado por:

$$\begin{bmatrix} z_1^T \\ \vdots \\ z_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} y_1^T & \rho_{1,1} & \dots & \rho_{c,1} y_1^T & \rho_{c,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{1,n} y_n^T & \rho_{1,n} & \dots & \rho_{c,n} y_n^T & \rho_{c,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1^T \\ h_1^T \\ \vdots \\ G_c^T \\ h_c^T \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Onde $\rho_{i,j}$ é ρ_i avaliado por y_j . De referir que, dado o conjunto dos n pontos de entrada $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, a primeira matriz do lado direito de (3.14) é constante, correspondendo a segunda matriz, aos parâmetros a serem otimizados.

Recorrendo ao método dos mínimos quadrados recursivos é minimizado o erro médio quadrático entre o modelo de saída e os pontos de treino, através da substituição da matriz do lado esquerdo de (3.14) pelos valores de saída dos dados de treino. Está implícito que, no problema de estimativa resolvido através do método dos mínimos quadrados recursivos, se considera que o número de dados de treino é superior ao número dos parâmetros a otimizar [Takagi85].

Assim, o método *fuzzy clustering* subtrativo consiste em:

1. encontrar os *clusters centers* para o estabelecimento do número e de

- premissas das regras;
2. otimizar as regras.

Apesar do número de *cluster centers* ou de regras ser automaticamente determinado através desta metodologia, deve ser tido em conta que o parâmetro r_a , tem implicação direta no número de *cluster centers* definidos. Sendo que um valor de r_a elevado, pode originar um número reduzido de *cluster centers* e em consequência pode resultar num modelo demasiado generalista. Enquanto que um valor de r_a reduzido, pode originar um número excessivo de *cluster centers* e em consequência pode resultar num modelo que não apresenta uma generalização adequada.

O parâmetro r_a é portanto uma aproximação à resolução desejada para o modelo, a qual pode ser ajustada de acordo com a complexidade resultante e a capacidade de generalização do modelo.

3.6 Implementação do Modelo

Para a implementação do modelo de DR que auxilie o consumidor num contexto onde o preço da energia elétrica e a potência disponível são variáveis, é desenvolvida uma metodologia que suporta o desenvolvimento dos controladores *fuzzy*, para assim controlar os estados das CC, de acordo com os perfis de consumo de modos de operação dos consumidores.

A metodologia tem como propósito desenvolver e ajustar os controladores *fuzzy* às necessidades do consumidor, sendo caracterizada por sete etapas representadas na Figura 3.1.

Na primeira etapa são definidos os parâmetros de entrada e de saída, nomeadamente as CC, o preço da energia elétrica e a potência disponível.

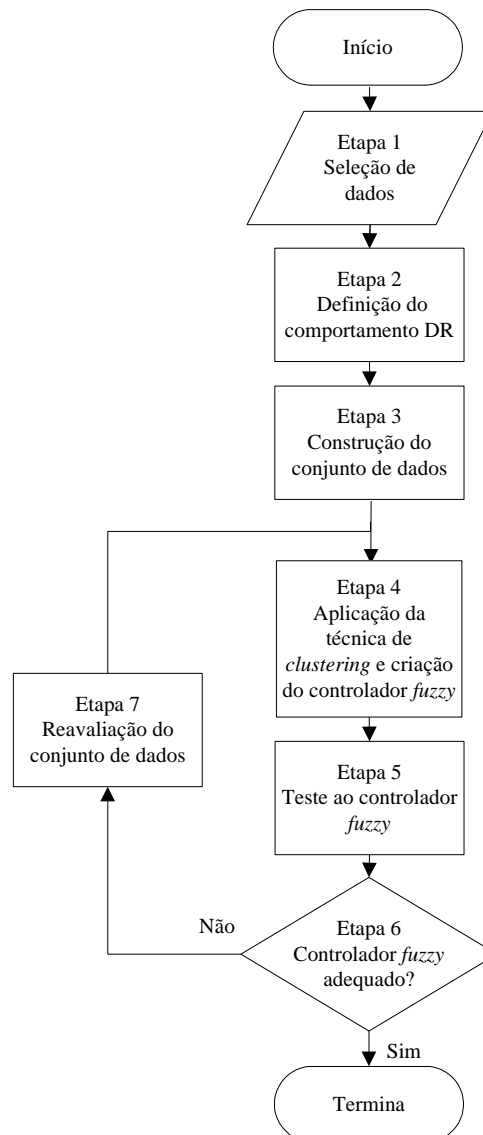


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia de implementação do modelo DR.

Na segunda etapa é definida a relação entre os parâmetros de entrada e de saída através da relação entre os perfis de consumo e os modos de operação, i.e., são determinadas a CC a utilizar face à potência disponível ou face ao preço da energia elétrica. São ainda definidas a posição hierárquica de cada CC na lista de prioridades, para cada modo de operação, e os intervalos do preço da energia elétrica para cada perfil de consumo, de acordo com a Tabela 3.1 e a Tabela 3.2.

Na terceira etapa são definidos os conjunto de dados baseados no comportamento

de DR definido na segunda etapa. Este conjunto de dados corresponde à transformação do comportamento de DR numa matriz numérica.

Os dados são definidos para cada combinação de perfil de consumo e modo de operação e representados em Excel. É considerado que ao estado disponível da CC corresponde o valor da potência nominal da CC considerada e ao estado indisponível corresponde um valor nulo. Esta consideração é adotada para facilitar a análise do comportamento de DR associado a uma residência e a análise do impacto do modelo de DR na REE.

Por não ser encontrada na literatura informação disponível que clarifique a forma de gestão da potência ao nível residencial, nomeadamente no que se refere à definição da precisão da informação sobre a potência disponível, é considerado que o modelo de DR recebe informação sobre a potência disponível com uma precisão de 100 W. Esta consideração assenta em resultados de um processo experimental, no qual foi verificado que este valor conduz a resultados que indiciam uma maior robustez do modelo, uma vez que corresponde a um menor número de regras utilizadas no controlador *fuzzy*, tendo como consequência a melhora do tempo de resposta do controlador. Sendo que a resposta do modelo de DR nesta situação apresenta resultados coerentes e satisfatórios.

É considerado que o modelo é válido para os limites máximo e mínimo de potência, correspondentes a 6.9 kW e 1.8 kW, respetivamente. O limite máximo corresponde ao valor da potência contratada, sendo que para o modelo de DR foi desprezada a potência reativa e o limite mínimo corresponde ao valor mais baixo de potência nominal das CC consideradas.

A quarta etapa consiste na submissão do conjunto de dados a uma técnica de *clustering* por forma a padronizar o comportamento de DR e proceder à sua representação por pontos de informação. Estes pontos de informação consistem nas regras necessárias à implementação do comportamento de DR em

controladores *fuzzy*. Com os pontos de informação resultantes da técnica de *clustering*, são implementados os controladores *fuzzy* para cada relação entre o perfil de consumo e modo de operação.

Para a implementação e simulação do controlador *fuzzy* foi utilizado o *software* Matlab/Simulink incluindo a *fuzzy logic toolbox*, em que a partir do desenvolvimento de ficheiros incorporados em Matlab, foi programada a interação entre a *toolbox* na plataforma de simulação, Simulink, e os ficheiros com os dados das entradas, automatizando os processos para simulação de cenários de forma eficiente.

Após a geração dos conjuntos de dados, é desenvolvido um ficheiro do tipo *.m*, onde é aplicada a função “*genfis2*”, responsável pela aplicação da técnica *subtractive clustering* aos conjuntos de dados definidos na terceira etapa. Seguidamente é aplicada a função *fuzzy* que possibilita a articulação entre os *clusters centers* definidos e as regras do tipo *if-then*, originando desta forma o controlador *fuzzy* que fica alocado num ficheiro do tipo *.fis*. É apresentado no Anexo 3.3 o código referente ao ficheiro do tipo *.m*.

Após a realização de diversos testes, o número de regras e o valor de r_a correspondente para cada controlador *fuzzy* são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4–Regras associadas a cada perfil, modo e correspondente valor de r_a

Perfil de consumo	Modo de operação	Número de regras	r_a
Económico	Asseio	7	1.5
	Conforto	8	1.5
Moderado	Asseio	14	1.4
	Conforto	10	1.5
Exigente	Asseio	9	1.5
	Conforto	7	1.5

A quinta etapa consiste no teste nos controladores *fuzzy* por forma a garantir que

a relação entre as entradas e saídas do controlador representa o comportamento de DR pretendido.

São desenvolvidos dois modelos em Simulink. Os modelos desenvolvidos correspondem aos dois modos de operação, asseio e conforto, apresentados no Anexo 3.4. Um diagrama representativo do modelo de DR implementado em Simulink é apresentado na Figura 3.2.

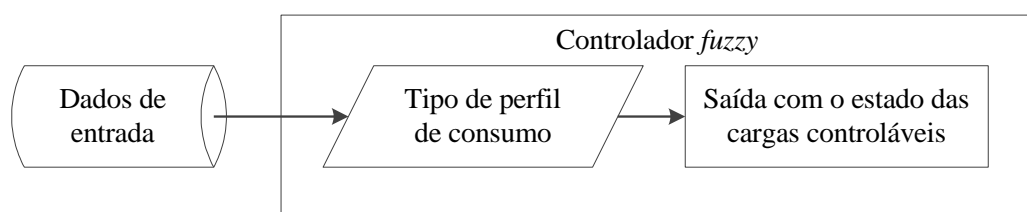


Figura 3.2 – Representação do modelo de DR implementado em Simulink.

O teste dos controladores *fuzzy* tem início com a receção dos dados de entrada, que correspondem aos estados disponível ou indisponível das CC, a potência disponível, o preço da energia elétrica, e com a seleção do perfil de consumo e modo de operação selecionados pelo consumidor. Estes dados são posteriormente avaliados pelo controlador *fuzzy*, de acordo com o perfil e modo selecionado, resultando num relatório com a informação: dos estados das CC, do perfil e modo selecionado e da justificação da indisponibilidade das CC. Um exemplo de relatório resultante do controlador *fuzzy* é apresentado no Anexo 3.5.

Por forma a automatizar o processo de simulação, foi desenvolvido um ficheiro do tipo *.m*, apresentado no Anexo 3.6, o qual promove a articulação entre os controladores *fuzzy* e os modelos Simulink, por forma a mimetizar uma situação real em que o consumidor escolhe o perfil de consumo, modo de operação e o estado pretendido para cada CC. No desenvolvimento do ficheiro do tipo *.m* foi considerado o facto dos controladores *fuzzy* não devolverem o valor exato correspondente ao estado da carga controlável, i.e., valor da potência nominal

para o estado disponível, ou zero para o estado indisponível. No entanto, se o controlador devolve um valor superior a metade da potência nominal da CC, este é traduzido em estado disponível da CC. Por outro lado, se o controlador devolve um valor inferior a metade da potência nominal da CC, este é traduzido em estado indisponível da CC.

A sexta etapa consiste na análise dos resultados dos testes realizados aos controladores *fuzzy* e de acordo com esses resultados, ou a implementação dos controladores é concluída caso o resultado seja adequado, ou caso contrário, é iniciada a sétima etapa da metodologia de implementação do modelo de DR.

A sétima etapa consiste na reavaliação do conjunto de dados, retornando à quarta etapa e repetindo a aplicação da técnica de *clustering* ao conjunto de dados.

3.7 Análise do Modelo

Para a análise do modelo DR são apresentados casos de estudo da sua integração numa residência e numa REE.

Para além das CC definidas é incluída uma carga referente a um veículo elétrico, para permitir analisar a sua integração com o modelo de DR desenvolvido.

Um dos casos de estudo apresentados permite a análise do modelo de DR num regime de contingência da REE.

Numa primeira fase são apresentados os impactes do modelo de DR face a um aumento de potência provocado pelo carregamento das baterias do veículo elétrico considerado para análise do modelo. Seguidamente são apresentados casos de estudo que incluem a integração do modelo de DR numa residência e numa REE.

De entre os casos de estudo apresentados é utilizado como base de comparação um caso de estudo que não contempla a integração do modelo de DR. De referir que no caso de estudo onde é analisada a integração do veículo elétrico é considerado que este se comporta no modelo de DR como uma carga não controlável, uma vez que é considerado que o carregamento das baterias do veículo ocorre num período definido pelo operador da REE, não sendo considerada nesta situação, a preferência ou necessidades do consumidor.

O caso de estudo onde é analisado o comportamento do modelo de DR num período de contingência da REE permite verificar que, caso o modelo seja adotado, como uma estratégia de redução de carga, à semelhança dos programas do tipo IBP, as prioridades de consumo definidas pelo consumidor são respeitadas.

É considerada relevante a análise do efeito do modelo de DR numa residência ou numa REE uma vez que é expectável que a sua implementação tenha consequências ao nível da alteração do diagrama de consumo de uma residência, ou ao nível da alteração do diagrama da geração ou nas perdas por efeito de Joule numa REE. Desta forma, é considerado igualmente relevante incluir a integração do veículo elétrico nesta análise, não só por existirem indícios de um aumento deste tipo de veículos, mas também porque a sua integração, enquanto carga elétrica ao nível de uma residência, pode influenciar não só a gestão da potência disponível, bem como o horário de utilização de algumas CC. Ao nível da REE, é considerado que a integração do veículo elétrico pode influenciar os diagramas de carga, de geração e as perdas por efeito de Joule.

A análise do efeito da contingência na REE e o seu impacte nos consumidores é também apresentada.

Integração do veículo elétrico

Existem diversos estudos sobre a análise da integração do veículo elétrico na REE a nível global [Clement-Nyns10, Masoum10, Lopes09] bem como sobre o efeito da sua integração nas redes de energia elétrica ao nível das cidades [Turker10, Sandels10, Babaei10].

De acordo com [EP08], existem diversos tipos de veículos elétricos, contudo nesta tese são considerados os veículos elétricos *plug-in*, caracterizados pelo carregamento das baterias através de uma fonte externa ao veículo, nomeadamente através da REE. É considerada a caracterização de veículos elétricos *Plug-in* em *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (PHEV) e *Plug-in Electric Vehicles* (PEV) ou *Battery Electric Vehicle* (BEV). Os PHEV possuem dois tipos de motor, um motor elétrico e um motor de combustão interna. Os PEV ou BEV apenas possuem um motor elétrico.

A análise da integração do veículo elétrico no modelo de DR é efetuada para os PEV porque estes, comparativamente aos PHEV, representam um maior consumo de energia elétrica, uma vez que possuem baterias com maior capacidade de armazenamento dado a força motriz do veículo apenas depender do motor elétrico.

Para a presente análise é considerada a capacidade das baterias e o tipo de carregamento utilizado. Existe o carregamento lento, utilizando um sistema monofásico ou trifásico, até 80 A por fase [IEC10], ou o carregamento rápido realizado em DC, até 500 V, 120 A [CHAdEMO10]. É considerada uma duração média do carregamento lento de aproximadamente 7 horas e uma duração média do carregamento rápido de aproximadamente 1 hora.

É considerado para a presente análise o tipo de carregamento lento, a partir de um sistema monofásico por ser considerado o mais provável de ser aplicado

numa residência. Nos exemplos estudados o veículo testado é da marca Nissan Leaf, que utiliza uma bateria de 24 kWh. Assumindo que a tomada utilizada permite o carregamento das baterias até 15 A, a uma tensão de 230 V, resulta numa potência disponível de aproximadamente 3.4 kW.

De acordo com o descrito em [Masoum10] as baterias não deverão exceder 80% de utilização, por forma a otimizar o seu ciclo de vida e é considerado um rendimento de 90% para os retificadores. Estes dados permitem determinar o tempo de carregamento das baterias, de acordo com:

$$E_{nec} = \frac{E_{bat} \cdot 0,8}{\eta} = 21,3 \text{ kWh} \quad (3.15)$$

Onde E_{nec} é a energia necessária para carregar as baterias, E_{bat} a capacidade das baterias e η o rendimento dos retificadores.

$$h_{car} = \frac{E_{nec}}{P_{tom}} = 7h \quad (3.16)$$

Onde h_{car} corresponde ao número de horas necessário para carregar completamente as baterias e P_{tom} a potência considerada disponível na tomada da residência.

É considerado que o carregamento das baterias decorre entre as 22 horas e as 7 horas, correspondendo a um carregamento noturno, por forma a minimizar o impacto no diagrama de carga resultante do presumível aumento da potência, em caso de coincidir com as horas de ponta. Nesta tese não é considerada a utilização das baterias do PEV para armazenamento de energia numa perspetiva *vehicle to grid*.

Contingência na rede de energia elétrica

A REE desempenha um papel preponderante na sociedade atual e este facto

determina que lhe seja atribuída primazia, face a outras infraestruturas atuais [Yan13]. Sendo um sistema intrincado e complexo, constituído por centros de produção, subestações, linhas de transmissão, e existindo um conjunto de particularidades ao nível regional, a REE apresenta padrões de funcionamento distintos para diferentes áreas geográficas. Estes aspetos acentuam a suscetibilidade da REE a cenários de contingência e a problemas de segurança [Yan13]. A análise de contingência consiste num procedimento de segurança, considerado na avaliação do comportamento da REE em situações de funcionamento anómalas, i.e., na avaliação da sua capacidade em prevenir: cavas de tensão, nomeadamente as que ocorrem devido à ligação de cargas indutivas elevadas; instabilidade no sistema devido a disparos intempestivos das proteções ou devido a aumentos repentinos de carga [Almeida07].

A análise de contingência considerada no caso de estudo apresentado consiste na simulação de um decréscimo abrupto do valor da potência disponível que afeta um conjunto de consumidores domésticos e na avaliação do comportamento do modelo de DR em cumprir as prioridades de consumo previamente estipuladas pelo consumidor. É considerado que os consumidores são previamente informados do decréscimo do valor da potência disponível.

Análise do modelo de DR para uma residência

A análise do impacte do modelo de DR numa residência é baseado em cinco casos de estudo e tem por objetivo demonstrar que qualquer consumidor que adira ao modelo de DR proposto, pode utilizar as mesmas cargas que utilizaria sem estar sujeito ao modelo de DR, dependendo para isso da sua flexibilidade na utilização das cargas, por forma a tirar o máximo partido da informação dos preços da energia elétrica e da potência disponível.

Os casos de estudo considerados são:

- *Caso de estudo 1 - Regime desregrado*

Este caso de estudo é caracterizado pelo facto do consumidor não estar afeto a nenhum modelo de DR, pelo que não existe influência na variação do preço na energia elétrica ou da potência disponível. O diagrama de carga resultante nesta situação é utilizado como base comparativa em relação aos demais casos de estudo considerados;

- *Caso de estudo 2 - Regime normal.*

Este caso de estudo é caracterizado pela influência do modelo de DR, i.e., o consumidor é influenciado pela variação do preço da energia elétrica e da potência disponível, sendo pretendido que o consumidor execute as mesmas tarefas, que são consideradas no caso de estudo correspondente ao regime desregrado, i.e., o caso de estudo 1; É apresentada uma comparação entre os perfis de consumo económico e moderado, sendo considerados o modo de operação conforto e asseio nas seguintes condições: o modo conforto é seleccionado quando a família se encontra na residência. O modo asseio é seleccionado quando a família se encontra fora da residência ou estando na residência, quando coincide com as horas de descanso.

- *Caso de estudo 3 - Regime ideal.*

Este caso de estudo é caracterizado por um regime ideal de consumo, no qual o consumidor recorrendo ao modelo de DR consegue executar a mesmas tarefas associadas ao regime desregrado do caso de estudo 1. Este cenário permite maximizar as potencialidades do modelo de DR.

- *Caso de estudo 4 - Regime ideal com integração do veículo eléctrico.*

Este caso de estudo permite aliar ao cenário mais exigente para o modelo de DR a inclusão de mais uma carga correspondente ao PEV;

- *Caso de estudo 5 - Regime de contingência.*

Este caso de estudo é caracterizado pela análise do modelo de DR face a um regime de contingência, no qual a potência disponível diminui

consideravelmente, garantindo o nível de segurança e qualidade da energia na REE.

Na análise dos casos de estudo, os diagrama de geração e de consumo têm um horizonte temporal de 24 horas, considerando uma disponibilização horária da informação do preço da energia e da potência disponível. Os diagramas de consumo contemplam a potência das CC e das cargas não controláveis, definidas de acordo com [ERSE12a].

Caso de estudo 1 – Regime desregrado

Neste caso de estudo, o consumo não depende da variação do preço da energia elétrica nem da potência disponível.

O diagrama de consumo para a situação descrita é representado na Figura 3.3.

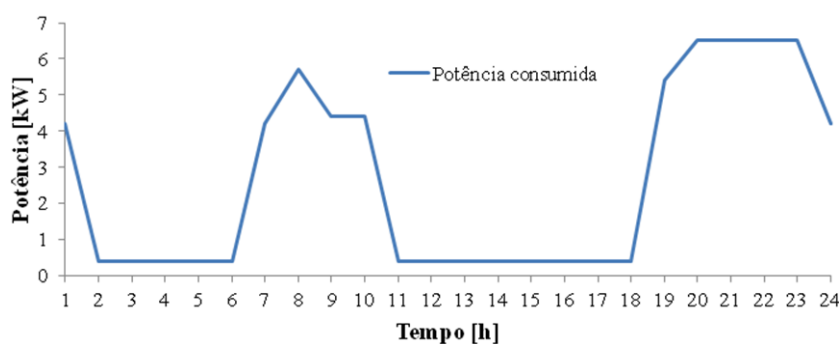


Figura 3.3 – Diagrama de consumo sem influência do modelo de DR.

Na Figura 3.3 os períodos correspondentes ao consumo mínimo são atribuídos às cargas não controláveis, nomeadamente aos equipamentos de refrigeração de bens alimentares. De referir que durante as horas correspondentes ao período de vazio o consumo é mínimo e que o consumo mais elevado coincide com as horas de ponta. Atendendo a que o preço da energia elétrica é tendencialmente mais

baixo nas horas de vazio, o diagrama de consumo apresenta um perfil que não se coaduna com uma possível redução da fatura de energia elétrica, caso fosse considerada a variação do preço da energia elétrica.

O estado de disponibilidade das CC para este caso de estudo é representado na Figura 3.4.

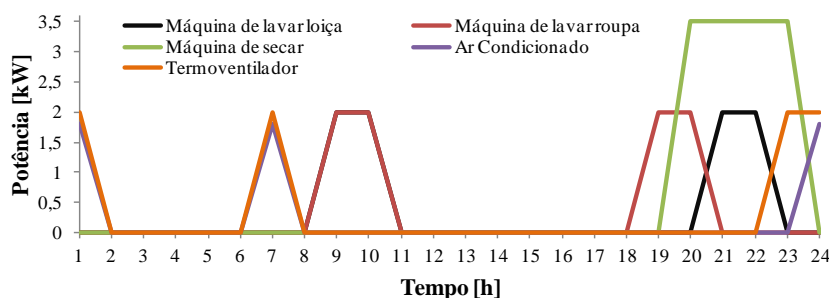


Figura 3.4 – Diagrama de carga das CC sem influência do modelo de DR.

Da análise da Figura 3.4 é possível observar que as máquinas de lavar roupa e loiça funcionam duas vezes por dia, que o ar condicionado está ligado durante um período da manhã e um período da noite. É considerada a colocação em funcionamento do termoventilador em dois períodos distintos do dia, sendo considerado um número excessivo de horas de utilização. Esta opção, apesar de ser considerada discrepante em relação a um possível cenário real, foi no entanto adotada com o intuito de aumentar o valor da potência consumida, tornando o diagrama de consumo mais exigente para o modelo de DR.

Caso de estudo 2 – Regime normal

Neste caso de estudo são analisados e comparados os perfis de consumo económico e moderado, considerado que a potência disponível varia em torno do valor máximo de 6.9 kW. No regime normal a evolução da potência disponível, a

variação do preço da energia elétrica e a evolução da potência de consumo base estão representados na Figura 3.5.

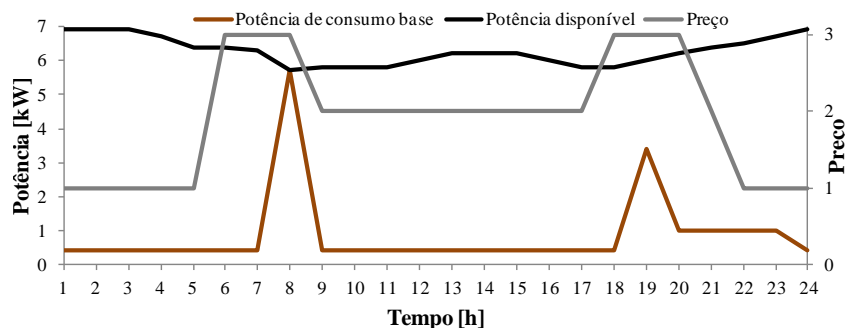


Figura 3.5 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível e do preço da energia elétrica para o regime normal.

Na Figura 3.5 a evolução da potência de consumo base corresponde ao consumo das cargas não controláveis e tem por base o diagrama de consumo representado na Figura 3.3, sem contabilizar o consumo das CC, uma vez que este vai depender do resultado do modelo de DR.

Os dados de entrada referentes aos perfis de consumo e modos de operação selecionados pelo consumidor são apresentados na Tabela A3.3 do Anexo 3.7.

De acordo com a análise da Figura 3.5 é possível observar que o intervalo de preço mais baixo, intervalo 1, coincide com as horas de vazio e que o intervalo de preço mais elevado, intervalo 3, coincide com as horas de ponta. Consequentemente as CC deveriam ser colocadas em funcionamento durante os períodos tempo coincidentes com o preço da energia elétrica mais baixo por forma a permitir que o consumidor tenha benefícios económicos, contudo a flexibilidade do consumidor na sua utilização das CC é determinante para consolidar esse potencial benefício económico.

O modelo de DR foi aplicado para as condições de utilização das CC e cargas não controláveis, cuja representação se apresenta na Figura 3.3.

Caso de estudo 2 – Regime normal com perfil de consumo económico

Considerando o perfil de consumo económico, a evolução da potência disponível, da potência referente ao consumo base e da potência referente ao consumo total são apresentadas na Figura 3.6.

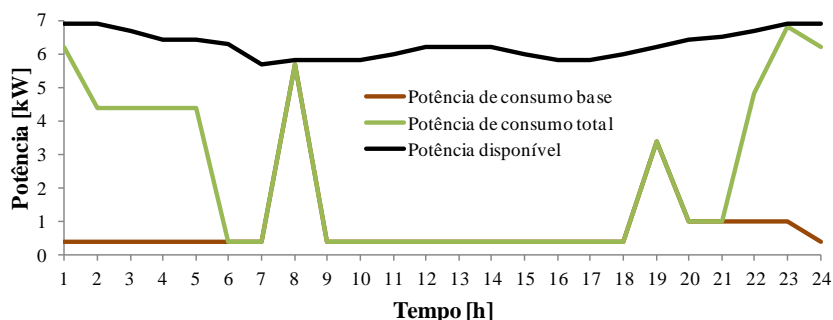


Figura 3.6 – Evolução da potência de consumo base, potência de consumo total e disponível para o perfil económico.

A análise da Figura 3.6 permite verificar que o modelo de DR garante que o valor da potência total consumida, correspondente à soma da potência de consumo base e potência de consumo das CC, não é superior ao valor da potência disponível. A diferença existente entre o valor da potência disponível e o valor da potência total consumida, resulta da resposta do modelo de DR em não permitir que qualquer CC seja colocada em funcionamento quando dessa ação resulte um valor de potência consumida superior ao valor da potência disponível.

O estado de disponibilidade das CC para este caso de estudo é representado na Figura 3.7.

Da análise da Figura 3.7 é possível verificar que as CC apenas estão disponíveis durante o período correspondente a um preço da energia elétrica pertencente ao intervalo 1, por ser o único admissível para o perfil económico.

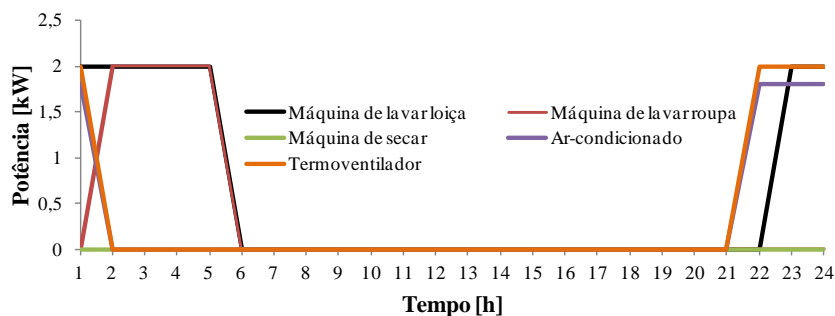


Figura 3.7– Diagrama de carga das CC para o perfil económico.

Caso de estudo 2 – Regime normal com perfil de consumo moderado

Considerando o perfil de consumo moderado a evolução da potência disponível, da potência referente ao consumo base e da potência referente ao consumo total é representado na Figura 3.8.

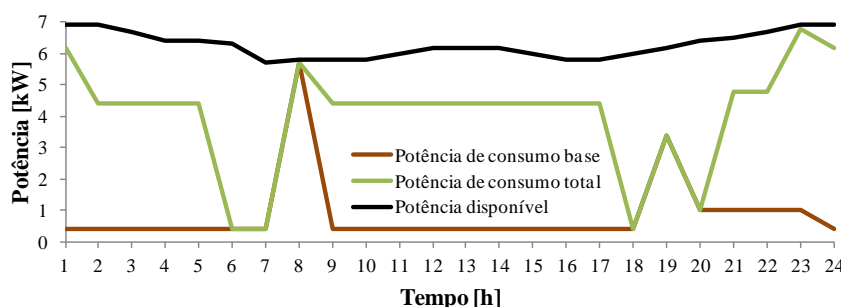


Figura 3.8 – Evolução da potência de consumo base, potência de consumo total e disponível para o perfil moderado.

A análise da Figura 3.8 permite verificar que para o perfil de consumo moderado o modelo de DR também garante que a potência total consumida não seja superior à potência disponível e de forma análoga ao verificado na análise do perfil económico, a diferença entre o valor da potência disponível e da potência total consumida resulta da resposta do modelo de DR em não permitir que qualquer CC seja colocada em funcionamento quando dessa ação resulte um

valor de potência consumida superior ao valor da potência disponível.

Para o caso de estudo considerado, o estado de funcionamento das CC é representado na Figura 3.9.

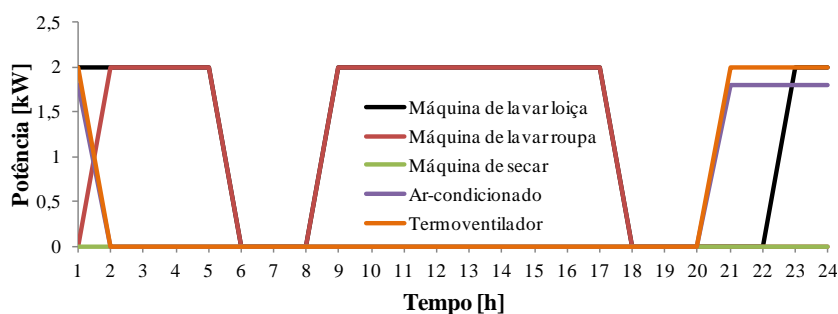


Figura 3.9 – Diagrama de carga das CC para o perfil moderado.

Da análise da Figura 3.9 é possível verificar que as CC apenas estão disponíveis durante o período a que corresponde um preço da energia elétrica pertencente aos intervalos de preço 1 e 2, por serem os únicos admissíveis para o perfil moderado.

Caso de estudo 2 – Comparação entre regime normal com perfil de consumo económico e moderado

A análise comparativa entre a Figura 3.7 e a Figura 3.9, referentes aos perfis de consumo económico e moderado, respetivamente, e a análise dos relatórios de simulação, apresentados nos Anexo 3.5 e no Anexo 3.8, permitem concluir que maiores restrições do preço da eletricidade implicam uma menor disponibilidade das CC. Portanto, pela análise efetuada é possível concluir que o benefício económico do consumidor na fatura da eletricidade é proporcional à sua flexibilidade na utilização das CC. Por exemplo, um consumidor que selecione o perfil económico deve apresentar maior flexibilidade na utilização das CC, uma

vez que estão disponíveis durante um menor período de tempo, podendo esta opção influenciar os seus hábitos e rotinas de consumo. Considerando um consumidor que selecione o perfil moderado, este não necessita apresentar a mesma flexibilidade na utilização das CC, no entanto existem períodos de tempo nos quais o preço da energia elétrica é superior ao que se verifica caso selecione o perfil económico.

Caso o consumidor selecione o perfil exigente, uma vez que não se encontra restrito pelo preço da energia elétrica, a disponibilidade das CC apenas depende do valor da potência disponível.

A análise comparativa entre a Figura 3.6 e a Figura 3.8, correspondentes aos perfis económico e moderado, respetivamente, permite concluir que, caso o consumidor opte pela colocação em funcionamento das CC disponíveis, o diagrama de carga é mais uniformemente distribuído no perfil moderado. No entanto, para esta situação o consumo é superior. Contudo, e em comparação com a Figura 3.3, o resultado do diagrama de carga para ambos os perfis de consumo mostra que o modelo de DR permite moldar o diagrama de consumo do consumidor doméstico, considerado nos casos de estudo.

A aplicação do modelo de DR pode ser potenciado se o consumidor tirar partido das várias opções disponíveis, alterando os perfis de consumo e modos de operação ao longo do dia, permitindo que o consumidor pague um preço da energia elétrica adequado às suas necessidades de consumo. O modelo de DR permite a racionalização da potência disponível, preterindo as CC prioritárias face às menos prioritárias, afetando a estas últimas a potência disponível. Uma situação que poderia ser gerida desta forma pode ser observada na Figura 3.7 e na Figura 3.9, em que a máquina de secar nunca está disponível. Este resultado advém do facto de, por exemplo, no modo asseio a máquina de secar estar na terceira posição da lista de prioridades das CC apresentada na Tabela 3.1, pelo

que, nesta situação nunca é possível a simultaneidade de funcionamento das 3 máquinas: de lavar loiça, de lavar roupa e de secar roupa.

Caso de estudo 3 –Regime ideal

Neste caso de estudo é apresentado um cenário em que a escolha de perfis de consumo e modos de operação permite maximizar as potencialidades do modelo de DR, por forma a permitir a execução das mesmas tarefas presentes no regime desregrado.

Considerando o perfil de consumo ideal, a evolução da potência disponível, da potência referente ao consumo base e da potência de consumo total são apresentadas na Figura 3.10.

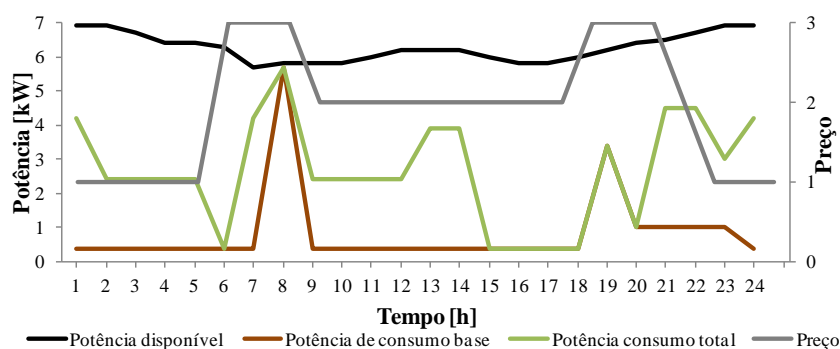


Figura 3.10 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível, potência de consumo total e do preço da energia elétrica.

Da comparação entre a Figura 3.10 e a Figura 3.3 resulta que o modelo de DR contribui para uma utilização das CC mais uniformemente distribuída durante o horizonte temporal considerado. Esta distribuição da potência consumida resultou da variação do preço da energia elétrica e da gestão das CC por parte do consumidor, por forma a obter benefícios económicos na fatura da eletricidade.

O estado de disponibilidade das CC correspondente à potência total de consumo representada na Figura 3.10 é representado na Figura 3.11.

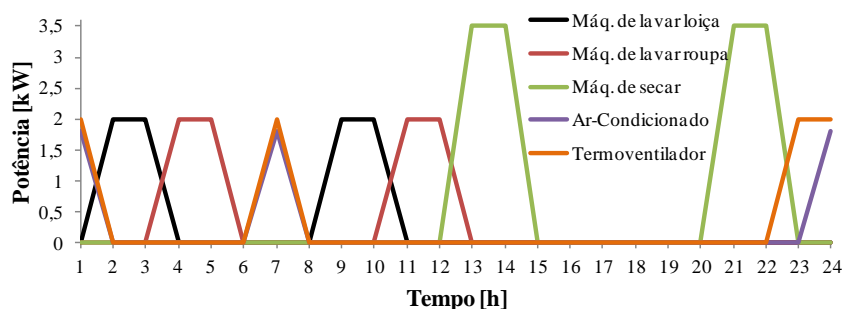


Figura 3.11 – Diagrama de carga das CC para o perfil ideal.

Da comparação entre a Figura 3.11 e a Figura 3.4 é possível concluir que, o modelo de DR permite a realização das mesmas tarefas consideradas no caso de estudo 1, correspondente ao regime desregulado. Contudo, a influência do modelo de DR exige flexibilidade na utilização da CC pelo consumidor e conseqüentemente a alteração da sua rotina e hábitos de consumo, para que lhe seja possível retirar benefícios económicos dessa gestão das CC.

Caso de estudo 4 – Regime ideal com integração do veículo elétrico

Neste caso de estudo é apresentado um cenário semelhante ao apresentado no caso de estudo 2, onde é incluída uma carga elétrica correspondente ao carregamento das baterias de um PEV. A potência de consumo base é alterada uma vez que o carregamento das baterias corresponde a uma carga não controlável, por se assumir uma imposição ao consumidor do horário de carregamento, entre as 22 horas e as 4 horas.

Considerando a inclusão do PEV no perfil de consumo ideal, a evolução da potência disponível, da potência referente ao consumo base e da potência de consumo total são representadas na Figura 3.12.

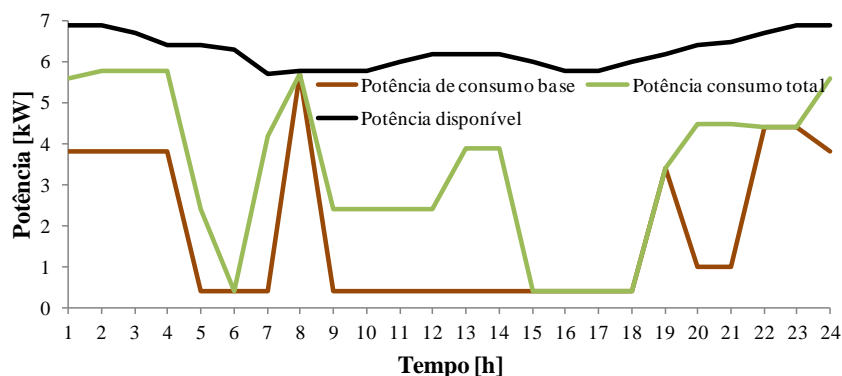


Figura 3.12 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível e da potência de consumo total.

O estado de disponibilidade das CC e do carregamento das baterias para este caso de estudo é apresentado na Figura 3.13.

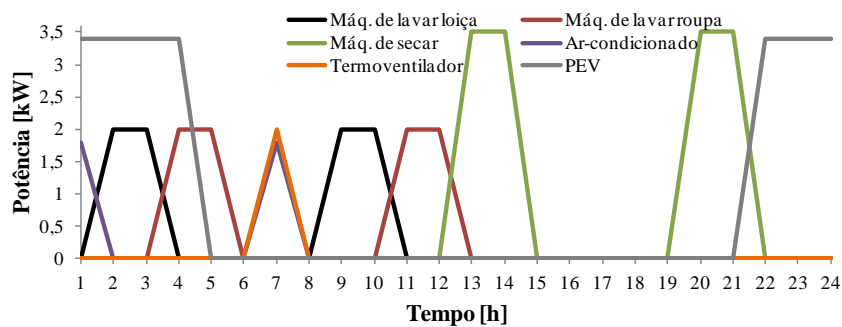


Figura 3.13 – Diagrama de carga das CC e do PEV.

Atendendo à inclusão do carregamento das baterias no cenário considerado no caso de estudo 3, da comparação entre a Figura 3.13 e a Figura 3.11 é possível verificar o ajuste efetuado pelo modelo de DR no diagrama das CC. A alocação da potência disponível ao carregamento das baterias implica que, para cumprir as

tarefas referentes ao caso de estudo 1, o consumidor terá um acréscimo de custos com a fatura da eletricidade, uma vez que para manter a disponibilidade das CC, nomeadamente da máquina de secar, esta coincide com o período de tempo onde o preço da energia elétrica é mais elevado. No entanto, a realização de todas as tarefas consideradas é impossível, uma vez que durante o tempo de carregamento das baterias, a potência disponível é insuficiente para garantir a disponibilidade da CC referente ao termoventilador.

Caso de estudo 5 – Regime de contingência

Neste caso de estudo é considerada uma redução na potência disponível para a residência. O cenário considerado tem por base a Figura 3.10, incluindo dois períodos de contingência. O primeiro ocorre entre as 6 horas e as 10 horas e o segundo, entre as 22 horas e as 24 horas, nos quais a potência disponível vai ser reduzida para 3 kW. Nas horas de contingência o preço da energia elétrica aumenta, assumindo o intervalo 3.

A evolução da potência disponível, de consumo base e do preço da energia elétrica são representadas na Figura 3.14.

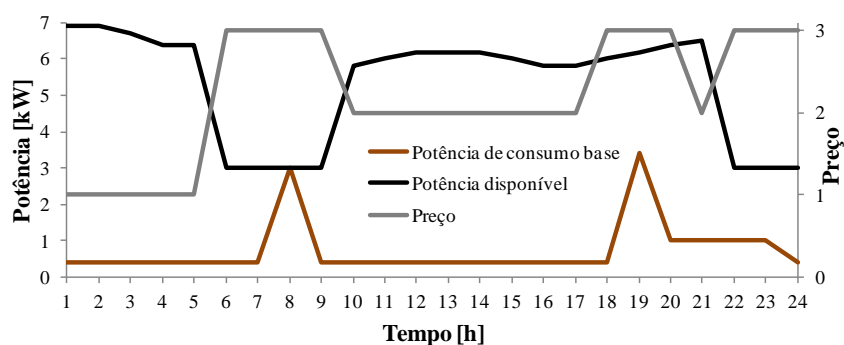


Figura 3.14 – Evolução da potência de consumo base, potência disponível e do preço da energia elétrica em regime de contingência.

A evolução da potência consumida total, da potência disponível e do preço da energia são representadas na Figura 3.15.

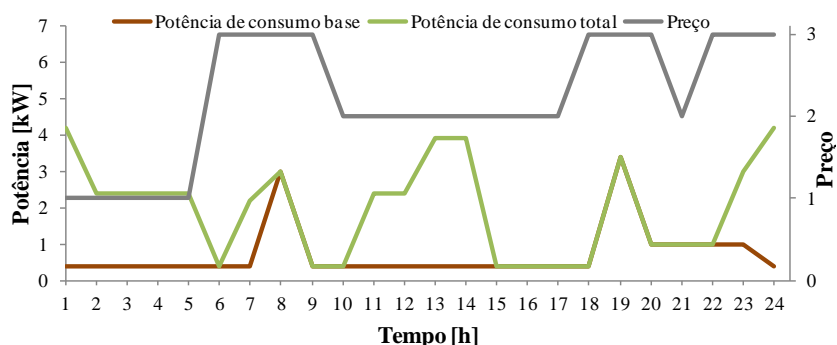


Figura 3.15 – Evolução da potência de consumo base, potência de consumo total e do preço em regime de contingência.

Da análise comparativa entre a Figura 3.15 e a Figura 3.10 é evidente a redução na potência de consumo total durante os períodos de contingência, resultante da indisponibilidade das CC durante esse período.

O estado de disponibilidade das CC, correspondente à potência de consumo total representada na Figura 3.15, é representado na Figura 3.16.

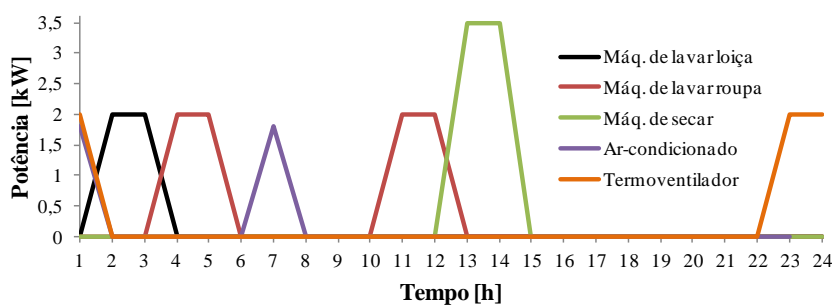


Figura 3.16 – Diagrama de carga das CC em regime de contingência.

Da análise comparativa entre a Figura 3.16 e a Figura 3.11 é verificado que as prioridades das CC foram respeitadas. Nomeadamente, durante o primeiro

período de contingência, e considerando que o modo conforto foi selecionado pelo consumidor, pode ser verificado que na oitava hora, para o modo conforto, as CC disponíveis representadas na Figura 3.11 são o ar-condicionado e o termoventilador, enquanto que na mesma hora, a CC disponível representada na Figura 3.16 é o ar-condicionado. Portanto, na oitava hora a potência disponível é 3 kW e a lista de prioridades das CC definida pelo consumidor é respeitada.

De forma análoga, durante o segundo período de contingência, nomeadamente na vigésima segunda hora a máquina de secar e o ar-condicionado, representados na Figura 3.11 passaram ao estado indisponível, dando lugar apenas à disponibilidade do termoventilador, representado na Figura 3.16, respeitando uma vez mais a lista de prioridades das CC definida.

3.8 Impacte do Modelo na Rede Elétrica

A análise do impacte do modelo de DR na REE é efetuada considerando os casos de estudo referentes ao regime desregado, *caso de estudo 1*, regime normal, *caso de estudo 2* e regime de contingência, *caso de estudo 5*, descritos no subcapítulo 3.6. Contudo é acrescentada a inclusão do PEV a cada um dos casos de estudo, referentes aos regimes desregado e normal. São, assim analisados os seguintes casos de estudo:

- *Caso de estudo 1 - Regime desregado;*
- *Caso de estudo 2 - Regime desregado com integração do veículo elétrico;*
- *Caso de estudo 3 - Regime normal.*
- *Caso de estudo 4 - Regime normal com integração do veículo elétrico;*
- *Caso de estudo 5 - Regime de contingência.*

Para cada caso de estudo são apresentados os diagramas de consumo resultantes para uma residência. A análise é efetuada considerando uma REE com base no modelo *IEEE 4 bus* [Indian12], representada na Figura 3.17.

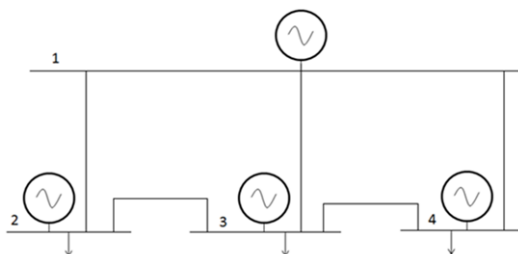


Figura 3.17 – Modelo da REE.

O modelo tem um barramento de geração e 3 de consumo. São consideradas 200 residências de um bairro residencial representadas em cada barramento de consumo e o barramento de geração contempla apenas um gerador. Os parâmetros das linhas são apresentados na Tabela 2.5.

Para os casos de estudo são analisados os diagramas de geração e as perdas por efeito de Joule. É pretendido que o diagrama de geração seja o mais uniforme possível, minimizando a amplitude da potência entre as horas de ponta e de vazio, contribuindo para a minimização das perdas por efeito de Joule na REE.

Os diagramas de geração apresentam a mesma evolução da potência disponível, referente a cada um dos casos de estudo considerados, uma vez que é pretendido garantir o balanço adequado entre a potência gerada e a potência consumida.

No caso de estudo do regime de contingência é considerado que cada consumidor dispõe do modelo de DR. A análise da simulação é efetuada para os períodos correspondentes à contingência, nos quais ocorre uma redução de 1.2 MW, o que significa que cada residência terá um máximo de 3 kW de potência disponível.

Caso de estudo 1 – Regime desregrado

Neste caso de estudo é considerado o diagrama de geração representado na Figura 3.18.

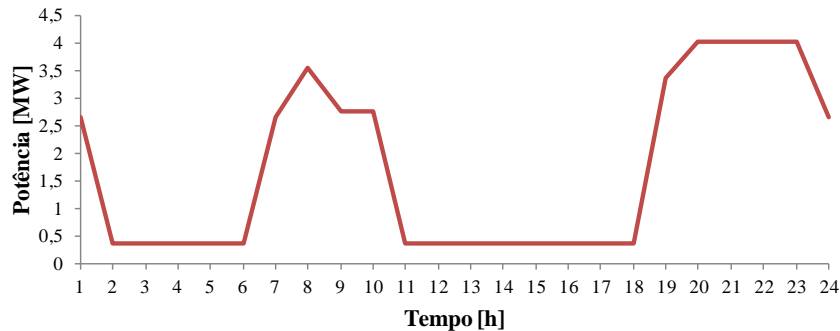


Figura 3.18 – Potência de geração no regime desregrado.

A Figura 3.18 apresenta as horas de ponta e de vazio bem identificadas. A diferença entre o valor mais elevado da potência de pico e a potência de vazio é de 3,67 MW. Esta diferença pode ser considerada responsável pela necessidade de construção de infraestruturas, nomeadamente centrais, linhas de transmissão e distribuição, para satisfazer a potência consumida durante as horas de ponta. Sendo que, durante as horas de vazio as centrais funcionam em regimes de baixo rendimento ou em *stand-by*, com os respetivos custos de operação associados.

A evolução das perdas por efeito de Joule consideradas neste caso de estudo são representadas na Figura 3.19.

A Figura 3.19 representa a evolução das perdas por efeito de Joule, as quais naturalmente acompanham o andamento da potência gerada representada na Figura 3.18. Neste caso de estudo o valor total das perdas por efeito de Joule é de 2,88 MW.

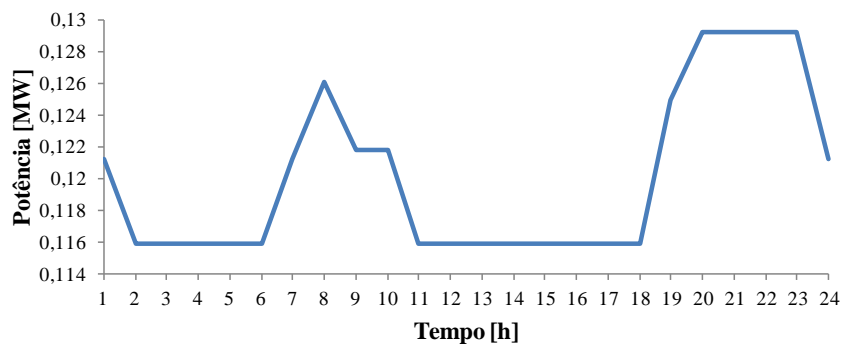


Figura 3.19 – Perdas por efeito de Joule no regime desregado.

Caso de estudo 2 – Regime desregado com integração do veículo elétrico

Neste caso de estudo é considerado que o carregamento das baterias do PEV decorre entre as 24 horas e as 7 horas, tendo como consequência o facto do consumidor não poder utilizar o termoventilador durante o período compreendido entre as 24 h e as 2 h, de acordo com a Figura 3.4. Para as considerações adotadas resulta um diagrama de geração representado na Figura 3.20 e a correspondente representação da evolução das perdas por efeito de Joule na Figura 3.21.

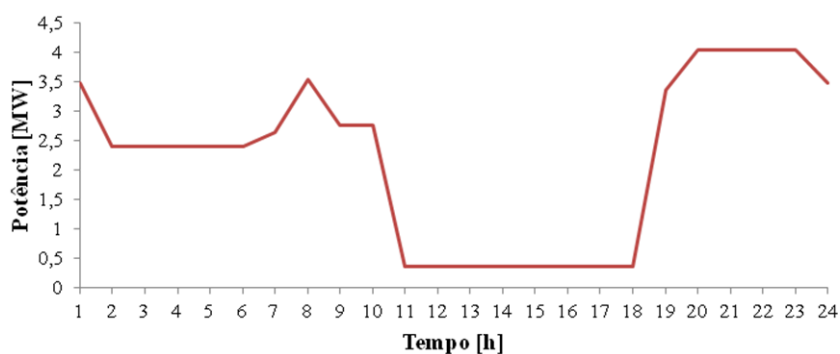


Figura 3.20 – Potência de geração no regime desregado incluindo o PEV.

A Figura 3.20 representa um diagrama de geração mais uniforme devido ao período de carregamento das baterias, no entanto esta uniformização foi apenas

devida ao aumento do consumo. Tal como na Figura 3.18, continua evidente a disparidade da potência entre as horas de ponta e de vazio.

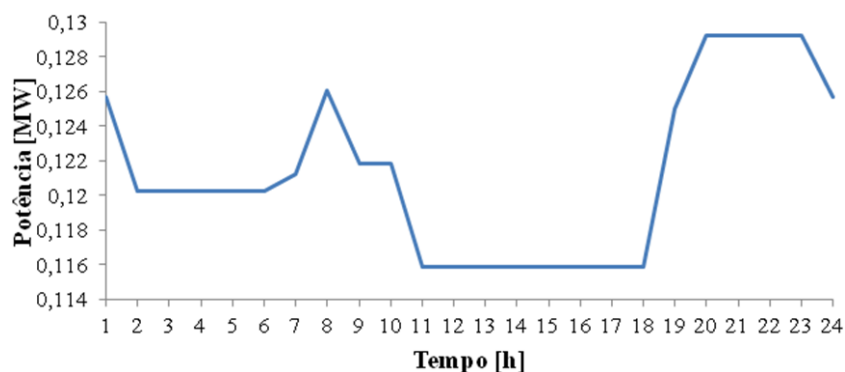


Figura 3.21 – Perdas por efeito de Joule no regime desregrado incluindo o PEV.

A Figura 3.21 representa a evolução das perdas por efeito de Joule, sendo o valor total das perdas para este cenário de 2.91 MW, ligeiramente superior ao referente à Figura 3.19 como seria expectável, uma vez que o aumento da potência gerada corresponde ao aumento da geração necessária para suprir o carregamento das baterias.

Caso de estudo 3 – Regime normal

Este caso de estudo inclui o modelo de DR e o correspondente diagrama de geração representado na Figura 3.22.

A comparação entre a Figura 3.22 e a Figura 3.18 evidencia a contribuição do modelo de DR para um diagrama de geração mais uniforme, bem como para a diminuição das horas de vazio. O valor máximo da potência de pico referente à Figura 3.22 é inferior em 0.48 MW (12%) comparativamente ao caso de estudo referente ao regime desregrado, representado na Figura 3.18. Este alisamento do diagrama de geração permite diminuir em 0.6 MW (16.4%) o valor da amplitude

entre a potência de ponta e de vazio.

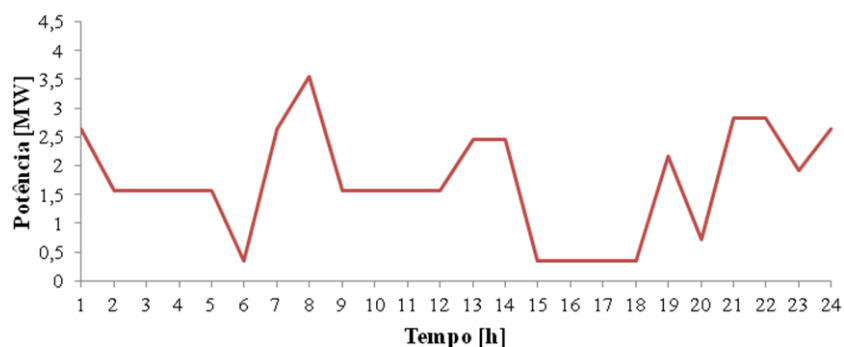


Figura 3.22 – Potência de geração no regime normal.

A evolução das perdas por efeito de Joule para este caso de estudo está representada na Figura 3.23.

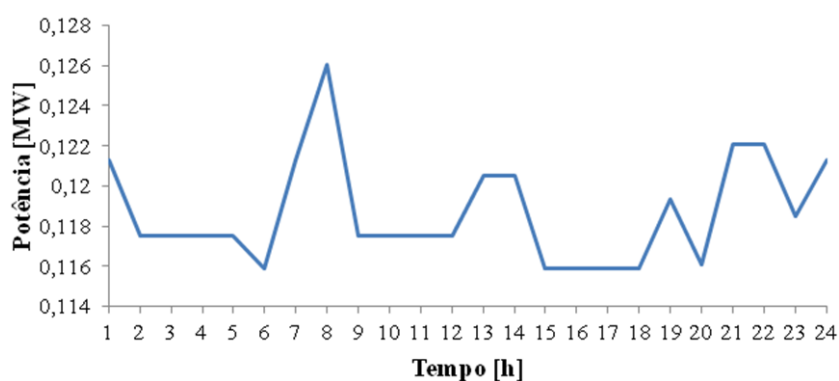


Figura 3.23 – Perdas por efeito de Joule no regime normal.

O valor total das perdas por efeito de Joule referentes à Figura 3.23 é de 2.85 MW e portanto ligeiramente inferior ao valor correspondente ao regime desregado, referente à Figura 3.19. Esta comparação permite concluir que o alisamento do diagrama de geração em pouco contribui para a diminuição das perdas por efeito de Joule na REE. Isto porque o valor máximo da potência de pico se mantém em valores próximos nos dois casos de estudo considerados. Portanto, um aumento de um valor baixo de potência tem menos impacto do que

a diminuição de um valor elevado de potência, para a contabilização das perdas por efeito de Joule, i.e., a diminuição da potência gerada de ponta tem maior relevância para as perdas do que o aumento da potência gerada de vazio.

Caso de estudo 4 – Regime normal com integração do veículo elétrico

Este caso de estudo inclui o modelo de DR incluindo o PEV, estando o diagrama de geração correspondente, representado na Figura 3.24.

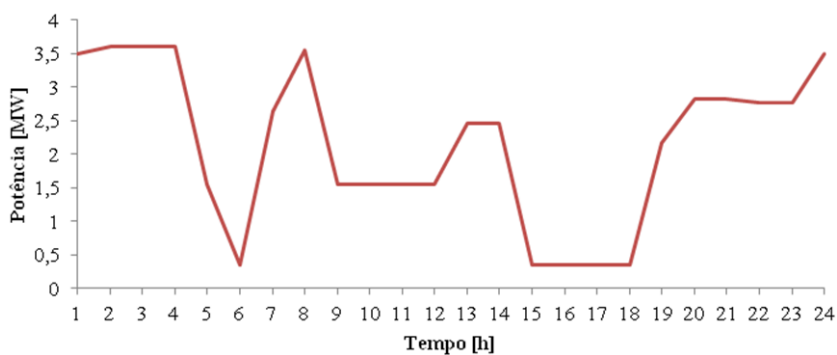


Figura 3.24 – Potência de geração no regime normal com inclusão do PEV.

A comparação entre a Figura 3.24 e a Figura 3.22 permite verificar que a necessidade de carregamento das baterias contribui para um aumento da potência de geração, contudo esse aumento é menor se comparado com o regime desregado, referente à Figura 3.20. Os resultados dessas comparações podem ser observadas no gráfico representado na Figura 3.25. No caso de estudo referente ao regime normal, continua válido que a integração do veículo elétrico não contribui para o aumento da potência de ponta, uma vez que o horário de carregamento das baterias foi definido para fora desse período.

A evolução da potência de perdas, por efeito de Joule, para este caso de estudo é representada na Figura 3.26. O valor total das perdas por efeito de Joule referente à Figura 3.26 é de 2.89 MW, o que representa uma ligeira diminuição de 0.6 %,

relativamente ao cenário apresentado no caso de estudo 1, representado na Figura 3.21.

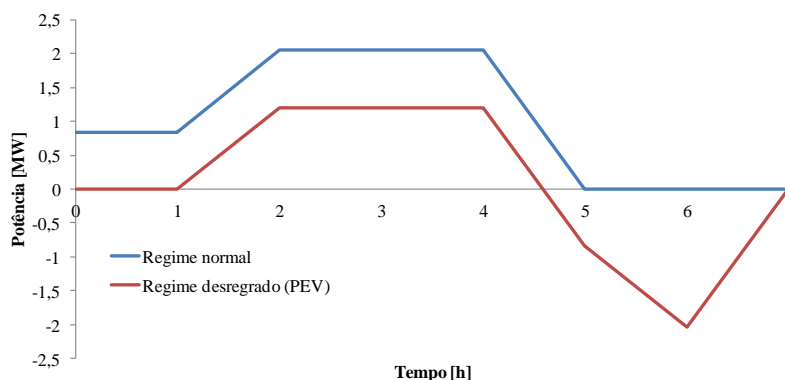


Figura 3.25 – Comparação entre potências de geração.

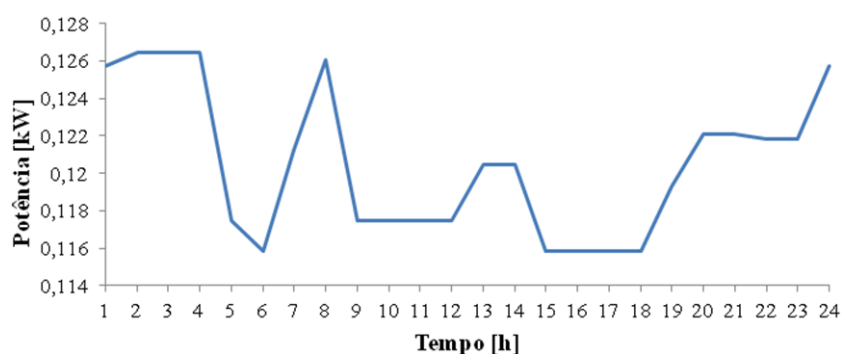


Figura 3.26– Perdas por efeito de Joule no regime normal com inclusão do PEV.

Caso de estudo 5 – Regime de contingência

Este caso de estudo é caracterizado pela redução do valor da potência disponível para 3 kW em cada residência, durante dois períodos distintos, de forma idêntica ao descrito no caso de estudo 5, apresentado no subcapítulo 3.6.

Considerando que a REE em análise é caracterizada por três barramentos de consumo, cada um com 200 residências, representado na Figura 3.17, significa que a redução da potência é dada por:

$$P_{red} = P_d \cdot n_{bairros} \cdot n_{res} \quad (3.17)$$

Onde P_{red} é o valor da potência na rede durante o período de contingência, P_{md} a potência máxima disponível, $n_{bairros}$ o número de bairros ligados à REE e n_{res} o número de residências por bairro.

De (3.17) resulta uma redução de 1.2 MW. No caso da mesma contingência ser suportada por menos residências, nomeadamente metade das consideradas neste caso de estudo, significaria que uma residência não teria disponível 6 kW dos 6.9 kW disponíveis para atingir os mesmos 1.2 MW de redução.

3.9 Conclusões

De acordo com os cinco casos de estudo apresentados, o modelo de DR permite garantir que a potência consumida nunca é superior à potência disponível. Caso o consumidor tenha flexibilidade de consumo, é possível selecionar um perfil de consumo económico, obtendo desta forma benefícios económicos através da redução da fatura de energia elétrica. Caso não disponha da flexibilidade de consumo que lhe permita um maior benefício económico, pode optar por adequar o perfil de consumo ao preço da energia elétrica. Os casos de estudo indicam que um perfil de consumo que permita preços de energia elétrica mais elevados, apresenta uma maior disponibilidade das CC, pelo que o consumidor pode optar pela sua colocação em funcionamento num horário que melhor se adequa às suas rotinas.

A combinação entre perfis de consumo e modos de operação, considerados para a implementação do modelo de DR, permitem que o consumidor execute as mesmas tarefas que tinha estipulado, considerando a inexistência do modelo de

DR. Contudo, a existência do modelo de DR provoca uma distribuição mais uniforme das CC que permitem executar essas mesmas tarefas.

A integração do veículo elétrico tem como efeito uma redução da potência disponível para as CC, exigindo do consumidor uma maior flexibilidade de consumo, alterando o horário de funcionamento das CC por forma a garantir a execução do maior número de tarefas necessárias.

A utilização do modelo de DR como estratégia de redução da carga da REE em caso de contingência, previamente planeada e anunciada, permite ao consumidor adaptar o seu consumo de acordo com as suas necessidades e preferências de consumo, sendo que as cargas mais prioritárias são as últimas a ficar indisponíveis à utilização do consumidor. A capacidade de redução da carga será tanto maior quanto maior for a aderência do consumidor ao modelo de DR.

Sob o ponto de vista do impacto do modelo de DR na REE e de acordo com os casos de estudo considerados, resulta um diagrama de geração mais uniforme permitindo a diminuição da diferença entre a potência de ponta e de vazio. O modelo de DR é portanto uma ferramenta útil para moldar o diagrama de geração tirando partido da variação do preço da energia elétrica e contribui para redução das perdas por efeito de Joule na REE.

CAPÍTULO

4

Aplicações de Gestão de Energia para Consumidores

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia que permite o desenvolvimento de aplicações de gestão de energia para consumidores. A implementação de contadores inteligentes e a sua integração num modelo de aquisição de dados, monitorização, controlo e supervisão da rede de energia elétrica é apresentada. São desenvolvidas plataformas de comunicação e é desenvolvida uma estrutura de controlo que permite a introdução de sistemas de controlo avançado que possibilitam a incorporação do papel ativo do utilizador na gestão da rede de energia elétrica. É ainda desenvolvido um modelo de controlo preditivo para controlo de temperatura e de luminosidade num edifício e que permite incorporar as decisões do utilizador.

4.1 Introdução

Para que os consumidores desempenhem um papel ativo na gestão da REI é considerado essencial entender e envolver os consumidores no sistema de energia elétrica [Melvin14]. O envolvimento dos consumidores depende das características das TIC, cujo aperfeiçoamento resulta das necessidades, interesses e benefícios dos consumidores. As TIC desempenham um papel preponderante nas REI, uma vez que o cumprimento dos objetivos da REI depende do desenvolvimento de sistemas TIC [Melvin14].

A estrutura de comunicação entre os diferentes *stakeholders* da REI deve ser simples, robusta, segura e flexível por forma a possibilitar a monitorização, gestão, controlo e despacho, desde a distribuição até aos consumidores da energia elétrica [Vijayapriya11]. Deve ser utilizada uma base de comunicação e modelos de dados comuns, por forma a assegurar uma gestão consistente das bases de dados envolvidas nos processos de comunicação.

No domínio residencial, a existência de controladores inteligentes que fornecem informações acerca dos padrões de consumo, contribui para consciencializar os consumidores sobre o consumo de energia elétrica e incentivar a poupança energética [Vijayapriya11]. Os equipamentos disponíveis para os consumidores de energia elétrica residenciais são nomeadamente, aparelhos domésticos inteligentes, contadores inteligentes e sistemas de monitorização e controlo de energia [Geelen13].

Neste capítulo são apresentadas duas metodologias para a gestão da energia elétrica para consumidores domésticos. As metodologias desenvolvidas apresentam a integração de um contador inteligente numa estrutura hierárquica de controlo e supervisão, em ambiente doméstico. A diferença entre as metodologias desenvolvidas está, nomeadamente no tipo de contador inteligente considerado.

Na primeira metodologia é integrado um contador inteligente propriedade da empresa distribuidora de energia elétrica EDP, considerando a tecnologia referente ao projeto EDP-InovGrid. Na segunda metodologia é desenvolvido um sensor de baixo custo para medição da energia elétrica consumida.

4.2 Contadores inteligentes e o projeto EDP-InovGrid

4.2.1 Contadores Inteligentes

Os contadores inteligentes são contadores digitais de eletricidade que medem o trânsito de energia, nomeadamente a produção e o consumo de energia elétrica e que promovem a comunicação desta informação à entidade distribuidora de energia elétrica. Os contadores inteligentes são geralmente utilizados pelas entidades distribuidoras por contribuírem para uma faturação mais precisa e automatizada da energia elétrica. Os contadores inteligentes podem ser introduzidos em sistemas domésticos de gestão de energia elétrica através da integração de protocolos de comunicação, disponibilizando informações relacionadas com o trânsito de energia e variações do preço da energia elétrica [Simões12].

Os contadores inteligentes são parte integrante de um sistema que engloba dispositivos de controlo, sensores para identificação de parâmetros e equipamentos utilizados para transferência e comando de sinais [Pereira15a]. Quando aplicados em redes de distribuição, desempenham um papel importante na monitorização das características de utilização e desempenho da carga na REI.

Os dados de consumo, recolhidos de forma sistemática, permitem à empresa de distribuição da energia elétrica gerir de forma eficiente a procura de energia e

aconselham os consumidores a usar de forma eficiente os seus equipamentos elétricos [Krishnamurti12, Depuru11]. As TIC utilizadas nos contadores inteligentes devem ser rentáveis, seguras e apresentar uma gama de transmissão adequada [Depuru11]. Neste âmbito, a tecnologia *Programmable Logic Controller* (PLC) é considerada adequada e comumente utilizada na automação de dados em contadores inteligentes [Depuru11].

Existem dois tipos de infraestruturas de comunicação necessárias ao fluxo de informação numa REI. A primeira infraestrutura é o fluxo de informação proveniente dos aparelhos elétricos e sensores, sendo dirigido aos contadores inteligentes. A segunda infraestrutura é fluxo de informação ocorrente entre os contadores inteligentes e os centros de dados das empresas de distribuição de energia elétrica [Güngör11]. É considerada a primeira infraestrutura, i.e., o fluxo de informação realizado com recurso a protocolos de comunicação, nomeadamente, o ZigBee, o 6LowPAN, ou o Z-wave [Güngör11]. Na segunda infraestrutura, i.e., o fluxo de informação pode ser realizado com recurso à *internet* ou à tecnologia de comunicação celular. Um sumário das tecnologias de comunicação utilizadas nas REI é apresentado na Tabela 4.1 [Güngör11].

4.2.2 Contexto Técnico do Projeto EDP-InovGrid

O projeto EDP-InovGrid tem por base a utilização de tecnologia de terceira geração, potenciando a fusão entre a rede de comunicação e a REE [InovGrid10, Dias10]. Sob o ponto de vista funcional, este projeto assenta na interação inteligente entre os *stakeholders* da REE, por forma a facilitar uma transmissão de energia eficiente, sustentável e segura [InovGrid10, Dias10]. A ênfase do projeto é dirigida aos *prosumers* na medida em que permite a gestão do consumo, promove a microgeração e contribui para uma poupança económica consciente, dos consumidores de energia elétrica. O projeto EDP-InovGrid é baseado numa

estrutura hierárquica que executa de forma simultânea a gestão técnica e comercial. A estrutura hierárquica tem três níveis: o nível do *prosumer*, o nível de transformação (Baixa Tensão/Média Tensão) BT/ MT e o nível de controlo de dados e de gestão [Dias10].

Tabela 4.1– Tecnologias de comunicação [Güngör11]

Tecnologia	Espetro (GHz)	Velocidade de dados (Mbps)	Aplicações	Limitações
GSM	0.9-1.8	>0.014	AMI, DR, HAN	Baixa velocidade de dados
GPRS	0.9-1.8	>0.017	AMI, DR, HAN	Baixa velocidade de dados
3G	2.11-2.17	0.384-2	AMI, DR, HAN	Taxa de espectro dispendiosa
WiMAX	2.5, 3.5, 5.8	>75	AMI, DR	Não está amplamente divulgada
PLC	0.001-0.03	2-3	AMI, deteção de falhas	Existência de ruído na comunicação
ZigBee	2.4, 0.868-0.915	0.250	AMI, HAN	Baixa velocidade de dados, alcance reduzido.

Os contadores inteligentes, *Energy Boxes* (EB) [InovGrid10], são implementados ao nível do *prosumer*, fornecendo informação dos dados de consumo em tempo real, possibilitando a gestão de energia ao nível residencial. Ao nível da transformação MT/BT, são implementados os *distribution transformer controllers* (DTC) [Pereira15a]. Os DTC têm por função a recolha de informação, a gestão das EB e o controlo e monitorização dos postos de transformação. Adicionalmente, os DTC são utilizados para controlar a iluminação pública. Os DTC permitem monitorizar a carga e analisar a qualidade da energia elétrica, para além de permitirem a operação em modo isolado, explorando as potencialidades da produção descentralizada. Ao nível do controlo de dados e gestão, é agregada toda a informação comercial permitindo a sua utilização como uma ferramenta importante para a gestão eficiente da REI. As

TIC utilizadas no projeto EDP-InovGrid são apresentadas na Tabela 4.2 [Dias10].

Tabela 4.2–Tecnologias de comunicação utilizadas no projeto EDP-InovGrid [Dias10]

Tipo	Caraterísticas
HAN	Equipamentos elétricos interligados com as EB. Possibilita a interação entre com os utilizadores de energia através de <i>LapTop</i> , <i>PDA</i> , <i>Smart displays</i>
LAN	Permite a comunicação direta entre EB e DTC através PLC
WAN	Comunicação GPRS; Promove a comunicação entre os DTC e os sistemas de informação através de protocolos SCADA/DMS.

Com o objetivo de melhorar a eficiência no consumo da energia elétrica, é essencial dotar os utilizadores de energia elétrica de conhecimento sobre como utilizar a tecnologia disponível de uma forma otimizada de modo a permitir um ajustamento favorável no seu padrão de consumo energético. Contudo, é possível que a redução no seu consumo seja uma consequência das tecnologias disponíveis mais do que de uma alteração no comportamento dos utilizadores de energia. Deve existir um equilíbrio entre a adequação dos utilizadores de energia às tecnologias existentes [Geelen13].

4.3 Modelização do sistema

Neste subcapítulo são estudadas e modelizadas aplicações de gestão da energia ao nível do *prosumer*, na medida em que é pretendido contribuir para a consciencialização da utilização eficiente da energia elétrica e para a redução da fatura de energia elétrica.

Para a modelização do sistema é considerada a integração de dois tipos de contadores inteligentes: o contador inteligente integrado no sistema de consumo

do *prosumer*, onde foi desenvolvido um sensor de baixo custo para medição da energia consumida e o contador inteligente propriedade do distribuidor, EDP.

Considerando os dois tipos de contadores inteligentes referidos, foi desenvolvido um sistema de *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) que promove a supervisão de uma rede de PLC, por forma a otimizar o consumo ao nível do *prosumer*.

Dada a sua aplicabilidade industrial, o sistema SCADA/PLC, tem a capacidade de integrar diferentes tipos de informação provenientes de um sistema típico de automação de edifícios, denominado *Building Automation System* (BAS). Deste modo, o sistema desenvolvido, quando integrado no BAS, permite contribuir para a eficiência energética do edifício em que se insere. O BAS tem por objetivo facilitar e melhorar a interação entre os sistemas de automação integrados nos edifícios com os seus habitantes e/ou utilizadores [Figueiredo10].

Além disso, o sistema SCADA é adequado ao controlo hierárquico [Silva07, Figueiredo08, Figueiredo10], razão pela qual integra ao nível operacional uma estrutura de controlo que também inclui o nível de interação que otimiza as preferências dos utilizadores dos edifícios, de acordo com as referências de controlo que lhes são disponibilizadas [Figueiredo12]. A estrutura de controlo hierárquico e supervisão desenvolvida, com as respetivas identificações dos níveis operacional e interativo [Pereira15a], está representada na Figura 4.1. Ao nível operacional, todas as operações são realizadas através da rede de PLCs. Uma rede Ethernet é utilizada para promover o fluxo de informação entre o sistema SCADA e os PLC. Esta rede de comunicação principal permite a utilização de protocolos de comunicação distintos, utilizados em sistemas BAS [Neumann07], nomeadamente, ModBus e BacNet. A integração destes protocolos de comunicação na estrutura de controlo e supervisão está representada na Figura 4.1, a qual é aplicada nas duas metodologias referidas no

subcapítulo 4.1, aqui desenvolvidas para a implementação de um sistema de gestão de energia para consumidores.

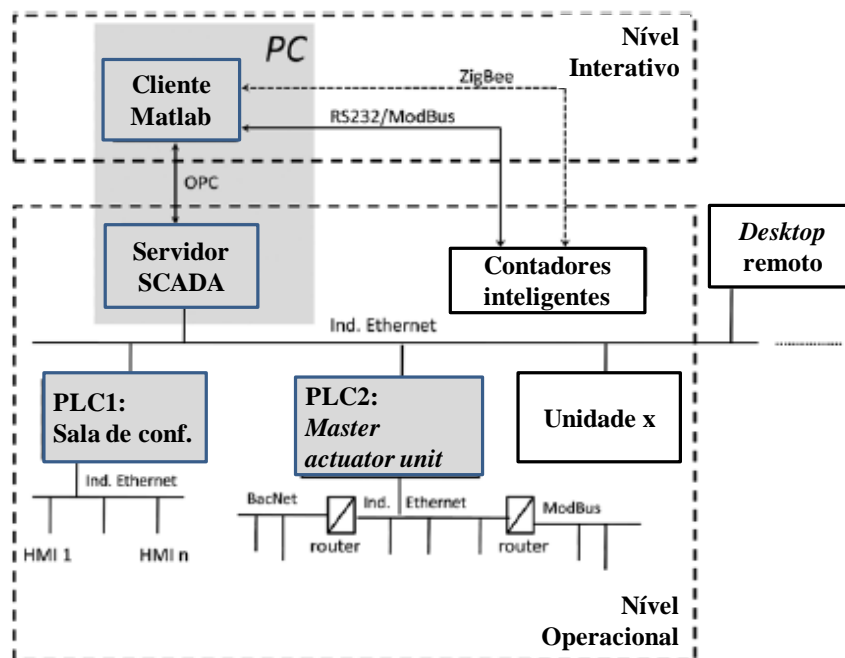


Figura 4.1 – Arquitetura do controlo e supervisão com dois níveis.

Integração do contador inteligente no sistema de consumo do prosumer

O contador inteligente afeto ao *prosumer* utiliza uma rede de comunicação sem fios (*wireless*) e a norma ZigBee enquanto especificação de comunicação de alto nível, baseada na norma IEEE 802.15.4 [Batista13] adequada para aplicações domésticas. Tem por objetivo fornecer dados sobre o padrão de produção e/ou consumo dos *prosumers*. É desenvolvido por forma a permitir uma interface com monitores móveis e com o sistema SCADA. Utiliza a norma ZigBee e *hardware* baseado na plataforma Arduino. A norma IEEE 802.15.4 permite a criação de uma *Low-Rate Wireless Personal data Network* (LR-WPAN) que permite a comunicação entre diversos dispositivos com baixo custo de produção, com comunicação universal de baixa velocidade e com baixo consumo de energia elétrica. Permite a inclusão de medidas de segurança, gestão do consumo

energético e controlo de colisão de pacotes de dados [Batista13]. A plataforma Arduino, consiste numa plataforma eletrónica acessível ao público, que se baseia em *software* e *hardware* de fácil utilização [Arduino15] e de baixo custo, comumente utilizada em projetos académicos. Consiste numa placa de circuito impresso com um microcontrolador programável, entradas e saídas analógicas e digitais, com ligação USB, tomada de alimentação DC de 6-10 V e botão de *reset* [Gertz12].

Integração do contador inteligente no sistema de consumo do distribuidor de energia elétrica

O contador inteligente, propriedade do distribuidor de energia elétrica, EDP, utiliza uma rede de comunicação cablada e o protocolo de comunicação ModBus. É composto por um conjunto de sensores e protocolos de comunicação que executam a contagem da energia elétrica e informam o distribuidor remotamente. Este contador inteligente tem por função principal informar o distribuidor acerca do consumo dos seus clientes por forma a possibilitar uma redução dos custos operacionais, nomeadamente a redução de meios humanos utilizados para recolher as leituras dos contadores. Adicionalmente a informação dos dados de consumo e/ou produção permite: conhecer os padrões de consumo dos clientes, otimizar o preço da energia elétrica, a gestão da REI e conhecer a tendência de consumo. Este tipo de contadores inteligentes é comumente utilizado em projetos piloto de REI pelas empresas de distribuição de energia elétrica nacionais, uma vez que permite adquirir experiência com *hardware* e *software* recente, possibilitando a identificação e correção de problemas técnicos em pequena escala e de forma antecipada à massificação da sua implantação. O sistema SCADA/PLC aqui desenvolvido permite assim disponibilizar, também ao consumidor, toda a informação já disponibilizada ao distribuidor.

Estratégia de controlo e supervisão

Conforme esquematizado na Figura 4.1, o nível operacional e o nível interativo presentes na estrutura de controlo estão inter-relacionados. O controlo referente ao nível operacional é hierárquico em cascata. A malha de controlo interna é gerida pelos PLC locais e a malha externa é controlada pelo sistema SCADA. O nível operacional do sistema de controlo e supervisão [Pereira15a] está representado na Figura 4.2.

As entradas do sistema SCADA, representadas por $(F_1(t), \dots, F_j(t))$ são descritas por leis de conforto, as quais incorporam critérios de bem-estar dos utilizadores. Neste nível operacional, a rede de PLC permite a gestão dos sensores e atuadores, sendo toda a informação subjacente integrada no sistema SCADA que detém o controlo geral do sistema, permitindo a gestão e supervisão da globalidade da habitação ou edifício considerado [Figueiredo08].

As leis de conforto são as principais entradas do sistema SCADA, as quais são provenientes do nível interativo. As leis de conforto são estabelecidas de acordo com um critério de otimização que define as entradas de referencia a aplicar ao *Master Actuator System* (MAS), considerando as preferências dos utilizadores, as variáveis medidas pelos sensores, e o consumo de energia elétrica fornecido pelo contador inteligente.

Finalmente, é ainda possível observar na Figura 4.1 que o sistema SCADA fornece as entradas ao nível interativo, referentes aos dados dos sensores da rede PLC. A transmissão de dados entre o nível operacional e o nível interativo utiliza o protocolo de comunicação Ethernet que interliga o controlo local ao sistema SCADA e ao controlador desenvolvido em Matlab, sendo este último utilizado para a implementação de técnicas de controlo avançadas, nomeadamente a implementação do controlo preditivo.

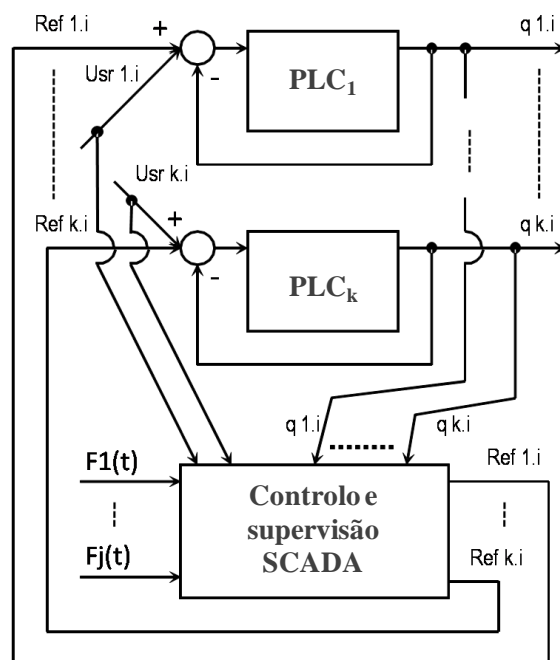


Figura 4.2 – Nível operacional de controlo.

4.4 Desenvolvimento do controlador

A fim de demonstrar as capacidades avançadas da estrutura de controlo desenvolvida, é considerado o sistema de gestão de energia baseado num modelo de controlo preditivo, sujeito a múltiplas entradas de utilizadores, correspondendo ao nível interativo do controlador. Como exemplo utilizado para o desenvolvimento deste controlador, é considerada uma sala de conferências de um edifício, que possui interfaces que permitem a aquisição de dados de entrada referentes às preferências dos utilizadores, as quais correspondem às variáveis de controlo.

A sala de conferências está ligada ao MAS que recebe sinais de comando provenientes do sistema SCADA, por forma a permitir o controlo da temperatura e luminosidade da sala, estando sujeito a restrições de minimização do consumo de energia elétrica. Os sinais de comando do MAS são aplicados ao sistema de

aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC). Este controlador, referente ao nível interativo, tem a possibilidade de receber dados de entrada diretamente dos utilizadores de energia e é executado em Matlab, estando ligado ao sistema SCADA através do protocolo de comunicação *Object Linking and Embedding - OLE-for Process Control* (OPC) [OPC15].

O protocolo de comunicação OPC é utilizado em automação industrial e consiste no estabelecimento de comunicação de dados em tempo real, entre diferentes equipamentos que podem ser provenientes de fabricantes distintos [Santos05].

4.4.1 Modelo de Controlo Preditivo

A gestão de energia associada ao BAS e aos sistemas de controlo da gestão de energia em edifícios em tempo real, são sistemas que dependem das condições ambientais, das características de construção e da ocupação dos edifícios. A utilização de modelos de controlo preditivo permitem incorporar modelos para estimar e prever a melhor estratégia de controlo a implementar para a gestão de energia do BAS, tendo portanto a possibilidade de prever a reação dinâmica do edifício. Esta é a vantagem do controlador preditivo, quando comparado com os controladores *on-line* típicos que consideram o modelo da dinâmica atual do edifício.

O modelo desenvolvido, *Model-based Predictive Control* (MPC) [Maciejowski02] tanto pode ser obtido por um modelo físico, como uma representação do tipo caixa negra [Figueiredo12] obtida, por exemplo, através da modelização de redes neuronais artificiais. As abordagens que utilizam o modelo do tipo caixa negra apresentam como benefícios um menor tempo de computação quando comparado com a abordagem que utiliza o modelo físico e permitem a modelização do sistema de forma menos complexa. Em contrapartida é

necessário utilizar dados fiáveis para a fase de aprendizagem e apenas podem ser utilizados dados contidos no domínio de aplicação do problema de controlo considerado.

Nesta tese é utilizado um modelo físico que possibilita o estudo das relações causa-efeito entre os vários componentes do edifício, as estratégias de controlo e as condições ambientais.

A representação do sistema de múltiplas entradas e saídas, comumente designado de *Multiple Input, Multiple Output* (MIMO), no modelo de espaço de estados [Maciejowski02], é dado por:

$$\begin{aligned}x^{(k+1)} &= A.x^{(k)} + B.u^{(k)} \\Y^{(k)} &= C.x^{(k)}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Onde $x^{(k)}$ é o vetor de estado, $Y^{(k)}$ é o vetor de saída, $u^{(k)}$ é o vetor de entrada ou de controlo, A é a matriz de estado, B é a matriz de entrada, C é a matriz de saída e k o tempo de amostragem.

Considerando o problema típico do controlo de temperatura em habitações/edifícios, o modelo matemático implementado é obtido a partir de um sistema térmico standard *Single Input – Single Output* (SISO, com uma fonte térmica, uma capacitância térmica e uma resistência térmica. A representação matemática do modelo é descrita pela equação [Close02] dada por:

$$T_i^{(t+1)} = \frac{I}{C_{pt}} \left[s^{(t)} - \frac{I}{R_t} (T_i^{(t)} - T_e^{(t)}) \right]\tag{4.2}$$

Onde T_i é a temperatura da sala de conferências, T_e é a temperatura exterior, C_{pt} é a capacitância térmica sala de conferências, a qual depende da geometria da sala e da pressão atmosférica, R_t é a resistência térmica da sala, a qual depende fundamentalmente das propriedades estruturais da parede e s é o fluxo térmico. O

fluxo térmico é fundamentalmente dependente da radiação solar recebida e da presença de pessoas e equipamentos na sala, nomeadamente do sistema AVAC.

Para o controlador de luminosidade foi considerado um modelo que considera dois fatores: i) a iluminação elétrica interior, i.e., iluminação artificial, e ii) a iluminação exterior, i.e., a iluminação natural, que atravessa a janela e os estores. Os estores são utilizados para o controlo de luminosidade natural, aqui designado de controlo de sombreamento. O modelo considerado para o controlo de luminosidade é dado por [Figueiredo12]:

$$L_i^{(t+1)} = E^{(t)} + I_A^{(t)} \quad (4.3)$$

Onde L_i é a luminosidade interior na sala de conferências, E é a luminosidade natural que atravessa as janelas e os estores e I_A luminosidade artificial da sala.

Generalizando as expressões (4.2) e (4.3) para um edifício com N salas de conferências, são obtidos os seguintes modelos de espaço de estados (4.4) a (4.7), sendo as equações de estado dadas por (4.4) e (4.6) e as equações de saída dadas por (4.5) e (4.7) [Bemporad05]:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} T_{i1}^{(t+1)} \\ \vdots \\ T_{iN}^{(t+1)} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1/C_1 R_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -1/C_N R_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{i1}^{(t)} \\ \vdots \\ T_{iN}^{(t)} \end{Bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} -1/C_1 & \dots & 0 & 1/C_1 R_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1/C_N & 0 & \dots & 1/C_N R_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_1^{(t)} \\ \vdots \\ s_N^{(t)} \\ T_{e1}^{(t)} \\ \vdots \\ T_{eN}^{(t)} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{Bmatrix} T_{i1}^{(t)} \\ \vdots \\ T_{iN}^{(t)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{i1}^{(t)} \\ \vdots \\ T_{iN}^{(t)} \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{Bmatrix} L_{iI}^{(t+1)} \\ \vdots \\ L_{iN}^{(t+1)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L_{iI}^{(t)} \\ \vdots \\ L_{iN}^{(t)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_I^{(t)} \\ \vdots \\ E_N^{(t)} \\ I_{AI}^{(t)} \\ \vdots \\ I_{AN}^{(t)} \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{Bmatrix} L_{iI}^{(t)} \\ \vdots \\ L_{iN}^{(t)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L_{iI}^{(t)} \\ \vdots \\ L_{iN}^{(t)} \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

4.4.2 Identificação de Parâmetros

O modelo de controlo preditivo apresentado no subcapítulo 4.4.1, quando aplicado ao controlo de temperatura e de luminosidade de salas com elevada dimensão, nomeadamente teatros, cinemas, ou salas de conferências, tem que ter em conta os seguintes aspetos físicos para aplicação apropriada de (4.4): i) as propriedades térmicas intrínsecas de cada sala e a sua conexão física ao espaço exterior, nomeadamente a temperatura exterior, são considerados os efeitos térmicos dominantes para o fluxo térmico; ii) a diferença de temperatura entre salas adjacentes não é considerada relevante, porque é assumida a existência de condições de isolamento adequadas.

A verificação destas considerações resultam num modelo matemático que engloba múltiplas salas independentes, tendo como consequência uma matriz de estados, A com todos elementos nulos, exceto na diagonal principal. No estudo apresentado, foi considerada esta tipologia para a caracterização da matriz A .

As equações de espaço de estados (4.1), reescritas por forma a englobar as variáveis de controlo e perturbações, são dadas por:

$$\begin{aligned} x^{(k+1)} &= A \cdot x^{(k)} + B_1 \cdot u_{\text{controlo}}^{(k)} + B_2 \cdot u_{\text{perturbações}}^{(k)} \\ y^{(k)} &= C \cdot x^{(k)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

De acordo com (4.8), as expressões (4.4) a (4.7), passam a ser escritas de forma agregada, representando o modelo dinâmico para o controlo de temperatura e de luminosidade, dado por:

$$\begin{Bmatrix} T_{il}^{(t+1)} \\ L_{il}^{(t+1)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/C_I R_I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_{il}^{(t)} \\ L_{il}^{(t)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/C_I & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} s_I^{(t)} \\ E_I^{(t)} \\ I_{AI}^{(t)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/C_I R_I \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_{el}^{(t)} \quad (4.9)$$

$$\begin{Bmatrix} T_{il}^{(t+1)} \\ L_{il}^{(t+1)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_{il}^{(t)} \\ L_{il}^{(t)} \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

Onde as variáveis de estado, T_{il} e L_{il} , são a temperatura interior e luminosidade interior, respetivamente. As variáveis de controlo, s_I , E_I e I_{AI} , são o fluxo controlável proveniente do AVAC, a luminosidade natural que atravessa os estores, i.e, variável de controlo de sombreamento e a luminosidade artificial, respetivamente. A perturbação mensurável, T_{el} , é a temperatura externa medida na vizinhança da sala de conferências.

Tendo a resistência térmica R_I o valor de 0.01°C , sendo dada por:

$$R_I = d / (A_T \cdot c_T) \quad (4.11)$$

Onde d é a espessura da parede, A_T a área transversal da parede e c_T a condutividade térmica da parede.

Tendo a capacitância térmica C_I o valor de $581292 \text{ J}/^\circ\text{C}$, sendo dada por:

$$C_I = C_p \cdot \rho_{ar} \cdot V \quad (4.12)$$

Onde C_p é o calor específico do ar, ρ_{ar} é a densidade do ar e V o volume da sala de conferências.

Para a obtenção experimental dos parâmetros de resistência térmica e de condutividade térmica foram utilizados equipamentos de instrumentação e medida *standard*, que incluem uma fonte de calor controlável e um conjunto de sensores de temperatura, cujo número depende da área e das características da sala em avaliação. Foram obtidos valores médios, resultantes das várias leituras realizadas, considerando intervalos de tempo adequados ao estabelecimento da temperatura no interior da sala, em relação a diferentes magnitudes de fluxo de calor submetidas à sala.

Os modelos de temperatura (4.2) e de luminosidade (4.3) apresentam as variáveis dissociadas, por forma a permitir a análise da robustez do controlador hierárquico desenvolvido. Para o modelo de controlo preditivo desenvolvido foram obtidos resultados satisfatórios, sem ser necessário um conhecimento aprofundado para a obtenção do modelo matemático.

O modelo de supervisão apresentado na Figura 4.2 permite a aplicação simultânea de diferentes referências provenientes de diferentes HMIs. Estas referências são agregados de acordo com um critério de otimização, por forma a resultarem numa única saída, que constitui a entrada de referencia dos PLCs locais.

A estratégia de controlo desenvolvida, considera as leis de conforto, apresentadas na Figura 4.2, como sendo as referências a serem seguidas de acordo com o modelo de controlo preditivo estabelecido. Contudo, e de acordo com [Siroky11] são apresentadas vantagens na introdução de algumas variáveis de folga no modelo, por forma a manter a temperatura da sala de conferências acima do valor de referência, em caso de aquecimento. Neste sentido, a estratégia de controlo e de supervisão desenvolvida considera a inclusão de variáveis de folga, as quais

são implementadas no sistema SCADA, apresentado na Figura 4.2.

4.4.3 Função de Custo

A formulação geral do modelo de controlo preditivo apresenta a minimização de uma função de custo [Figueiredo12]. Uma classe particular de otimização de funções, denominada de problemas de otimização convexos, garante que o mínimo local corresponde ao mínimo global da função [Fletcher87]. Para assegurar a convexidade do problema de otimização são normalmente considerados dois tipos de funções de custo associadas a problemas de programação quadrática (QP) e a problemas de programação linear (LP). Considerando o controlo preditivo, são geralmente adotados problemas LP porque são de mais rápida resolução, quando comparados com os problema QP, e porque existe mais experiência na sua implementação computacional. Contudo, o desenvolvimento de ferramentas computacionais para resolução de problemas QP, ou de outros problemas convexos contribuiu para atenuar estas diferenças em relação aos problemas LP [Fletcher87, Nesterov94].

O problema QP, apresenta flexibilidade, sobretudo no que se refere a alterações executadas em tempo real pelos operadores do sistema, nomeadamente [Maciejowski02]:o ponto de operação desejado pode ser alterado, de forma natural, numa determinada região viável, enquanto que nos problemas LP a alteração do ponto de operação é conseguido à custa das restrições; se as restrições são persistentemente ativadas, então a localização do ponto de operação sobre a fronteira da região viável pode ser alterada através do ajuste dos pesos da função de custo; o problema QP apresenta um comportamento linear desde que as restrições não sejam ativadas, ou então desde que apenas um conjunto de restrições seja ativado, e nesta situação podem ser aplicadas as teorias subjacentes ao controlo linear.

Alguns autores definem as funções de custo combinando fatores de problemas LP com QP, de acordo com as variáveis a otimizar [Siroky11]. Neste caso de estudo, cuja ênfase reside no teste de um sistema SCADA interligado com Matlab, aplicado a um BAS, foi utilizada uma função de custo puramente quadrática dada por [Bemporad05]:

$$\begin{aligned}
 V_C = & \left(\begin{bmatrix} \hat{Y}^{(k+H_w/k)} \\ \vdots \\ \hat{Y}^{(k+H_p/k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c^{(k+H_w)} \\ \vdots \\ c^{(k+H_p)} \end{bmatrix} \right)^T \cdot Q \cdot \left(\begin{bmatrix} \hat{Y}^{(k+H_w/k)} \\ \vdots \\ \hat{Y}^{(k+H_p/k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c^{(k+H_w)} \\ \vdots \\ c^{(k+H_p)} \end{bmatrix} \right) + \\
 & + \left(\begin{bmatrix} \hat{u}_c^{(k/k)} \\ \vdots \\ \hat{u}_c^{(k+H_p-1/k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{u_c}^{(k)} \\ \vdots \\ c_{u_c}^{(k+H_p-1)} \end{bmatrix} \right)^T \cdot W \cdot \left(\begin{bmatrix} \hat{u}_c^{(k/k)} \\ \vdots \\ \hat{u}_c^{(k+H_p-1/k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{u_c}^{(k)} \\ \vdots \\ c_{u_c}^{(k+H_p-1)} \end{bmatrix} \right) + \\
 & + \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}^{(k/k)} \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}^{(k+H_p-1/k)} \end{bmatrix}^T \cdot R \cdot \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}^{(k/k)} \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}^{(k+H_p-1/k)} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Onde o sobrescrito $\hat{}$, indica os valores estimados.

A função de custo V_C penaliza os desvios entre as saídas estimadas $\hat{Y}^{(k+i/k)}$ em relação aos valores da trajetória de referência $c^{(k+H_w)}$, correspondentes ao primeiro termo de (4.13); penaliza os desvios nas ações de controlo estimadas $\hat{u}_c^{(k/k)}$ em relação ao valor de referência $c_{u_c}^{(k)}$, correspondentes ao segundo termo de (4.13) e as variações nas ações de controlo estimadas $\Delta \hat{u}^{(k/k)}$, correspondentes ao terceiro termo.

Os fatores Q , W e R , são matrizes que atribuem pesos ao resultado de otimização. Estes pesos determinam a resposta do sistema e a atribuição de valores diferentes aos coeficientes das matrizes Q , W e R , permitem variar o peso atribuído a uma determinada variável em relação a outras, permitindo ao sistema de controlo o cumprimento de diferentes objetivos [Figueiredo12].

No dimensionamento de um sistema de controlo preditivo é comum ajustar os

parâmetros na formulação matemática para se obter um sistema estável. Considerando uma função de custo apresentada em (4.13) e assumindo que as matrizes Q , W e R são simétricas-positivas, com pesos constantes ao longo do horizonte preditivo, a solução do problema de otimização é simplificado, resultando na solução de uma equação diferencial ordinária, a equação de Riccati [Kwakernaak72].

As matrizes Q e W correspondem ao erro de seguimento e a matriz R à ação de controlo. Portanto, o aumento do peso dos coeficientes da matriz R na ação de controlo, relativamente aos pesos dos coeficientes das matrizes Q e W do erro de seguimento, tem o efeito de redução da atividade de controlo. Ou seja, se o valor do peso dos coeficientes da matriz R aumentar indefinidamente, anula a ação de controlo, que indiretamente desliga a realimentação do controlador. Se o sistema em cadeia aberta for estável, resulta num sistema de controlo estável [Figueiredo12]. Desta forma e partindo de um sistema estável, é expectável a manutenção da estabilidade do sistema de controlo em cadeia fechada, através do aumento dos pesos dos coeficientes da matriz R . Em contrapartida desta ação resulta numa resposta lenta às perturbações. Caso o sistema em cadeia aberta seja instável, é expectável que o sistema em cadeia fechada se torne instável, se o peso dos coeficientes da matriz R aumentar excessivamente.

Existem comportamentos típicos de controladores preditivos que podem auxiliar na afinação dos coeficientes das matrizes Q , W e R [Maciejowski02]. Contudo, a ênfase desta tese relativamente às aplicações de gestão de energia para consumidores não está no dimensionamento do controlador preditivo, mas sim no desenvolvimento da plataforma SCADA-Matlab para aplicação em BAS. Portanto, para a obtenção das matrizes Q , W e R foi desenvolvida uma metodologia simples que considera matrizes constantes para todo o horizonte de previsão, tendo em consideração dois objetivos: 1) reduzir o custos associados à utilização de energia elétrica, e 2) estabilidade do sistema em cadeia fechada.

Tendo por base as considerações anteriores, a determinação dos pesos é descrita seguidamente, onde H_p é o horizonte preditivo, H_u é o horizonte de controlo e H_w é o parâmetro da janela de previsão considerada [Maciejowski02]. As matrizes dos pesos são dadas por [Bemporad05]:

$$Q([H_w; H_p]) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$W([0; H_p - 1]) = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 75 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$R([0; H_u - 1]) = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

De acordo com (4.14) a (4.16), pode ser observado que a maior penalização foi atribuída à iluminação artificial, o que significa que foi dada preferência à iluminação natural que atravessa os estores. A maior penalização atribuída à iluminação artificial está patente nos pesos 75 e 5 das matrizes W e R , respetivamente. As penalizações associadas à iluminação artificial, estão patentes nos pesos 0 e 0.1 das matrizes W e R , respetivamente. Apesar das penalizações atribuídas indicarem uma preferência pela iluminação natural, esta preferência tem associado um consumo de energia elétrica que advém do sistema de comando dos estores. Este custo do consumo de energia elétrica é considerado através da atribuição de um pequeno valor de penalização, diferente de zero.

A minimização do consumo de energia elétrica está indiretamente considerado no dimensionamento e atribuição dos pesos das matrizes Q , W e R .

4.4.4 Restrições da Função de Custo

Neste caso de estudo, a otimização da função de custo é sujeita às restrições das amplitudes permitidas para as variáveis de entrada presentes em (4.9) e para as variáveis de saída presentes em (4.10). É comum apresentar as restrições sob a forma de equações [Maciejowski02] dadas por [Bemporad05]:

$$\begin{bmatrix} y_{min}^{H_w} \\ \dots \\ y_{min}^{H_p} \\ u_c^0 \\ u_{c_{min}} \\ \dots \\ u_{c_{min}}^{H_{p-1}} \\ \Delta u_c^0 \\ \Delta u_{c_{min}} \\ \dots \\ \Delta u_{c_{min}}^{H_{p-1}} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y^{H_w} \\ \dots \\ y^{H_p} \\ u_c^0 \\ \dots \\ u_c^{H_{p-1}} \\ \Delta u_c^0 \\ \dots \\ \Delta u_c^{H_{p-1}} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_{max}^{H_w} \\ \dots \\ y_{max}^{H_p} \\ u_{c_{max}}^0 \\ \dots \\ u_{c_{max}}^{H_{p-1}} \\ \Delta u_{c_{max}}^0 \\ \dots \\ \Delta u_{c_{max}}^{H_{p-1}} \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

Considerando as variáveis de saída (4.10), temperatura interior e luminosidade interior, foi assumido que não existem restrições à temperatura interior e que a luminosidade interior não pode ser negativa.

Para a definição de restrições para as variáveis de entrada, foi feita uma análise das amplitudes permitidas, bem como das suas variações. Neste caso de estudo existem 2 tipos de entradas controláveis: 1) entradas criadas artificialmente, nomeadamente o fluxo proveniente do sistema AVAC e a iluminação artificial, e 2) entradas criadas naturalmente, nomeadamente a luminosidade natural.

As restrições para as variáveis de entrada do tipo 1, são definidas pelos fabricantes. Para as variáveis de entrada do tipo 2, o valor máximo permitido corresponde a uma abertura dos estores de 100%.

4.5 Integração dos Contadores Inteligentes

Para a integração dos contadores inteligentes foi desenvolvida uma interface Matlab, que permite a medição do consumo da energia elétrica, cujos dados são posteriormente comunicados à aplicação SCADA que finalmente incorpora estes dados no sistema de gestão de consumo de energia elétrica.

Com efeito, o Matlab, permite a computação dos dados adquiridos provenientes de ambos os tipos de contadores inteligentes aqui abordados: i) contador inteligente propriedade do distribuidor, EDP, e ii) contador inteligente de baixo custo, propriedade do consumidor.

Para a comunicação de dados entre o Matlab e o sistema SCADA é utilizado o mesmo protocolo de comunicação OPC [OPC15], já utilizado para a implementação do controlador preditivo, referido no subcapítulo 4.4.

4.5.1 Contador Inteligente Propriedade do Distribuidor (EDP)

O contador inteligente aqui abordado é a EB para Baixa Tensão Normal (EB BTN), que foi o modelo instalado em Évora, em cerca de 30000 utilizadores, no âmbito do projeto EDP-InovGrid.

A interação entre a EB BTN e o consumidor é promovida através de um botão de controlo e de um monitor alfanumérico com duas linhas. A informação disponibilizada pela EB BTN, sem intervenção do consumidor, é a seguinte: hora e dia da semana; versão de *software*; versão de *firmware*; data atual; potência contratada; designação do tarifário; identificação do período horário em vigor; 3 registos de leitura, por período horário, para o tarifário; potência teórica.

A informação disponibilizada pela EB BTN por ação do consumidor através do botão de controlo consiste em 6 menus: 1) valores instantâneos; 2) pontas máximas; 3) totalizadores de energia; 4) valores de histórico; 5) registos do tarifário e 6) sair.

No menu 1 são disponibilizados os valores instantâneos da potência ativa; no menu 2 são disponibilizados os valores máximos de potência ativa; no menu 3 é disponibilizado o valor correspondente à potência ativa total; no menu 4 são disponibilizados valores de histórico referentes à potência contratada, tensão instantânea, corrente instantânea, fator de potência e frequência da REE; No menu 5 são disponibilizados os registos do tarifário de energia elétrica.

A comunicação entre a EB BTN e o consumidor é estabelecida através de monitor ou através do protocolo ModBus. De entre os vários domínios do protocolo ModBus, nomeadamente, RTU, ASCII, TCP/IP, Plus e PEMEX [Ghumre15], a EB BTN, gentilmente disponibilizada pela EDP à Universidade de Évora para a execução de estudos académicos, apenas permite a interface de comunicação de dados através do domínio RTU utilizando a porta série, assumindo a designação de ModBus *Serial Line*.

Para a comunicação através da porta série foi utilizada a configuração RS485. Esta configuração permite a ligação entre equipamentos numa distancia aproximada de 1200 m. A representação esquemática da comunicação ModBus é apresentada na Figura 4.3.

O protocolo de comunicação ModBus *Serial Line* é um protocolo mestre/escravo, comumente designado *master/slave*, em que ambos partilham o mesmo barramento, podendo existir apenas um mestre e 247 escravos. A comunicação pode ser estabelecida entre o mestre e apenas um único escravo, assumindo a designação *unicast*, ou entre o mestre e vários escravos, assumindo a designação *broadcast* [Wilamowski11].

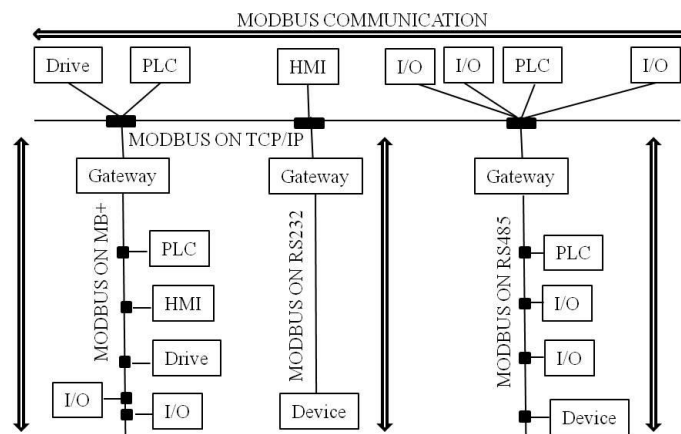


Figura 4.3– Representação da comunicação ModBus [Pereira15a].

Para a implementação laboratorial foi utilizado o protocolo ModBus RTU sendo a comunicação realizada em *broadcast*.

O modo de transmissão de dados ModBus RTU utilizado pela EB BTN é composto por: 1 bit inicial, 8 bits de dados, 1 bit de paragem, a deteção de erro é formalizada pelo código CRC16. A velocidade de transmissão é de 9600 bps.

O formato ModBus para transferência de dados é assegurado por 256 bytes e é composto por quatro campos distintos: endereço, código, dados e *Cyclic Redundancy Check (CRC)*. Foi utilizado um conversor RS232-RS485 para permitir a interligação do computador onde está o sistema SCADA e o EB BTN, com configuração ponto-a-ponto, utilizando o conversor IC-485S. Foi utilizada a rede de comunicação Ethernet para estabelecimento da comunicação entre a EB BTN e o conversor IC-485.

A EB BTN dispõe de três códigos de funcionamento disponíveis: leitura de registos, escrita de registos e leitura de entradas do diagrama de carga. Contudo, a versão da EB BTN utilizada apenas permite a leitura de registos. Para a obtenção de valores correspondentes aos valores de consumo foi desenvolvida uma aplicação Matlab.

Os dados disponíveis na EB BTN são assim processados pela aplicação Matlab e, conforme referido no subcapítulo 4.5, são posteriormente comunicados ao sistema de controlo e supervisão SCADA. através do protocolo OPC

4.5.2 Contador Inteligente de Baixo Custo – Desenvolvimento e Implementação

O contador inteligente de baixo custo desenvolvido para integração no sistema de consumo do *prosumer*, tem também por objetivo fornecer a informação referente ao consumo de energia, é propriedade do consumidor. A EB de baixo custo é constituída por três subsistemas: i) a unidade de processamento e sensores, ii) o monitor móvel e iii) a unidade centralizada (PC), que através do Matlab poderá também interagir com o sistema de Controlo e Supervisão SCADA. Uma representação da metodologia de implementação está representada na Figura 4.4.

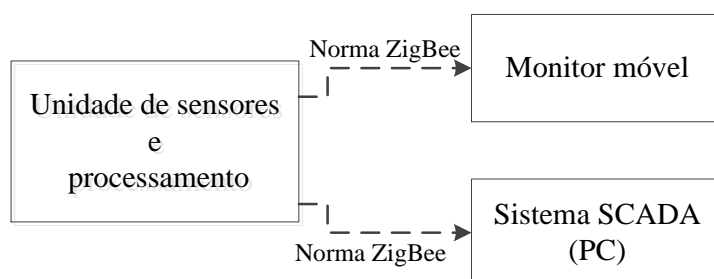


Figura 4.4 – Esquema do sistema implementado.

O sistema implementado na Figura 4.4, foi desenvolvido com base em tecnologia de baixo custo. A unidade de sensores e processamento é constituída por um conjunto de sensores, um microprocessador e uma rede sem fios. O conjunto de sensores integra sensores de tensão e de corrente com sinais analógicos de saída entre 0 V e 10 V. A unidade de sensores que se encontra ligada fisicamente ao

quadro elétrico principal da residência do *prosumer* [Pereira15a] está representada na Figura 4.5.

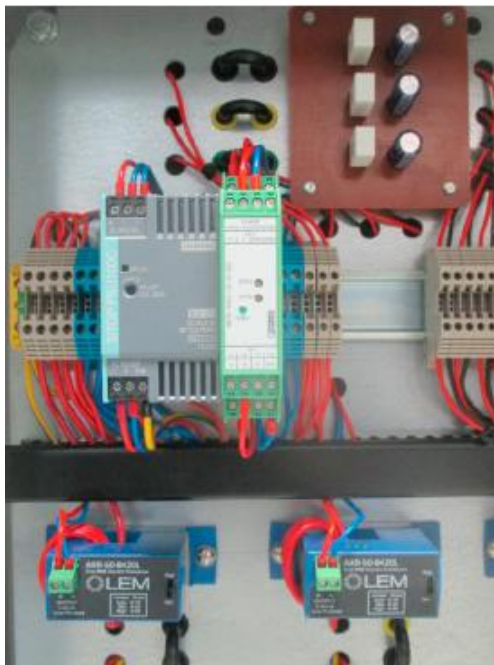


Figura 4.5 – Unidade de sensores ligados ao quadro elétrico principal.

O monitor móvel consiste num *Liquid Crystal Display* (LCD) a cores, de 12 bits, com resolução de 128×128 *pixel*, da marca Nokia. O monitor está instalado numa *shield* acoplada à plataforma Arduino, por forma a ser possível adquirir capacidade autónoma para processamento de sinais. O monitor móvel desenvolvido [HT15] está representado na Figura 4.6.

A unidade de sensores está fisicamente ligada ao microprocessador de uma placa Arduino que integra um transmissor sem fios. Dois recetores sem fios estão ligados ao monitor móvel e ao PC/SCADA centralizado.

A instalação dos recetores *wireless* está representada na Figura 4.7 e Figura 4.8, respetivamente.



Figura 4.6 – *Shield* Arduido LCD a cores.

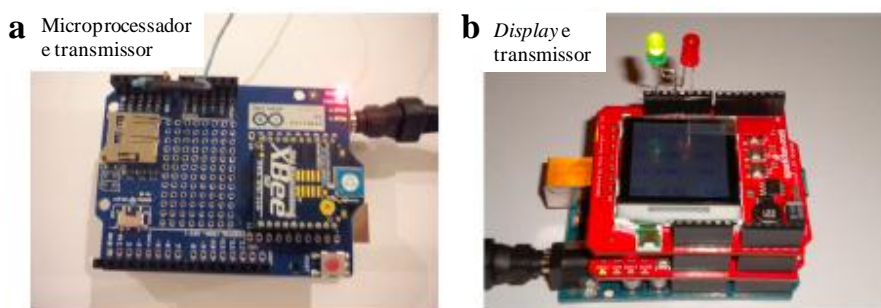


Figura 4.7 – Microprocessador da unidade de sensores com o dispositivo de transmissão (a); Monitor móvel inserido na plataforma Arduino com rede de comunicação ZigBee (b).



Figura 4.8 – Sistema SCADA centralizado com recetor sem fios.

A rede sem fios utiliza a norma ZigBee e o módulo sem fios utilizado é o XBee, também utiliza a norma ZigBee. A norma ZigBee está no IEEE 802.15.4 ponto-a-ponto, sendo a rede de comunicação configurada no *software* X-CTU [Pereira15a].

Na norma IEEE 802.15.4 existem 4 tipos de módulos caracterizados como *Full Function Device* (FFD) e *Reduced Function Device* (RFD) [Batista13].

O módulo coordenador ZigBee é um FFD que tem por função coordenar a rede e formar a malha. Pode constituir a ponte com diferentes tipos de rede adicionais, faz a gestão da segurança da rede e armazena informação sobre a rede. O módulo *router* ZigBee é um FFD que permite o acoplamento de sensores e atuadores, tendo ainda a possibilidade de retransmitir mensagens de outros módulos. O módulo final ZigBee é um RFD, no qual são acoplados sensores e atuadores. Não tem a possibilidade de retransmissão de mensagens de outros módulos e pode entrar em modo de suspensão, reduzindo o consumo de energia. O módulo ZigBee Green Power é um RFD que comunica com os módulos *router* que enviam as mensagens em seu nome. A energia destes módulos provém do movimento ou interatividade com os dispositivos [Batista13].

A norma ZigBee permite dois tipos de topologias: ponto-a-ponto e estrela. A topologia ponto-a-ponto pode ser dividida em dois tipos: malha e árvore [Batista13].

Foi utilizada a tipologia ponto-a-ponto em malha, uma vez que, apresenta como vantagem dispor de flexibilidade de regeneração dinâmica, sempre que um nó da rede deixa de funcionar. Contudo esta característica de redundância condiciona a velocidade de transmissão, uma vez que o percurso de transmissão definido automaticamente, não minimiza a distância compreendida entre o emissor e o recetor.

Na rede desenvolvida para transmissão de dados relativos ao consumo de energia, os três componentes implementados, têm a seguinte classificação: a unidade de processamento e sensores constitui o coordenador, FFT, a unidade centralizada correspondente ao sistema SCADA constitui o *router*, RDF, e o monitor móvel constitui o módulo final, RFD. Foram utilizados os seguintes parâmetros:

- ID-PAN ID - 0000;
- *Baud rate* – 9600.

Para o contador inteligente integrado no sistema de consumo do *prosumer*, o *software* LabView foi utilizado como HMI. Para o estabelecimento da comunicação entre o módulo XBee e o LabView foi utilizada a porta série.

Os dados relativos ao consumo de energia consistem nos dados de consumo das 3 fases de alimentação e ao valor total de energia consumida em 24 h. Para a implementação do sistema de transmissão de dados foram utilizadas 3 entradas analógicas do Arduino, para a aquisição dos dados de consumo referentes às 3 fases. O valor acumulado é obtido com recurso à programação do microprocessador do Arduino. Após aquisição dos quatro valores, a transmissão dos mesmos é efetuada com recurso à porta série, que está conectada com o módulo XBee, que por sua vez faz a retransmissão dos dados para outro módulo XBee que está conectado a um computador através de porta série, permitindo o acesso aos 4 valores de consumo de energia elétrica.

Como resultado da programação em LabView a interface HMI está representada na Figura 4.9.

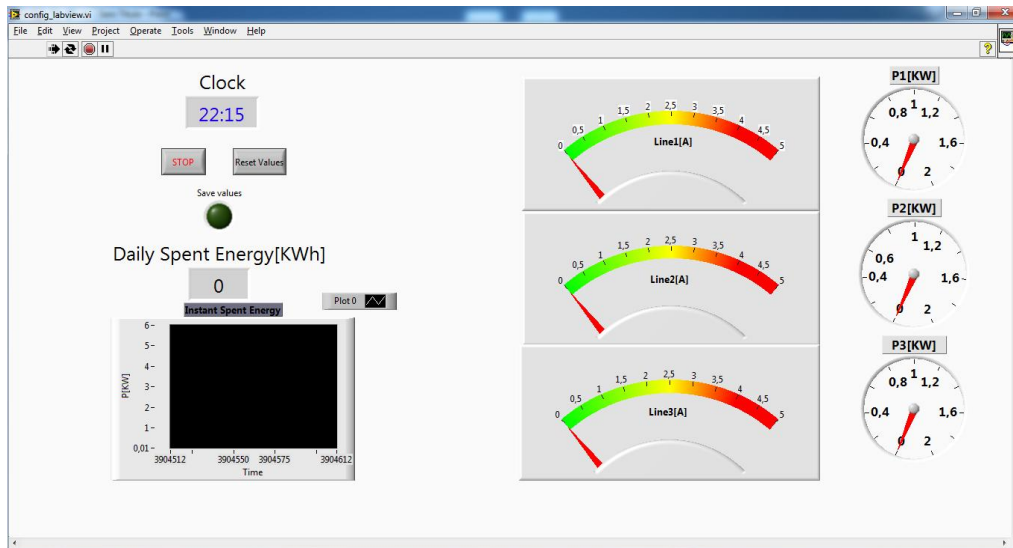


Figura 4.9– Interface HMI do contador inteligente de baixo custo.

4.6 Implementação do Sistema de Gestão da Energia

O sistema de gestão de energia é composto fundamentalmente pela aplicação SCADA que supervisiona toda a instalação de *hardware*, i.e., PLCs e redes de sensores e de atuadores e pelo Matlab onde foi desenvolvido o controlo preditivo que processa os dados provenientes dos contadores inteligentes. Esta arquitetura do sistema de gestão da energia foi já apresentada na Figura 4.1, do subcapítulo 4.3.

4.6.1 Implementação do Controlador Preditivo

Neste subcapítulo é apresentada a implementação do controlador preditivo desenvolvido no subcapítulo 4.4. Uma visão global do controlador implementado em Matlab é apresentada na Figura 4.10. O controlador preditivo é utilizado para

controlar a temperatura e luminosidade de uma sala de conferências, de acordo com as preferências dos utilizadores, através de HMI distribuídas pela sala, tendo em consideração a minimização do consumo de energia elétrica.

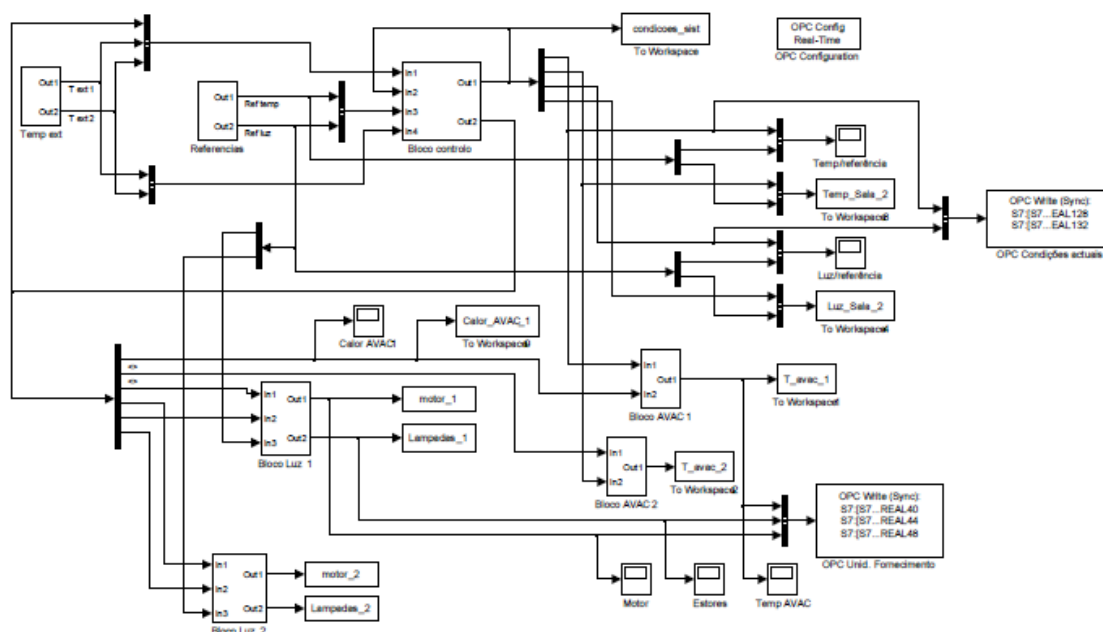


Figura 4.10 – Modelo de controlo preditivo em Matlab.

Este controlador preditivo não foi implementado diretamente no sistema SCADA, por não permitir a computação de modelos matemáticos complexos, nomeadamente as operações matemáticas ao controlador preditivo implementado. Neste sentido, foi necessário o desenvolvimento de um canal de comunicação entre o sistema SCADA [Siemens08] e o Matlab [Mathworks08], onde foi implementado o controlador preditivo. O canal de comunicação utilizado foi o protocolo OPC, conforme descrito subcapítulo 4.4.

Os resultados de simulação do controlador desenvolvido estão sujeitos às seguintes considerações: as referências de temperatura são geradas aleatoriamente entre 20 °C e 30 °C, as referências de luminosidade são geradas aleatoriamente entre 0 % e 100 %, é considerada uma temperatura exterior

constante de 24 °C e luminosidade de 100 %, e é considerado um tempo de simulação de 1h.

Na Figura 4.10 estão representados os modelos parciais correspondentes ao sistema AVAC apresentado na Figura 4.11, à unidade de luminosidade apresentada na Figura 4.12, ao controlador apresentado na Figura 4.13 e à geração de referências [Pereira15a] apresentada na Figura 4.14.

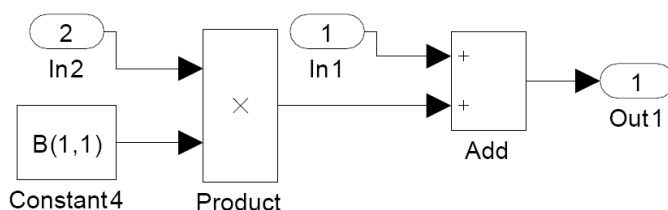


Figura 4.11 – Modelo do sistema AVAC em Matlab.

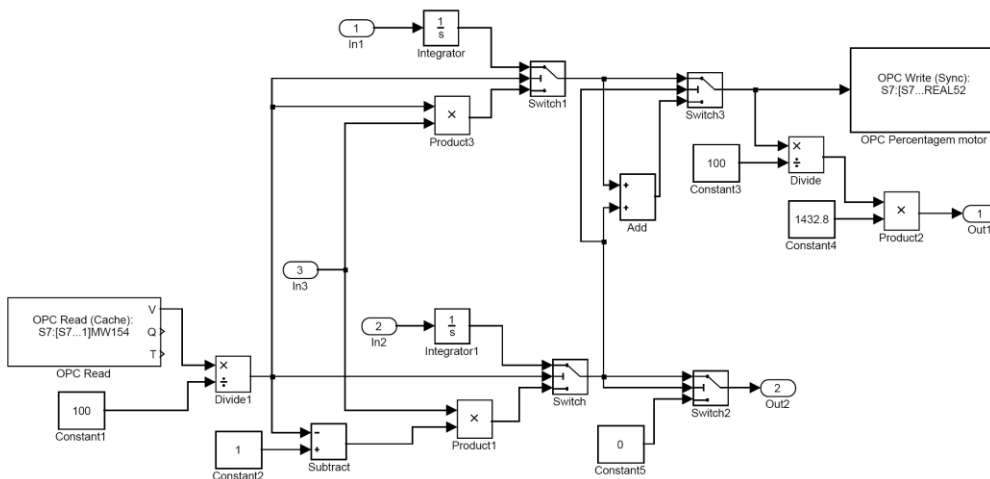


Figura 4.12 – Modelo de luminosidade em Matlab.

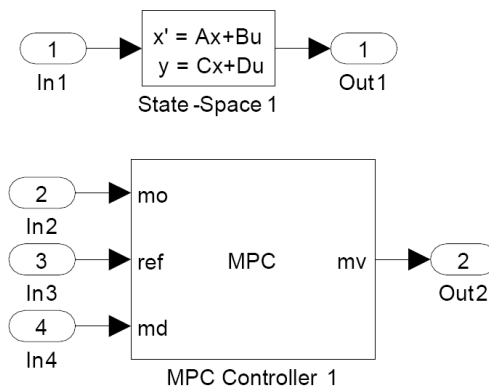


Figura 4.13 – Modelo do controlador em Matlab.

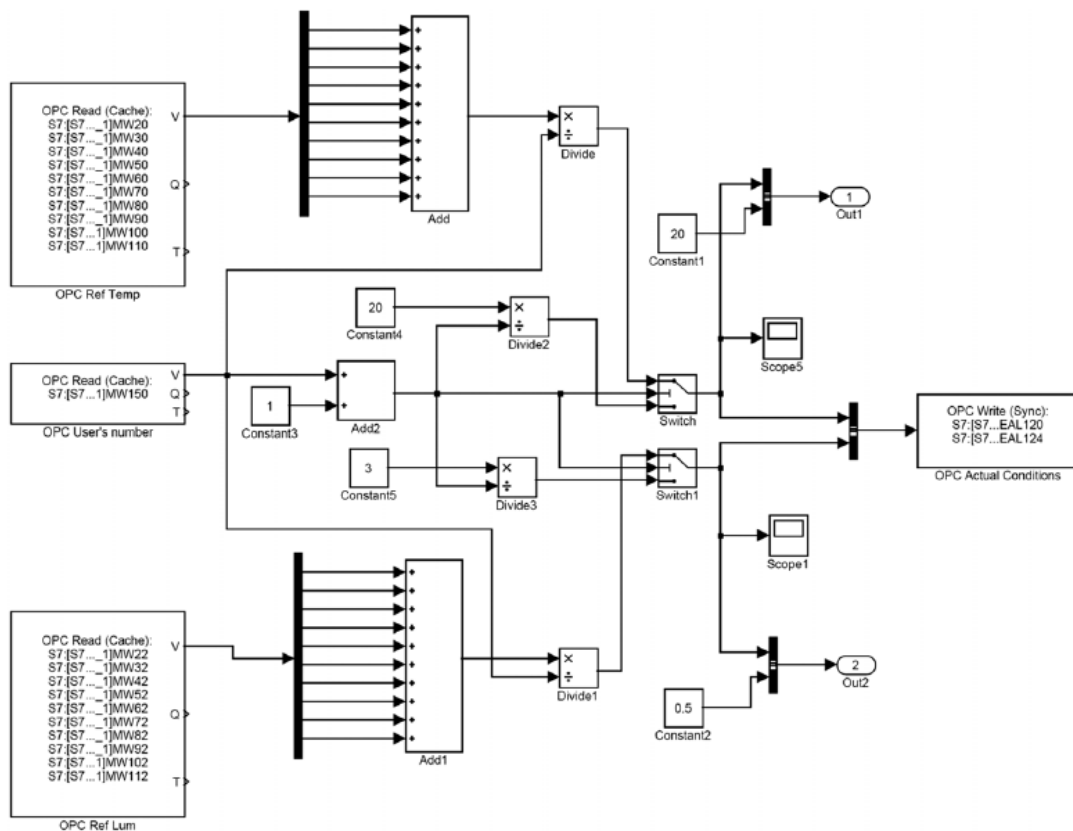


Figura 4.14 – Modelo para geração de referências em Matlab.

A resposta do controlador da temperatura e da luminosidade da sala de conferências, em ambiente laboratorial, está representado na Figura 4.15 e Figura 4.16, respetivamente.

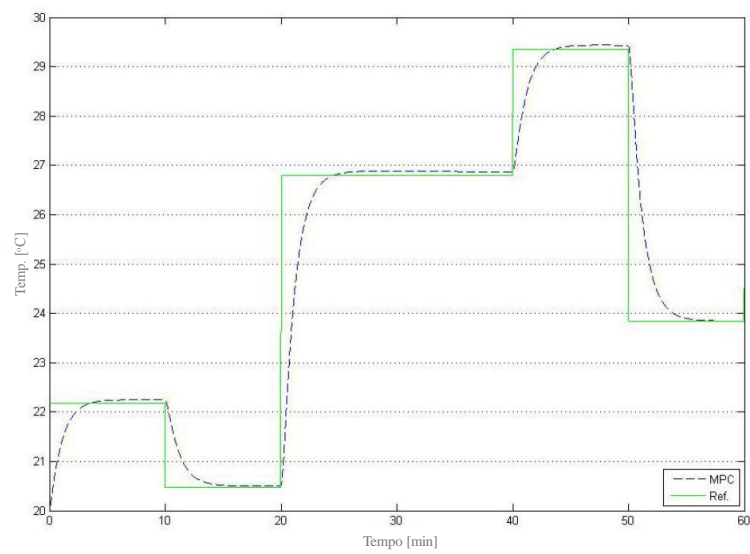


Figura 4.15 – Resultado do controlo de temperatura em ambiente laboratorial.

Os resultados de simulação apresentados na Figura 4.15, correspondem ao seguimento em degrau da variação da temperatura de referência.

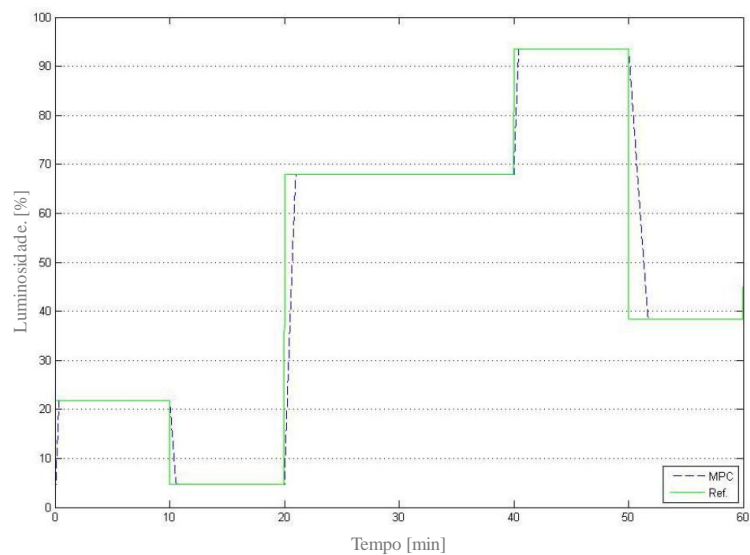


Figura 4.16 – Resultado do controlo de luminosidade em ambiente laboratorial.

Da comparação entre a Figura 4.15 e da Figura 4.16, é possível observar que o tempo de resposta do controlador de temperatura é mais lento do que o tempo de resposta do controlador de luminosidade. O tempo de estabelecimento da temperatura é condicionado pelas características térmicas, área e número de utilizadores da sala de conferência. No caso de estudo analisado, o tempo de resposta do controlador é de aproximadamente 5 minutos, apresentando uma ligeira sobrelevação em relação ao valor de referência de temperatura, com um valor de erro de 0.3 %, que não é significativo.

A resposta do controlador de luminosidade apresenta um erro não significativo e um tempo de estabelecimento de, aproximadamente 1 minuto.

A análise realizada indicia a viabilidade da aplicação do sistema de automação, comunicação, controlo e monitorização em ambiente real.

Do cálculo das ações de controlo da luminosidade natural, E , e da luminosidade artificial, I_A , de acordo com (4.3), resulta a percentagem de utilização de luminosidade natural através dos estores, apresentada na Figura 4.17, e a percentagem de utilização de luminosidade artificial, apresentada na Figura 4.18.

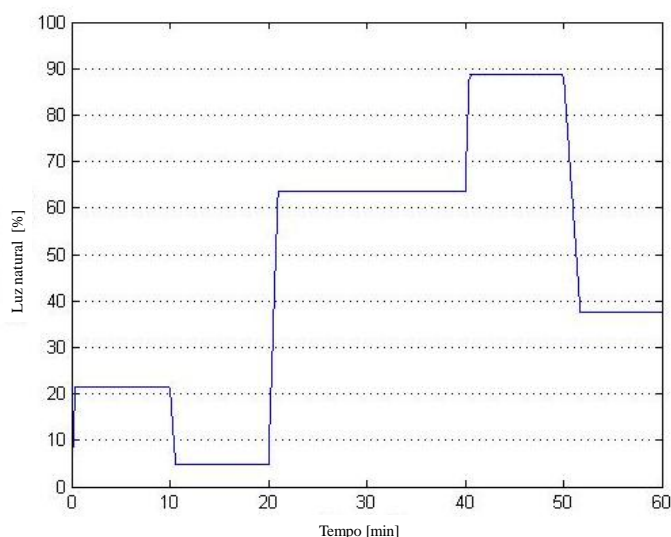


Figura 4.17– Resultado de simulação do controlo de luminosidade natural.

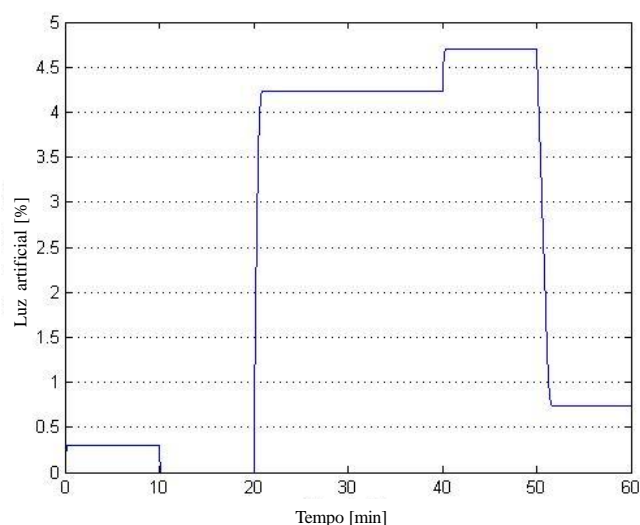


Figura 4.18 – Resultado de simulação do controlo de luminosidade artificial.

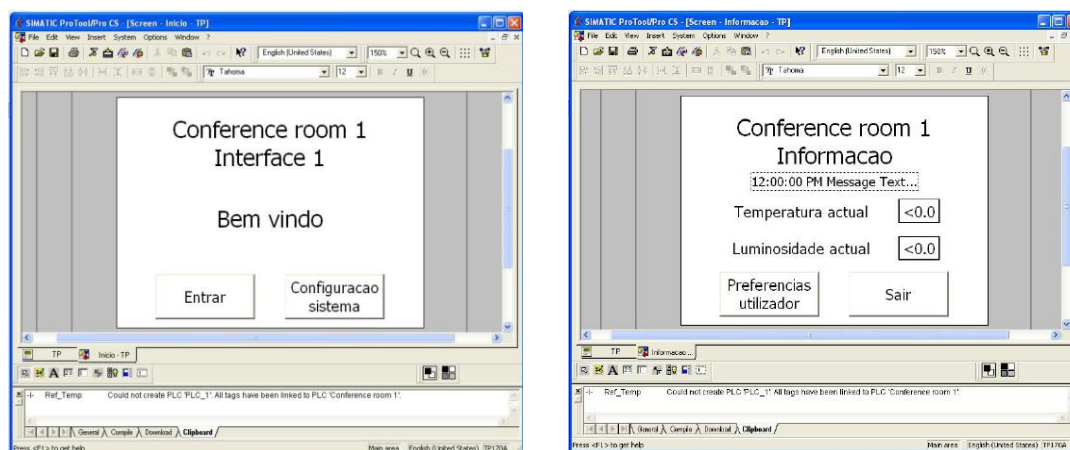
4.6.2 Configuração e Programação do *Hardware*

A implementação do controlo preditivo descrito no subcapítulo 4.6.1, considera a existência de: i) 10 HMI constituídas por 10 painéis tácteis na sala de conferências; ii) a existência de 2 PLC Siemens S7-300 representados por PLC1 e PLC2 na Figura 4.1; iii) um sistema AVAC; iv) sensores de luminosidade e de temperatura; v) motor de passo-a-passo para comando dos estores; e vi) um *dimmer* para comando da variação da luminosidade artificial [Henriques09].

Analisando a Figura 4.1, as 10 interfaces HMI permitem a introdução das preferências de temperatura e de luminosidade pelos utilizadores da sala de conferências. O PLC1 é responsável pela leitura das HMIs. O PLC2 é o PLC responsável pelo MAS fazendo a aquisição de dados, provenientes dos sensores de temperatura e de luminosidade e o comando dos atuadores do sistema.

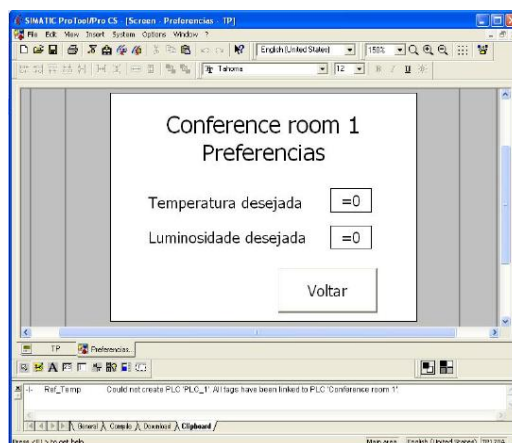
Ambos os PLCs comunicam com o sistema SCADA, via *Industrial Ethernet*, permitindo a atualização dos dados das HMI e dos comandos dos atuadores, a cada ciclo do sistema SCADA (1s).

Para a configuração dos PLC foi utilizado o *Simatic Manager STEP7* [Siemens06] sendo definida a comunicação de dados por rede Ethernet. Foi introduzido o número de dispositivos e definida uma *Simatic PC Station* [Siemens06] para possibilitar a comunicação entre os vários componentes do sistema. Seguidamente, a rede Ethernet foi configurada permitindo a comunicação de dados entre os PLC e o sistema SCADA. Após a configuração da rede Ethernet, foi configurada a comunicação OPC, através do software *OPC Scout* [Siemens06]. As interfaces HMI e os PLC foram programados e configurados, estando o resultado deste processo representando na Figura 4.19.



(a) – Ecrã inicial

(b) Ecrã “Informação”



(c)– Ecrã “Preferências”

Figura 4.19 – Visualização da interface HMI.

Foi utilizado o WinCC [Siemens08] para a configuração do sistema SCADA. A comunicação entre o WinCC e o restante sistema é feita através de protocolo OPC.

4.6.3 Desenvolvimento da Aplicação SCADA

A motivação para a realização dos testes experimentais foi permitir avaliar a viabilidade da estratégia proposta, nomeadamente do estabelecimento de uma comunicação adequada e sem falhas entre: o sistema SCADA; o contador inteligente, a rede de PLCs; a atualização das variáveis definidas pelos utilizadores e o cálculo das referências correspondentes, de acordo com o algoritmo de controlo preditivo desenvolvido.

Além disso, a realização de testes adicionais permitem comprovar a capacidade da metodologia proposta para a decisão e gestão de múltiplas variáveis de entrada definidas pelos utilizadores. Para a realização dos testes experimentais foi utilizado um protótipo laboratorial constituído por:

- 2 plataformas físicas HMI, ligadas a 2 PLCs, PLC1 e PLC2, através de uma rede de comunicação industrial Ethernet;
- PLC1 e o PLC2 ligados ao servidor SCADA através de uma rede Ethernet.

Os atuadores controlados pelo PLC2, que constitui o MAS, são simulados com recurso a *software* Matlab, uma vez que, devido a restrições financeiras, não foi possível integrar fisicamente os sistema AVAC, sistema de comando dos estores e sistema de controlo de luminosidade artificial.

Neste sentido, os sistemas referidos foram representados por dispositivos lineares, cujo declive depende da magnitude imposta para a referência. Uma vez que para a implementação laboratorial apenas existem 2 dispositivos HMI, as

entradas adicionais fornecidas pelos utilizadores são diretamente introduzidas na HMI do sistema SCADA.

Assim, e de acordo com a modelização matemática do controlo preditivo apresentado no subcapítulo 4.4.1, foi desenvolvida a interface SCADA apresentada na Figura 4.20.

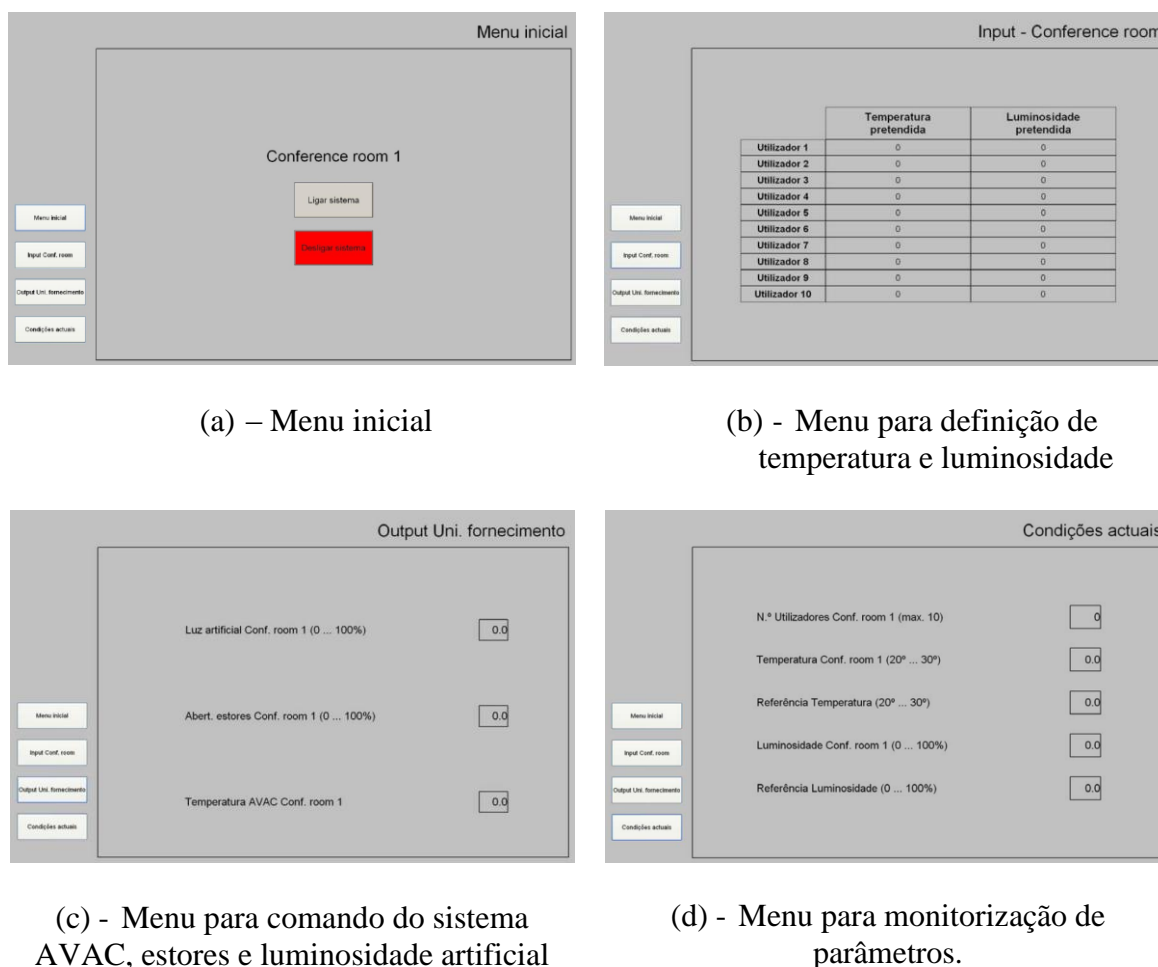


Figura 4.20 – Interface gráfica do sistema SCADA.

A interface gráfica permite informar o administrador do sistema sobre o número de utilizadores que comunicam com o sistema, o valor atual de temperatura e de luminosidade e os valores médios resultantes das variáveis de temperatura e de luminosidade definidos pelos utilizadores. Existem ainda menus adicionais

acessíveis ao administrador do sistema, nomeadamente: i) as entradas provenientes da sala de conferências, onde são monitorizadas as preferências dos utilizadores, ii) as saídas do MAS, onde é disponibilizada a informação de comando aos atuadores, nomeadamente, a intensidade da luminosidade artificial, abertura dos estores e a temperatura e fluxo de ar do sistema AVAC.

O protótipo laboratorial está apresentado [Pereira15a] na Figura 4.21.



Figura 4.21 – Protótipo desenvolvido em ambiente laboratorial.

4.7 Conclusões

Neste capítulo é apresentado um sistema de gestão de energia com a integração de dois tipos de contadores inteligentes: i) contador inteligente propriedade do distribuidor EDP, ii) contador inteligente de baixo custo.

Para a integração de ambos os tipos de contadores inteligentes considerados, foi desenvolvida uma interface em Matlab que permite a medição do consumo de energia elétrica, que é posteriormente comunicada à aplicação SCADA, que

finalmente incorpora esses dados no sistema de gestão de consumo da energia elétrica.

O sistema de gestão de energia elétrica apresentado nesta tese, desenvolve uma plataforma de controlo operacional para edifícios inteligentes com recurso a um sistema SCADA. O sistema SCADA integra diferentes tipos de informação provenientes de vários dispositivos e tecnologias presentes nos edifícios modernos, nomeadamente, controlo do sistema AVAC, de temperatura e de luminosidade.

A estratégia de controlo desenvolvida apresenta a implementação de uma estrutura de controlo em cascata, na qual a malha interna de controlo é realizada pelos PLCs locais e a malha de controlo externa é gerida por um sistema SCADA centralizado, que promove a interação com a rede de PLCs locais.

Apesar da ênfase desta tese não estar no desenvolvimento do controlador preditivo, este foi implementado na plataforma SCADA desenvolvida e foram apresentados resultados experimentais para o controlo de temperatura e de luminosidade de uma sala de conferências. Os resultados indiciam que o controlador desenvolvido otimiza a satisfação das preferências dos utilizadores fornecidas ao sistema através de HMI, obedecendo ao critério de minimização do consumo de energia elétrica.

A principal contribuição da aplicação de gestão de energia para consumidores reside no desenvolvimento de uma plataforma que permite a ligação entre o sistema SCADA, correspondente ao nível operacional, e o Matlab correspondente ao nível interativo. Esta plataforma denominada de SCADA/Matlab, permite atribuir aos atuais sistemas SCADA capacidade de integrar algoritmos de controlo complexos.

CAPÍTULO

5

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as contribuições resultantes do trabalho desenvolvido nesta tese sobre o tema das redes elétricas inteligentes. São referidas as publicações científicas produzidas no contexto de divulgação e validação do trabalho de investigação realizado. São ainda apontadas as linhas de investigação para desenvolvimentos futuros.

5.1 Contribuições

Face ao aumento crescente da necessidade de um fornecimento de energia elétrica com maior qualidade e fiabilidade, associado à crescente preocupação ambiental, nomeadamente no que se refere à redução da emissão dos gases de efeito de estufa, a REI é apresentada como um conceito potenciador do desenvolvimento e integração de novas tecnologias, bem como da integração da produção descentralizada da REE tradicional, por forma a dar resposta a essas necessidades.

A REI é o elemento preponderante na contribuição para a redefinição das funções e da caracterização dos seus *stakeholders*, na medida que tem contribuído para dotar os utilizadores de energia elétrica de uma maior consciência ambiental e de conhecimento no âmbito do funcionamento e gestão da REE. Esta consciencialização e conhecimento advêm do aumento da utilização de energia elétrica proveniente de fontes de energia renováveis e da existência de políticas e de programas de incentivos financeiros que têm repercussões, nomeadamente ao nível da redefinição do perfil do diagrama de carga e da redução das perdas na REE. Neste contexto, tem sido verificado um aumento dos consumidores de energia elétrica que se tornam produtores, sendo a energia produzida utilizada para consumo próprio ou vendida à REE.

Considerando o decorrer da fase de transição entre a REE e a REI, os fatores legislativos e técnicos têm impelido os operadores da REE a contribuir para a modernização da REE através da introdução de novos equipamentos e de novas tecnologias. A modernização da REE contribui para o aumento da produção descentralizada e conseqüente diminuição das perdas no transporte e distribuição de energia elétrica. Os reguladores da REE enfrentam novos desafios na medida em que as suas ações de regulação são aplicadas no âmbito dos MEE, contribuindo para a sua transparência e competitividade.

O impacto do *prosumer* na REE é evidenciado quando inserido em comunidades, constituindo as VPP, permitindo atingir níveis de produção e de consumo que possibilitem a negociação em MEE.

A informação disponibilizada aos *stakeholders* da REE, auxilia a operação e gestão da rede, razão pela qual é relevante efetuar a previsão da produção e do consumo da energia elétrica. Neste âmbito, as RNA são uma ferramenta passível de ser utilizada para dar resposta às necessidades de previsão por parte dos operadores da REE, auxiliando na operação e gestão da REE.

Nesta tese foram considerados vários casos de estudo e cenários, para os quais os resultados das redes neuronais são considerados satisfatórios e que são posteriormente aplicados na resolução do problema de despacho económico, tendo em conta as limitações orçamentais dos consumidores e as horas preferenciais de consumo definidas pelos consumidores.

O problema de despacho económico foi resolvido considerando um horizonte temporal diário e mensal. Quando comparados, a resolução do problema de despacho económico mensal potencia uma melhor perceção da evolução do consumo e do custo total da energia do que a resolução do problema de despacho económico diário. Em contrapartida a resolução do problema de despacho económico diário apresenta como vantagem uma maior facilidade de ajuste nos limites de consumo, comparativamente com a resolução do problema de despacho económico mensal.

Os resultados obtidos para o problema de despacho económico demonstram que as imposições orçamentais têm como consequência um deslocamento das horas de consumo, contribuindo para o alisamento do diagrama de carga, estando em linha com os programas de resposta à procura.

A análise do trânsito de energia foi realizada para alguns casos de estudo, tendo sido verificado que as VPP contribuem para a diminuição das perdas na REE e

que a produção, proveniente de fontes de energia renováveis, contribui para a diminuição da dependência de produção não renovável a nível global. Adicionalmente as VPP desempenham um papel preponderante na REI na medida em que são os utilizadores finais da energia elétrica que desempenham um papel ativo na gestão da própria rede, nomeadamente através da produção de energia e em associação a programas de *demand side management*, nomeadamente ao deslocamento e deslastre de carga.

Os programas de DR são apresentados como uma estratégia que permite conciliar o cumprimento crescente das necessidades de consumo com o aumento da eficiência energética da REE. Esta estratégia assenta na comunicação bidirecional entre a REE e o consumidor. As redes neuronais são uma ferramenta passível de ser utilizada que permite dar resposta às necessidades de previsão por parte dos operadores da REE, contribuindo para uma operação e gestão mais eficiente da REE.

O modelo de DR desenvolvido é baseado no método de *fuzzy clustering* subtrativo, em que os pontos de informação determinados representam a relação entre o preço da energia elétrica, potência disponível e o estado das CC pretendido pelo consumidor, com o estado de disponibilidade ou indisponibilidade das CC. Esta relação representa o comportamento de DR de um consumidor. Foram definidos perfis de consumo e modos de operação para que, de uma forma fácil e expedita atendendo a uma possível e desejável ampla aplicação, o modelo de DR constitua uma ferramenta que permita suportar as decisões do consumidor na gestão das CC. Os perfis de consumo permitem que o consumidor estabeleça quais os intervalos de preço da energia elétrica que melhor se adequam às suas necessidades e/ou preferências de consumo. Os modos de operação permitem ao consumidor estabelecer várias hierarquias de prioridades para as CC auxiliando o consumidor na gestão da potência disponível.

Da análise da influência do modelo de DR nos hábitos e rotinas do consumo de um consumidor é verificado que as alterações resultantes, têm impacte no diagrama de consumo ao nível residencial e ao nível da REE, permitindo uma adequação bastante aceitável entre o diagrama de carga e o diagrama de geração.

O modelo de DR beneficia os consumidores que apresentarem maior flexibilidade na utilização das CC, uma vez que desta forma é possível tirar partido de preços de energia elétrica mais baixos. No entanto, considerando os consumidores com menos flexibilidade de utilização das CC, é possível adequar o perfil às suas necessidades de consumo. A integração do veículo elétrico contribui para a diminuição do valor da potência disponível para as CC ou para a alteração do horário de utilização das CC, razão pela qual requer uma maior flexibilização no consumo. No caso de ocorrência de uma contingência na REE que resulte na diminuição da potência disponível, as CC mais prioritárias são as últimas a serem preteridas dada a hierarquia de CC definida no modelo.

O modelo de DR pode constituir uma ferramenta útil aos operadores da REE uma vez que, para além de conseguir influenciar o consumo através da variação do preço da energia elétrica, com as leituras provenientes dos contadores inteligentes, os operadores podem analisar os dados dos diagramas de consumo e com essa informação sugerir alterações aos perfis de consumo e modos de operação que apresentem mais vantagens, quer seja para a REE ou para o consumidor.

A implementação de contadores inteligentes é essencial para a interface entre a REI e os utilizadores de energia elétrica. A plataforma de comunicação desenvolvida entre o sistema de controlo e supervisão e os contadores inteligentes é fundamental para possibilitar a incorporação de um sistema de controlo que permita introduzir as ações definidas pelos utilizadores de energia elétrica e de acordo com as suas preferências. Foi desenvolvido e implementado um modelo de controlo preditivo no sistema de controlo do sistema de gestão de

energia elétrica, permitindo não só incorporar as decisões do utilizador de energia elétrica mas permitir uma resposta mais eficiente do que um modelo de controlo tradicional. O sistema desenvolvido integra diferentes protocolos de comunicação e diferentes tecnologias, apresentando um desempenho que se enquadra no cumprimento de ações inerentes a BAS e em permitir o estabelecimento e execução de ações de DR.

Nesta tese foi adequado o modelo do produtor-consumidor apresentado em [Sun13] utilizando modelos de previsão de radiação solar e de consumo, recorrendo a redes neuronais artificiais [Pereira15b]. Também se abordou a resolução do problema de despacho económico considerando a existência de sazonalidade e diferentes limites orçamentais para horizontes temporais distintos [Pereira15b], bem como, a determinação do trânsito de potência e análise do impacto do impacto na REE de uma VPP [Pereira15b].

No âmbito da modelização da resposta à procura, nesta tese, foi desenvolvida uma ferramenta computacional baseada em sistemas inteligentes, para apoiar as decisões do consumidor na gestão de cargas [Pereira15c], e uma técnica de padronização de consumos baseada na definição de perfis de consumo e de modos de operação para consumidores domésticos [Pereira15c].

Ainda sobre a implementação da REI, nesta tese, foi desenvolvida uma arquitetura de comunicação de suporte à instalação de contadores inteligentes [Pereira15a], uma estratégia de controlo e supervisão baseada no sistema SCADA [Pereira15a] e ainda uma interface de comunicação entre o contador inteligente e o produtor-consumidor e de aplicações SCADA [Pereira15a].

5.2. Publicações

Do trabalho desenvolvido no âmbito desta tese, resultaram as publicações científicas que se apresentam seguidamente.

Publicações científicas em revistas internacionais (indexadas ISI/SCOPUS)

R. Pereira, J. Figueiredo, R. Melício, V.M.F. Mendes, J. Martins, J.C. Quadrado, “Consumer Energy Management System with Integration of Smart Meters”. Energy Reports, Elsevier, vol.1, pp.22-29, 2015.

R. Pereira, D. Pereira, J. Figueiredo, J.C. Quadrado, J. Martins, R. Melício, V.M.F. Mendes, “Prosumers as smart grid stakeholders - modeling and case study analysis”. (Submetido)

R. Pereira, R. Melício, V.M.F. Mendes, A. Fagundes, J. Figueiredo, J. Martins, J.C. Quadrado, “Fuzzy clustering demand response model under smart grid scope”. (Submetido)

Publicações científicas em capítulos de livros

R. Pereira, A. Fagundes, R. Melício, V.M.F. Mendes, J. Figueiredo, J. Martins, J.C. Quadrado, "Demand response analysis in smart grids resorting to fuzzy clustering model," In Contribution to Technological Innovation for the Internet of Things, Eds. L.M. Camarinha-Matos, S. Tomic, P. Graça, SPRINGER, Heidelberg, Germany, ISBN: 978-3-642-37290-2, pp. 403-412, April 2013.

R. Pereira, A. Fagundes, R. Melício, V.M.F. Mendes, J. Figueiredo, J.C. Quadrado, "Fuzzy subtractive clustering technique applied to demand response in a smart grid scope", Conference on Electronics, Telecommunications and Computers (CETC 2013), Elsevier Procedia Technology, vol. 17, pp. 478-486, 2014.

Publicações científicas em atas de conferências internacionais

R. Pereira, J. Figueiredo, J. Martins, J.C. Quadrado, R. Melicio, V.M.F. Mendes, "Integration of Evora-InovGrid Smartmeters in a Consumer's SCADA System", 9th IEEE/IES Int. Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE 2015), Portugal, June 24-26, 2015.

R. Pereira, A. Fagundes, R. Melício, V.M.F. Mendes, J. Figueiredo, J. Martins, J.C. Quadrado, "Fuzzy clustering applied to a demand response model in a smart grid contingency scenario", IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2014, pp.495-499, Ischia, Italy, June 2014.

5.3 Linhas de Investigação

Para além do cumprimento dos objetivos desta tese existem linhas de investigação futuras que contribuem para o desenvolvimento de ferramentas de apoio à resposta à procura por forma a dar um amplo suporte às decisões do consumidor, quer seja do desenvolvimento de modelos computacionais ou implementações laboratoriais para suporte à gestão de energia. Neste sentido são propostas as seguintes linhas de investigação para desenvolvimento futuro:

Relativamente à modelização do produtor-consumidor, incorporar o modelo de MLE e a existência de armazenamento de energia para a resolução do PDE. Desenvolver outros modelos de despacho económico, nomeadamente modelos de otimização multicritério. Além disso, modelizar e analisar o comportamento de grupos de produtores-consumidores e de VPP, comparando o seu impacto na gestão de REI.

Relativamente ao desenvolvimento de ferramentas de apoio à resposta à procura, considerar outros regimes de funcionamento para as CC; definir perfis de consumo e modos de operação adicionais, tendo em consideração diferentes diagramas de carga de acordo com tipologias residenciais distintas, nomeadamente, dimensão da habitação e do agregado familiar. Considerar o PEV como CC, onde a energia armazenada pode ser incluída no programa de DR desenvolvido, nomeadamente na gestão da ponta de consumo numa residência.

Relativamente a aplicações de gestão de energia para o consumidor, considerar aplicações interativas para *smartphones* ou *tablets* para a gestão de tarifários e para comando de CC de forma simples e expedita. Incluir o modelo de DR desenvolvido no sistema SCADA apresentado.

Referências Bibliográficas

- [Aalami08] Aalami, H., G., Yousefi, R., Moghadam, M. P., “Demand response model considering EDRP and TOU programs”, *IEEE/PES Transmission Distribution Conference Exposition*, pp.1-6, Chicago, Illinois, 2008.
- [ADENE14] Agência para a Energia, Energia, Planos e Programas, (<http://www.adene.pt/planos-e-programas>) (Acedido 2015.04.18).
- [Aguiar10] Aguiar M.M.C, “O consumidor e a mudança de paradigma”, *XIV Reunión Anual Iberoamericana de Reguladores de la Energia*, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Abril 10.
- [AICEP08] Agência para o Investimento e Comércio Externo de Portugal, Infraestruturas-Eletricidade, “O sector elétrico”, Agosto 2008. (<http://www.portugalglobal.pt/PT/InvestirPortugal/Portugal/Documents/O%20sector%20electrico.pdf>) (acedido 2014.01.16).
- [Albadi08] Albadi, M. H., El-Saadany, E.F.,”A summary of demand response in electricity markets”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 11, pp. 1898-1996, November 2008.
- [Almeida07] Almeida, S., Machado, N., Pestana, R., “Voltage collapse: real time and preventive analysis in the portuguese transmission system”, *IEEE Power Tech*, pp.1817-1822, Lausanne, 2007.
- [Almeida13] Almeida, A., Moura, P., “ Sistemas sustentáveis de energia”, *Revista Ingenium*, II Série, No.134, pp.38-39, Março/Abril 2013.

- [Antunes03] Antunes, P., Santos, R., Martinho, S., Lobo, G., “Estudo sobre sector elétrico e ambiente – Relatório síntese”, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Centro de Economia Ecológica e Gestão do Ambiente, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, pp. 1-139, Lisboa, 2003
- [APREN14] Associação de energias renováveis, Ondas e marés (<http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/ondas-e-mares/>) (acedido 2014.08.03).
- [Arduino15] Arduino, (<http://www.arduino.cc/>) (acedido 2015.03.27)
- [Arif13] Arif, A., Javed, F., Arshad, N., “Integrating renewables economic dispatch with demand side management in micro-grids: a genetic algorithm-based approach”, *Energy Efficiency*, Vol.7, No.2, pp. 271-284, 2013.
- [Babaei10] Babaei, S. “Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Distributed Generations in Power Systems: Effects and Penetration Level Studies”, *Chalmers University of Technology*, Master thesis, Gothenburg, Sweden, 2010.
- [Barros10] Barros, M., ENCE, Econometria – Semestre 2010.01, Capítulo 12-Autocorrelação (<http://www.mbarros.com/documentos/upload/Capitulo%2012%20Gujarati%20Resumo.pdf>) (acedido 2014.07.28)
- [Batista13] Batista, N., “Novo aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano”, Tese de doutoramento, Universidade de Évora, Novembro 2013.

- [Batlle09] Batlle, C., Rodilla, P. “Electricity demand response tools: current status and outstanding issues”, *European Review of Energy Markets*, Vol. 3, No. 2, pp. 1-27, June 2009.
- [Bemporad05] Bemporad, A., Morari, M., Ricker, N., “Model Predictive Control Toolbox for Use with MATLAB”, second ed., The Mathworks, 2005.
- [Benzi11] Bnezi, F., Anglani, N., Bassi, E., Frosine, L., “Electricity Smart Meters Interfacing the Households”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.58, No.10, pp. 4487-4494, October 2011.
- [Blanquet09] Blanquet, A., Santos, J., Carrapatoso, A., Teixeira, C., “From DA to smartgrids – evolution or revolution? A path to improve the utility efficiency”, *20th International conference and exhibition on electricity distribution*, Part 1, pp. 1-4, Prague, Czech Republic, 2009.
- [Bonner64] Bonner, R. E., “On some clustering techniques”, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 8, No. 1, pp. 22-32, 1964.
- [Boshell08] Boshell , F., Veloza, O.,”Review of developed demand side management programs including different concepts and their results”, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp.1-7, August 2008.
- [CHAdeMO10] CHAdeMO protocol, *Technical specifications of quick charger for the electric vehicle*, 2010.
- [Chebbo07] Chebbo, M., ”EU SmartGrids Framework «electricity Nteworks of the future 2020 and beyond»”, *IEEE Power*

- engineering Society General meeting*, pp.1-8, Tampa, USA, June 2007.
- [Chen01] Chen, T., “Real-time predictive supervisory operation of building thermal systems with thermal mass”, *Energy Build*, Vol. 33, No. 2, pp.141–150, 2001.
- [Chen10] Chen, C.S., Kang, M.S., Hwang, J.C., Huang, C.W., "Synthesis of power system load profiles by class load study", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 22, No. 5, pp. 325–330, 2000.
- [Chen12] Chen, L., Li, N., Jiang, L., Low, S., “Optimal demand response: Problem formulation and deterministic case”, *Control and Optimization Theory for Electric Smart Grids* A. Chakraborty, M.D. Ilic, Eds.: Springer, New York, vol.3, pp.63–85, 2012.
- [Chiu94] Chiu, S. L., “Fuzzy model identification based on cluster estimation”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 267-278, 1994.
- [Clement-Nyns10] Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J., “The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 371-380, February 2010.
- [Close02] Close, C. M., Frederick, D.K., Newell, J.C., “Modeling and analysis of dynamic systems”, 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc, 2002.
- [Collier10] Collier, S. E., “Ten Steps to a Smart Grid”, *IEEE Industry Applications Magazine*, 2010.

- [Conejo01] Conejo, A. J., Galiana, F. D., Kockar, I., “Z-Bus Loss Allocation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 1, pp.105-110, February 2001.
- [Darbur12] Darbur, P., Singh, G., Yadav, N.K., “Electricity demand side management: various concepts and prospects”, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-6, April 2012.
- [Dave13] Dave, S., Sooriyabandara, M., Yearworth, M., “System behaviour modelling for demand response provision in a smart grid”, *Energy Policy*, Vol. 61, pp. 172-181, October 2013.
- [Davis10] Davis, S., “Grid looks to smart solutions”, *Engineering and Technology*, Vol. 5, Issue 7, pp. 49-51, 2010.
- [DecretoLei13] Decreto-Lei n.º 25/2013, Diário da República, 1.ª série No, 35, Lisboa, *Ministério da Economia e do Emprego*, Portugal, 19 de fevereiro de 2013.
- [del Real14] del Real, A. J., Arce, A., Bordons, C., “Combined environmental and economic dispatch of smart grids using distributed model predictive control”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.54, pp. 65–76, 2014.
- [Delgado85] Delgado, R.M., “Demand-side management alternatives”, *Proceedings of IEEE*, Vol. 73, No. 10, pp. 1471–1488, October 1985.
- [Depuru11] Depuru, S.S.S.R., Wang, R., Devabhaktuni, V., “Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status”, *Renew. Sustain. Energy Ver*, Vol. 15, pp. 2736–2742, 2011.

- [Dias10] Dias, A.J.F., “Telecontagem e Gestão de Energia em Casa—Conceito FunEnergy”, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [DGGE04] Direção geral de geologia e energia, *Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencial*, DGGE/IP-3E, Lisboa, 2004
- [DOE14] Department of Energy, USA. (http://www.smartgrid.gov/recovery_act/deployment_status/time_based_rate_programs) (acedido 2014.01.28).
- [EDP09] InovGrid-EDP Distribuição, www.edpdistribuicao.pt, Copyright 2009.
(<http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/RedesInteligentes.aspx>) (acedido 2014.01.16).
- [EDP13] Energias de Portugal, SA, Dados ibéricos 2013, Direção de Planeamento Energético (<http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/Pages/DadosIbericos.aspx>) (acedido 2014.08.04).
- [EDP14] Energias de Portugal, SA, Microgeração. (<https://energia.edp.pt/Particulares/microgeracao>) (acedido 2014.05.05).
- [EIOC14] Electricity Infrastructures Operation Center, Pacific Northwest National Laboratory (<http://www.eioc.pnnl.gov/research/gridstability.stm>) (acedido 2014-10-11)
- [EP08] Electric Powertrains. *MIT Electric Vehicle Team*, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts,

2008. (http://web.mit.edu/evt/summary_powertrains.pdf)
(acedido 2014.01.30).
- [ERSE12] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Integração da produção em regime especial no MIBEL e na operação dos respetivos sistemas elétricos, propostas de harmonização regulatória, Conselho de reguladores do MIBEL 2012 (http://www.erse.pt/pt/consultaspublicas/consultas/documents/38_3/mibel_pre_pt.pdf) (Acedido 2014.08.04).
- [ERSE12a] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Simulador de potência a contratar, 2012 (<http://www.erse.pt/pt/electricidade/simuladores/simuladordepotenciaacontratar/Documents/ERSEkw.html>) (Acedido 2012.08.20).
- [ERSE13] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Direção geral de energia e geologia, Relatório de Monitorização da Segurança de Abastecimento do Sistema Elétrico Nacional 2013 - 2030, 2013 (http://www.erse.pt/pt/consultaspublicas/consultas/documents/46_1/rmsa-e%202012.pdf) (Acedido 2014.08.04).
- [ERSE14a] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Ambiente, Produção em Regime Especial e Produção em Regime Ordinário (<http://www.erse.pt/pt/desempenhoambiental/prodregesp/Paginas/default.aspx>) (acedido 2014.08.03).
- [ERSE14b] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Liberalização do mercado elétrico-Mudança de comercializador

- (http://www.erse.pt/pt/electricidade/liberalizacaodosector/informacaosobreomercadoliberalizado/2014/Comunicados/201406_ML_elec_ResInf.pdf) (acedido 2014.08.05).
- [ERSE14c] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Comercializadores em regime de mercado (<http://www.erse.pt/pt/electricidade/agentesdosector/comercializadores/Paginas/default.aspx>) (acedido 2014.08.05).
- [ERSE14d] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Eletricidade, Perdas na rede de transporte (<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/transporte/Paginas/RNT-Perdas.aspx>) (acedido 2014.08.05).
- [ERSE14e] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Eletricidade, Perdas na rede de distribuição (<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/RND-Perdas.aspx>) (acedido 2014.08.05).
- [ERSE14f] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Eletricidade, Ciclo horário (http://www.erse.pt/consumidor/electricidade/querosercliente/tenholigacaoarede/Documents/Documento_CiclosHor%C3%A1rios_Electricidade.pdf) (acedido 2014.07.20).
- [Fagundes13] Fagundes, A., *Gestão do deslastre de cargas – Évora como caso de estudo*, Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Maio 2013.
- [Farhangi10] Farhangi, H., “The path of smart grid”, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 8, No.1, pp.18-20, January-February 2010.
- [Faruqui10] Faruqui, A., Harris, D. Hledik, R., “Unlocking the €53 billion savings from contadores inteligentes in the EU:

- How increasing the adoption of dynamic tariffs could make or break the EU's smart grid investment", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 10, pp. 6222-6231, October 2010.
- [Ferreira12] Ferreira, J." Demand Side Management", *Ingenium*, pp. 1–16, 15 Agosto 2012.
- [Figueiredo08] Figueiredo, J., Sá da Costa, J., "Operative platform applied to building automation", *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, Vol. 24, pp. 26–40, 2008.
- [Figueiredo10] Figueiredo, J., Martins, J., "Energy production system management—renewable energy power supply integration with building automation system", *Energy Convers. Manag.*, Vol. 45, pp. 1120–1126, 2010.
- [Figueiredo12] Figueiredo, J., Sá da Costa, J., "A SCADA system for energy management in intelligent buildings", *Energy Build.*, Vol.49, pp. 85–98, 2012.
- [Fletcher87] Fletcher, R. "Practical Methods of Optimization", 2nd ed., Wiley, 1987.
- [Gangale13] Gangale, F., Mengolini, A., Onyeji, I., "Consumer engagement: an insight from smart grid projects in Europe". *Energy Policy* , Vol. 60, pp. 621-628, 2013.
- [Geelen13] Geelen, D., Reinders, A., Keyson, D., "Empowering the end-user in smart grids: Recommendations for the design of products and services", *Energy Policy*, Vol. 61, pp. 151–161, 2013.
- [Gertz12] Gertz, E., Di Justo, P., "Environmental monitoring with arduino", Marker Press, ISBN 978-1-444-31056-1, 2012.
- [Ghumre15] Ghumre, P., "Automation intelligence", Schneider Electric India Private Limited, Issue 6, 2015
- [Gilbraith13] Gilbraith, N., Powers, S. E., "Residential demand response reduces air pollutant emissions on peak

- electricity demand days in New York City”, *Energy Policy*, Vol. 59, pp. 459-469, August 2013.
- [Goel06] Goel, L., Wu, Q. ; Wang, P., “Reliability enhancement of a deregulated power system considering demand response”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-6, Montreal, 2006.
- [Gokmen12] Gokmen, N., Karatepe, E., Celik, B., Silvestre, S., "Simple diagnostic approach for determining of faulted PV modules in string based PV arrays", *Solar Energy*, Vol. 86, No.11, pp. 3364–3377, 2012.
- [Gribik90] Gribik, P. R., Shirmohammadi, D., Hao, S., Thomas, C. L., “Optimal Power Flow Sensitivity Analysis”, *IEEE/PES WinterMeeting*, pp. 969-976, Atlanta, Georgia, February 1990.
- [Güngör11] Güngör, V.C., Sahin, D., Kocak, T., Ergüt, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G.P., “Smart grid technologies: Communication technologies and standards”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, Vol. 7, No. 4, pp. 529–539, 2011.
- [Gyamfi12] Gyamfi, S., Krumdieck, S., “Scenario analysis of residential demand response at network peak periods”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 93, pp. 32-38, December 2012.
- [Hammouda00] Hammouda, K., Karray, F., “A comparative study of data clustering techniques”, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2000. (<http://www.pami.uwaterloo.ca/pub/hammouda/sde625-paper.pdf>) (acedido 2014.01.29).
- [Han08] Han, J., Piette, M.A., “Solutions for summer electric power shortages: demand response and its applications in

- air conditioning and refrigeration systems”, *Journal Refrigeration, Air Conditioning & Electric Power Machinery*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-4, 2008.
- [Haney10] Haney, A. Brophy, Jamasb, T., Platchkov, L.M., Pollitt, M.G., ”Demand-side Management Strategies and the Residential Sector: Lessons from International Experience”, *University of Cambridge*, Electricity Policy Research Group, November 2010.
- [Hazra12] Hazra, J., Reddi R. K., Das, K., Seetharam, D.P., “Power Grid Transient Stability Prediction Using Wide Area Synchrophasor Measurements”, *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, pp. 1-8, Berlin, Germany, October 2012.
- [Henriques09] Henriques, E., “Plataforma interativa para edificios inteligentes com controlo preditivo”, Tese de mestrado, Universidade de Évora, Outubro 2009.
- [HT15] Hobby Electronics, (<http://www.hobbytronics.co.uk>) (acedido 2015.04.30)
- [IEA11] International Energy Agency, “Technologic Roadmap - smartgrids”, 2011.
- [IEC10] Norma IEC-61851-1, Electric vehicle conductive charging system, 2010.
- [Indian12] Indian ETD Repository, (<http://shodhganga.inflibnet.ac.in>) (acedido 2012.08.15).
- [InovGrid10] Projecto InovGrid, Apresentação do projeto à Universidade de Évora, EDP Distribuição, 29 Março 2010.

- [Ito08] Ito K., Kunisch, K., "Lagrange Multiplier Approach to Variational Problems and Applications", Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008.
- [Jahn07] Jahn, J., "Introduction to the theory of nonlinear optimization", 3rd ed. Berlin, Springer, 2007.
- [Lazzerini14] Lazzerini, B., Pistoiesi, F., "Neural network-based objectives prioritization for multi-objective economic dispatch in microgrids", *Proc. IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 665-671, Tokyo, 2014.
- [Nesterov94] Nesterov, J., "A. Nemirovsky, Interior Point Polynomial Methods in Convex Programming: Theory and Applications", SIAM, Philadelphia, 1994.
- [Kanjiya13] Kanjiya, P., Khadkikar, V., "Enhancing Power Quality and Stability of Future Smart Grid with Intermittent Renewable Energy Sources Using Electric Springs", *Proc. International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2013)*, pp. 918-922, Madrid, Spain, October 2013.
- [Kellerer14] Kellerer, E., Steinke, F., "Scalable Economic Dispatch for Smart Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PP No.99, pp. 1-8, 2014.
- [Kirschen97] Kirschen, D., Allan, R., Strbac, G., "Contributions of Individual Generators to Load and Flows", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 52-60, February 1997.
- [Kolokotsa09] Kolokotsa, D., Pouliezios, A., Stavrakakis, G., Lazos, C., "Predictive control techniques for energy and indoor

- environmental quality management in buildings”, *Build. Environ.*, Vol. 44, pp. 1850–1863, 2009.
- [Krishnamurti12] Krishnamurti, T., Schwartz, D., Davis, A., Fischhoff, B., Bruin, W.B., Lave, L., Wang, J., “Preparing for smart grid technologies: A behavioural decision research approach to understanding consumer expectations about smart meters”, *Energy Policy*, Vol. 41, pp. 790–797, 2012.
- [Kumar11] Kumar, R., “Assuring Voltage Stability in the Smart Grid”, *Proc. IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp.1-4, Anaheim, California, USA, January 2011
- [Kwakernaak72] H. Kwakernaak, “Linear Optimal Control Systems”, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 1972.
- [Lampropoulos10] Lampropoulos, I., Vanalme, G. M. A., Kling W. L., “A methodology for modeling the behavior of electricity prosumers within the smart grid”, *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, (ISGT) Europe*, pp. 1-8, Gothenburg, Sweden, October 2010.
- [Lo11] Lo, C.H., Ansari, N., “The Progressive Smart Grid System from Both Power and Communications Aspects”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol 14, No. 3, pp. 799-821, 2011.
- [Lopes09] Lopes, J., Soares, F., Almeida, P., “Identifying management procedures to deal with connection of Electric Vehicles in the grid”, *Proc. IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1-8, Bucharest, 2009.

- [Lourenço10] Lourenço, M.I.D., “O sector da eletricidade em Portugal – O papel da EDP Soluções Comerciais”, Mestrado em Economia Industrial – Relatório de Estágio, Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, Abril 2010.
- [MacDonald09] MacDonald, R. A., Ault, G. W., McDonald, J. R., ”A novel approach to the optimal planning of flexible active distribution networks”, *Proc. IEEE 44th International universities power engineering conference -UPEC*, pp. 1-5, Glasgow, United Kingdom, September 2009.
- [Maciejowski02] Maciejowski, J., “Predictive Control with Constrains”, second ed. Prentice-Hall., 2002.
- [Mah13] Mah, D. N., Wu, Y. J., Ip, C., Hills, P.R., “The role of the state in sustainable energy transitions: a case study of large smart grid demonstration projects in Japan”. *Energy Policy* Vol. 63, pp. 726-737, 2013.
- [Malik11] Malik , O., Havel , P., ”Analysing demand-side management potential: Situation in Europe and the Czech Republic”, *Proc. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp.1-4, May 2011.
- [Masoum10] Masoum, A.S., Deilami, S., Moses, P.S., Abu-Siada, A., “Impacts of battery charging rates of Plug-in Electric Vehicle on smart grid distribution systems”. *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, pp. 1-8, Gothenburg, 2010.
- [Mathworks08] The MathWorks, Matlab 7.6.0.324 (R2008a), The MathWorks Inc., 2008.
- [Melício10] Melício, R., Modelos dinâmicos de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede eléctrica, Tese de

- Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Janeiro 2010.
- [Melvin14] Melvin, H., “The role of ICT in evolving smartgrids”, 10th *IEEE International Conference on Digital Technologies*, pp. 235–237, Slovakia, 2014.
- [Moghaddam11] Moghaddam, M.P., Abdollahi, A., Rashidinejad, M., “Flexible demand response programs modeling in competitive electricity markets”, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 9, pp. 3257-3269, September 2011.
- [Momoh12] Momoh, J., “Smart grid: Fundamentals of design and analysis”, Mohamed E. El-Hawary, Ed.: IEEE Press, Wiley, 2012, pp. 1-232.
- [Neumann07] Neumann, P., “Communication on industrial automation—What is going on?”, *Control Eng. Pract.*, Vol.15, No.11, pp. 1332–1347, 2007.
- [OPC15] OPC Foundation, (<https://opcfoundation.org/>) (Acedido 2015.04.26)
- [Parnphumeesup11] Parnphumeesup, P., Kerr, S., “Classifying carbon credit buyers according to their attitudes towards and involvement in CDM sustainability labels”, *Energy Policy*, Vol. 39, No. 10, pp. 6271-6279, October 2011.
- [PER14] Portal das energias renováveis, Geotérmica, Estado em Portugal, atualidade
(http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=19&ID_area=4&ID_sub_area=11)
(Acedido 2014.08.03).

- [Pereira13] Pereira, R., Fagundes, A., Melício, R., Mendes, V.M.F., Figueiredo, J., Martins, J., Quadrado, J.C., “Demand response analysis in smart grids resorting to fuzzy clustering model”, *Technological innovation for the internet of things*, Camarinha-Matos, L.M., Tomic, S., Graça, P, Ed.: Springer, Heidelberg, 2013, pp. 403-412.
- [Pereira15a] Pereira, R., Figueiredo, Melício, R., Mendes, V.M.F., J., Martins, J., Quadrado, J.C., “Consumer energy management system with integration of smart meters”, *Energy Reports*, Vol.1, pp.22-29, 2015.
- [Pereira15b] R. Pereira, D. Pereira, J. Figueiredo, J.C. Quadrado, J. Martins, R. Melício, V.M.F. Mendes, “Prosumers as smart grid stakeholders - modeling and case study analysis”, (*submetido*)
- [Pereira15c] R. Pereira, R. Melício, V.M.F. Mendes, A. Fagundes, J. Figueiredo, J. Martins, J.C. Quadrado, “Fuzzy clustering demand response model under smart grid scope”, (*submetido*).
- [Phuangpornpitak13] Phuangpornpitak, N., Tia, S., “Opportunities and Challenges of Integrating Renewable Energy in Smart Grid System”, *Energy Procedia*, Vol. 34, pp. 282-290, 2013.
- [Power08] Power Systems design – Basis for efficient Smart grid Initiatives, *Abstract of CIRED Seminar: SmartGrids for Distribution*, IEEE, 2008.
- [Pryono05] Priyono, M., Ridwan, A. J.. Alias, A.O.K.. Rahmat, A., Hassan, M.A.M. Ali, “Generation of fuzzy rules with

- subtractive clustering”, *Jurnal Teknologi*, Vol. 43(D), pp. 143-153, 2005
([http://eprints.utm.my/1460/1/JTDIS43D\[10\]new.pdf](http://eprints.utm.my/1460/1/JTDIS43D[10]new.pdf))
(acedido 2014.01.29).
- [Ramani10] Ramani, A., Baharin, K.A., “Transmission Losses Allocation in Deregulation Electricity Market”, *Proc. IEEE International Conference on Power and Energy*, pp.841-845, Kuala Lumpur, Nov.-Dec. 2010.
- [Ramenzani05] Ramezani, M., Falaghi, H., Haghifam, M., Shahryari, G.A., "Short-Term Electric Load Forecasting Using Neural Networks", *The International Conference on Computer as a Tool, EUROCON*, pp.1525-1528, Belgrade, November 2005.
- [Rastegar12] Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M. F., Aminifar, “Load commitment in a smart home”, *Applied Energy* Vol. 96, pp 45-54, August 2012.
- [Rathnayaka14] Rathnayaka, A.J.D., Potdar, V.M., Dillon, T.S., Hussain, O.K., Chang, E., "A Methodology to Find Influential Prosumers in Prosumer Community Groups", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10. No. 1, 2014, pp. 706-713.
- [REN14] Redes Energéticas Nacionais, o Setor Elétrico (http://www.ren.pt/o_que_fazemos/eletricidade/o_setor_eletrico/) (acedido 2014.08.03)
- [Rollo96] Rollo, M.F., Brito, J.M.B, “Ferreira Dias e a constituição da companhia nacional de eletricidade”, *Análise social*, Vol. XXXI (130-137), 1996 (2.º-3.º), pp. 343-354, 1996.

- [Rollo05] Rollo, M. F., “Hulla branca: uma história de triunfos, impasses e de renovados desafios”, *Revista Ingenium* N.º 88, Julho/Agosto 2005. (<http://www.ordemengenheiros.pt/pt/centro-de-informacao/dossiers/historias-da-engenharia/hulha-branca-uma-historia-de-triunfos-impasses-e-de-renovados-desafios/>) (acedido 2014.01.16).
- [Saboori11] Saboori, H., Mohammadi, M., Taghe, R., “Virtual power plant (VPP), definition, concept, componentes and types”, *Proc. IEEE Power and energy Engineering Conference (APPEC)*, pp. 1-4, Wuhan, China, March 2011.
- [Sandels10] Sandels, C., Franke, U., Ingvar, N., Nordstrom, L., “Vehicle to Grid State of the Art System Design - Plug In Hybrid Electric Vehicles as source of power for the control markets in Sweden and Germany”, *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, (ISGT)*, pp.1-8, Gothenburg, Sweden, 2010.
- [Santos05] Santos, R., Normey-Rico, J., Gomez, A., Arconada, L., Moraga, C., “OPC based distributed real time simulation of complex continuous processes”, *Simul. Model. Pract. Theory*, Vol. 13, pp. 525–549, 2005.
- [Santos12] Santos, V., “A regulação do setor energético”, *Seminário internacional Portugal-Brasil*, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Portugal, Fevereiro 2012.
- [Setlhaolo14] Setlhaolo, D., Xia, X., Zhang, J., “Optimal scheduling of household appliances for demand response”, *Electric. Power Systems Research*. Vol. 116, pp 24-28, November 2014.

- [Siemens01] Simatic S7-300 – Ladder Logic (LAD) for S7-300.
- [Siemens06] Communication with SIMATIC, System Manual.
- [Siemens08] Simatic WinCC V7.0; Simatic Net OPC Scout V10.
- [Silva08] Silva, A., “Sistema de conversão de energia solar fotovoltaica”, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [SGIC] Smart grid information clearinghouse, smart grids projects (<http://www.sgiclearinghouse.org/ProjectList>) (acedido 2014.08.05)
- [SGP14] Smart grid portal, projects (<https://portal.smartgridsprojects.eu/projects/Pages/default.aspx>) (acedido 2014.08.05).
- [Shi11] Shi, Y., Xiong, J., “Contingency constrained economic dispatch in smart grids with correlated demands”, *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 333-338, Brussels, 2011.
- [Shi14] Shi, W., Li, N., Xie, X., Chu, C., Gadh, R., “Optimal Residential Demand Response in Distribution Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in communications*, Vol. 32, No. 7, pp. 1441-1450, July 2014.
- [Shirmohammadi91] Shirmohammadi, D., Thomas, C. L., “Valuation of the Transmission Impact in a Resource Bidding Process”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No.1, pp.316-323, February 1991.
- [Siano14] Siano, P., “Demand response and smart grids—A survey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp. 461-468, February 2014.

- [Silva07] Silva, P., Botto, M., Figueiredo, J., Rijo, M., “Model predictive control of an experimental water canal”, *IFAC/IEEE European Control Conference, ECC’07*, pp. 2977–2984, Greece, 2007.
- [Simões12] Simões, M.G., Roche, R., Kyriakides, E., Suryanarayanan, S., Blunier, B., McBee, K.D., Nguyen, P.H., Ribeiro, P.F., Miraoui, A., “A comparison of smart grid technologies and progresses in Europe and the U.S”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 48, No.5, pp. 1154–1162, 2012.
- [Siroky11] Siroky, J., Oldewurtel, F., Cigler, J., Privara, S., “Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system”, *Appl. Energy*, Vol. 88, pp. 3079–3087, 2011.
- [Smartgrids10] *Vision and strategy for Europe’s electricity networks of the future*, www.smartgrids.eu, Copyright 2012.
- [Smartgridnews13] Smart grids news, Projects: Demos & Pilots, www.smartgridnews.com, Copyright 2013. (http://www.smartgridnews.com/artman/publish/Projects_Demo_Pilots/) (acedido 2014.01.16).
- [Song14] Song, M., Alvehaga, K., Widénb, J., Parisio, A., “Estimating the impacts of demand response by simulating household behaviours under price and CO2 signals”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 111, pp. 103-114., June 2014.
- [Stromback10] Stromback, J., “The Development of Demand Response in Europe”, *Proc. Smart Grid Technology Conference*, San Diego, June 2010.

- [Sun13] Sun, Q., Beach, A., Cotterell, M. E., Wu, Z., Grijalva, S. "An Economic Model for Distributed Energy Prosumers", *Proc. 46th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 2103-2112, Wailea, 2013.
- [Takagi85] Takagi, T., Sugeno, M., "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Transactions on Man and Cybernetics Systems*, Vol. SMC15, pp. 116 -132, 1985.
- [Torriti10] Torriti, J., Hassan, M. G., Leach M., "Demand response experience in Europe: policies, programmes and implementation", *Energy*, Vol. 35, No. 4, pp. 1575-1583, April 2010.
- [Turker10] Turker, H., Bacha, S., Chatroux, D. "Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) on the French electric grid", *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT)*, pp. 1-8, 2010.
- [Usman13] Usman, A., Shami, S.H., "Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.19, pp. 191–199, 2013.
- [Vale10] Vale, Z.A., Morais, H.; Khodr, H.; Canizes, B. ; Soares, J.. "Technical and economic resources management in smart grids using heuristic optimization methods", *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, Minneapolis, 2010.
- [Vale13] Vale, Z., Morais, H., Faria, P., Ramos, C., "Distribution system operation supported by contextual energy resource

- management based on intelligent SCADA”, *Renewable Energy*, Vol. 52, pp. 143-153, 2013.
- [Venkatesan12] Venkatesan, N., Solanki, J., Khushalani, S., “Residential Demand Response model and impact on voltage profile and losses of an electric distribution network”, *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 84–91, 2012.
- [Vijayapriya11] Vijayapriya, T., Kothari, D.P., “Smart Grid: An Overview”, *Smart Grid Renew. Energy*, Vol. 2, pp. 305–311, 2011.
- [Vukmirovic10] Vukmirovic, S., Erdeljan, A., Kulic, F., “A Smart Metering Architecture as a step towards Smart Grid realization”, *Proc. IEEE International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon)*, pp.357-362, Manama, December 2010.
- [Walker14] G. Walker, “The dynamics of energy demand: Change, rhythm and synchronicity”, *Energy Research & Social Science*, Vol.1, pp.49-55, April 2014.
- [Wang10] Wang, J., Kennedy, S., Kirtley, J., “Optimization of Time-Based Rates in forward energy markets”, *Proc. IEEE International Conference on the European Energy Market*, pp. 1-7, Madrid, 2010.
- [Wang10a] Wang, K., “Comparison of four kinds of fuzzy C-means clustering methods”, *Proc. IEEE Third International Symposium on Information Processing*, pp. 563-566, Qingdao, Shandong, 2010.
- [Wei09] Wei, X., Yu-hui, Z., Jie-lin, Z., “Energy-efficient Distribution in Smart Grid”, *Proc. IEEE International*

- Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pp.1-6, Najing, China, April 2009.
- [Wilamowski11] Wilamowski, B. M., Irwin, J. D., “The industrial electronics handbook – Industrial communication systems”, CRC Press, 2011.
- [Xin-Wei10] Xin-Wei, D., Qiang, Y., “Review of smart grid and its development prospect in Sichuan”, *Proc. IEEE Power and energy Engineering conference - APPEEC*, pp. 1-4, Chengdu, Popular Republic of China, March 2010.
- [Xu11] Xu, F.Y., Lai, L. L., "Scope design, characteristics and functionalities of Smart Grid", *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp.1-5, San Diego, California, USA, July 2011.
- [Yager94] Yager, R. R., Filev, D. P., "Approximate clustering via the mountain method", *IEEE Transactions On Man And Cybernetics Systems*, Vol. 24, No. 8, pp.1279–1284, 1994.
- [Yan13] Yan, J., Zhu, Y., He, H., Sun, Y., “Multi-contingency cascading analysis of smart grid based on self-organizing map”, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, Vol. 8, No. 4, pp. 646-656, April 2013.
- [Yang05] Yang, J., Rivard, H., Zmeureanu, R., “On-line building energy prediction using adaptive artificial neural networks”, *Energy Build*, Vol. 37, No.12, pp.1250–1259, 2005.
- [Yu11] Yu, X., Cecati, C., Dillon, T. Simões M.G. “The new frontier of smart grids – An industrial perspective”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 49-63, September 2011.

- [Zakariazadeh14] Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano, P., “Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: a multiobjective mathematical programming approach”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 151-164, February 2014.
- [Zhu03] Zhu, J. Z., Hwang, D., Sadjadpour, A., “Loss Sensitivity Calculation and Analysis”, *Proc. Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2, pp. 962-967, Bellevue, USA, July 2003.

Anexos

Anexo 2 – Previsão de produção e de consumo

2.1. Determinação do número de neurónios na camada escondida da RNA para previsão da radiação

Tabela 1 – Resultados dos ensaios com dados anuais da radiação para o cálculo do número de neurónios da camada escondida da RNA de janeiro

Número de treinos	Número de neurónios da camada escondida											
	35		37		39		41		43		45	
	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana
1	6785	6841	6560	7047	6625	6625	6634	6707	6797	6807	6657	6693
2	6406		7148		6696		6321		6681			
3	6231		7383		6478		6707		6183			
4	7271		6879		6588		7174		7308			
5	6841		7079		6520		7580		7430			
6	6985		6473		6447		6572		6807			
7	6846		6919		6787		7296		7476			
8	7574		7263		6670		6272		7058			
9	6957		7246		6827		6083		6725			
10	6334		6841		6693		6907		7256			
11	6321		7047		6475		6960		6282		7387	

Tabela 2 – Resultados dos ensaios com dados anuais da radiação para o cálculo do número de neurónios da camada escondida da RNA de julho

Número de treinos	Número de neurónios da camada escondida											
	35		37		39		41		43		45	
	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana
1	6848	6795	7340	6825	6629	6878	7652	6889	6778	6778	6741	6890
2	7080		7116		6672		7560		7502			
3	6469		6858		7266		6577		6260			
4	6795		6798		6878		6776		7203			
5	6344		6825		7508		6261		6263			
6	6789		6515		6937		7741		6797			
7	7449		6870		6627		6889		6868			
8	6818		6175		7445		7100		6170			
9	6650		6453		6155		7406		6735			
10	7079		6830		5993		6825		6741			
11	6415		6762		7106		6883		6781		6903	

2.2 Resultado da RNA para previsão da radiação de julho

Tabela 1 – Resultado da previsão da radiação da RNA de Julho

Previsão com dados anuais com todas as horas				
Horas	Radiação a prever t+24	Resultado da RNA para t+24	Erro (MSE)	Erro (MAPE)
06:00	15,0	62,39	2245,57	3,159
07:00	113,0	126,74	188,92	0,122
08:00	283,0	283,26	0,07	0,001
09:00	467,0	506,92	1593,70	0,085
10:00	631,0	744,46	12874,13	0,180
11:00	758,0	884,66	16042,15	0,167
12:00	836,0	964,44	16495,72	0,154
13:00	863,0	856,43	43,11	0,008
14:00	833,0	739,26	8788,03	0,113
15:00	755,0	616,90	19072,04	0,183
16:00	620,0	432,18	35277,98	0,303
17:00	460,0	341,42	14060,28	0,258
18:00	286,0	259,31	712,11	0,093
19:00	97,0	60,11	1361,21	0,380
20:00	16,0	-8,97	623,70	1,561

2.3 Resultado da RNA para previsão da radiação de janeiro

Tabela 1 – Resultado da previsão da radiação da RNA de Janeiro

Previsão com dados anuais com todas as horas				
Horas	Radiação a prever t+24	Resultado da RNA para t+24	Erro (MSE)	Erro (MAPE)
08:00	3,00	1,85	1,32	0,383
09:00	63,00	65,77	7,65	0,044
10:00	213,00	154,00	3481,10	0,277
11:00	357,00	329,21	772,11	0,078
12:00	448,00	398,81	2419,48	0,110
13:00	486,00	391,38	8953,26	0,195
14:00	467,00	385,54	6636,16	0,174
15:00	344,00	281,97	3847,90	0,180
16:00	240,00	234,15	34,18	0,024
17:00	117,00	87,25	884,84	0,254
18:00	13,00	4,22	77,13	0,676

2.4 Determinação do número de neurónios na camada escondida da RNA para previsão de consumo

Tabela 1 – Resultados dos ensaios com dados anuais da radiação para o cálculo do número de neurónios da camada escondida

Número de treinos	Número de neurónios da camada escondida											
	43		45		47		49		51		53	
	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana	Validation MSE	Mediana
1	3,44500	2,58000	5,67400	0,96720	9,58100	1,93300	2,14900	0,75210	1,28700	1,58800	1,79600	1,79600
2	2,85100		0,56480		6,78300		7,97800		2,92400		4,02100	
3	1,87300		0,52890		1,21800		0,30040		1,27100		2,25100	
4	1,38200		5,45400		1,93300		0,20090		0,23480		6,19600	
5	7,16900		0,74410		4,92200		0,74670		4,83600		6,98700	
6	0,48520		2,16200		1,46900		0,75210		2,46000		0,58260	
7	2,58000		6,05500		1,17400		0,94880		0,47790		4,14200	
8	6,48400		0,96720		1,23000		1,47400		1,64300		1,42400	
9	6,19100		0,44240		0,59890		9,68700		6,86900		0,47580	
10	1,52300		0,33500		1,95900		0,40640		1,58800		0,81370	
11	1,20500		3,33700		6,53900		0,51130		1,48800		0,38100	

2.5 Resultado da RNA para previsão de consumo de julho

Tabela 1 – Exemplo da previsão para um dia de Julho

Horas	Consumo a prever $t+24$	Resultado da rede para $t+24$
00:00	1,49	1,07
01:00	1,33	0,94
02:00	1,18	1,13
03:00	1,01	1,36
04:00	1,00	1,49
05:00	1,28	1,81
06:00	1,68	2,09
07:00	2,03	2,33
08:00	2,30	2,37
09:00	2,50	2,44
10:00	2,56	2,53
11:00	2,52	2,58
12:00	2,35	2,60
13:00	2,24	2,45
14:00	2,23	2,23
15:00	2,31	2,00
16:00	2,46	2,20
17:00	2,54	2,75
18:00	2,74	3,04
19:00	1,05	3,56
20:00	2,83	3,49
21:00	2,51	3,31
22:00	2,08	2,86
23:00	1,63	2,24

2.6 Resultado da RNA para previsão de consumo de janeiro

Tabela 1– Resultado da previsão do consumo da RNA de janeiro

Dados anuais com temperatura e valores reais				
Horas	Consumo a prever t+24	Resultado da rede para t+24	Erro (MSE)	Erro (MAPE)
00:00	1,79	1,64	0,022	0,082
01:00	1,43	1,35	0,006	0,055
02:00	1,23	1,19	0,002	0,034
03:00	1,12	1,10	0,000	0,017
04:00	1,12	1,02	0,009	0,085
05:00	1,12	1,21	0,008	0,079
06:00	1,31	1,33	0,000	0,012
07:00	1,67	1,55	0,014	0,072
08:00	2,01	1,83	0,032	0,090
09:00	2,26	2,11	0,022	0,066
10:00	2,29	2,25	0,001	0,015
11:00	2,27	2,38	0,013	0,049
12:00	2,25	2,34	0,008	0,039
13:00	2,22	2,36	0,019	0,061
14:00	2,09	2,29	0,037	0,092
15:00	2,08	2,63	0,307	0,267
16:00	2,35	2,68	0,107	0,139
17:00	3,12	3,09	0,001	0,009
18:00	3,66	2,93	0,537	0,200
19:00	3,63	3,14	0,236	0,134
20:00	3,52	3,23	0,083	0,082
21:00	3,11	2,96	0,023	0,049
22:00	2,71	2,56	0,023	0,056
23:00	2,30	2,13	0,031	0,076

Anexo 3 – Modelo de demand response

3.1. Conjunto de dados para o controlo *fuzzy* do modo asseio, no perfil económico

Tabela A3.1 – Sequência de cargas controláveis e respetiva potência de consumo em kW

Situação	Pot. disponível	Nível de Preço	Utilização pretendida de CC					Utilização possível de CC				
			Máq. loiça	Máq. roupa	Máq. secar	AC	Termov.	Máq. loiça	Maq. roupa	Máq. secar	AC	Termov.
1	6,4	1	2	2	3,5	1,8	2	2	2	0	0	0
2	6,4	1	0	2	3,5	1,8	2	0	2	3,5	0	0
3	6,4	1	0	0	3,5	1,8	2	0	0	3,5	1,8	0
4	6,4	1	0	0	0	1,8	2	0	0	0	1,8	2

- a) Na situação 1, a potência é disponibilizada para as máquinas de lavar loiça e roupa, não existindo potência disponível suficiente para as CC seguintes. No entanto na situação 2, uma vez que o consumidor prescinde da utilização da máquina de lavar loiça, referente à primeira prioridade, a potência passou a ser disponibilizada às CC seguintes da lista de prioridades, nomeadamente à máquina de lavar roupa e de secar.
- b) Na situação 1, existe potência disponível para a primeira e segunda CC prioritária, não existindo para a terceira, mas existe potência disponível suficiente para a quarta CC prioritária. Nesta situação a quarta CC prioritária apresenta o estado indisponível. Ou seja, as máquinas de lavar loiça e roupa estão ligadas, existindo um remanescente de 2,4 kW de potência disponível. Este valor é insuficiente para a utilização da máquina de secar, mas é suficiente para ligar o ar condicionado. Contudo o ar condicionado permanece indisponível por forma a garantir que a hierarquia de prioridades das CC é cumprida;

3.2 Mountain clustering

A técnica de *mountain clustering* descrita em [Yager94] consiste no estabelecimento de uma rede com n interseções, definidas de acordo com o conjunto de dados de treino, em que cada dado corresponde a um ponto de informação. Utilizando a função de montanha, é calculada a densidade dos pontos de informação em redor de cada interseção da rede. Como resultado deste cálculo é obtido o valor potencial de cada interseção ser um *cluster center*. A função de montanha é descrita pela equação dada por:

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (\text{A4.1})$$

Onde x_i é o i -enésimo ponto de informação, P_i é o seu potencial para ser *cluster center*, x_j é o j -enésimo ponto de informação vizinho de x_i e α corresponde à equação dada por:

$$\alpha = \frac{4}{r_a} \quad (\text{A4.2})$$

Onde r_a é uma constante positiva que representa o raio que define até que distância um ponto de informação é considerado vizinho.

Após o cálculo da densidade dos pontos de informação, o primeiro *cluster center* é definido centro correspondente à maior densidade de pontos calculada. Seguidamente esse ponto é eliminado e é avaliado um novo centro correspondente à maior densidade de pontos de informação existente, sendo repetido este processo até que todos os pontos de informação pertençam a uma *cluster*.

O tempo de computação associado a este método depende da quantidade de dados de entrada e da dimensão do problema, uma vez que quanto maior for a dimensão, é necessário avaliar mais redes e interseções. Como exemplo desta

situação é descrito em [Chiu94], um problema de *clustering* com 4 variáveis, em que cada rede teria, por exemplo, uma resolução de 10, o que equivale a uma rede com dimensão de 10 por 10. Assim é computacionalmente necessário avaliar 10^4 interseções possíveis de serem *cluster centers*.

O funcionamento desta técnica pode ser descrito em três passos:

1. É definido um conjunto de redes com uma determinada resolução, representado na Figura A4.1.

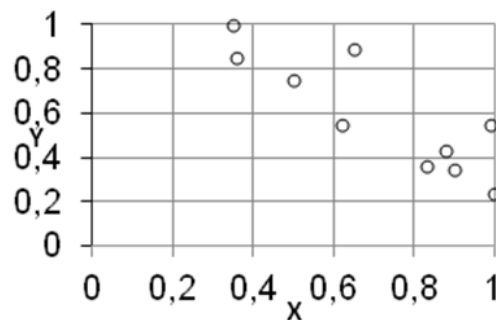


Figura A3.1 – Rede com a representação dos pontos de informação.

O número de redes é função do número de variáveis de entrada, representadas na Tabela A3.2. Onde k é o número de pontos de informação. Cada interseção em cada rede é candidata a ser *cluster center*;

Tabela A3.2 – Tabela com as coordenadas dos pontos de informação

k	x	y
1	0,36	0,85
2	0,65	0,89
3	0,62	0,55
4	0,50	0,75
5	0,35	1
6	0,90	0,35
7	1	0,24
8	0,99	0,55
9	0,83	0,36

2. São introduzidos os dados a agrupar e definida a equação da função de montanha (A3.2). Esta função permite avaliar a densidade de pontos para

cada *cluster center* possível. A avaliação resulta do cálculo da distância do ponto de informação ao *cluster center*, sendo atribuído ao ponto de informação um valor, que é tanto maior quanto maior for a sua proximidade ao *cluster center*;

3. Os *cluster center* são selecionados. O primeiro *cluster center* é atribuído ao *cluster* com maior densidade de pontos de informação. Seguidamente o efeito desse *cluster* é eliminado, sendo avaliado o próximo *cluster center* com maior densidade de pontos de informação, sendo este processo repetido até ao último *cluster*.

3.3. Código Matlab correspondente ao controlador *fuzzy subtractive clustering*

```
clc
clear

%importacao de dados para treino
inputdata =
xlsread('D:\ISEL\TESE\zMATLAB\Testes_Subtractive\Economico\Asseio\Dados_Economico_Asseio.xlsx');
i=1:1:210;

%alocação dos dados nas respetivas variaveis
%%Input
Loica=inputdata(i,2);
Roupa=inputdata(i,3);
Secar=inputdata(i,4);
AC=inputdata(i,5);
Termo=inputdata(i,6);
potencia=inputdata(i,7);
preco=inputdata(i,8);
train_input=[Loica Roupa Secar AC Termo potencia preco];

%%Output
Loicao=inputdata(i,10);
Roupao=inputdata(i,11);
Secaro=inputdata(i,12);
ACo=inputdata(i,13);
Termoo=inputdata(i,14);
train_output=[Loicao Roupao Secaro ACo Termoo];

%Geração das regras fuzzy através da técnica subtractive clustering
myfis=genfis2(train_input,train_output,1.5);
```

```
%Atribuir o nome de cada variável no toolbox fuzzy
myfis = setfis(myfis, 'input',1,'name','Loica');
myfis = setfis(myfis, 'input',2,'name','Roupa');
myfis = setfis(myfis, 'input',3,'name','Secar');
myfis = setfis(myfis, 'input',4,'name','AC');
myfis = setfis(myfis, 'input',5,'name','Termo');
myfis = setfis(myfis, 'input',6,'name','Potencia');
myfis = setfis(myfis, 'input',7,'name','Preco');
myfis = setfis(myfis, 'output',1,'name','Loicao');
myfis = setfis(myfis, 'output',2,'name','Roupao');
myfis = setfis(myfis, 'output',3,'name','Secaro');
myfis = setfis(myfis, 'output',4,'name','ACo');
myfis = setfis(myfis, 'output',5,'name','Termoo');

%Abrir a toolbox fuzzy com as configurações anteriores
fuzzy(myfis);
```

3.4 Modelos simulink[®] desenvolvidos para os modos de operação correspondentes

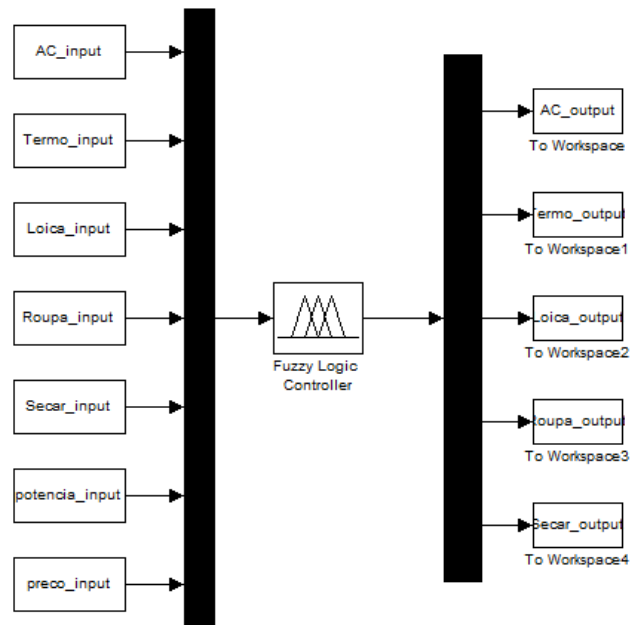


Figura A3.2 – Representação do modelo para o modo conforto.

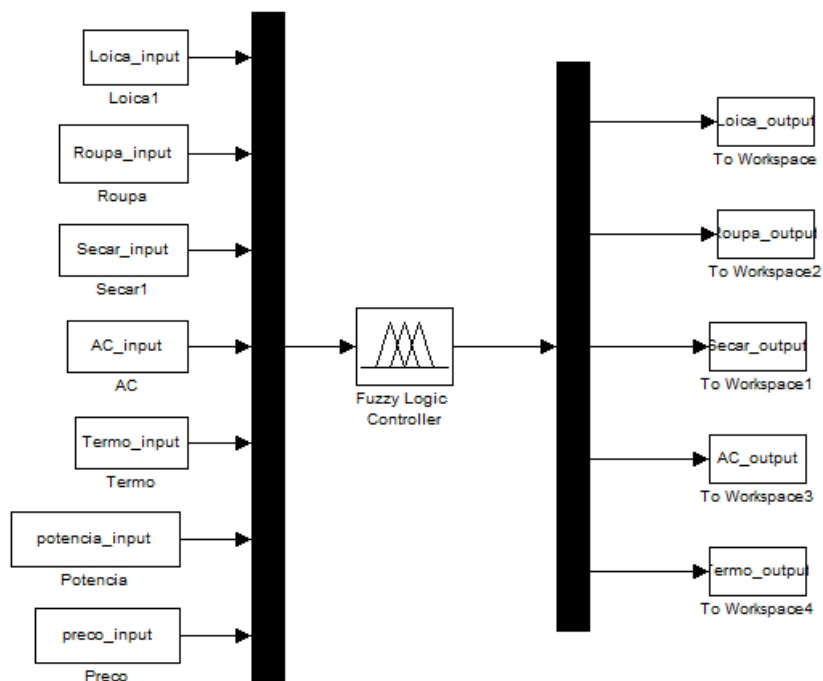


Figura A3.3 – Representação do modelo para o modo asseio.

3.5 Relatório resultante do simulador para o perfil de consumo moderado

Número	Máq. loiça	Máq. roupa	Máq. secar	AC	Termov.	Perfil	Modo
1	2000	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
2	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
3	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
4	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
5	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
6	Moderado: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
7	Moderado: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
8	Moderado: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
9	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
10	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
11	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
12	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
13	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
14	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
15	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
16	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
17	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
18	Moderado: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
19	Moderado: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
20	Moderado: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
21	0	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
22	0	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
23	2000	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
24	2000	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto

3.6. Código Matlab[®] parcial correspondente ao simulador de modelo de DR

```
%Ler dados do excel
[ndata, text, alldata]=xlsread('Cenario5\Cenario 5.xlsx');
i=1:1:24;
num=ndata(i,1);
potencia_in=ndata(i,5);
preco_in=ndata(i,6);
perfil=text(i,7);
modo=text(i,8);
input1=ndata(i,9);
input2=ndata(i,10);
input3=ndata(i,11);
input4=ndata(i,12);
input5=ndata(i,13);
```

```

%Condições e simulação do controlo
w=1;

Loica=2000;
Roupa=2000;
Secar=3500;
AC=1800;
Termo=2000;

file=fopen('Cenario5\Resultado_Cenario 5.txt','wt');
while(w<=nhoras)
    if(potencia_in(w)<=1800)
        if(w==1)
            fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t AC\t
Termo\t Perfil\t Modo\n');
            end
            fprintf(file,'%4.0f,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t Não existe
potencia disponível para cargas controlaveis\n',w);
            display('SIMULOU')
        else
            PF=strcmp(perfil(w),'Economico');
            if(PF==1)
                if(preco_in(w)==1)
                    TF=strcmp(modo(w),'Asseio');
                    if (TF==1)
                        if (input1(w)==1)
                            Loica_input=2000;
                        else
                            Loica_input=0;
                        end
                        if (input2==1)
                            Roupa_input=2000;
                        else
                            Roupa_input=0;
                        end
                        if (input3==1)
                            Secar_input=3500;
                        else
                            Secar_input=0;
                        end
                        if (input4==1)
                            AC_input=1800;
                        else
                            AC_input=0;
                        end

                        if (input5==1)
                            Termo_input=2000;
                        else
                            Termo_input=0;
                        end
                    potencia_input=potencia_in(w);
                    preco_input=preco_in(w);

                    controlof=readfis('Economico_Asseio_7_1_5');
                    sim('Economico_Asseio');

                    if(Loica_output(1)<(Loica/2))

```

```

        Loica_output(1)=0;
    else
        Loica_output(1)=Loica;
    end
    if(Roupa_output(1)<(Roupa/2))
        Roupa_output(1)=0;
    else
        Roupa_output(1)=Roupa;
    end
    if(Secar_output(1)<(Secar/2))
        Secar_output(1)=0;
    else
        Secar_output(1)=Secar;
    end
    if(AC_output(1)<(AC/2))
        AC_output(1)=0;
    else
        AC_output(1)=AC;
    end
    if(Termo_output(1)<(Termo/2))
        Termo_output(1)=0;
    else
        Termo_output(1)=Termo;
    end

    if(w==1)
        fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t
AC\t Termo\t Perfil\t Modo\n');
    end
    fprintf(file,'%4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t
%4.0f,\t %4.0f,\t %s, %s\n',w, Loica_output(1), Roupa_output(1),
Secar_output(1), AC_output(1), Termo_output(1), perfil{w}, modo{w});
    display('SIMULOU')
end

```

.....

```

TF=strncmp(modo(w), 'Conforto');
if (TF==1)
    if (input1(w)==1)
        AC_input=1800;
    else
        AC_input=0;
    end
    if (input2(w)==1)
        Termo_input=2000;
    else
        Termo_input=0;
    end
    if (input3(w)==1)
        Loica_input=2000;
    else
        Loica_input=0;
    end
    if (input4(w)==1)
        Roupa_input=2000;
    else
        Roupa_input=0;
    end
end

```

```

        if (input5(w)==1)
            Secar_input=3500;
        else
            Secar_input=0;
        end
        potencia_input=potencia_in(w);
        preco_input=preco_in(w);

        controlof=readfis('Gastador_Conforto_8_1_5');
        sim('Gastador_Conforto')

        if(Loica_output(1)<(Loica/2))
            Loica_output(1)=0;
        else
            Loica_output(1)=Loica;
        end
        if(Roupa_output(1)<(Roupa/2))
            Roupa_output(1)=0;
        else
            Roupa_output(1)=Roupa;
        end
        if(Secar_output(1)<(Secar/2))
            Secar_output(1)=0;
        else
            Secar_output(1)=Secar;
        end
        if(AC_output(1)<(AC/2))
            AC_output(1)=0;
        else
            AC_output(1)=AC;
        end
        if(Termo_output(1)<(Termo/2))
            Termo_output(1)=0;
        else
            Termo_output(1)=Termo;
        end

        if(w==1)
            fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t
AC\t Termo\t Perfil\t Modo\n');
        end
        fprintf(file,'%4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t
%4.0f,\t %4.0f,\t %s, %s\n',w, Loica_output(1), Roupa_output(1),
Secar_output(1), AC_output(1), Termo_output(1), perfil{w}, modo{w});
        display('SIMULOU')
    end
else
    if(w==1)
        fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t
AC\t Termo\t Perfil\t Modo\n');
    end
        fprintf(file,'%4.0f,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t
Gastador: Preco demasiado elevado para o perfil atual\n', w);
    end
end
end
w=w+1

```



```

end
display('Fim de simulação')
fclose('all');

```

3.7. Dados de entrada referentes aos perfis de consumo

Tabela A3.3 – Dados de entrada referentes ao perfil económico

Potência disponível	Preço	Perfil	Modo	Prioridade				
				1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
6500	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
6300	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
6000	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
6000	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5900	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5300	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
0	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5600	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5600	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5600	3	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
2800	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5400	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5500	2	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5700	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5900	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1

3.8. Relatório resultante do simulador para o perfil de consumo económico

Número	Máq. loiça	Máq. roupa	Máq. secar	AC	Termov.	Perfil	Modo
1	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
2	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
3	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
4	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
5	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
6	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
7	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
8	Não existe potencia disponível para cargas controláveis						
9	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
10	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
11	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
12	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
13	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
14	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
15	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
16	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
17	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
18	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
19	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
20	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
21	Economico: Preço demasiado elevado para o perfil atual						
22	0	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
23	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
24	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
INSTITUTO DE INVESTIGAÇÃO
E FORMAÇÃO AVANÇADA

Contactos:

Universidade de Évora
Instituto de Investigação e Formação Avançada - IIFA
Palácio do Vimioso | Largo Marquês de Marialva, Apart. 94
7002-554 Évora | Portugal
Tel: (+351) 266 706 581
Fax: (+351) 266 744 677
email: iifa@uevora.pt