



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Routers de Energia em Cidades Inteligentes

Rui Miguel Coelho Morgado

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Presidente: Prof. Dr. António Manuel Oliveira Gomes Martins
Orientadores: Prof. Dr. Pedro Manuel Soares Moura
Prof. Dr. Aníbal Traça de Carvalho Almeida
Vogal: Prof. Dr. Rita Cristina Girão Coelho da Silva

Coimbra, 4 de Setembro de 2013

*“It always seems impossible until it’s
done”*

Nelson Mandela

Este trabalho foi enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade (EfS) da Universidade de Coimbra e desenvolvido no âmbito do projeto EMSURE - Energy and Mobility for Sustainable Regions (CENTRO-07-0224-FEDER-002004), cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Regional do Centro 2007 - 2013 (PORC), no âmbito do «Sistema de Apoio a Entidades do Sistema Científico e Tecnológico Nacional», e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, um forte agradecimento ao meu orientador Professor Doutor Pedro Moura, pela confiança depositada em mim, pelo apoio, conselhos e sugestões que possibilitou a realização desta dissertação e pela excelente orientação prestados na realização deste trabalho.

Ao orientador Professor Doutor Aníbal Almeida, por ter aceitado a realização desta dissertação e apoio inicial que foi prestado.

Aos meus amigos, por todo o apoio, amizade, companheirismo e preocupação.

À Minha Família, um enorme obrigado por acreditarem sempre em mim e naquilo que faço e por todos os ensinamentos de vida. Espero que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma forma, retribuir e compensar todo o carinho, apoio e dedicação que, constantemente, me oferecem. A eles, dedico todo este trabalho, incluindo ao meu pai, que com muita tristeza minha já partiu, mas sei que, esteja onde estiver, também está orgulhoso de mim.

À minha irmã, pela ajuda e sugestões essenciais para realização do trabalho.

A todos o meu muito Obrigado!

Resumo

Apesar de alguns avanços alcançados, a rede de energia elétrica tem mantido a mesma arquitetura, permanecendo sem grandes alterações durante as últimas décadas. Contudo, dado o aumento crescente do consumo de eletricidade no sector residencial, durante os últimos anos, os requisitos e objetivos da rede têm vindo a ser alterados, tornando a eficiência energética uma questão importante para governos e *utilities*; uma maior eficiência energética contribui para um futuro sustentável através de geração renovável de energia e otimização de recursos energéticos disponíveis.

Nesta dissertação foram analisados diversos trabalhos desenvolvidos na área da eficiência energética e da introdução de recursos renováveis intermitentes, nomeadamente no âmbito das *Smart Grids*. O projeto ENERSip, que teve como objetivo aumentar a eficiência energética em bairros residenciais através da consciencialização dos utilizadores para os consumos e da coordenação do consumo com a geração local de energia, serviu de referência para o desenvolvimento da arquitetura do *Energy Router*. Adicionalmente, o armazenamento de energia elétrica e térmica com a identificação das principais tecnologias e respetivas características foi estudado para ser incorporado na arquitetura. O conceito do *Energy Hub* foi também apresentado, tendo como princípio, o desenvolvimento de um bloco final a integrar na arquitetura do Router de Energia, cujo principal objetivo é a combinação num único elemento de diversas infraestruturas de energia, armazenamento e conversão, instalado ao nível do posto de transformação de um bairro.

A dissertação propõe a definição de um Router de Energia (*Energy Router*), que tem como objetivo assegurar, em tempo real, a otimização de diversos tipos de energia (elétrica e térmica) em função dos recursos energéticos disponíveis e das necessidades de energia num determinado bairro ou cidade. Foi projetado o bloco do *Energy Hub* que permite a conversão e o armazenamento de energia, com a determinação das tecnologias que o constituem. Com base no conceito do ENERSip, foi proposta uma arquitetura de comunicações, constituída por 4 domínios e vários blocos, em que são identificadas todas as tecnologias e interações, para o correto funcionamento do *Energy Router*. Através dos perfis de geração e consumo diários, foi apresentada a estratégia de otimização do *Energy Router*, usando um fluxograma, bem como a estrutura principal do código. A dissertação teve também como objetivo a simulação de três casos de estudo, obtidos através dos algoritmos de otimização, e a respetiva avaliação económica (comparando com a compra de energia elétrica da rede).

Palavras-Chave

Router de Energia (*Energy Router*), *Smart Grid*, ENERSip, *Energy Hub*, Tecnologias de Informação e Comunicação, eficiência energética.

Abstract

The traditional electricity grid has remained without major changes for most of last decades, almost keeping the same architecture, only with a few improvements. However, the steady increase of electricity consumption in the building sector during the last years, has changed its requirements and goals, making energy efficiency a major issue both for governments and for utilities, and become more sustainable in energy generation renewable and optimization of available resources.

In this thesis, several projects of energy efficiency development were analysed as well as the introduction of renewable and intermittent resources, namely the Smart Grid concept. The ENERSip project, whose main goal is to increase the energy efficiency in the neighbourhood area, through the customer's awareness for unnecessary consumption, was taken as reference for the Energy Router architecture development. The energy storage for electrical and thermal grids with identification of the main technologies and their features was studied to be incorporated in the architecture. The Energy Hub concept was also presented and a solution to integrate it on the Energy Router architecture was proposed. Its main objective is the combination of several energy infrastructures, energy storage and conversion in a single element, installed in the neighbourhood area.

This thesis proposes the definition of an Energy Router, whose main objective is to assure the optimization of several energy grids (electrical and thermal), according to the available energy resources and the energy needs, in a particular neighbourhood or city. The Energy Hub element, which allows energy conversion and storage was designed, with the selection of its main technologies. Based on the ENERSip concept, an architecture of communications was proposed composed by 4 domains and several blocks, identifying all the technologies and interactions, in order to achieve the correct operation for the Energy Router. Using the generation and consumption daily profiles, the optimization strategy for the Energy Router was presented, using a flowchart, as well as the specific code. This thesis also aimed at the simulation of three case studies, obtained from optimization algorithms, and their economic evaluation (comparing the purchase of electrical energy from the grid).

Keywords

Energy Router, Smart Grid, ENERSip, Energy Hub, Information and Communications Technology, energy efficiency.

Índice

Índice de Tabelas	iv
Índice de Figuras	v
Simbologia	vii
Acrónimos	ix
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Antecedentes e Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização da Dissertação	4
Capítulo 2 – Estado da Arte	5
2.1 <i>Smart Grids</i>	5
2.1.1 Cidade Sustentável	5
2.1.2 Objetivos das <i>Smart Grids</i>	6
2.1.3 Evolução das <i>Smart Grids</i>	6
2.2 Projeto Enersip	8
2.3 Armazenamento de Energia	10
Capítulo 3 – Requisitos do <i>Energy Router</i>	13
3.1 O Conceito do <i>Energy Hub</i>	13
3.1.1 Combinação das Infraestruturas de Energia	13
3.1.2 O Conceito do <i>Energy Hub</i>	14
3.1.3 Conclusões	15
3.2 Conceito e Objetivos do <i>Energy Hub</i> e do novo <i>Energy Router</i>	15
3.3 Elementos Do <i>Energy Hub</i>	16
3.3.1 Conexões Diretas	17
3.3.2 Conversões	17
3.3.3 Armazenamento	17
3.3.4 Conexão com a Energia Elétrica de Produção Renovável	18
3.4 Tecnologias para os Elementos do <i>Energy Hub</i>	18
3.4.1 Conversão	19

3.4.2	Armazenamento Energia Elétrica	19
3.4.3	Armazenamento Energia Térmica	19
3.4.4	Conclusões	20
Capítulo 4 – Arquitetura do <i>Energy Router</i>		23
4.1	Arquitetura Global do <i>Energy Router</i>	23
4.1.1	<i>Building Domain</i>	24
4.1.2	<i>Neighborhood Domain</i>	28
4.1.3	<i>Grid Management System Domain</i>	30
4.1.4	<i>Decision Support System (DSS)</i>	31
4.2	Diagrama de Blocos da Arquitetura Global do <i>Energy Router</i> e Interfaces	33
Capítulo 5 – Otimização do <i>Energy Router</i>		35
5.1	Objetivos	35
5.2	Elementos de Otimização	36
5.3	Custo da Energia da Rede	38
5.4	Otimização	39
5.4.1	Dimensionamento do Banco de Baterias	41
5.4.2	Situações a Otimizar	41
5.4.3	<i>Levelized Cost Of Energy</i> (Custo Nivelado da Energia)	43
5.4.4	Estratégia de Despacho	44
5.4.5	<i>Prenewable > PLoad</i>	48
5.4.6	<i>Prenewable < PLoad</i>	49
5.5	Resultados e Discussões	50
Capítulo 6 – Conclusões e Trabalho Futuro		55
6.1	Conclusões	53
6.2	Trabalho Futuro	55
Bibliografia		59
Anexo 1 – Modelos e Tecnologias das <i>Smart Grids</i>		63
1.1	Arquiteturas e Modelos Conceptuais	65

1.2.1	Tecnologias de Informação e Comunicação	67
1.2.2	Smart Meters e Smart Appliances	72
1.2.3	Sistemas de Monitorização e Controlo.....	72
Anexo 2 – Impactos das <i>Smart Grids</i>.....		75
2.1	Benefícios.....	75
2.2	Poupança de Energia Elétrica.....	76
Anexo 3 – Armazenamento de Energia Elétrica.....		77
3.1	Tecnologias incluídas em cenários de elevada produção renovável	78
3.2	Baterias de Elevada Energia.....	79
Anexo 4 – Armazenamento de Energia Térmica.....		83
4.1	Armazenamento de Energia Térmica nas redes de DH.....	83
4.2	Métodos de Armazenamento de Energia Térmica	85
4.3	Armazenamento de Calor Sensível	85
4.4	Armazenamento de Calor Latente.....	87
4.5	Classificação dos materiais de mudança de fase.....	89
4.6	Armazenamento de Frio	91
Anexo 5 – Modelos para o <i>Energy Hub</i>.....		93
5.1	Conversões	93
5.2	Armazenamento	95
Anexo 6 – Interfaces na Arquitetura do <i>Energy Router</i>.....		97
6.1	Interfaces Intra-Domain	97
6.1.1	Building Domain: In-Building Energy Consumption Infrastructure (I-BECI) ...	97
6.1.2	Building Domain: In-Building Energy Generation Infrastructure (I-BEGI).....	98
6.1.3	Neighborhood Domain.....	99
6.1.4	Grid Management System (GMS).....	99
6.1.5	Decision Support System (DSS)	99
6.2	Interfaces Inter-Domain	100
6.3	Interfaces com as Utilities	101
6.4	<i>Energy Services Marketplace</i> (Mercado dos Serviços de Energia)	101
Anexo 7 – Elementos de Otimização.....		103
7.1	Painéis Fotovoltaicos.....	103
7.2	Microturbinas Eólicas	104
7.3	Baterias.....	104
7.4	Sistema de Gestão das Baterias	106
Anexo 8 – Otimização da Energia Térmica		107
Anexo 9 – Código da estratégia de despacho para a Energia Elétrica		109

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Principais baterias com potencial para o <i>Energy Hub</i>	19
Tabela 4.1 - Funcionalidades dos sensores e dos atuadores	25
Tabela 4.2 - Funcionalidades dos <i>Smart Meters</i> e <i>Smart Appliances</i>	26
Tabela 4.3 - Características dos dispositivos M2M e CNTR.....	31
Tabela 5.1 - Parâmetros para cálculo do LCOE	43
Tabela 5.2 - Ações a aplicar para os diferentes cenários quando <i>Prenewable</i> > <i>PLoad</i>	48
Tabela 5.3 - Ações a aplicar para os diferentes cenários quando <i>Prenewable</i> < <i>PLoad</i>	49
Tabela 5.4 - Resultados obtidos dos diferentes exemplos de otimização	53
Tabela A1.1 – Tecnologias das <i>Smart Grids</i>	67
Tabela A1.2 - Resumo das tecnologias usadas para comunicação	69
Tabela A1.3 – Protocolos e standards usados nas camadas mais elevadas.....	70
Tabela A1.4 – Resumo das tecnologias de comunicação PLC	71
Tabela A3.1 - Aplicações típicas dos sistemas de armazenamento de energia	77
Tabela A3.2 - Características das tecnologias de armazenamento de energia elétrica	80
Tabela A4. 1 - Formas de armazenamento de energia térmica	85
Tabela A4.2 - Propriedades de líquidos para armazenamento de calor sensível	86
Tabela A4.3 - Propriedades de sólidos para armazenamento de calor sensível	87
Tabela A4.4 - Propriedades dos materiais de mudança de fase	88
Tabela A4.5 - Características técnicas e económicas dos materiais de mudança de fase mais usados.....	88
Tabela A4.6 - Comparativo dos três materiais principais para armazenamento de energia térmica	89
Tabela A7.1 - Determinação da capacidade de carga diária para as baterias.....	105

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Áreas tecnológicas das <i>Smart Grids</i>	7
Figura 2.2 - Arquitetura global do sistema ENERSip	8
Figura 3.1 - Exemplo de um <i>Energy Hub</i> que contém um transformador, uma microturbina, um permutador de calor, um resfriador, uma bateria, e um armazenamento de água quente.....	14
Figura 3.2 - Esboço inicial do <i>Energy Hub</i> do projeto.....	18
Figura 3.3 - <i>Energy Hub</i> com transformador, permutador de calor, armazenamento de energia elétrica e térmica	21
Figura 3.4 - <i>Energy Hub</i> com transformador, permutador de calor, central CHP, armazenamento de energia elétrica e térmica.....	21
Figura 3.5 - Característica final do bloco do <i>Energy Hub</i> a aplicar na arquitetura do <i>Energy Router</i>	22
Figura 4.1 - Domínios e Blocos do <i>Energy Router</i>	24
Figura 4.2 - <i>In-Building Energy Consumption Infrastructure</i>	27
Figura 4.3 - <i>Building Hot Water Controller System</i>	27
Figura 4.4 - <i>In-Building Energy Generation Infrastructure</i>	28
Figura 4.5 - <i>Neighborhood Domain</i>	29
Figura 4.6 - <i>Grid Management System Domain</i>	31
Figura 4.7 - <i>Decision Support System Domain</i>	32
Figura 4.8 - Arquitetura Global do <i>Energy Router</i>	34
Figura 5.1 - Componentes do sistema e respetivas direções de fluxos de energia a otimizar.....	36
Figura 5.2 - Consumo de eletricidade para o dia médio de uma habitação típica na Europa	37
Figura 5.3 - Comparativo de consumo de energia anual por tipo de equipamento	37
Figura 5.4 - Perfis do consumo de energia elétrica e custos	39
Figura 5.5 - Perfil anual médio de consumo para o condomínio.....	40
Figura 5.6 - Perfil médio de geração fotovoltaica para o condomínio	41
Figura 5.7 - Perfis de Geração e Consumo.....	42
Figura 5.8 - Comparativo do LCOE para as várias tecnologias.....	44
Figura 5.9 - Estratégia de Otimização do <i>Energy Router</i>	46
Figura 5.10 - Comportamento do perfil de consumo ao aplicar cargas controláveis.....	48
Figura 5.11 - Exemplo de otimização com utilização apenas do armazenamento.....	51
Figura 5.12 - - Exemplo de otimização com utilização da armazenagem e cargas controláveis para as horas de excesso de geração.....	52
Figura 5.13 - Exemplo de otimização com utilização da armazenagem e cargas controláveis para as horas noturnas e manhã do dia seguinte.....	52
Figura A1.1 - Comparação entre os modelos <i>Smart Grid</i> da NIST e <i>Smart Grid</i> do CEN/CENELEC/ETSI.....	65
Figura A1.2 - Modelo 3D da arquitetura do CEN/CENELEC/ETSI	66
Figura A1.3 – Arquitetura típica M2M para uma <i>Smart Grid</i>	68
Figura A1.4 – Modelo OSI e padrões usados.....	71
Figura A1.5 – Exemplo de equipamento de monitorização do consumo de energia)	73
Figura A2.1 - Impacto ao melhorar a tecnologia.....	76
Figura A3.1 - Aplicações e Tecnologias de armazenamento de energia.....	78
Figura A4.1 - Armazenamento de energia térmica integrado em rede de DH.....	84
Figura A4.2 - Classificação dos PCMs.....	90
Figura A4.3 - Temperatura de fusão e entalpia de fusão para os materiais PCMs.....	90
Figura A5.1 - Conversor com entrada e saída simples.....	93
Figura A5.2 - Exemplo do <i>Energy Hub</i> que contém um transformador, uma microturbina, um queimador e um permutador de calor	94

Figura A5.3 - Exemplo de um elemento de armazenamento	96
Figura A7.1 - Média da radiação solar anual em Lisboa.....	104
Figura A8.1 - Estratégia de despacho da Energia Térmica.....	108

Simbologia

L_{β}	Energia de entrada
P_{α}	Energia de saída
$c_{\alpha\beta}$	Fator de acoplamento
P_e	Entrada de eletricidade
P_g	Entrada de gás natural
P_t	Entrada de calor
L_e	Saída de eletricidade
L_t	Saída de calor
η_{ee}^T	Rendimento do transformador
η_{ge}^{GT}	Rendimento da turbina a gás ao gerar eletricidade
η_{gt}^{GT}	Rendimento da turbina a gás ao gerar calor
η_{gt}^F	Rendimento da queima de gás natural
η_{tt}^{HE}	Rendimento do permutador de calor
E_{α}	Energia armazenada
$Q_{\alpha+}$	Energia interna
Q_{α}	Energia transferida
e_{α}	Rendimento da tecnologia
P_{PV}	Potência gerada pelos painéis fotovoltaicos
P_{Wind}	Potência gerada pelas microturbinas eólicas;
P_{Batt}	Potência de carga e descarga das baterias
P_{Grid}	Potência proveniente da rede de energia elétrica
P_{load}	Potência de consumo
P_{loss}	Perdas de energia no sistema agregadas
H_t	Radiação total em superfície inclinada
H_{dir}	Radiação direta
H_{ref}	Radiação refletida
H_{dif}	Radiação difusa
β, δ	Ângulos de azimute e inclinação
P_{MPP}	Potência gerada no ponto de máxima potência
I_{MPP}	Corrente no ponto de máxima potência
U_{MPP}	Tensão no ponto de máxima potência
z_p	Número de painéis conectados em série
z_s	Número de painéis conectados em paralelo
$E_{N,i}$	Energia nominal da bateria i
B_i	Benefício da bateria i
C_i	Custo da bateria i
$L_{opt,i}$	Tempo de vida ótimo operando no SOC_{opt}
C_h	Custo por hora
EC_h	Consumo de energia por hora
EG_h	Geração de energia por hora
SC_h	Autoconsumo por hora
PL_h	Porcentagem da carga máxima por hora (picos)
R_h	Rácio de custos entre a geração e o consumo por hora
$P_{renewable}$	Potência gerada pelos painéis fotovoltaicos e microturbinas eólicas

AO	Custo da operação e manutenção anual
DR	Taxa de Desconto
$Initial\ kWh$	Geração anual de energia do sistema
SDR	Taxa de degradação do sistema
$P_{Batt\ Charge}$	Potência de entrada na bateria
N	Número de anos de vida útil do sistema
$P_{Batt\ Discharge}$	Potência de saída na bateria
E_{Batt}	Energia armazenada na bateria
η	Eficiência do ciclo completo de carga e descarga na bateria
$P_{Load\ Control}$	Potência de cargas que é possível controlar
$P_{Total\ Load}$	Potência total após o aumento do número de cargas
E_{Load}	Energia de consumo
$n_{control}$	Número de equipamentos disponíveis para controlar (ligar/desligar)
x	Porcentagem de cargas a que se vai aplicar o controlo.
SOC_0	Estado de carga inicial
$C(\tau)$	Capacidade da bateria
$I_{eff}(\tau)$	Corrente eficaz de carga/descarga da bateria
C_p	Limite de Betz
ρ_l	Densidade do ar
A	Área do rotor
v	Velocidade do vento

Acrónimos

ADR EP	Automated Demand Response End Point (Dispositivo Final de Comunicação)
AMI	Advanced Metering Infrastructure (Infraestrutura Avançada de Medição)
AN	Access Network (Rede de acesso)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BAN	Building Area Network (Rede de edifício)
BEMC	Building Energy Management Controller (Controlador da gestão de energia no edifício)
BMS	Battery Management System (Sistema de gestão das baterias)
CAES	Compressed-air energy storage (armazenamento de energia em ar comprimido)
CEN	European Committee for Standardization (Comité Europeu para a Normalização)
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization (Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica)
CHP	Combined Heat and Power (Geração combinada de calor e eletricidade)
CIS	Customer Information System (Sistema de informação para o cliente)
CNTR	Concentrator (Concentrador)
DH	District Heat (Aquecimento Urbano)
DMS	Distribution Management System (Sistemas de gestão da distribuição de energia)
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DR	Demand Response (Resposta da procura)
DSM	Demand Side Management (Gestão da procura)
DSOs	Distribution System Operators (Operadores do sistema de distribuição)
DSS	Decision Support System (Sistema de suporte de decisões)
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EMS	Energy Management System (Sistema de gestão de energia)
ERP	Enterprise Resource Planning Software (Software de planeamento de recursos empresariais)
ESTI	European Telecommunication Standards Institute (Instituto Europeu de Normalização da Telecomunicação)
ETH Zurich	Swiss Federal Institute of Technology (Instituto Federal de Tecnologia Suíço)
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System (Sistema de transmissão da corrente alternada flexível)
FTTH	Fiber-to-the-Home
FW	Flywheels ("Volantes")
G2V	Grid-To-Vehicle (Fluxo de eletricidade da rede para veículo)
GHG	Greenhouse gas (Gases de efeito de estufa)
GIS	Geographic Information System (Sistema de informação geográfica)
GMS	Grid Management System (Sistema de gestão da rede)
GMS	Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicações Móveis)
GPRS	General Packet Radio Service (Serviço de Rádio de Pacote Geral)
GSM	Global System for Mobile Communication (Sistema global para a comunicação móvel)
HAN	Home Area Network (Rede doméstica)

HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IAE	International Agency of Energy (Agência Internacional da Energia)
I-BECI	In-Building Energy Consumption Infrastructure (Infraestrutura de consumo de energia no edifício)
I-BEGI	In-Building Energy Generation Infrastructure (Infraestrutura de geração de energia no edifício)
ICT	Information and Communication Technologies (Tecnologias de Informação e Comunicação)
IDE	Intelligent Electronic Device (Equipamento eletrônico inteligente)
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Internacional da Eletrotécnica)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrotécnicos)
IP	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para a Padronização)
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (União Internacional de Telecomunicações)
L/A	Baterias de Chumbo-ácido
LAN	Local Area Network (Rede local)
LCOE	Levelized Cost of Energy (Custo Nivelado da Energia)
Li-Ion	Baterias de Lítio-íon
LTE	Long-term evolution (4G LTE)
M2M	Machine-to-Machine (Máquina-a-Máquina)
MDMS	Meter Data Management System (Sistema de gestão do dados dos smart meters)
MIBEL	Mercado Ibérico de Eletricidade
MPP	Maximum Power Point (Ponto de potência máxima)
NAN	Neighbourhood Area Network (Rede do bairro)
NaNiCl	Baterias ZEBRA
NaS	Bateria de Sódio-Enxofre
NB-PLC	NarrowBand Power Line Communication (comunicação através de cabo de banda estreita)
ND	National Dispatcher (Dispacho nacional)
NEMC	Neighbourhood Energy Management Controller (Controlador da gestão de energia no bairro)
Ni-Cd	Baterias de Níquel-Cádmio
NILM	Non-Intrusive Load Monitoring (Sistema de monitorização não intrusivo)
Ni-MH	Baterias de Hidretos Metálicos de Níquel
NIST	National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)
OMS	Outage Management System (Sistema de gestão das interrupções)
OSI	Open-system interconnection (Sistema de interconexão aberto)
Pb-ácido	Baterias de Chumbo-ácido
PCM	Phase Change Materials (Materias de mudança de fase)
PLC	Power line communication (comunicações através de cabo)
PMU	Phasor Measurement Units (Unidades de medição fasorial)
PS-BI	Power Saving Business Intelligent (Sistema inteligente de gestão de energia)
PSH	Pumped-storage hydroelectricity (Bombagem Hídrica)

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RTUs	Remote Terminal Units (Unidades terminais remotas)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados)
SDH	Synchronous Digital Hierarchy (Hierarquia síncrona digital)
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SMS	Short Message Service (Serviço de mensagens curtas)
SOC	State of Charge (Estado de carga)
SOH	State of Healthy (Estado de envelhecimento)
SONET	Synchronous optical networking (Rede ótica síncrona)
T&D	Transmission and Distribution (Transmissão e Distribuição)
TCP	Transmission Control Protocol (Protocolo de controlo de transmissão)
TSOs	Transport System Operators (Operadores do sistema de transporte)
UAP	User Application Platform (Plataforma de aplicações do utilizador)
UE	União Europeia
V2G	Vehicle-To-Grid (Fluxo de eletricidade do veículo para a rede)
VR	Baterias de Vanádio-Redox
WAAPCA	Wide-Area Adaptive Protection Control and Automation (Proteção, controlo e monitorização de cabos)
WAMS	Wide-Area Monitoring Systems (Sistemas de monitorização dos cabos)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-ondas)
WMS	Workforce Management System (Sistema de gestão geral)
Zn-Br	Baterias de Brometo de Zinco

Capítulo 1

Introdução

1.1 Antecedentes e Motivação

As cidades são grandes centros de desenvolvimento económico, que crescem exponencialmente proporcionando oportunidades de emprego, geração de riqueza e condições de vida. No entanto com o seu desenvolvimento estas provocam impactes negativos no meio ambiente. Embora as cidades apenas ocupem 2% de área do planeta, são responsáveis pelo consumo de 75% da energia global e geram 80% dos gases de efeito de estufa emitidos para a atmosfera (Grids, 2012). Assim, a União Europeia tem como meta estabelecida para 2020 a redução em 40% dos gases de efeito de estufa, promovendo o uso sustentável de energia e geração renovável, relativamente aos consumos nos edifícios e nas redes de energia.

Adicionalmente durante as últimas décadas, o consumo de energia mundial tem aumentado, dado o desenvolvimento industrial e crescimento económico global, resultando num aumento dos custos de produção de energia e impactes negativos para o ambiente. Embora melhorias significativas, envolvendo eficiência energética, tenham sido alcançadas nos equipamentos consumidores de energia, o consumo de eletricidade da parte do utilizador final continua a aumentar, particularmente nos edifícios.

As cargas elétricas nos edifícios (maioritariamente de entretenimento e tecnologias de informação e comunicação) consomem mais de 21% da eletricidade produzida na União Europeia, uma percentagem significativa, que se deve a consumos em *standby* e outros modos não-ativos (p. ex. um router deixado em funcionamento durante 24h por dia)(Almeida et al., 2008). Na União Europeia, a média de consumos de eletricidade em modo *standby* é cerca de 180 kWh por habitação por ano, o que corresponde a 7% do consumo anual de eletricidade por habitação. De acordo com as previsões da Agência Internacional da Energia, em 2030, 15% do consumo de eletricidade em aparelhos elétricos, na Europa, dever-se-á ao modo *standby*.

As cargas de aquecimento, ventilação ou ar condicionado têm também apresentado altos consumos de eletricidade com crescente taxa de penetração nas habitações. Dados os aumentos de consumo de energia juntamente com a dificuldade de identificar as cargas responsáveis, é cada vez mais necessário dispor de monitorização e controlo dos equipamentos elétricos nas habitações com capacidades de medição em tempo real, de modo a fornecer informação aos utilizadores finais sobre os consumos elétricos desnecessários.

O consumo base¹ de cargas elétricas numa habitação na União Europeia é bastante elevado, perto de 200 W, sobretudo devido às cargas de refrigeração e às cargas de HVAC (*Heating, Ventilating, and Air Conditioning* - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)(Almeida et al., 2008). Também as máquinas de lavar e secar consomem mais de 16% da eletricidade com alto consumo nas horas de ponta, que poderiam ser desviados para outros períodos. Em cenários de elevada geração renovável, as tecnologias de DR (*Demand Response* – resposta à procura da energia) conseguem ser um meio apropriado de compensar os efeitos de variabilidade e intermitência dos recursos renováveis disponíveis.

Atualmente, as redes elétricas estão a evoluir no sentido de aumentar a presença de fontes de geração de eletricidade nos edifícios, nomeadamente através de painéis fotovoltaicos, os quais podem ser utilizados para gerar eletricidade para consumo próprio ou para vender para a rede elétrica. De acordo com este cenário, um consumidor poderá também tornar-se um produtor de energia elétrica, pelo que são necessários sistemas de monitorização e controlo para determinar a opção mais rentável (consumir ou vender para a rede elétrica) (Moura, López, Moreno, & Almeida, 2013).

Contudo, a geração de energia renovável não combina tipicamente com o perfil de consumo da habitação, pois é usualmente associada a níveis elevados de intermitência, e a sua produção de eletricidade não pode ser controlada. A integração de sistemas inteligentes irá permitir otimizar a relação entre a geração e o consumo e abrir o caminho para o uso de DR, por forma a compensar os efeitos da imprevisibilidade e variabilidade de algumas fontes de energia renovável (p. ex. intermitência eólica e solar). A elevada geração de energia elétrica de fonte renovável e sua integração na rede elétrica representa um grande desafio para os governos da União Europeia e as empresas produtoras, dado o aumento da variabilidade e incapacidade de controlo que estes tipos de energia apresentam. O cenário de microgeração distribuída em cada bairro de habitações faz com que este problema seja ainda mais desafiante (Moura et al., 2013).

O armazenamento de energia nos sistemas de microgeração permite o ajuste entre a geração e a procura de energia elétrica. Este é um aspeto de grande importância pois a energia gerada a partir de fontes renováveis intermitentes, durante períodos de baixo custo de produção ou de baixa procura, pode ser deslocada para períodos de maior consumo, ou de elevado custo de geração. Este sistema possibilita maior flexibilidade nos fluxos de energia, integração de fontes intermitentes e mitigação de congestionamentos.

As redes de eletricidade atuais estão a ficar desadequadas, sem grandes melhoramentos a nível da arquitetura durante décadas. A sua capacidade de geração de eletricidade é sobredimensionada de forma a corresponder aos picos de procura de energia, tornando o sistema ineficiente. A falta de informação em tempo real e o controlo crítico dos processos e bens pode causar apagões e falhas, o que implica custos elevados para os utilizadores da rede. Além de haver sistemas de transmissão de energia congestionados, muitas das

¹ O consumo médio que ocorre em horas noturnas, horas em que a necessidade real de utilização dos equipamentos é baixa.

infraestruturas de energia estão no fim do tempo de vida útil. Adicionalmente, outros problemas como a crescente procura de energia, a dependência dos combustíveis fósseis, a reestruturação das indústrias e dos edifícios, e a necessidade de se utilizar cada vez mais fontes de energia sustentáveis e amigas do ambiente, levantam assim a questão se as infraestruturas existentes são suficientes para lidar com todos estes desafios que o futuro da energia apresenta.

Os sistemas de aquecimento urbano (DH – *District Heating*) podem desempenhar um papel importante para aumentar o uso de energias renováveis para aquecimento. Os sistemas de DH fornecem uma oportunidade de usar calor de origem geotérmica bem como da biomassa não refinada (p. ex. desperdícios de madeira, palha, resíduos florestais) e resíduos sólidos urbanos (RSU). Os sistemas de DH também permitem a utilização de calor excedente de indústrias (calor residual industrial) e de centrais térmicas através da cogeração (ou CHP - *Combined Heat and Power*), reduzindo assim a procura da energia primária. Na Europa, os sistemas de aquecimento urbano são comuns nos países escandinavos (Suécia, Finlândia, Dinamarca e Noruega), nos países bálticos e na Europa do leste. A integração de armazenamento de energia térmica nos sistemas de aquecimento urbano permite grande flexibilidade de operação e maior eficiência, principalmente em centrais CHP. O calor em excesso pode ser enviado para as tecnologias de armazenamento de energia térmica sendo posteriormente utilizado em períodos com maior procura.

De modo a responder aos assuntos introduzidos existe assim uma necessidade de gerir e otimizar em conjunto redes de diferentes formas de energia. A introdução de um sistema que permita o controlo de eletricidade e de energia térmica numa única arquitetura pode vir a ser bastante vantajoso para otimizar e analisar as necessidades de cada bairro, ou seja, ter uma visão global da procura e dos recursos locais.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se definir e projetar um *Energy Router* (Router de Energia) que assegure, em tempo real, a otimização de diversos tipos de energia (elétrica e térmica) em função dos recursos energéticos disponíveis e das necessidades de energia num determinado bairro ou cidade. O *Energy Router* deverá monitorizar a geração e o consumo de cada tipo de energia, controlar cargas, armazenar energia e eventualmente assegurar a conversão entre diferentes tipos de energia, através de uma rede de comunicações fiável distribuída pela arquitetura.

O conceito do *Energy Hub* (no qual o *Energy Router* deve ser parcialmente baseado) deve ser analisado para determinar todos os elementos que o irão constituir com base nos rendimentos, potencialidades de otimização e custos associados. A dissertação tem também como objetivo a definição de uma arquitetura global *Energy Router* que irá conter todos os domínios e blocos do sistema. A arquitetura deverá ainda incluir todas as tecnologias envolvidas e as interações entre elas, incluindo nomeadamente, sistema de armazenamento de energia elétrica ao nível do posto de transformação, armazenamento de energia térmica, geração local renovável, sistema de monitorização da geração local, sistemas de controlo de

consumos, sensores, sistema de encaminhamento de dados e comandos para um dispositivo central de tratamento da informação possibilitando a otimização.

Na última parte da dissertação o objetivo será definir os algoritmos de otimização para o sistema do *Energy Router*. Os algoritmos de otimização deverão determinar a ação que o sistema deve tomar em cada situação, tendo em consideração as restrições de disponibilidade de armazenamento e cargas a deslocar, geração disponível e custos associados.

1.3 Organização da Dissertação

A dissertação é composta por 6 capítulos que abordam o trabalho realizado no âmbito do tema do trabalho.

Capítulo 2: Estado da Arte corresponde a uma caracterização geral das tecnologias e metodologias existentes atualmente relativamente a *Smart Grids*, armazenamento de energia térmica e elétrica. Apresenta também como exemplo de projeto de *Smart Grids* o projeto ENERsip, que é utilizado como referência para a arquitetura.

Capítulo 3: Requisitos do *Energy Router* apresenta o conceito do *Energy Hub*, determina os componentes a aplicar na arquitetura do *Energy Router* e determina um conjunto de características e requisitos de forma a proporcionar um funcionamento adequado com base nos rendimentos, potencialidades de otimização e custos associados.

Capítulo 4: Arquitetura do *Energy Router* apresenta o conjunto de tecnologias, e as respetivas interações entre elas que devem constituir o *Energy Router*. Neste capítulo é apresentado um esquema final com a arquitetura de comunicações do *Energy Router* e todas as tecnologias envolvidas.

Capítulo 5: Algoritmos de Otimização do *Energy Router* aplica o *Energy Router* definido nos capítulos anteriores de forma a determinar regras de otimização do sistema, tendo em consideração as restrições que ocorrem em diversas situações, dependendo dos níveis de geração local, perfis dos consumos, disponibilidades de armazenamento, disponibilidade de cargas possíveis de controlar, custos, entre outros. Consiste em determinar as ações do sistema em várias situações que se podem verificar na vida real. São apresentados vários exemplos possíveis de otimização para a energia elétrica.

Capítulo 6: Conclusão e Trabalho futuro finaliza a tese resumindo e discutindo, com uma análise crítica, os resultados mais importantes, os principais desafios bem como motivações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo é feita uma caracterização geral das tecnologias e metodologias existentes para *Smart Grids*, com uma breve introdução ao armazenamento de energia.

2.1 Smart Grids

2.1.1 Cidade Sustentável

Com diversas mudanças na estrutura social, as cidades enfrentam dois grandes problemas, o aumento explosivo da população e a escassez de energia. O termo de cidade sustentável ou eco-cidade foi inicialmente introduzido por Richard Register, como uma cidade ecologicamente saudável, em 1987 (Register, 1993). Este conceito tinha como objetivos a redução da procura de energia, água, alimentos ou outras necessidades, de forma a diminuir a poluição do ar (emissões de CO₂), poluição da água, calor e concentrações de metano, proporcionando assim uma cidade mais amiga do ambiente (sem impactes negativos para o ambiente). Como resultado, a cidade sustentável permite o fornecimento dos seus próprios consumos de energia e alimentos, minimizando a dependência face a outros países ou regiões e reduzindo a sua pegada ecológica.

Além disso, a promoção de energia renovável e eficiência energética estão relacionadas não só com a mudança do estilo de vida, mas também com a inovação tecnológica. Dado o conceito de sustentabilidade, vários significados têm sido usados, como por exemplo, uma infraestrutura de energia sustentável, sendo determinante para uma eco-cidade de elevado nível tecnológico. A próxima geração de infraestruturas destinam-se a ser sustentáveis, confiáveis e acessíveis a sistemas de energia, incluindo as *Smart Grids*: infraestruturas de eletricidade inteligentes (Mi, 2012).

2.1.2 Conceito de Smart Grid

A Agência Internacional de Energia (IEA) define *Smart Grid* como uma rede de energia elétrica moderna que usa tecnologias de comunicação e informação para monitorizar e gerir o transporte de eletricidade desde a geração até aos equipamentos dos consumidores finais, de forma a ir ao encontro dos diferentes perfis de consumo dos utilizadores finais (IEA, 2011). O objetivo das *Smart Grids* consiste em maximizar a fiabilidade do sistema, a estabilidade e a capacidade de resolver problemas minimizando os custos e os impactos ambientais usando coordenação entre o consumo e os recursos dos utilizadores finais e dos operadores de geração, transporte e comercialização de energia. Adicionalmente, as *Smart Grids* irão facilitar a integração de diversos tipos de tecnologias de geração de eletricidade, suportando também a integração nas redes de distribuição e no consumidor final várias formas de produção de energia, promovendo uma participação mais ativa dos utilizadores

não só controlando as cargas e perfis de consumo, como também a gestão de um maior número de recursos de geração de energia distribuída (IEA, 2011).

2.1.3 Objetivos das *Smart Grids*

Smart Grid baseia-se na aplicação de tecnologias em todos os aspetos da transmissão de energia e no sistema de fornecimento de modo a assegurar melhor monitorização, controlo e uso eficiente do sistema. O objetivo da Organização Internacional para Padronização (ISO) é de permitir e integrar todas as tecnologias modernas disponíveis na rede operando com segurança, eficiência, confiança e eficácia, mercados abertos que envolvam e permitem que os consumidores vão ao encontro da consciência ambiental e políticas energéticas.

Em suma, a ISO pretende realizar investigação, projetos-piloto, implementação e integração de tecnologias que:

- Aumentam a eficiência, fiabilidade e visibilidade da rede;
- Permitam geração diversa incluindo tecnologias à escala do utilizador, *demand response*, armazenamento e tecnologias de geração fotovoltaica a pequena escala de modo a participar no mercado de venda da eletricidade;
- Forneçam melhor segurança física e cibernética.

Os benefícios esperados para a implementação de tecnologias de *Smart Grids* incluem:

- Habilidade para reconhecer mais cedo os problemas da rede e resolvê-los;
- Uso do sistema de transmissão e distribuição eficientemente para adiar ou deslocar investimentos dispendiosos na transmissão e distribuição de energia;
- Permitir que os consumidores reajam às condições variáveis da rede fazendo-os participantes ativos na sua energia usada;
- Aproveitar a geração local e tecnologias emergentes quando é possível a inclusão de fontes de geração distribuída, *demand response* e armazenamento de energia, para enfrentar os desafios introduzidos pelos recursos renováveis variáveis.

2.1.4 Evolução das *Smart Grids*

Até agora, as *Smart Grids* têm-se baseado apenas na introdução de *smart meters*, que na maioria medem o consumo de eletricidade numa única direção, sendo unidirecionais, ou seja, os dados são apenas transmitidos numa única direção, do consumidor para a *utility* (distribuidor). Surge assim o conceito da *Advanced Metering Infrastructure* (AMI – Infraestrutura Avançada de Medição), que permite a comunicação de dados e transporte de energia nos dois sentidos, e que adicionalmente pode ter a capacidade de gestão de cargas e proteção de tecnologias. Com as características da AMI, o próximo passo destina-se a implementar estratégias de controlo e comandos distribuídos proporcionando inteligência por todas as geografias, componentes, e funcionalidades do sistema (Moura et al., 2013).

A introdução de novas camadas de modo a providenciar funcionalidades mais avançadas é a chave para a evolução das *Smart Grids*:

1ª Camada (Base): Monitorização detalhada e automatização da rede.

2ª Camada: Conexão entre os utilizadores, integração de clientes e empresas de serviços de sistema (*utilities*).

3ª Camada: Encaminhamento de informações ao longo do sistema e de comandos de controlo; algoritmos de otimização de ajuste entre a geração e o consumo em tempo real.

4ª Camada: Analisar e otimizar os fluxos de energia eléctrica no sistema de energia eléctrica (SEE), de acordo com as informações adquiridas pelos agentes inteligentes.

As áreas tecnológicas que vão ser desenvolvidas com as *Smart Grids* dividem-se por várias áreas do sistema de energia eléctrica, tendo como base as novas camadas. São designadas como: monitorização e controlo, integração de tecnologias de informação e comunicação, integração de geração renovável em maior número e ao nível da distribuição no SEE, aumento das aplicações na transmissão, gestão adequada de energia eléctrica na distribuição, infraestrutura avançada de medição de consumos, infraestrutura para carregamento de veículos eléctricos e sistemas de controlo no utilizador final. Na figura 2.1 encontram-se as áreas tecnológicas das *Smart Grids*.

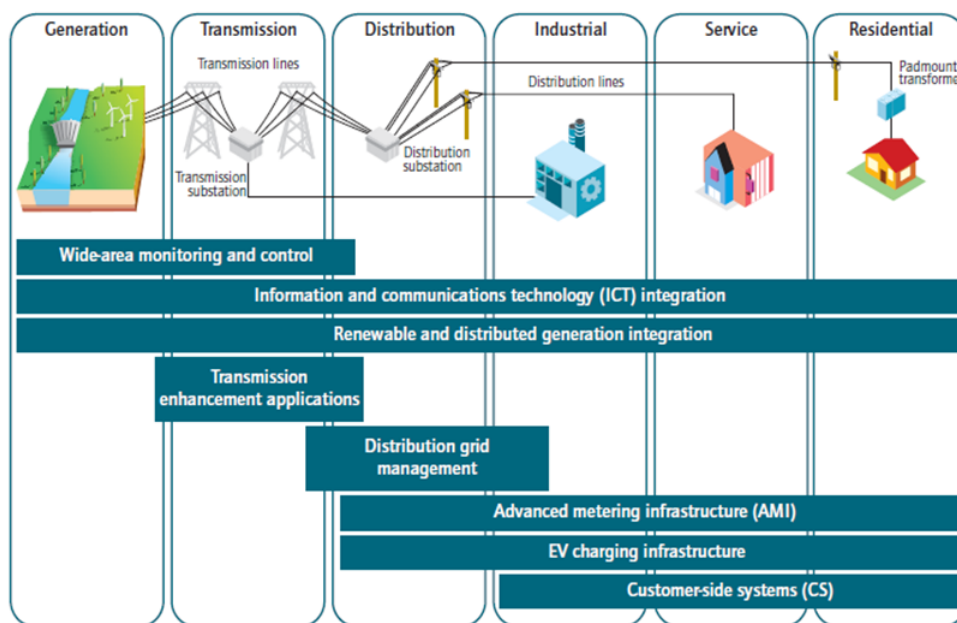


Figura 2.1 - Áreas tecnológicas das Smart Grids (IEA, 2011)

No anexo 1 são apresentadas as arquiteturas e modelos conceptuais usados em *Smart Grids*, e ainda as principais tecnologias de comunicação que são usadas atualmente. No anexo 2, os principais impactos que estas podem proporcionar aos utilizadores finais e *utilities* são explicados.

2.2 Projeto ENERsip

O projeto europeu ENERsip teve como objetivo aumentar a eficiência energética em bairros residenciais, mudando o comportamento do consumidor final, de forma a otimizar o consumo com a produção local de origem renovável. Através de tecnologias de monitorização e controlo de cargas, o sistema ENERsip permite a otimização entre a geração e consumo utilizando plataformas M2M (Máquina a Máquina), sistema de informação e controlo automatizado com interface para os utilizadores. Este é um exemplo de projeto de *Smart Grids* desenvolvido para otimizar os recursos de energia num bairro de habitações (Moura, López, & Carreiro, 2012) (López, Moura, Moreno, & Almeida, 2013). Esta é a arquitetura que serve de base à arquitetura que vai ser desenvolvida na dissertação.

A arquitetura do ENERsip é híbrida, dadas as várias tecnologias existentes, e hierárquica uma vez que é composta por vários domínios hierárquicos. Na figura 2.2 pode-se observar a arquitetura do sistema sendo dividido em 4 domínios principais: o edifício, o bairro, o sistema de informação e o utilizador.

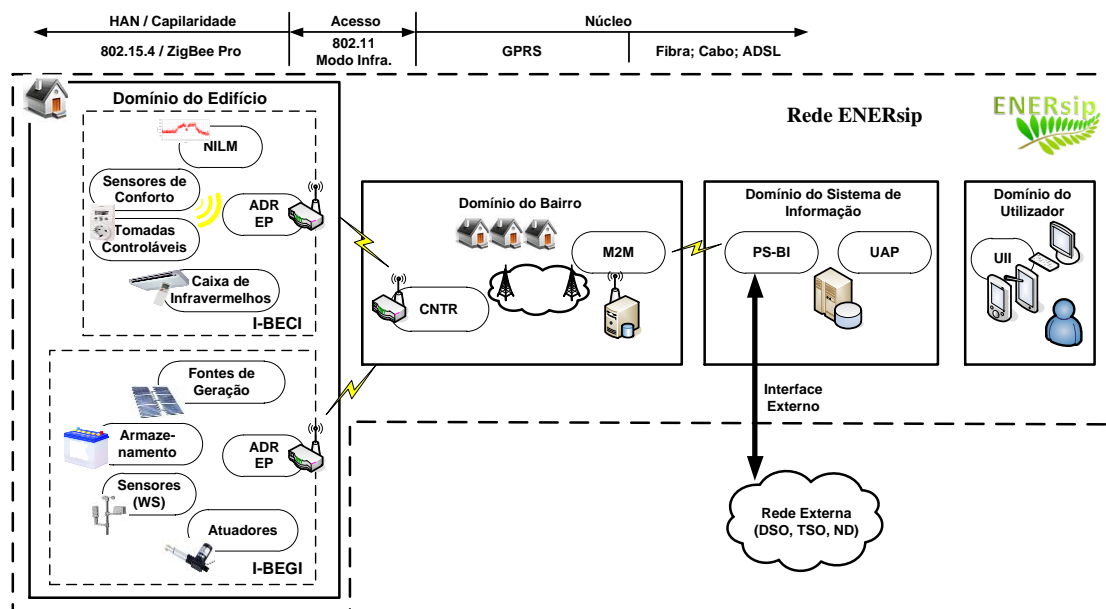


Figura 2.2 - Arquitetura global do sistema ENERsip (López et al., 2013)

O domínio do edifício é constituído pela I-BECI (Infraestrutura de Consumo de Energia) que contém os sistemas de monitorização e controlo do consumo, e pela I-BEGI (Infraestrutura de Geração de Energia) que agrega todo o equipamento das tecnologias de dos sistemas de geração.

Os principais blocos da I-BECI são: os sensores de conforto que asseguram a medição de variáveis (p. ex humidade, temperatura, concentração de CO₂ ou movimento) e transmitem os dados para o sistema de informação, as tomadas controláveis que atuam no controlo ON/OFF no fornecimento de energia no equipamento a que estão associadas e asseguram também a monitorização do consumo, o NILM (sistema de monitorização não intrusivo) que

permite a monitorização do consumo total da habitação, e ainda a caixa de infravermelhos que através de comandos de infravermelhos controla remotamente os equipamentos.

A I-BEGI é composta por equipamentos de geração local (p. ex. solar fotovoltaico e microturbinas eólicas), armazenamento de energia elétrica, um conjunto de sensores que integra uma estação meteorológica que é essencial para a previsão da geração, e um conjunto de atuadores, nomeadamente relés e inversores. As infraestruturas I-BECI e I-BEGI são ainda constituídas pelo ADR EP (Dispositivo Final de Comunicação), o dispositivo que permite o encaminhamento de informações para os outros domínios da plataforma bem como receber comandos do sistema de informação.

O domínio do bairro é constituído por uma rede de concentradores e pelas plataformas M2M. Os concentradores gerem um grupo de ADR EPs, assegurando a comunicação com a plataforma M2M que gere a rede de concentradores e assegura a sua comunicação com o sistema de informação.

O próximo domínio, designado sistema de informação, funciona como a zona de inteligência. Este domínio é dividido no PS-BI (Sistema Inteligente de Gestão de Energia) e na UAP (Plataforma de Aplicações do Utilizador). O PS-BI tem como função recolher todas as informações do consumo e geração. Estes dados são processados e enriquecidos com informação adicional (p. ex. previsões de consumo, geração e tarifas), para permitir ações que maximizam a eficiência do sistema em tempo real. O PS-BI fornece informações para a UAP que juntamente com o perfil do utilizador vai disponibilizar serviços para o aumento da eficiência energética, monitorização de conforto e otimização de serviços. Neste domínio é também realizada a interface com a *utility*.

O último domínio é o do utilizador consistindo numa interface web que permite ao utilizador explorar e interagir com a plataforma quando quiser e independente da sua localização.

A arquitetura do ENERsip funciona num sistema interligado e fornece serviços para diferentes tipos de utilizadores finais: utilizador do edifício, agregadores de consumo e geração, e operadores da rede de distribuição. Os principais serviços incluem:

- Monitorização, visualização e relatórios – estes serviços fornecem informação sobre o consumo e geração de energia, em tempo real, com os associados impactos económicos e ambientais; no caso da geração de energia fornece informação sobre a geração, tarifas e também disponibiliza cenários de previsão que vão ser importantes para os produtores na decisão entre consumir ou injetar energia na rede.
- Interação remota e controlo de equipamentos – usando uma interface web permite controlar (ON/OFF) remotamente os aparelhos ou ajustar as suas configurações; autoriza o consumidor a configurar certas regras que irão aplicar ações pré-definidas para equipamentos específicos de modo a adaptar a operação do equipamento para a necessidade do utilizador.

- Gestão de cargas – consiste em definir e gerir um conjunto de cargas elétricas que possam ser controlados pela plataforma em programas de *demand response* ou que possam ser deslocadas para outros períodos do dia (reagendamento da operação das cargas).
- Gestão de microrredes – informação recebida em tempo real pelos agregadores das cargas que são submetidas a programas de *demand response*;
- Operação do sistema de distribuição – informação recebida em tempo real pelos operadores da rede sobre a geração e consumo em vários locais, bem como previsões para o consumo/geração.

Em conclusão, o projeto ENERSip consiste numa plataforma inteligente em que o consumo de energia é controlado continuamente de forma a aumentar a eficiência energética e adaptando o consumo ao perfil da geração renovável local ao perfil de consumo dos bairros. A otimização do sistema de consumo e de produção faz com que consumos desnecessários sejam eliminados ou movidos para outro período e apresenta benefícios económicos e ambientais. No entanto, o ENERSip apresenta certas lacunas como a não utilização de sistemas de armazenamento de energia elétrica ao nível do posto de transformação, inexistência de *smart meters* e ainda de não contemplar a energia térmica no sistema juntamente com sistemas de armazenamento de energia térmica.

2.3 Armazenamento de Energia

O armazenamento de energia nos sistemas de distribuição de energia elétrica permite o ajuste entre a geração e a procura de energia elétrica. É um aspeto de grande importância, no sector da energia, possibilitando a integração da energia renovável em grande escala, particularmente fontes de energia renovável intermitente como a solar fotovoltaica e a energia eólica. Traduz o princípio de que toda a energia produzida não tem de ser consumida em tempo real, isto é, energia produzida em alturas de baixa procura ou baixo custo de produção, pode ser armazenada e devolvida para a rede em períodos de elevada procura ou elevado custo de produção.

Como a procura de energia está sujeita a variações horárias, diárias e sazonais, o armazenamento de energia possibilita a flexibilidade de transferir energia para os períodos quando esta é requerida. Outra vantagem das tecnologias de armazenamento é o facto de poderem ser instaladas em qualquer ponto da rede, permitindo o apoio à integração de fontes renováveis intermitentes e a mitigação do congestionamento.

Com as crescentes preocupações sobre os impactos ambientais na produção de energia, o mercado tem desenvolvido cada vez mais tecnologias de armazenamento com as suas performances melhorando constantemente. As tecnologias de armazenamento usadas nos sistemas de energia podem ser classificadas pela forma como o armazenamento ocorre, e incluem:

- Armazenamento de energia elétrica
 1. Supercondensadores;
 2. Supercondutores.

- Armazenamento de energia eletroquímica
 1. Baterias convencionais, tais como as ácidas de chumbo, de níquel, de íões de lítio, etc.;
 2. Baterias de células de fluxo, tais como as de brometo de zinco e brometo de vanádio.
- Armazenamento de energia cinética
 1. *Flywheels*.
- Armazenamento de energia potencial
 2. Aproveitamentos hidroelétricos reversíveis;
 3. Armazenamento de ar comprimido.
- Armazenamento de energia química
 1. Hidrogénio;
 2. Recombinação/dissociação de amónia.
- Armazenamento de energia térmica
 1. Sistemas com materiais sensíveis ao calor, tais como acumuladores de vapor ou água quente, grafite, rochas, seixos etc.;
 2. Sistemas de calor latente, tais como materiais de mudança de fase.

Nesta dissertação apenas irão ser detalhados os meios de armazenamento onde atualmente a comercialização em grande escala é possível: o armazenamento de energia elétrica e o armazenamento de energia térmica. Os armazenamentos de energia elétrica e térmica encontram-se desenvolvidos e detalhados nos anexo 3 e 4, respetivamente.

Capítulo 3

Requisitos do *Energy Router*

Neste capítulo é introduzido e analisado o conceito do *Energy Hub*. Com base nesta análise este conceito é aplicado ao sistema do *Energy Router*, para o qual são determinados os elementos que devem constituir o novo *Energy Hub*. Tal análise é feita de forma a definir um conjunto de requisitos e características para proporcionar o seu correto e viável funcionamento. A análise é realizada essencialmente com base nos rendimentos, potencialidades e custos associados.

3.1 O conceito do *Energy Hub*

Vários estudos científicos têm sido desenvolvidos para investigar cenários futuros das atuais infraestruturas de energia. Apesar de fornecerem resultados importantes estes, estudos apenas apresentam soluções que complementam os sistemas existentes. Em contraste, um projeto chamado *Vision of Future Energy Networks* iniciado pelo Instituto de Tecnologia Suíço (ETH), em Zurique (Suíça), pretende usar as sinergias através das várias infraestruturas de energia como uma grande oportunidade de melhorar os sistemas. Sob tais princípios, foram definidos os seguintes elementos chave: transformação, conversão, armazenamento das várias formas de energia em unidades centrais chamadas *Energy Hubs*, e combinação dos vários meios de transporte de energia de longas distâncias numa única tecnologia de transmissão denominado *interconector de energia* (Koeppel & Andersson, 2007).

3.1.1 Combinação das Infraestruturas de Energia

Os consumidores requerem vários serviços de energia fornecidos por diferentes infraestruturas, nomeadamente redes de energia elétrica, gás natural e redes de calor/frio. Atualmente, tais infraestruturas são planeadas e operadas independentemente. Uma combinação destes sistemas pode resultar num conjunto de benefícios. Tendo em conta as vantagens de cada tipo de energia, a sinergia destes sistemas pode ser alcançada de múltiplas formas: por exemplo, a eletricidade pode ser transmitida a longas distâncias com perdas reduzidas e o gás natural pode ser armazenado envolvendo apenas tecnologias simples e baratas. A combinação destas infraestruturas possibilita a existência de um único sistema de transporte e desse modo assegurar a transferência de energia entre os sistemas, com tecnologias de conversão de energia (p. ex. eletricidade em calor). Como conseguinte, têm sido desenvolvidos modelos e métodos para encontrar a junção ótima e transformação de energia entre os múltiplos sistemas de transporte de energia baseados em vários critérios, como o custo, emissões, eficiência energética, disponibilidade, segurança, entre outros parâmetros.

3.1.2 O conceito do *Energy Hub*

Um elemento chave do projeto *Vision of Future Energy Networks* é o chamado *Energy Hub*. Um *Energy Hub* consiste numa unidade central onde os vários sistemas de transporte de energia são acondicionados, e a energia é armazenada e convertida, representando uma interface entre diferentes infraestruturas de energia e/ou cargas. O bloco do *Energy Hub* tem como entradas várias infraestruturas de diferentes tipos de energia (p. ex. infraestruturas de eletricidade e gás natural) e fornece nas saídas os serviços de energia necessários, tais como eletricidade, calor, frio, ar comprimido, etc. de acordo com o perfil de consumo. Com este modelo a energia pode ser convertida e acondicionada usando, por exemplo, cogeração, sistemas de eletrônica de potência, compressores, permutadores de calor, e outras tecnologias. A figura 3.1 mostra um exemplo de um *Energy Hub*.

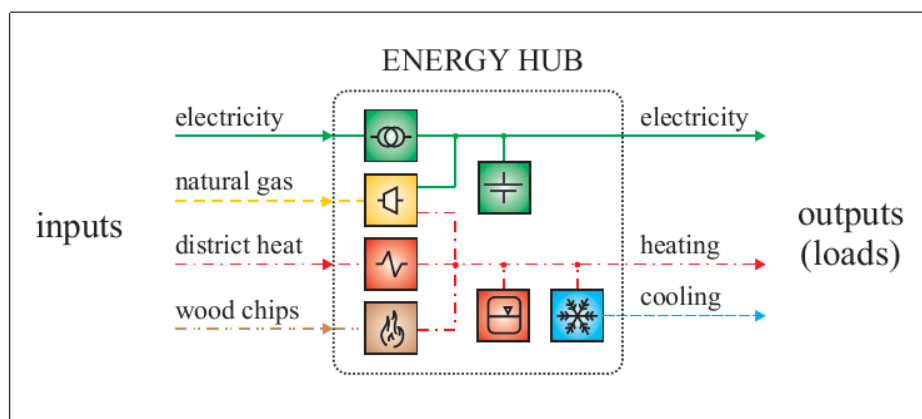


Figura 3.1 - Exemplo de um *Energy Hub* que contém um transformador, uma microturbina, um permutador de calor, um resfriador, uma bateria, e um armazenamento de água quente. (Geidl et al., 2007)

Os componentes que constituem o *Energy Hub* devem estabelecer conexões redundantes entre as entradas e as saídas. Por exemplo, a eletricidade para consumo, ligada à carga na figura 3.1, pode ter origem na rede elétrica ou ser gerada a partir do gás natural no *Energy Hub*. Esta transferência constante das diferentes formas de energia para corresponder às necessidades de consumo apresenta duas vantagens importantes: em primeiro lugar, há uma maior fiabilidade no abastecimento de energia na perspectiva da carga porque não é totalmente dependente de uma única rede de energia; em segundo lugar, o grau elevado de liberdade de fontes de energia e transformações permite a otimização no *Energy Hub* da forma mais rentável e eficiente possível. Os sistemas de transporte de energia que se podem ligar às entradas do *Energy Hub* são caracterizados de acordo com o custo, emissões, disponibilidade, entre outros critérios, assim como o fluxo (quantidade de energia transferida) dos tipos de energia que são requeridos e otimizados (Koeppel & Andersson, 2007).

Também a utilização de armazenamento de energia representa uma grande oportunidade para o aumento da performance do *Energy Hub*, especialmente quando existem fontes de energia com produção renovável intermitente em grandes quantidades. O armazenamento torna-se assim, uma ferramenta importante pois faz com que seja possível otimizar os fluxos

de energia compensando, por exemplo, os picos de consumo ou armazenando quando a procura de energia é reduzida ou existe excesso de produção.

3.1.3 Conclusões

Tipicamente, os *Energy Hubs* têm como entradas as infraestruturas comuns de energia na rede, como eletricidade, gás natural e DH (aquecimento urbano), que são convertidas e/ou acondicionadas no *Energy Hub*. Também pode ter entradas de combustíveis fósseis, por exemplo, petróleo e carvão. Adicionalmente, formas de energia como o hidrogénio, biomassa, biogás, energia geotérmica, resíduos municipais e gás de aterros podem também vir a ser uma opção futura.

As redes de energia que o *Energy Hub* integra podem ser simplesmente transmitidas sem conversão noutra forma de energia. Contudo, as energias na entrada podem ser convertidas para o propósito de arrefecimento, produção de ar comprimido ou vapor. Além dos sistemas de energia mencionados também se pode considerar entrada e saída de reações químicas e outros produtos como água, ar, emissões, lubrificantes e resíduos.

Existe um número de instalações reais que podem ser dimensionadas como um *Energy Hub*:

- Centrais elétricas (cogeração e trigeração);
- Instalações industriais (refinarias, siderurgias, fábricas de papel);
- Grandes edifícios (aeroportos, hospitais, shoppings);
- Sistemas de energia isolados (comboios, navios, aviões);
- Áreas geograficamente delimitadas (distritos urbanos e rurais, vilas, cidades).

O conceito do *Energy Hub* permite novas formas de projeto nos múltiplos sistemas de transportes de energia. O custo da energia e as emissões de gases podem ser reduzidos, a segurança e disponibilidade podem ser aumentadas, o congestionamento pode ser diminuído, e consequentemente a eficiência energética global pode ser melhorada (Geidl et al., 2007).

3.2 Conceito e objetivos do *Energy Hub* e do novo *Energy Router*

O conceito do *Energy Router* que vai ser desenvolvido na dissertação irá constituir um novo bloco baseado no *Energy Hub* apresentado na secção anterior, mantendo também a designação de *Energy Hub*. A diferença do *Energy Hub* que vai ser aplicado, comparando com o apresentado no capítulo anterior, consiste na utilização de uma infraestrutura de ICT, um conjunto de sensores, atuadores e um controlador central, que irá efetuar a otimização a aplicar nas tecnologias presentes no *Energy Hub* (conversão, armazenamento, etc). Assim, o *Energy Hub* vai consistir num bloco com entradas e saídas de redes de energia, nomeadamente eletricidade e energia térmica, constituído por elementos de conversão e armazenamento que possuem tecnologias de informação e comunicação de forma a monitorizar em tempo real todas as conversões e armazenamento que ocorram. Este é o conceito do *Energy Hub* que vai ser desenvolvido nesta dissertação fazendo parte da arquitetura do *Energy Router*.

O conceito do *Energy Router* surge como uma solução inovadora e global para os diversos problemas e desafios de eficiência energética nas cidades. A arquitetura do *Energy Router* pode ser definida como um conjunto de tecnologias de comunicação e controlo, possibilitando tomadas de decisão e gestão de diferentes redes de energia, de forma a coordenar e otimizar o consumo de energia, a geração renovável e o armazenamento, e manter um balanço adequado de geração-consumo em tais redes. O *Energy Router* pode ser aplicado a várias topologias, desde os edifícios residenciais, bairros, distritos e até mesmo ao nível de uma cidade inteira. O conceito do *Energy Router* associado às *Smart Grids* irá representar uma solução inovadora para otimizar os sistemas de energia permitindo um fluxo de informação em tempo real e troca de informação entre os edifícios, distritos, sistemas de armazenamento, redes de energia elétrica e redes de energia térmica.

O bloco do *Energy Router* vai integrar e processar informações vindas de diferentes subsistemas, como a geração de energia (elétrica e térmica), consumo e armazenamento num determinado bairro. As entradas devem incluir: previsões meteorológicas, monitorização da geração e do consumo de energia, monitorização do armazenamento e do fluxo de energia na rede.

Com uma execução em tempo real de algoritmos e com sistemas de controlo, o *Energy Router* deve permitir a gestão das redes de energia e otimizar a sua operação nas diferentes comunidades que engloba, fornecendo uma visão geral do desempenho de todos os sistemas, e executando em tempo real estratégias específicas de atuação, como a combinação da geração com o consumo.

Os algoritmos e os sistemas de suporte de decisões devem permitir criar o fornecimento de serviços específicos para cada comunidade ou cidadãos individuais que podem encontrar serviços adequados para os seus consumos como:

- Serviços de informação sobre o consumo de energia e oportunidades de poupança, personalizados para cada perfil de consumo;
- Recomendações sobre as melhores tarifas de energia;
- *Demand response* para as máquinas de lavar e secar roupa e outras cargas, como frigoríficos ou AVAC;
- Controlo otimizado do sistema de AVAC e outras cargas elétricas.

3.3 Elementos do *Energy Hub*

Nesta parte do trabalho os elementos necessários para a constituição e funcionamento do bloco do *Energy Hub*, vão ser identificados tendo como base o conceito original *Energy Hub* (secção 3.1).

Em termos de elementos básicos, o *Energy Hub* deve ser constituído por:

- Conexões diretas;
- Conversões;

- Armazenamento;
- Conexão com a energia elétrica de produção renovável.

Este conceito deverá ser desenvolvido ao nível do posto de transformação para um bairro, conjunto de apartamentos, edifícios de escritórios ou outros tipos de edifícios, e deverá dispor essencialmente de dois tipos de energia, a eletricidade e a energia térmica. Contudo, posteriormente também se pode considerar a introdução de um terceiro tipo de energia, o gás natural na entrada.

3.3.1 Conexões diretas

As conexões diretas são usadas para transmitir as formas de energia desde a entrada até à saída sem haver conversão noutra forma de energia e sem alterar a sua qualidade significativamente (p. ex. tensão elétrica ou pressão hidráulica). Os cabos elétricos, linhas aéreas e gasodutos são alguns exemplos deste tipo de elemento. Com as conexões diretas, a energia que entra no *Energy Hub* é aproximadamente igual à energia que sai, sem sofrer alterações significativas. De entre as formas de energia que entram no sistema, a eletricidade e a energia térmica são as únicas infraestruturas que vão apresentar conexão direta com o lado de consumo, isto porque já existem as suas respetivas infraestruturas de transporte e são estes os dois tipos de energia mais usados nos edifícios de habitação, comércio e serviços.

3.3.2 Conversões

Os elementos de conversão são usados para transformar uma certa forma de energia noutra forma de energia. Alguns exemplos destas tecnologias são as turbinas a gás ou vapor de água, motores de combustão interna, conversores termoelétricos, etc. Tecnologias como compressores, bombas, válvulas de controlo de pressão, transformadores, inversores de eletrónica de potência, filtros, permutador térmico e outros aparelhos são geralmente usadas para condicionamento, isto é, converter a mesma forma de energia em quantidades desejáveis de modo a serem consumidas pelas cargas. O modelo genérico, a aplicar nos conversores do *Energy Hub*, foi definido, em detalhe, no anexo 5 (secção 5.1).

3.3.3 Armazenamento

O terceiro elemento, o armazenamento de energia, também pode ser assegurado com diferentes tecnologias. A energia sob forma de líquidos, sólidos ou gases pode ser armazenada em tecnologias simples, como tanques e contentores. A eletricidade pode ser armazenada diretamente (p. ex., condensadores e tecnologias supercondutores) ou indiretamente (p. ex, baterias, células de fluxo, bombagem hídrica, *flywheels*, armazenamento de ar comprimido e células de combustível reversíveis). Na secção 5.2 do anexo 5 é apresentado o modelo para o armazenamento.

3.3.4 Conexão com a energia elétrica de produção renovável

O último elemento a introduzir no *Energy Hub* consiste numa entrada de rede de energia elétrica que tem o objetivo de transportar eletricidade produzida diretamente por fontes renováveis para o sistema de armazenamento. As tecnologias de produção renovável, como os painéis fotovoltaicos e microturbinas, que se encontram instalados nos edifícios e nas áreas circundantes a estes, normalmente produzem eletricidade com destino de consumo no próprio edifício, mas em períodos de baixa procura ou baixo custo, como períodos noturnos, esta energia pode ser deslocada para o *Energy Hub*, ser armazenada e posteriormente transferida para o consumo do próprio edifício ou até mesmo outros edifícios do bairro. Assim, este sistema possibilita o funcionamento otimizado, solucionando o problema da intermitência das fontes renováveis e aproveitando toda a energia elétrica gerada para o consumo.

3.4 Tecnologias para os elementos do *Energy Hub*

Nesta secção são analisadas as tecnologias a aplicar nos elementos do *Energy Hub*, com maior detalhe nas tecnologias de armazenamento de energia elétrica e térmica.

Considera-se inicialmente o *Energy Hub* como uma “caixa preta” composta por entradas e saídas, como pode ser observado na figura 3.2. As entradas correspondem a infraestruturas de energia elétrica e térmica vindas da rede e as saídas são as energias para o consumo. Para além disto, o *Energy Hub* tem conexões separadas para as tecnologias de armazenamento de energia térmica e elétrica, de forma a possibilitar o armazenamento da energia vinda da rede. Neste caso, a energia é transferida desde os edifícios até ao *Energy Router* para ser armazenada.

O objetivo geral consiste em concluir sobre as melhores tecnologias a instalar no armazenamento e determinar os elementos que devem constituir o interior do *Energy Hub*, ou seja, as ligações e tecnologias a aplicar com as dadas entradas e saídas.

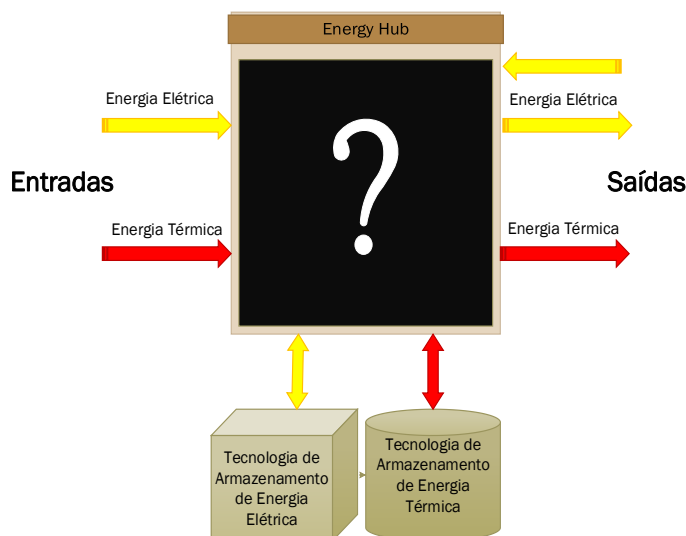


Figura 3.2 - Esboço inicial do *Energy Hub* do projeto

3.4.1 Conversão

Os elementos de conversão a integrar no *Energy Router* são principalmente os já utilizados nos sistemas atuais. Para a eletricidade utilizam-se os transformadores e para a energia térmica utilizam-se os permutadores de energia térmica. Estas tecnologias não efetuam conversão noutra forma de energia, apenas transformam em quantidades/qualidades desejáveis para as cargas de consumo. Com a introdução da rede de gás natural, existe a possibilidade de integrar sistemas de conversão do gás natural para a eletricidade e sistemas de cogeração para o aproveitamento de calor.

3.4.2 Armazenamento de Energia Elétrica

Os vários tipos de tecnologias de armazenamento exibem um largo espectro de rendimentos e capacidades de forma a corresponderem aos diferentes ambientes de aplicação e escalas. As tecnologias que atualmente são mais promissoras a introduzir ao nível do posto de transformação de forma a armazenar e fornecer eletricidade num bairro são as baterias. A tabela 3.1 resume os tipos de baterias a integrar no *Energy Hub* com as suas respetivas características.

Tabela 3.1 - Principais baterias com potencial para o *Energy Hub* (IRES, 2012)

Tipos de Baterias	NaS	Íões de lítio	Pb-ácido
Potência Nominal (MW)	0.5-50	0.1-5	<70
Energia nominal (kWh)	$6 \times 10^3 - 6 \times 10^5$	$10^{-2} - 10^5$	$10^2 - 10^5$
Tempo de Descarga	s-h	min-h	s-3h
Tempo de Recarga	~9h	min-h	8-16h
Densidade Energética (kWh/m^3)	<400	250-620	~75
Rendimento do ciclo (%)	85-90	90-98	80-90
Tempo de vida útil [anos]	12-20	8-15	3-15
Custo por potência (€/kW)	700-2000	700-3000	200-650
Custo por energia (€/kWh)	200-900	200-1800	50-300

Através de análise detalhada da tabela pode-se concluir que as baterias mais baratas são as de chumbo-ácido, no entanto estas podem apresentar tempo de vida útil baixo e densidade energética de apenas $75 kWh/m^3$. As baterias de íões de lítio são as que oferecem melhor rendimento, no entanto é uma tecnologia ainda cara quando comparada com as outras da tabela. As baterias de sódio-enxofre (NaS) apresentam características bastante satisfatórias tendo em conta o custo, com densidades energéticas de aproximadamente $400 kWh/m^3$, tempo de vida útil de 16 anos e rendimentos na ordem dos 90%. As baterias NaS foram as escolhidas a aplicar como exemplo de estudo na dissertação.

3.4.3 Armazenamento de Energia Térmica

O armazenamento de energia térmica inclui um grande número de tecnologias, cada uma com a sua aplicação específica, rendimento e custo. Os sistemas de armazenamento de

energia térmica, baseados em calor sensível, oferecem capacidade de armazenamento desde 10 kWh/t até 50 kWh/t com eficiências entre os 50% e 90%, dependendo do calor específico e da tecnologia de isolamento. Os materiais de mudança de fase podem oferecer uma elevada capacidade de armazenamento e eficiências energéticas desde 75% até 90%. O armazenamento por sistemas de reações termoquímicas consegue chegar a capacidades de mais de 250 kWh/t, com uma temperatura de operação superior a 300°C e eficiência desde 75% até perto de 100%.

O custo do sistema completo de armazenamento de calor sensível varia entre 0.1 €/kWh e 10 €/kWh dependendo do tamanho, aplicação, e da tecnologia de armazenamento. No caso dos PCMs, são necessários maiores custos associados às tecnologias de transferência de calor (e massa), as quais têm de ser dimensionadas para atingir potências suficientes de carga/descarga. O custo dos sistemas de calor latente baseados em PCM varia entre 10 €/kWh e 50 €/kWh, e o custo de sistemas de calor com reações termoquímicas varia desde 8 €/kWh até 100 €/kWh. A viabilidade económica de determinada tecnologia de armazenamento de energia térmica depende fortemente da sua aplicação e operação, inclusive da quantidade e da frequência dos ciclos de armazenamento (IRENA, 2013). Os sistemas de armazenamento baseados em material de mudança de fase foram os escolhidos a aplicar como exemplo de estudo na dissertação.

3.4.4 Conclusões

Após definir os elementos que vão constituir o bloco do *Energy Hub*, bem como as tecnologias que permitem a conversão e o armazenamento, foram obtidas duas possíveis hipóteses para o *Energy Hub* a desenvolver. A hipótese *Energy Hub 1* que integra entradas e saídas para as redes de energia elétrica e térmica, é constituído por um transformador, um permutador de calor e as tecnologias de armazenamento de energia elétrica e térmica. A hipótese de *Energy Hub 2* é semelhante à hipótese 1 tendo adicionalmente na entrada uma rede de gás natural e uma central de CHP, com uma turbina permitindo a conversão de gás natural em eletricidade e calor. Esta hipótese apenas se pode integrar em zonas onde existam redes de gás natural.

As hipóteses *Energy Hub 1* e *Energy Hub 2* são ilustradas nas figuras 3.3 e 3.4, respetivamente.

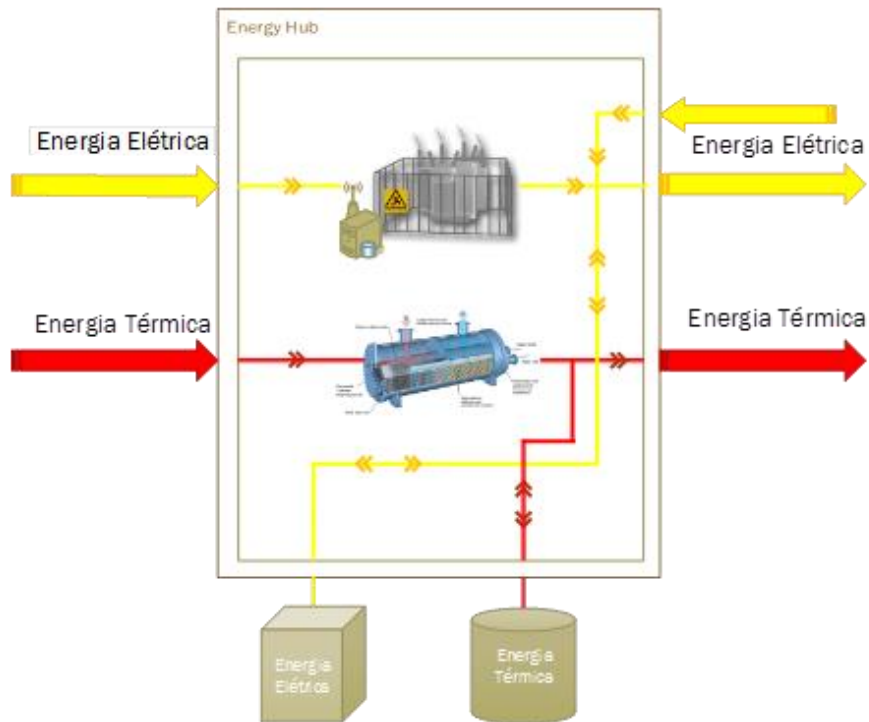


Figura 3.3 - *Energy Hub* com transformador, permutador de calor, armazenamento de energia elétrica e térmica

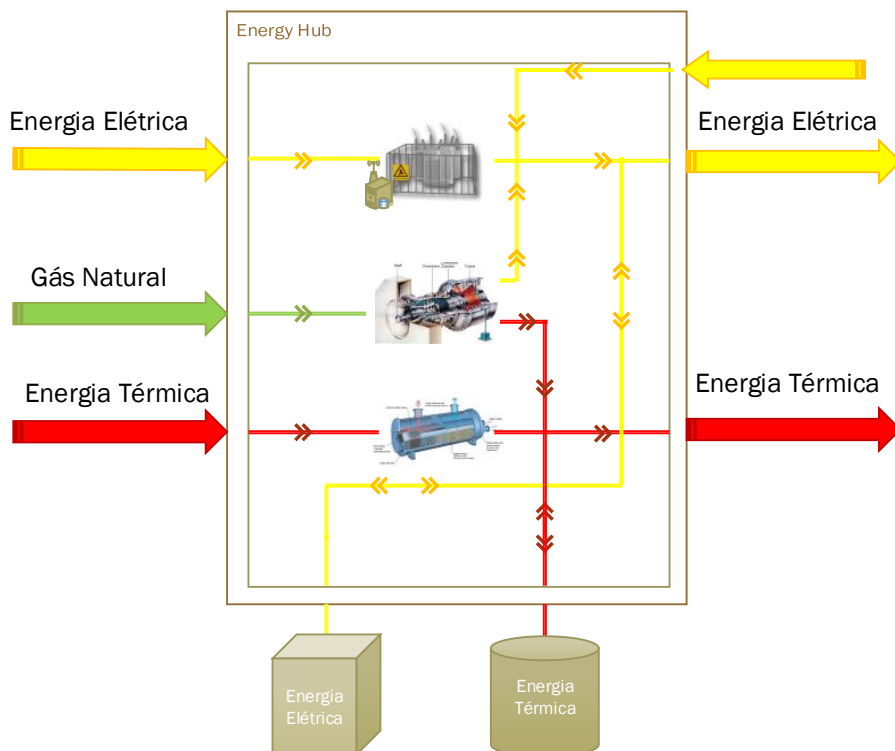


Figura 3.4 - *Energy Hub* com transformador, permutador de calor, central CHP, armazenamento de energia elétrica e térmica

Foram considerados os seguintes valores para os elementos de conversão:

- Eficiência do Transformador: $\eta_{ee}^T = 0.98$
- Eficiência da Turbina a gás (gás para eletricidade): $\eta_{ge}^{CHP} = 0.35$

- Eficiência da Turbina a gás (gás para calor): $\eta_{gc}^{CHP} = 0.45$
- Eficiência Permutador de calor: $\eta_{cc}^{PC} = 0.9$

Na figura 3.5 pode-se observar uma possível arquitetura do bloco do *Energy Hub*. Este é o caso mais complexo com uma rede de gás natural na entrada, sendo posteriormente convertido em eletricidade e energia térmica (CHP). Os fluxos de eletricidade estão a amarelo e os fluxos de energia térmica a vermelho. No lado do consumo (lado direito) foi introduzida uma entrada de energia elétrica para a geração renovável local. No armazenamento foram escolhidas as baterias do tipo NaS, para o caso de energia elétrica e sistemas com material tipo PCM, no caso da energia térmica. Este vai ser o bloco *Energy Hub* a integrar na arquitetura final do *Energy Router*.

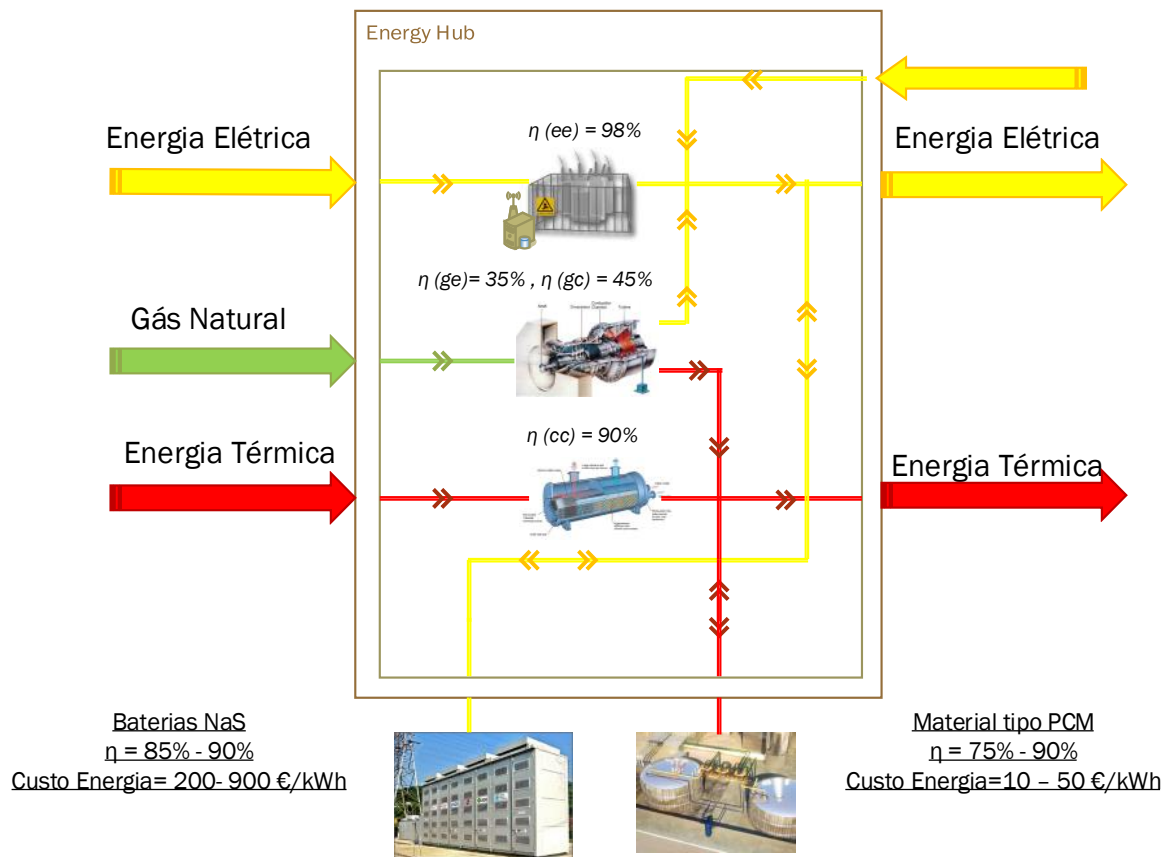


Figura 3.5 - Característica final do bloco do *Energy Hub* a aplicar na arquitetura do *Energy Router*

Capítulo 4

Arquitetura do *Energy Router*

Este capítulo fornece uma visão ampla de toda a arquitetura do *Energy Router* e de cada grupo que constitui o sistema, separadamente. As funcionalidades dos blocos de cada domínio do sistema são identificadas e descritas, bem como as interfaces entre tais blocos que pertençam ao mesmo grupo (interfaces intra-domínio), interfaces entre os blocos que pertençam a domínios diferentes (inter-domínio), e ainda as interfaces que permitem que as entidades externas comuniquem e interatuem com a plataforma do *Energy Router* (interfaces externas).

O objetivo global deste capítulo é definir uma arquitetura que englobe todo o sistema do *Energy Router* através da identificação detalhada de blocos com determinadas funcionalidades, bem como das interações entre tais blocos desde o nível do edifício até ao elemento que efetua a inteligência do sistema.

4.1 Arquitetura Global do *Energy Router*

O *Energy Router* vai ser focado no sistema de distribuição de energia elétrica (isto é, na média e baixa tensão) e de energia térmica. De forma mais precisa, a plataforma do *Energy Router* deve envolver os domínios do cliente, *utilities* e de operações, definidos no modelo conceptual de *Smart Grids* do NIST (*National Institute of Standards and Technologies*) (IEEE, 2013).

De forma a definir uma arquitetura detalhada e ajudar no desenvolvimento e implementação dos blocos que constituirão o *Energy Router*, o sistema foi dividido em domínios e subdividido em blocos, conforme a figura 4.1:

1. *Building Domain* (Domínio do Edifício)
 - 1.1. *In-Building Energy Consumption Infrastructure* (Infraestrutura de Consumo de Energia)
 - 1.2. *In-Building Energy Generation Infrastructure* (Infraestrutura de Geração de Energia)
2. *Neighborhood Domain* (Domínio do Bairro)
 - 2.1. *Energy Hub*
 - 2.2. *Energy Storage*
3. *Grid Management System Domain* (Domínio do Sistema de Gestão da Rede)
 - 3.1. *GMS Regional*
 - 3.2. *GMS Enterprise*

4. Decision Support System Domain (Domínio do Sistema de Suporte de Decisões)

4.1. Energy Router

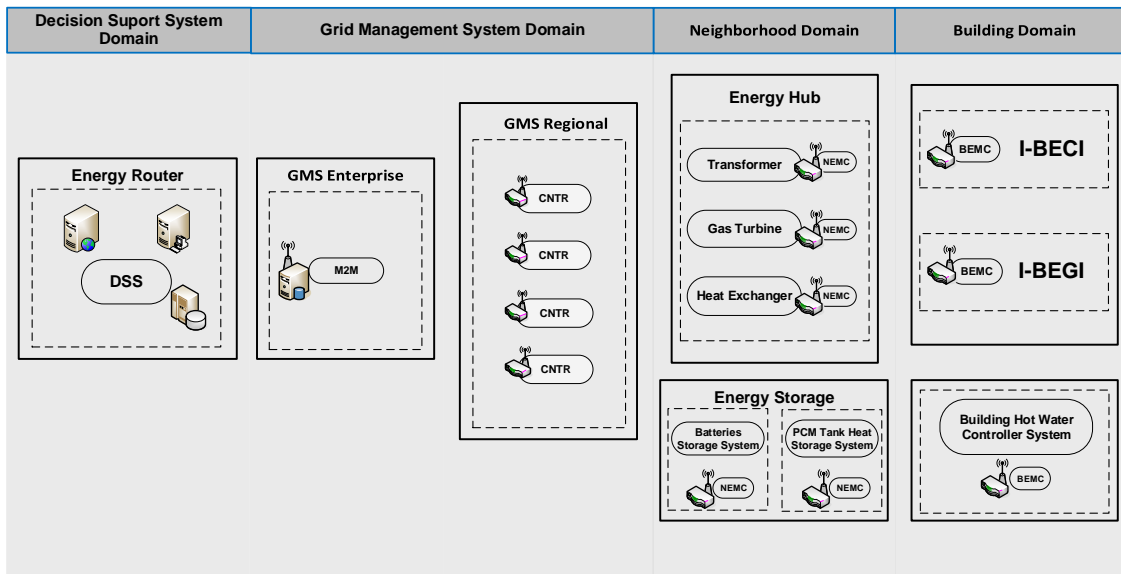


Figura 4.1 - Domínios e Blocos do Energy Router

Nesta secção, as principais características de cada domínio e dos blocos que o integram são descritas e definidas de forma a fornecer uma visão detalhada do sistema do *Energy Router*.

4.1.1 Building Domain

O *Building Domain* compreende toda a infraestrutura associada aos edifícios, incluindo os componentes de ICT que asseguram a monitorização e controlo dos equipamentos eléctricos, de modo a melhorar a eficiência energética e o conforto dos utilizadores. Com este cenário, os edifícios vão ainda interagir com o sistema, não só como consumidores de energia, mas também como geradores de energia através de tecnologias de geração instaladas nas suas infraestruturas ou áreas circundantes. Tal inclui painéis fotovoltaicos ou microturbinas eólicas para geração de energia eléctrica e, ainda, a possibilidade de instalação de um sistema de coletores solares para aquecimento de águas. Este grupo pode ser visto como o grupo físico do *Energy Router* que efetua todo o conjunto de operações necessárias para o funcionamento adequado do sistema ao nível dos edifícios.

A infraestrutura do *Building Domain* foi dividida em duas partes: *In-Building Energy Consumption Infrastructure (I-BECI)* – Infraestrutura de Consumo de Energia, e *In-Building Energy Generation Infrastructure (I-BEGI)* – Infraestrutura de Geração de Energia.

4.1.1.1 *In-Building Energy Consumption Infrastructure*

A *In-Building Energy Consumption Infrastructure* (I-BECI) corresponde a toda a infraestrutura de consumos de energia elétrica e térmica no edifício, sendo responsável pelas funcionalidades de monitorização, controlo e transmissão de informação dos elementos de consumo da energia do edifício, de forma a controlar o consumo dos aparelhos elétricos que constituem o edifício e também dos aparelhos de aquecimento do meio ambiente e da água. É assim necessário recorrer a sensores e atuadores de forma a assegurar a monitorização das várias variáveis e o controlo do estado de funcionamento dos equipamentos. É também essencial assegurar as comunicações entre os equipamentos distribuídos pelo edifício e o equipamento central, que concentre toda a informação recolhida pelos sensores e funcione como transmissor da informação para um nível superior de otimização do sistema. Com este cenário, os equipamentos elétricos atuais irão ser dotados de sensores e atuadores de forma a ter comportamento semelhante ao das chamadas *Smart Appliances* (eletrodomésticos “inteligentes”), tendo a capacidade de comunicar com o equipamento central, que envia informações e recebe comandos de controlo do *Decision Support System* (DSS).

Os sensores e os atuadores podem ser classificados em sensores de conforto e *plugs* (tomadas controláveis), e são detalhados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Funcionalidades dos sensores e dos atuadores

Sensores	Funções
<i>Sensores de Conforto</i>	<ul style="list-style-type: none">- Medir diferentes variáveis do ambiente interior melhorando o conforto, a eficiência energética, a fiabilidade e a segurança.- As grandezas que os sensores podem medir são a temperatura, movimento, luminosidade, humidade, qualidade de ar interior, detetores de fumo, fugas de gás ou fugas de água, etc. O conhecimento destas grandezas é muito importante para permitir o controlo dos equipamentos, como por exemplo, desligar o aquecimento caso a temperatura ambiente atinja um determinado nível.- Comunicam com o BEMC para enviar as informações recolhidas pelos diversos sensores.
Atuadores	Funções:
<i>Plugs</i>	<ul style="list-style-type: none">- Funcionam associados a aparelhos simples (como aquecedores elétricos) alterando os seus consumos com as opções de ON e OFF.- Medem o consumo de cada equipamento, que está ligado nessa tomada e esta informação é usada para desagregar os diferentes consumos por equipamento.- Comunicam com o BEMC (<i>Building Energy Management Controller</i>) para enviar os valores de consumo e receber comandos para realizar o controlo ON/OFF.

Os *Smart Meters* e as *Smart Appliances* apresentam as seguintes funcionalidades (tabela 4.2):

Tabela 4.2 - Funcionalidades dos *Smart Meters* e *Smart Appliances*

Dispositivos	Funções
<i>Smart Appliances</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorizam o consumo de energia dos eletrodomésticos de forma a obter um perfil de consumo do aparelho elétrico/térmico, apresentam também outras funções secundárias (segurança, temperatura, estado de operação, etc.). - Controlam o estado dos chamados eletrodomésticos "inteligentes" como HVAC, TV, máquinas de lavar, frigoríficos, micro-ondas, etc., possibilitando a diminuição do consumo de energia, desligamento ou ligamento (ON/OFF) à distância. - Comunicam com o BEMC para enviar os valores de consumo e receber comandos de modo a realizar o controlo ON/OFF.
<i>Electrical Energy Smart Meter</i>	- Regista o consumo de energia elétrica em intervalos de tempo ou em tempo real e comunica tais informações com o <i>Energy Router</i> para propósitos de monitorização.
<i>Thermal Energy Smart Meter</i>	- Comportamento semelhante ao anterior, mas neste caso aplica-se para a energia térmica.

A informação recolhida pelos sensores, tal como as variáveis do consumo, e a informação vinda de fora do domínio do edifício para os atuadores é gerida pelo BEMC (*Building Energy Management Controller*). Este dispositivo representa a interface entre o nível do edifício e o resto da plataforma do *Energy Router*, permitindo a comunicação de informação bidirecional entre as tecnologias da I-BECI e o Concentrador da *Grid Management System Regional* (GMS Regional). Este tipo de comunicação baseia-se em tecnologias de pequeno alcance, como redes sem fios. Ainda também nesta infraestrutura deve ser instalado um *Smart Meter* de Energia Elétrica para medir o consumo de eletricidade que entra no edifício (apartamento ou escritório), bem como um *Smart Meter* de Energia Térmica que mede o fluxo de água quente para o aquecimento do ambiente. O BEMC vai comunicar em tempo real com estes equipamentos de forma a fornecer dados e receber comandos do grupo de otimização DSS.

A infraestrutura no *Building Domain* vai ser ainda constituída por um bloco ligado à rede de energia térmica chamado *Building Hot Water Controller System*, com o qual é possível controlar a temperatura da água para fins domésticos ou para aquecimento do meio ambiente nos serviços comuns do edifício. A instalação deste sistema de controlo é independente do I-BECI, uma vez que engloba um edifício completo com muitas habitações, ou seja, pode vir a fornecer água quente para vários apartamentos e divisões do edifício. Este bloco vai ser constituído por tanques que armazenam água quente temporariamente, sensores de temperatura, atuadores que possibilitam o controlo do fluxo de água quente (*Pump, Control Valves*), e ainda um sistema central de controlo que permite gerir o sistema a nível local ou remotamente comunicando com o BEMC a fim de enviar dados e receber comandos do DSS.

A figura 4.2 ilustra a *In-Building Energy Consumption Infrastructure* (I-BECI).

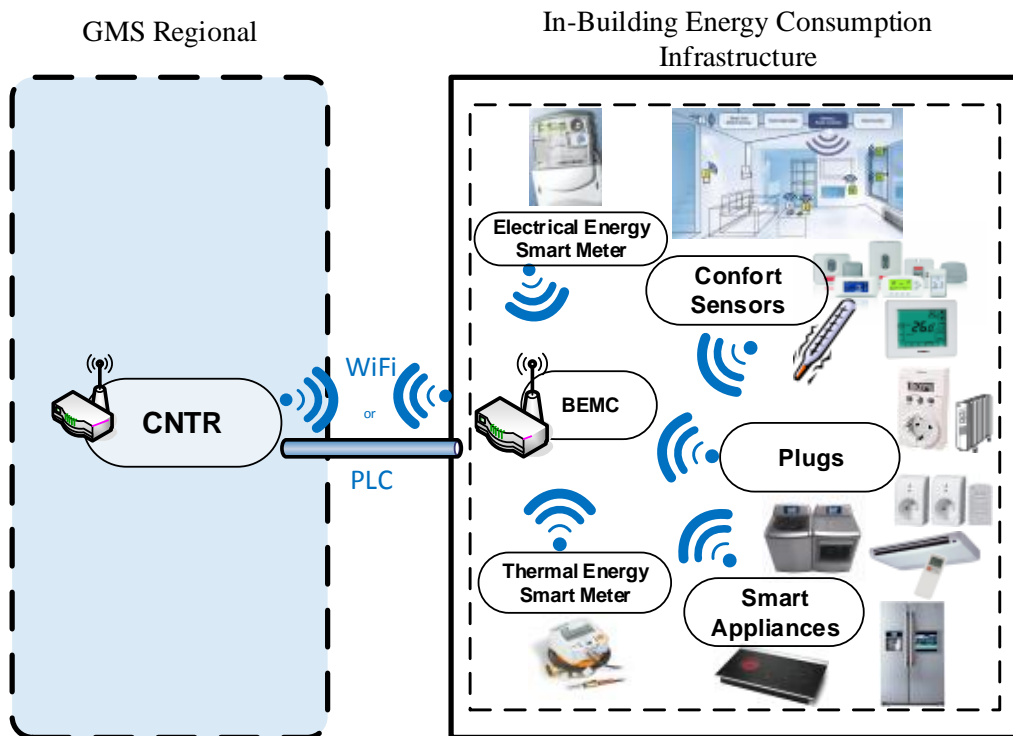


Figura 4.2 - In-Building Energy Consumption Infrastructure

A figura 4.3 ilustra o bloco *Building Hot Water Controller System*.

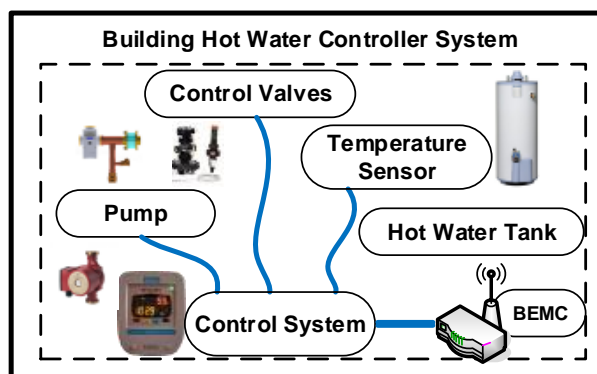


Figura 4.3 - Building Hot Water Controller System

4.1.1.2 In-Building Energy Generation Infrastructure

A *In-Building Energy Generation Infrastructure* (I-BEGI) é responsável pelas funcionalidades de monitorização e transmissão dos dados relativos aos elementos ligados a tecnologias de geração de energia integradas no edifício. A infraestrutura é constituída por equipamento de geração de eletricidade, como painéis fotovoltaicos e microturbinas eólicas, inversores, um conjunto de sensores e atuadores e o dispositivo central de interface entre o nível do edifício e a plataforma do *Energy Router*, com as mesmas funções do caso da infraestrutura anterior. A figura 4.4 ilustra a *In-Building Energy Generation Infrastructure* (I-BEGI).

O objetivo principal dos sensores consiste em medir variáveis relacionadas com a meteorologia (p. ex. temperatura, humidade, direção e velocidade do vento, radiação solar) de modo a fornecer ao DSS informação relevante para prever cenários de geração futuros. Como sensores, também irão funcionar os *smart meters* para monitorizarem a geração de eletricidade, associados a cada tecnologia de geração (painéis fotovoltaicos e microturbinas eólicas), e o analisador da rede que mede os parâmetros da rede de energia elétrica, comunicando ambos com o BEMC.

Os atuadores incluídos nesta infraestrutura são os relés dedicados a ligar e desligar os equipamentos, os inversores que realizam a conversão DC-AC, os sistemas de seguimento do sol para painéis fotovoltaicos de dois ou quatro eixos e o sistema de controlo das microturbinas eólicas para cenários de ventos fortes.

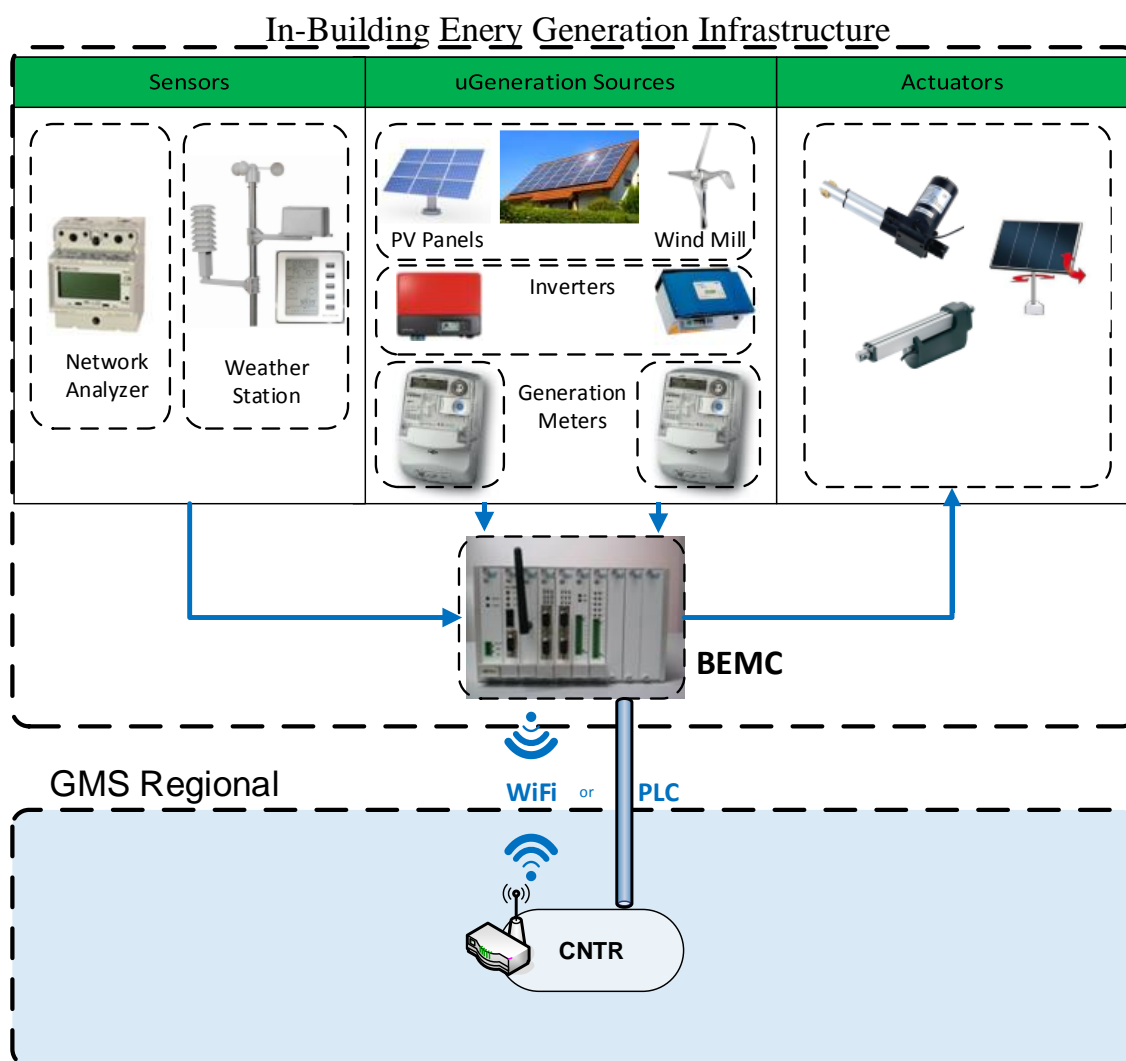


Figura 4.4 - In-Building Energy Generation Infrastructure

4.1.2 Neighborhood Domain

Este grupo pode ser visto como o segundo grupo físico do *Energy Router* que efetua todo o conjunto de operações necessárias para o funcionamento correto do sistema ao nível do

bairro. O *Neighborhood Domain* vai integrar as tecnologias de conversão que constituem o posto de transformação de energia elétrica e térmica, e ainda tecnologias de armazenamento de energia. Este sistema irá melhorar a gestão das redes de energia devido às capacidades adicionais de controlo proporcionadas pelo armazenamento. O *Neighborhood Domain* vai ser constituído por dois blocos: o *Energy Hub* e a *Energy Storage*.

A figura 4.5 ilustra o *Neighborhood Domain* e a sua comunicação com os concentradores do *GMS Regional*.

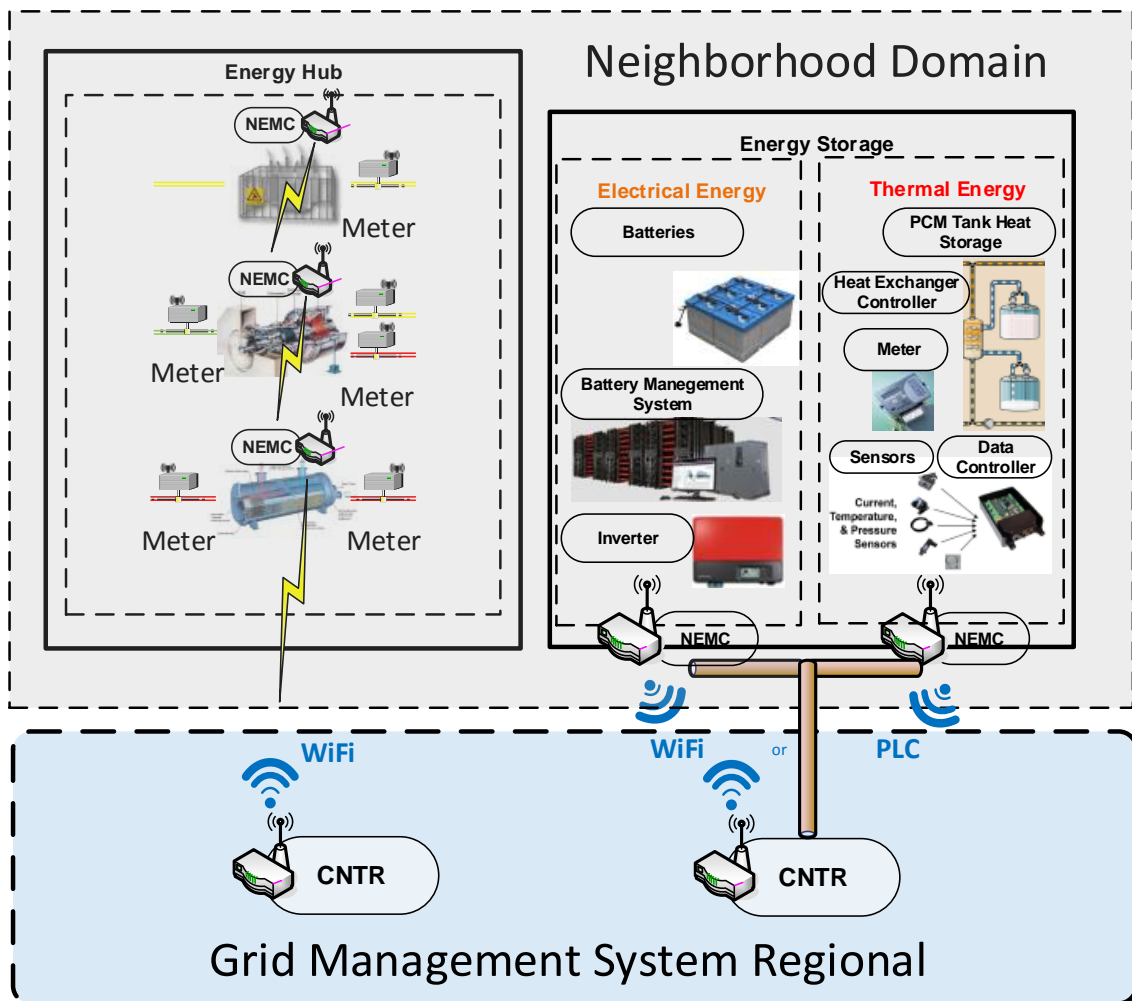


Figura 4.5 - *Neighborhood Domain*

4.1.2.1 *Energy Hub*

O *Energy Hub*, que foi apresentado no capítulo anterior, é constituído por três elementos de conversão de energia, o transformador para a energia elétrica, um permutador de calor para a energia térmica e, por fim, a turbina a gás que permite a conversão de gás natural em energia elétrica e calor. Em cada elemento de conversão vai ser introduzido um *Smart Meter* de forma a monitorizar o fluxo de energia antes e após a conversão, que irá comunicar com o seu respetivo *Neighborhood Energy Management Controller* (NEMC), que encaminha a informação para o sistema de otimização DSS.

4.1.2.2 *Energy Storage*

O segundo bloco diz respeito ao armazenamento de energia elétrica e térmica. Os elementos que constituem o sistema de armazenamento de energia elétrica são as baterias, o inversor de forma a permitir a carga e a descarga das baterias e o elemento que permite a gestão de energia nas baterias, *Battery Management System* (BMS). Este sistema permite gerir o funcionamento das baterias, possibilita a monitorização do seu estado e assegura a operação de carga e descarga com segurança, prolongando o tempo de vida das baterias. Permite ainda o envio de comandos para o inversor, baseados na atividade dos fluxos de energia e integração de sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA), de forma a permitir a interoperabilidade entre o armazenamento e os comandos de controlo do DSS. Os elementos que constituem o sistema de armazenamento de energia térmica são: os tanques com material de mudança de fase, o *Smart Meter*, os sensores de temperatura e de pressão, o *Data Controller* e o *Heat Exchanger*. O *Data Controller* está ligado aos sensores de temperatura e pressão e monitoriza, em tempo real, os fluxos de água quente permitindo o adequando funcionamento da carga e descarga da energia nos tanques. O *Heat Exchanger* permite transferir o calor da água para o tanque de material PCM e vice-versa dependendo do estado de operação.

Ambos os sistemas de armazenamento de energia irão integrar um elemento NEMC, que permite a transmissão de dados para o DSS e envio de comandos de controlo às tecnologias de armazenamento.

4.1.3 *Grid Management System Domain*

Este domínio é responsável pela ligação entre o *Building Energy Management Controller* (BEMC) e o *Neighborhood Energy Management Controller* (NEMC) com o *Decision Support System* (DSS). É dividido em dois dispositivos: *GMS Regional* e *GMS Enterprise*. O *GMS Regional* é onde se encontram os concentradores (CNTR) que agregam e encaminham a informação obtida pelas tecnologias dos domínios ao nível dos edifícios, do bairro e do posto de transformação. A informação é, posteriormente, transmitida para o *GMS Enterprise*. O *GMS Enterprise* é representado por uma infraestrutura M2M que permite monitorização, gestão e controlo de um grande volume de dispositivos de geração e consumo de um bairro inteiro, remotamente. O GMS tem, assim, como função principal assegurar a transmissão de informação entre os BEMC's, os NEMC's e o sistema DSS e vice-versa.

A figura 4.6 ilustra o *GMS Domain* com os seus principais componentes e respetivas interações.

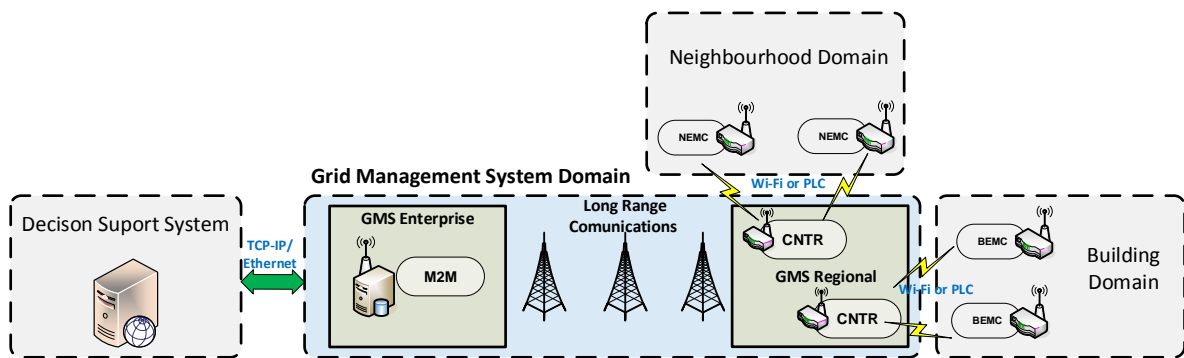


Figura 4.6 - Grid Management System Domain

Na tabela 4.3 encontram-se as principais características dos dispositivos que constituem o *Grid Management System Domain*.

Tabela 4.3 - Características dos dispositivos M2M e CNTR

Dispositivo	Principais Características
Plataforma M2M	<ul style="list-style-type: none"> -Comunica com o DSS usando protocolos TCP/IP; -Controlo do fluxo de energia; -Segurança nas comunicações; -Segurança no acesso aos dispositivos; -Contenção e retransmissão das mensagens; -Encaminhamento dos eventos e dos comandos.
CNTR	<ul style="list-style-type: none"> -Comunica com os BEMC e NEMC usando dois canais de comunicação: <ol style="list-style-type: none"> 1- Canal de Informação baseado em comunicações móveis (GPRS); 2- SMS over GMS (usado em caso de falha do primeiro canal como backup); -Suporta canais de comunicação de longo alcance (para comunicar com plataforma M2M); -Suporta canais de comunicação, de curto alcance (para comunicar com os dispositivos BEMC e NEMC); -Gestão das conexões com os dispositivos BEMC e NEMC; -Encaminhamento das mensagens para o dispositivo apropriado BEMC ou NEMC (podendo comunicar para apenas um ou para vários ao mesmo tempo).

4.1.4 Decision Support System (DSS)

O *Decision Support System* é o “cérebro” do *Energy Router*. Este sistema tem como função agregar todas as informações relacionadas com a energia do conjunto de subsistemas, enviar os comandos de controlo dos dispositivos, assegurar os serviços de monitorização e previsão para os utilizadores finais, permitindo automaticamente determinar a melhor estratégia de utilização da energia de forma a reduzir custos e impactos ambientais.

O bloco DSS irá agregar a informação disponível de todas as fontes, incluindo consumos de energia, dados de energia gerada, energia armazenada, e dados dos fluxos de energia nos conversores do *Energy Hub*, a qual é constantemente sincronizada com a informação sobre a meteorologia e tarifas da energia. Esta informação, juntamente com os serviços de gestão automatizada dos equipamentos, pode ser disponibilizada aos utilizadores finais.

O DSS vai funcionar como o sistema de otimização da plataforma do *Energy Router*. Este bloco vai abordar o *Energy Router* como um sistema complexo, localizando os problemas a níveis local e global, e resolvendo os mesmos com métodos coordenados. Por outras palavras, através do estudo e análise da arquitetura do *Energy Router*, o DSS vai isolar zonas homogêneas com comportamentos e objetivos semelhantes e aplicar algoritmos de otimização em diferentes níveis, com coordenação. Graças à combinação de tais métodos independentes, o DSS irá garantir flexibilidade em termos da dimensão do sistema e permite a aplicação em diferentes cenários e modelos.

O capítulo 5 vai focar-se no desenvolvimento do DSS tendo como objetivo definir regras e algoritmos de otimização do sistema do *Energy Router*.

A figura 4.7 ilustra o *DSS Domain*. O bloco que constitui o *DSS Domain* é denominado por *Energy Router* visto que é o sistema central de computação de toda a arquitetura. Na figura foram colocados três elementos, dentro do *Energy Router*, que representam os elementos necessários principais para permitir o funcionamento do DSS: o elemento de armazenamento dos dados recolhidos, o elemento de computação e otimização, e o elemento de transmissão da informação.

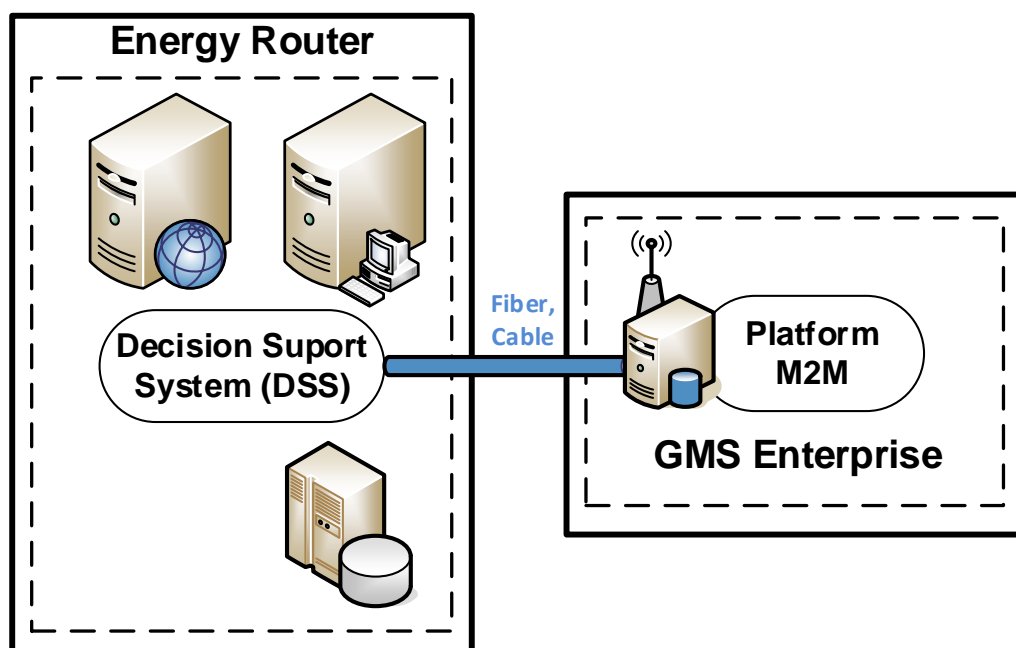


Figura 4.7 - *Decision Support System Domain*

O *Energy Router* pode também permitir a terceiros (nomeadamente agregadores) o fornecimento de serviços de valor acrescentado baseados no perfil do utilizador e na informação monitorizada.

Dos principais serviços para utilizadores finais inclui-se:

- Acesso a serviços e dispositivos disponíveis relacionados com a eficiência energética, monitorização do conforto e otimização;

- Visualização, em tempo real, da informação relacionada com o uso dos eletrodomésticos e possíveis modificações nos padrões de consumo proposto pelos algoritmos de gestão de energia;
- Visualização, em tempo real, da informação relacionada com a geração de energia, condições ambientais e tarifas de energia atuais;
- Apresentação de perfis dos utilizadores, padrões e comportamentos de consumo específicos;
- Gestão remota dos aparelhos e serviços disponíveis através da internet.

4.2 Diagrama de Blocos da Arquitetura Global do *Energy Router* e Interfaces

A figura 4.8 mostra o diagrama de blocos geral do *Energy Router*, especificando os blocos definidos em cada domínio, bem como as interfaces de comunicação entre eles. Note-se que apenas as interfaces de comunicação estão especificadas na figura 4.8, não estão incluídas as interfaces físicas. No anexo 6 estão detalhadas todas as interfaces entre os blocos que constituem a arquitetura do *Energy Router*, sendo divididas em dentro do domínio - *Intra-Domain* (interfaces entre blocos que pertencem ao mesmo domínio) e fora do domínio - *Inter-Domain* (interfaces entre blocos que pertencem a domínios diferentes).

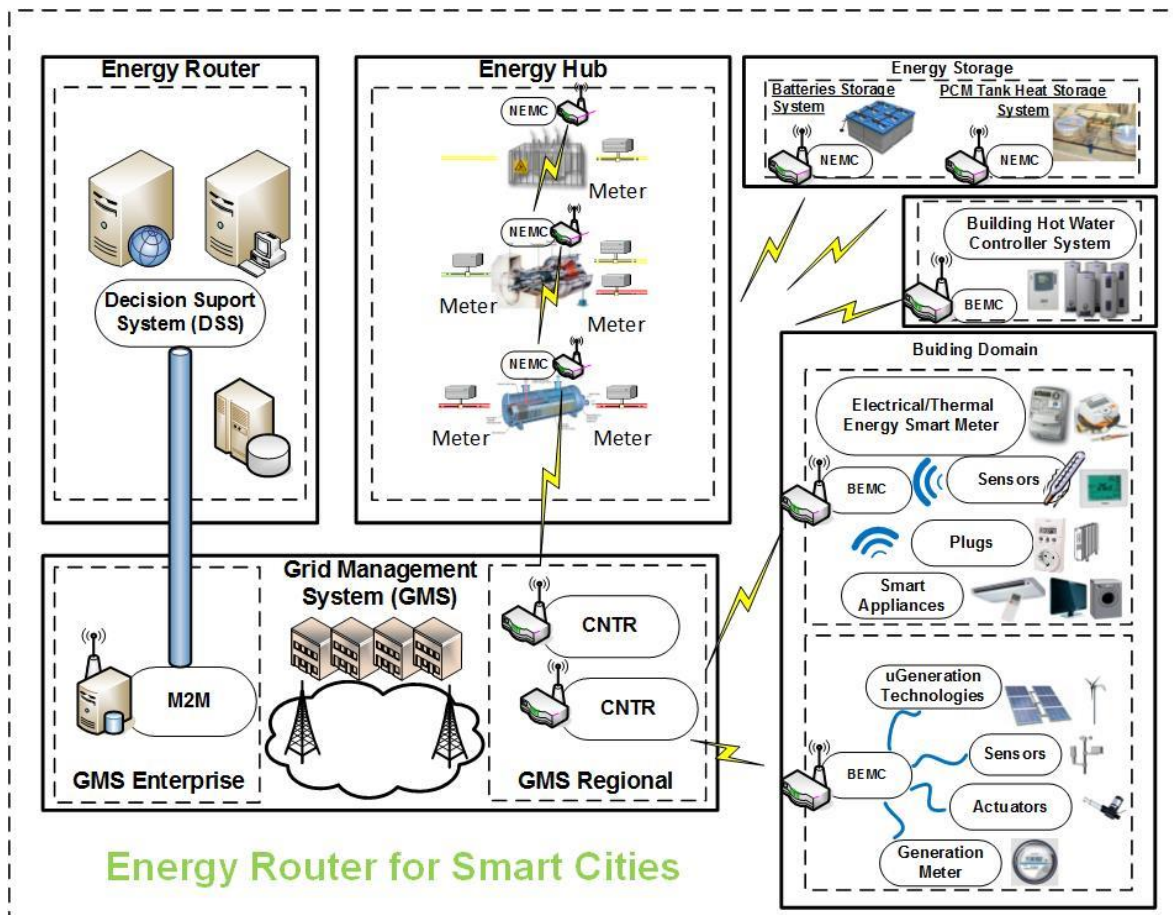


Figura 4.8 - Arquitetura Global do Energy Router

Capítulo 5

Otimização do *Energy Router*

Na otimização do *Energy Router* tem que se encontrar o equilíbrio perfeito entre a disponibilidade, fiabilidade, eficiência e custo. Inicialmente, as *smart appliances*, os *smart meters* e os sensores recolhem informação. De seguida, o DSS analisa tais dados e aplica ações de otimização de modo a utilizar ao máximo os recursos que constituem o sistema.

O objetivo deste capítulo é definir as regras de otimização do sistema do *Energy Router*, ou seja, estabelecer algoritmos de controlo de modo a proporcionar uma gestão eficiente de toda a arquitetura do *Energy Router*. Para tal, deve-se ter em conta todas as restrições possíveis que podem acontecer em cada situação real, como diferentes níveis de geração local, diferentes perfis de consumo, disponibilidade do armazenamento, disponibilidade de cargas para controlar, diferentes custos, entre outros. Neste capítulo, vai ser estabelecido o conjunto de ações a aplicar em cada situação, para obter uma otimização em tempo real, possibilitando a melhor estratégia para o uso da energia que é gerada, armazenada e consumida em toda a arquitetura do *Energy Router*.

5.1 Objetivos

Para determinar o modelo de otimização do *Energy Router* são considerados os seguintes objetivos:

- Utilizar ao máximo os recursos disponíveis;
- Reduzir a dependência da rede de energia;
- Diminuir os custos de compra da energia.

A utilização ao máximo dos recursos disponíveis significa utilizar internamente toda a geração local e fornecer tal energia para os consumidores. Como fornecedores de energia tem-se a *In-Building Energy Generation Infrastructure* e a energia vinda da rede através do *Energy Hub*. Existe ainda a possibilidade de utilizar a energia disponível nas tecnologias de armazenamento e as cargas controláveis de modo a mover tais consumos para períodos mais adequados de acordo com a geração e custos de energia.

O segundo objetivo está fortemente relacionado com o primeiro, uma vez que vai ser decisivo para a escolha de certos recursos. Isto significa que, em certos períodos, ao utilizar toda a energia gerada localmente a quantidade de energia a fornecer pela rede vai diminuir. Ao diminuir a energia fornecida pela rede, os custos também vão diminuir, satisfazendo assim, as necessidades dos consumidores de uma forma mais económica, como representa o terceiro objetivo.

Inicialmente, vai ser desenvolvido o modelo de otimização para a rede de energia elétrica e, posteriormente, este será adequado também à rede de energia térmica, que está apresentado no anexo 8.

5.2 Elementos de Otimização

O sistema de energia elétrica a otimizar tem como elementos as cargas consumidoras (representadas por um perfil de consumo), painéis fotovoltaicos como fontes de energia elétrica renovável, baterias para armazenar o excesso de energia e melhorar a fiabilidade do sistema e, por último, a ligação à rede de energia elétrica através do *Energy Hub* para quando é necessário e/ou económico a compra de eletricidade da rede. Os componentes do sistema e as direções dos fluxos são mostrados na figura 5.1.

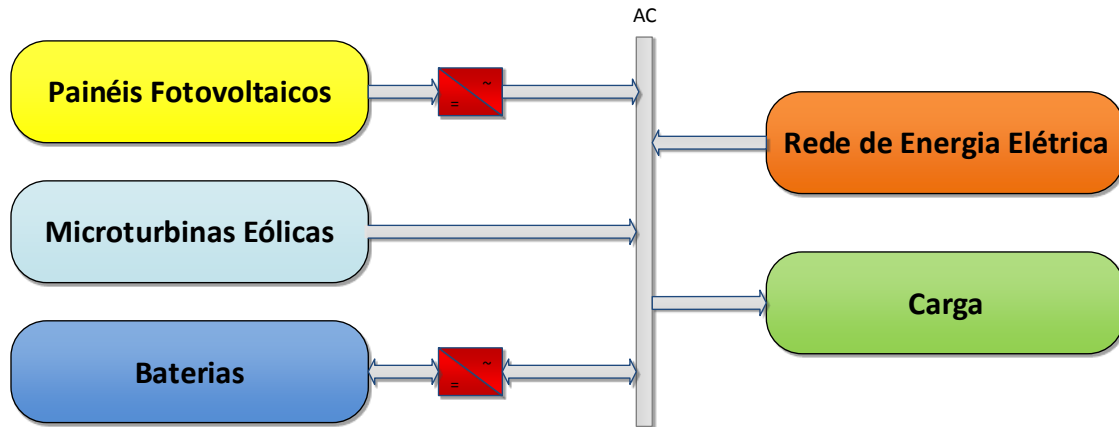


Figura 5.1 - Componentes do sistema e respetivas direções de fluxos de energia a otimizar

Como perfil de consumo vai ser usado o gráfico de consumo de eletricidade para um típico dia útil do ano de uma habitação característica na Europa, apresentado na figura 5.2. Este gráfico foi obtido como resultado de campanhas de monitorização em habitações na Europa no âmbito do projeto REMODECE, tendo o objetivo de contribuir para um aumento de conhecimento detalhado dos consumos atuais de eletricidade pelas habitações na Europa através de diferentes tipos de equipamentos, estilos de vida dos consumidores e níveis de conforto (Fonseca, Markogiannakis, Kofod, & Feilberg, 2009).

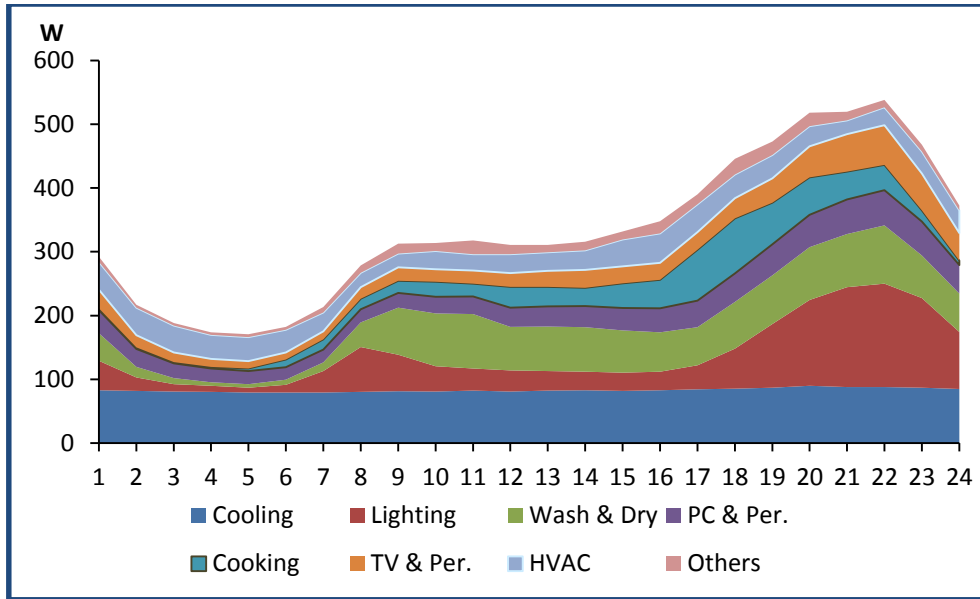


Figura 5.2 - Consumo de eletricidade para o dia médio de uma habitação típica na Europa (Fonseca et al., 2009)

O perfil de consumo é detalhado pelos diferentes tipos de cargas. Neste caso, os consumos são apresentados de forma agregada de modo a representar o consumo total a cada período. A figura 5.3 mostra em detalhe a percentagem de consumo de cada tipo de equipamento tendo em conta o consumo total por ano. Através desta figura, é possível verificar que os maiores consumos encontram-se nos equipamentos de refrigeração e na iluminação, mas também, as máquinas de lavar e secar apresentam percentagens significativas. Dados os elevados consumos medidos nestas áreas pode-se partir do princípio que os maiores impactos em controlar cargas também se irão verificar nestas áreas, exceto na iluminação por influenciar o conforto dos utilizadores.

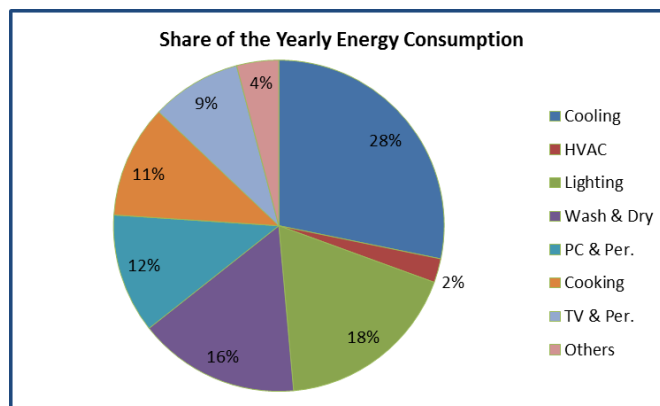


Figura 5.3 - Comparativo de consumo de energia anual por tipo de equipamento

Durante a operação do sistema do *Energy Router*, em cada momento, a carga necessita de ser satisfeita e, por esse motivo, o equilíbrio entre a geração, armazenamento e o uso de energia da rede tem de ser atingido.

$$P_{PV} + P_{Wind} + P_{Batt} + P_{Grid} + P_{load} + P_{loss} = 0 \quad Eq. 5.1$$

Em que:

- P_{PV} – Potência gerada pelos painéis fotovoltaicos;
- P_{Wind} – Potência gerada pelas microturbinas eólicas;
- P_{Batt} – Potência de carga e descarga das baterias;
- P_{Grid} – Potência proveniente da rede de energia elétrica;
- P_{load} – Potência de consumo;
- P_{loss} – Perdas de energia no sistema agregadas.

O equilíbrio pode ser alcançado através do encaminhamento da energia para ou das baterias usando estratégias de controlo implementadas pelo sistema de gestão das baterias e com o uso das cargas controláveis. Além disso, as restrições para os componentes do modelo de otimização têm de ser definidas. No anexo 7 são apresentados e desenvolvidos os seguintes elementos de otimização: os painéis fotovoltaicos, as microturbinas eólicas, as baterias e o sistema de gestão das baterias, com indicação das respetivas restrições.

5.3 Custo da Energia da Rede

Atualmente, devido aos incentivos à microgeração, a geração local de energia nas habitações é vendida totalmente para a rede, e toda a energia consumida é comprada da rede originando maiores fluxos de energia. Adicionalmente, as tarifas atuais não fornecem incentivos suficientes para os utilizadores finais, não assegurando o consumo da energia gerada localmente e uma otimização da energia efetiva.

No entanto, as tarifas em tempo real permitem incluir todos os problemas que afetam o sistema de energia em cada momento (p. ex., custos de geração, fiabilidade, segurança, e emissões de gases poluentes GHG) e, portanto, fornecer os incentivos necessários para assegurar a otimização do sistema. De forma a avaliar os impactos da otimização do *Energy Router*, a utilização das tarifas em tempo real é a forma mais apropriada para cenários futuros.

Com o intuito de simular o valor das tarifas, em tempo real, da energia elétrica da rede vão ser utilizados os valores usados também para avaliar os impactos do projeto ENERSip (Moura et al., 2012).

A figura 5.4 mostra os perfis do consumo energético e dos custos de energia no MIBEL (Mercado Ibérico de Eletricidade). Estes perfis foram obtidos com valores médios por hora durante o ano 2011. Na figura o ponto de carga máximo (pico) é representado com o valor 100% e os custos mais elevados estão associados aos picos de carga, sendo também representados com o valor 100%. Como é visível na figura, ambos os perfis apresentam variações semelhantes com uma correlação elevada, cerca de 93%. Portanto, os custos (percentagem do custo mais elevado), em cada hora, podem ser representados pela fração de carga máxima consumida na mesma hora.

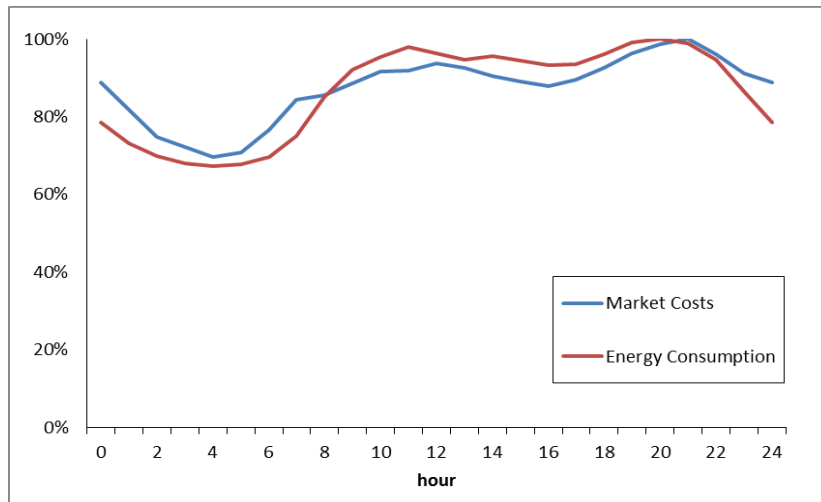


Figura 5.4 - Perfis do consumo de energia elétrica e custos (Moura et al., 2012)

A mesma abordagem poderia ser usada para as tarifas da energia gerada localmente. Nos próximos anos, o mercado horário de compra de eletricidade gerada localmente deverá apresentar tarifas elevadas nas horas de maior consumo. No entanto, num mercado de energia sem incentivos, o custo da geração local deve ser sempre inferior aos custos de compra de energia no mercado. A partir do gráfico acima, o custo para uma dada hora pode ser dado pela seguinte equação:

$$C_h = (EC_h - SC_h)PL_h - (EG_h - SC_h)(PL_h * R_h) \quad \text{Eq. 5.2}$$

Em que:

- C_h - Custo por hora;
- EC_h - Consumo de energia por hora;
- EG_h - Geração de energia por hora;
- SC_h - Autoconsumo por hora;
- PL_h - Percentagem da carga máxima por hora (picos);
- R_h - Rácio de custos entre a geração e o consumo por hora.

Sempre que houver necessidade de comprar energia da rede elétrica para satisfazer as necessidades dos consumidores, as tarifas de compra variam por hora, dependendo assim do consumo, de acordo com o perfil ilustrado na figura 5.4.

5.4 Otimização

De modo a efetuar uma otimização mais realista vai ser utilizado como exemplo de carga de um bairro, o perfil de consumo de um condomínio localizado em Lisboa. Os Jardins de S. Bartolomeu são um conjunto de edifícios com 9 andares cada, onde se encontram 356 frações habitacionais.

É possível obter o perfil de consumo para este condomínio através dos resultados do projeto REMODECE apresentados na figura 5.5. O perfil de consumo médio de uma habitação é

multiplicado pelas 356 frações que constituem o condomínio para obter o perfil de consumo do condomínio.

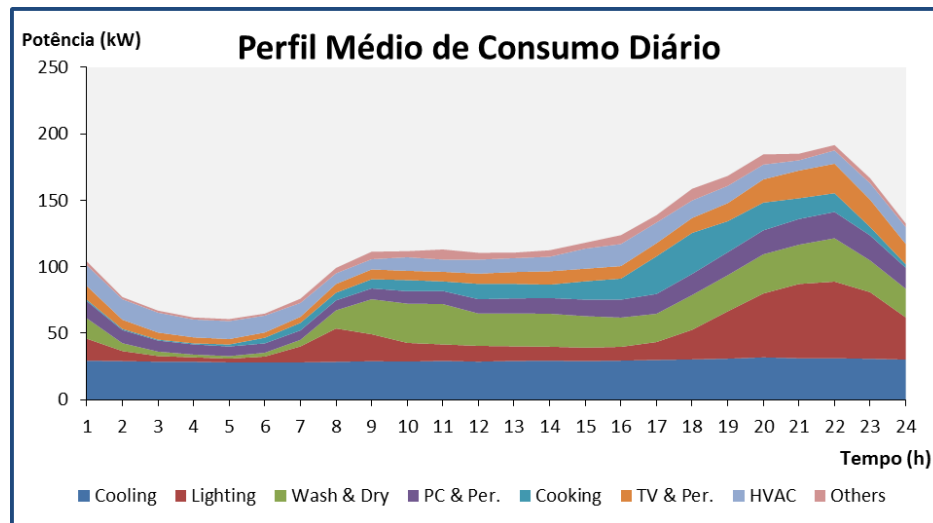


Figura 5.5 - Perfil anual médio de consumo para o condomínio

A potência atinge o pico de 191,54 kW às 22h, sendo as cargas com maior impacto a iluminação, a refrigeração e as máquinas de lavar e secar. O consumo acumulado de energia elétrica, por dia, no condomínio é de 2848,92 kWh.

Após a apresentação do perfil de consumo, vai ser definido o perfil de geração renovável local, em que as tecnologias utilizadas são os painéis fotovoltaicos.

Para a geração fotovoltaica foi considerada a instalação de unidades de painéis fotovoltaicos distribuídos pela área do telhado e nas áreas circundantes ao condomínio que não sejam prejudicadas pelo sombreamento. O sistema de geração total é definido tendo uma área total disponível de 3870 m², o que equivale a 62 × 62 m. Os painéis fotovoltaicos vão ser instalados com uma inclinação de 35°, e considerando que a distância entre painéis é de 0,41 m é razoável ocupar 81%, o que equivale a uma área de 3145 m² de painéis fotovoltaicos. Nesta área é possível instalar cerca de 400 kW de potência. Os painéis que vão ser instalados são do tipo monocristalino com um rendimento de 16%.

Com recurso à figura 5.6, da radiação solar anual média na cidade de Lisboa, foi calculado o perfil de geração considerando a potência instalada de 400 kW.

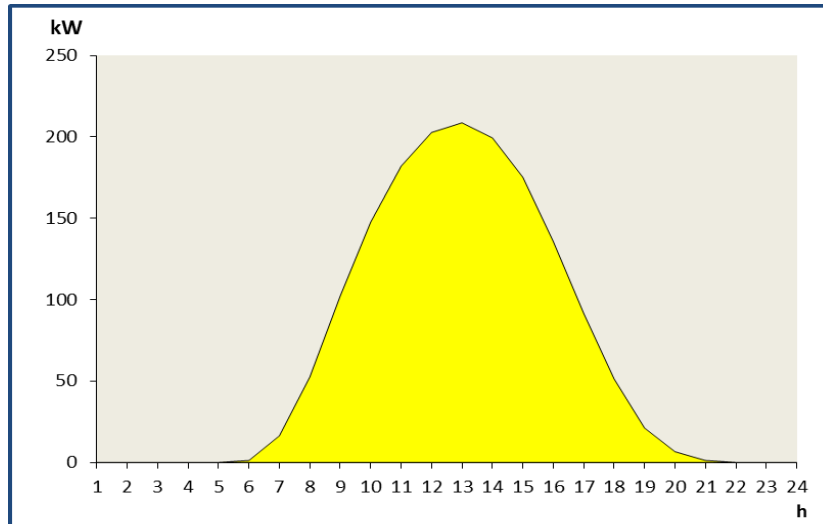


Figura 5.6 - Perfil médio de geração fotovoltaica para o condomínio

5.4.1 Dimensionamento do banco de baterias

É fundamental dimensionar a capacidade do banco de baterias a aplicar no projeto para o correto funcionamento do sistema. Para isso é necessário analisar tanto o perfil de consumo como o perfil de geração a fim de determinar a quantidade de energia em excesso que deve ser armazenada. Na tabela A7.1 do anexo 7 pode-se constatar que a energia em excesso a ser armazenada nas baterias é de 451,245 kWh por dia. Considerando que as baterias realizam um ciclo de carga e descarga por dia, estas têm de ser dimensionadas para uma capacidade de armazenamento total mínima de 451,245 kWh.

Desta forma, o conjunto de baterias deverá ter 500 kWh, permitindo a carga e descarga da energia total num dia. Para calcular a potência nominal foi utilizado o valor de densidade energética $\sim 400 \text{ Wh/m}^3$ e o valor de potência médio 140 W/m^3 da tabela A3.2 do anexo 3.

$$\text{Volume} = \frac{500 \text{ kWh} \times 1 \text{ m}^3}{0.4 \text{ kWh}} = 1250 \text{ m}^3; \quad \text{Eq. 5.3}$$

$$\text{Potência} = 1250 \text{ m}^3 \times 140 \text{ W/m}^3 = 175 \text{ kW} \quad \text{Eq. 5.4}$$

5.4.2 Situações a otimizar

Recorrendo ao perfil de consumo e ao perfil de geração obtidos para as 356 habitações do condomínio, e de modo a compreender os cenários possíveis para otimização, os dois perfis foram sobrepostos, conforme ilustrado na figura 5.7.

Como seria de esperar a energia de geração fotovoltaica excede o consumo desde as 9:15h até às 17h sendo, neste período do dia, as horas de maior radiação solar. Pode-se verificar que a energia fotovoltaica gerada consegue satisfazer uma grande parte do perfil de consumo durante o dia. Durante o início do período noturno, principalmente entre as 19h e 23h, encontra-se o período do dia de maior consumo. Após a meia-noite verifica-se uma diminuição da carga até às 5h ($P_{Load} \approx 60 \text{ kW}$), que representa o consumo base.

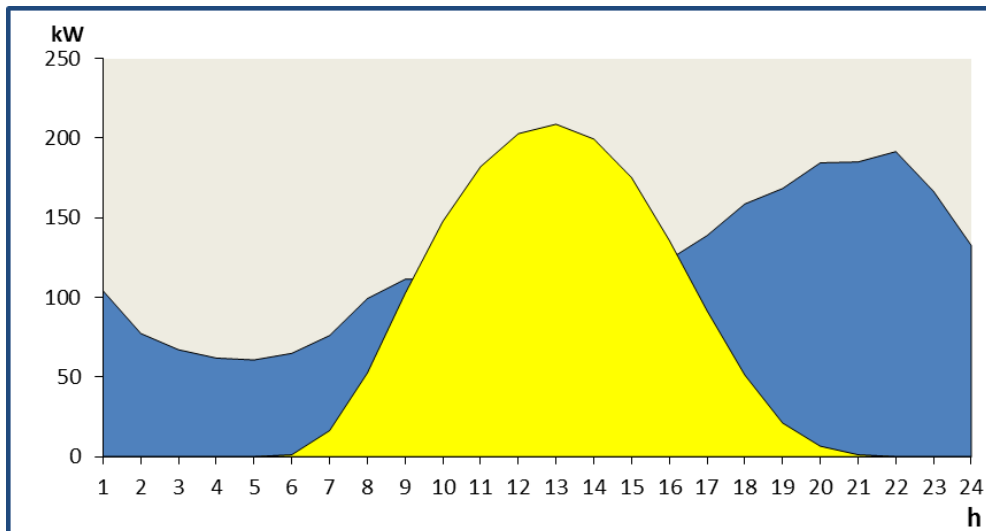


Figura 5.7 - Perfis de Geração e Consumo

Através da análise da figura 5.7 pode-se relacionar os perfis de geração (associado a $P_{renewable}$) e de consumo (associado a P_{load}) em três situações possíveis:

- $P_{renewable} > P_{Load}$ *Eq. 5.5*

Esta situação corresponde ao período do dia em que a geração local é superior ao consumo. No gráfico acima, isto verifica-se entre as 9:15h e as 17h. Apesar de se ter atingido o equilíbrio entre a geração e o consumo, existe ainda a necessidade de otimizar o sistema de modo a também utilizar toda a energia em excesso para consumo.

- $P_{renewable} = P_{Load}$ *Eq. 5.6*

Neste caso a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é igual ao consumo. É possível observar esta situação em dois momentos do dia, quando a geração tende a exceder o consumo e no processo inverso. Assim como foi atingido o equilíbrio não existe a necessidade de otimização.

- $P_{renewable} < P_{Load}$ *Eq. 5.7*

Esta situação corresponde ao período do dia em que a geração local é inferior ao consumo. No gráfico acima, isto verifica-se depois das 17h até às 9:30h, ou seja, durante os períodos pôr-do-sol, noturno e nascer do sol. Esta é a situação mais problemática uma vez que não foi atingido o equilíbrio entre a geração e o consumo. Assim, é muito importante a otimização, uma vez que o sistema tem de atuar de forma a analisar outros recursos disponíveis e escolher o mais adequado para satisfazer o consumo em tempo real, possibilitando o equilíbrio com os menores impactos ambientais, técnicos e económicos possíveis.

Apresentadas as três situações que se verificam no gráfico, vão ser identificados os possíveis cenários para solucionar cada situação. Estes cenários vão ser analisados ao nível de recursos e ao nível económico para que o custo da energia a comprar na rede para os utilizadores finais seja o menor possível. A estratégia de despacho da energia eléctrica vai definir as

decisões a tomar para cada situação mencionada acima com o objetivo de otimizar os recursos que constituem o *Energy Router*.

5.4.3 Levelized Cost of Energy (Custo Nivelado da Energia)

O custo nivelado da energia (LCOE) consiste no custo da eletricidade que é gerada por uma fonte de energia específica, durante o tempo de vida do projeto, por unidade de energia gerada. É uma avaliação económica de um sistema de geração de eletricidade que inclui todos os custos ao longo do seu tempo de vida. O LCOE permite a comparação de diferentes tecnologias de geração com base no custo médio ponderado (€/kWh) durante o tempo de vida de cada tecnologia.

Para a arquitetura do *Energy Router* o LCOE vai ser aplicado para o cálculo do custo da energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos e para o cálculo do acréscimo de custo ao movimento, devido ao armazenamento da energia gerada localmente. Para o cálculo do LCOE foi utilizada a seguinte equação (Kost & Thomsen, 2012):

$$LCOE = \frac{Project\ Cost + \sum_{n=1}^N \frac{AO}{(1 + DR)^n}}{\sum_{n=1}^N Initial\ kWh * (1 - SDR)^n} \quad Eq. 5.8$$

Em que:

- LCOE – Custo Nivelado da Energia (€/kWh);
- *Project Cost* – Custo do investimento inicial (€);
- *AO* – Custo da operação e manutenção anual (€);
- *DR* – Taxa de Desconto (%);
- *Initial kWh* – Geração anual do sistema (kWh);
- *SDR* – Taxa de degradação do sistema (%);
- *N* – Número de anos de vida útil do sistema.

Os parâmetros que foram utilizados para o cálculo do LCOE do projeto são mostrados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros para cálculo do LCOE

Sistema	Painéis Fotovoltaicos	Baterias NaS
Capacidade (kW)	400	175
Custo da instalação (€/kW)	3200	1350
Custo O&M (€/kW.ano)	20	15
Tempo de vida útil (anos)	25	5
Rendimento do ciclo	-	90%

O valor do custo de instalação dos painéis fotovoltaicos foi estimado tendo em conta o custo dos painéis (1700 €/kW). Juntamente com o custo de todos os elementos que constituem o conjunto da instalação, como inversores, reguladores, cabos e instalação, o valor passa para 3200 €/kW.

Inicialmente, o LCOE foi calculado individualmente para cada tecnologia tendo em conta o seu tempo de vida útil e a percentagem de energia que asseguram. Para a taxa de degradação do sistema foi estabelecido o valor de 1% por ano e para a taxa de desconto 3%.

O LCOE foi também calculado para o sistema do *Energy Router* que conjuga painéis fotovoltaicos com as baterias. Neste foi considerado um tempo de vida do projeto de 25 anos. Como os painéis fotovoltaicos apresentam um tempo de vida útil longo, bastante superior às baterias, ao calcular o LCOE do sistema em conjunto tem que se considerar a instalação das baterias NaS novas cerca de cinco vezes. Considerando os mesmos valores na taxa de degradação e desconto os resultados são apresentados na figura 5.8.

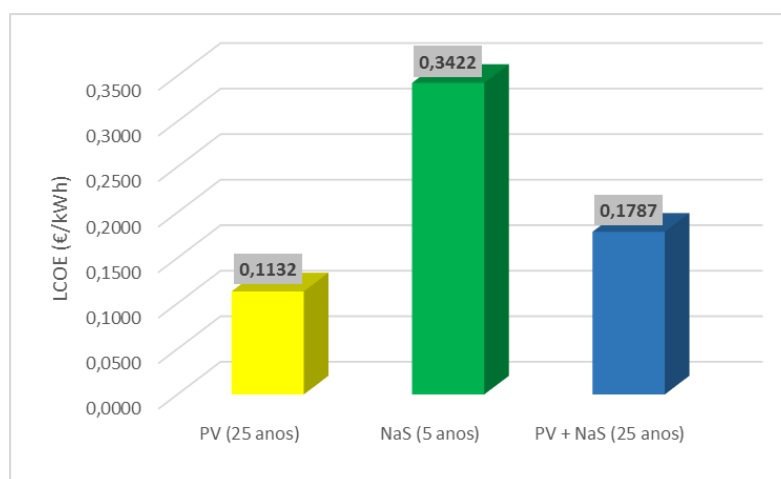


Figura 5.8 - Comparativo do LCOE para as várias tecnologias

É de notar o valor favorável para a geração fotovoltaica com cerca de 0,1132€/kWh, sendo ainda mais baixo que as tarifas da rede para tarifa simples (0,1405€/kWh) (EDP, 2013). Foi obtido o valor de 0,1787€/kWh pela energia servida no sistema do *Energy Router* tendo em conta os custos atuais das tecnologias.

5.4.4 Estratégia de Despacho

Após identificar cada componente individual, deve-se simular a forma como tais componentes funcionam em conjunto, como um sistema. Isto requer decisões em tempo real, determinar a geração renovável dos painéis fotovoltaicos, a carga ou descarga de energia das baterias, a disponibilidade de cargas controláveis, e ainda a necessidade de comprar energia da rede. Nesta secção é apresentado o esquema de decisão de como o *Energy Router* vai efetuar tais decisões, tendo em conta todas as restrições que podem ocorrer em situações reais. O princípio fundamental que o *Energy Router* vai seguir para efetuar o despacho do sistema, é assegurar a maximização dos recursos disponíveis. A segunda prioridade, ao efetuar a otimização, será minimizar o custo da energia. Isto implica a diminuição ao máximo possível da compra de energia da rede. Em cada momento, o *Energy Router* determina se as fontes de energia renovável são capazes de assegurar a procura. Se não, determina a melhor forma de despacho para os recursos disponíveis do sistema (banco de baterias, rede e cargas controláveis) para assegurar o ajuste entre a oferta e a procura de energia. Na figura 5.9

encontra-se a estratégia de otimização para o *Energy Router*. O despacho vai funcionar como um ciclo infinito, assegurando um controlo permanente do *Energy Router*.

Legenda:

- P_{renl} : $P_{renewable} - P_{load}$;
- P_{char} : Maximum chargeable power for battery (potência máxima de carga da bateria);
- P_{disch} : Maximum dischargeable power for battery (potência máxima de descarga da bateria);
- P_{lon} : Power available to turn on type Wash & Dry (potência disponível para ligar do tipo máquinas de lavar e secar);
- P_{lc1} : Power available to delay or avoid type Wash & Dry (potência disponível para deslocar ou evitar do tipo máquinas de lavar e secar);
- P_{lc2} : Power available to turn off type cooling and HVAC (potência disponível para desligar do tipo de refrigeração e AVAC)
- P_{lc} : Power available to turn off or delay ($P_{lc1}+P_{lc2}$) (potência disponível para desligar ou deslocar);
- P_{Grid} : Power from the electricity grid (potência da rede de energia elétrica);
- Cap_{SOC} : Capacidade do *State of Charge*;
- $SOC_{m\acute{a}x}$: Máximo *State of Charge*;
- SOC_{min} : Mínimo *State of Charge*;
- i : variable to count the delay or avoid operation time (variável para contar o tempo de operação para o deslocamento de cargas ou cargas que se evitam);
- j : variable to count the offline operation time (variável para contar o tempo em que as cargas se encontram desligadas).

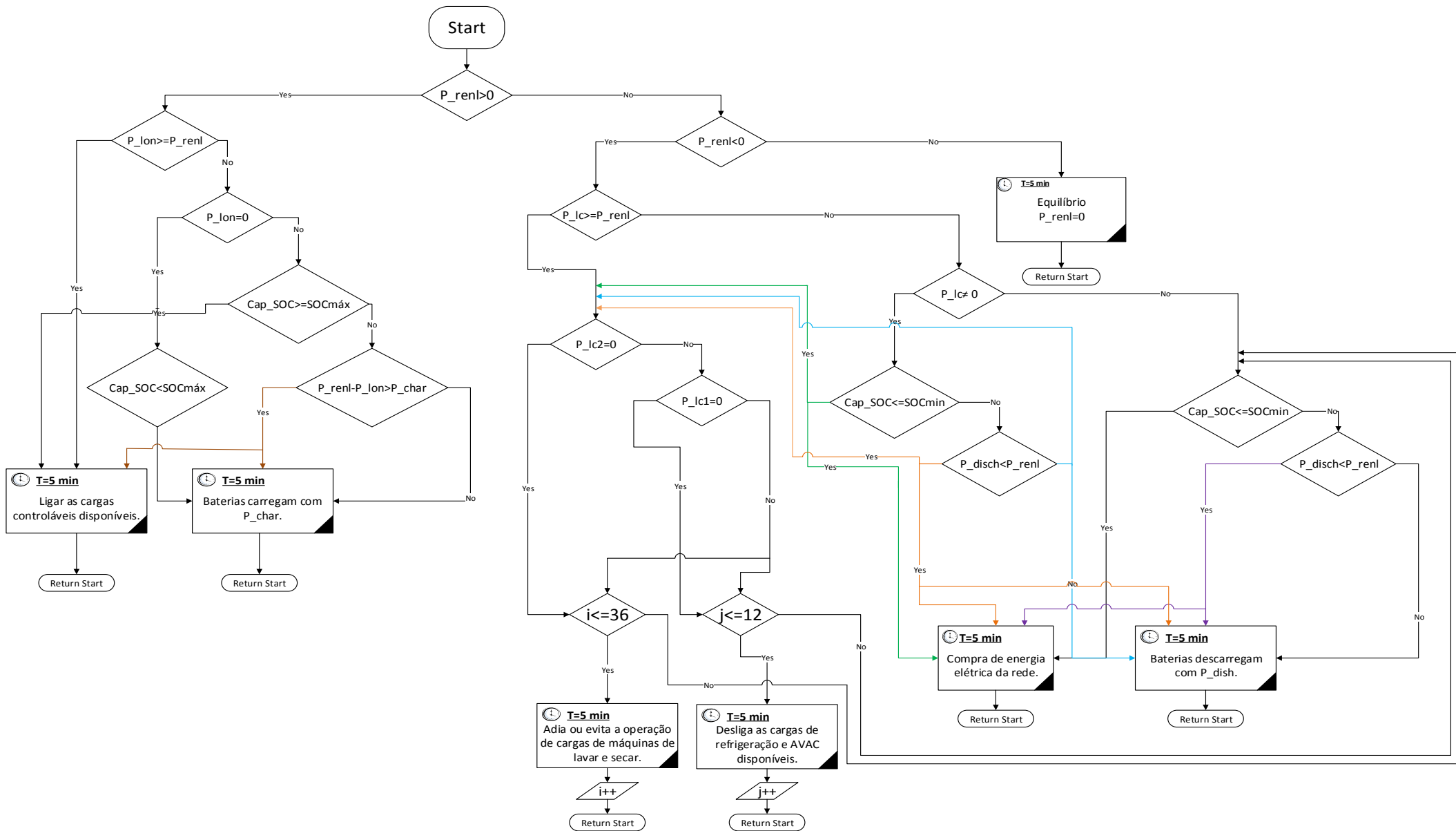


Figura 5.9 - Estratégia de Otimização do Energy Router

Para os casos em que a solução de otimização é obtida através das cargas controláveis, havendo a necessidade de diminuir ou aumentar o número de cargas tem que se definir uma relação para os acontecimentos de ligar e desligar. Isto significa que quando se liga uma carga esta vai permanecer ligada durante um certo período de tempo, ou quando se desliga uma carga esta tem de ser ligada mais tarde.

Tendo em conta o perfil de consumo detalhado pelos vários tipos de carga que fazem parte de uma habitação típica, foi considerado que as cargas que podem ser deslocadas para outras horas do dia são as máquinas de lavar e secar que representam 16% do consumo total. Também pode ser considerado a diminuição do número de cargas de refrigeração e aparelhos de calor, ventilação e ar-condicionado (AVAC) durante as horas de maior consumo. Assim, o objetivo principal das cargas controláveis é deslocá-las das horas de maior consumo para horas de menor consumo ou excesso de geração, e ainda permitir um maior ajuste entre a procura e a oferta, sem que tal afete as necessidades dos consumidores.

Utilizando o perfil de consumo da figura 5.5, as cargas onde pode ser favorável o deslocamento encontram-se no intervalo 18-22h. Estas cargas podem ser movidas para as horas de geração em excesso, 10-16h, ou para o período noturno quando o consumo começa a decrescer, nomeadamente no intervalo 23-2h, ou durante o nascer do sol, principalmente das 6h às 9h. No primeiro caso, o deslocamento ocorre nas horas de excesso de geração, diminuindo assim a compra de energia da rede, no segundo caso, o deslocamento apenas influencia os custos de energia a pagar pela sua compra devido aos valores mais baixos das tarifas durante esse período.

Ao deslocar as cargas para o período de excesso de geração é necessário determinar o novo perfil de consumo, uma vez que estas serão ligadas e desligadas entre as 10-16h em vez de serem ligadas e desligadas entre as 18-22h. Com recurso ao histórico do perfil semanal, no uso deste tipo de cargas, tais deslocamentos serão possíveis sempre dependentes da autorização do utilizador. No caso de deslocar as cargas para o período noturno e manhã seguinte, este deslocamento é realizado para o dia seguinte. isto significa que as cargas são deslocadas de entre as 18-22h para o intervalo 23-2h do próprio dia, ou para o intervalo 6-9h do dia seguinte. Neste tipo de deslocamento é também necessário requerer a autorização ao utilizador para a realização do deslocamento para o período noturno.

No caso das cargas que podem sofrer redução no consumo o sistema funciona automaticamente uma vez que tal não afeta as necessidades do consumidor (p. ex. desligar o frigorífico durante 1h, ou a alteração da temperatura do ar-condicionado durante 30 minutos). Na figura 5.10 pode-se comparar as alterações no gráfico de consumo ao deslocar 50% das cargas de máquinas de lavar e secar para as horas de geração em excesso, representado na linha a vermelho, e para as horas noturnas conforme a linha a verde. Foi também estimado uma diminuição de 10% nas cargas de refrigeração (*cooling*) e nas cargas de HVAC com uma redução total de cerca de 29.7 kWh do consumo diário.

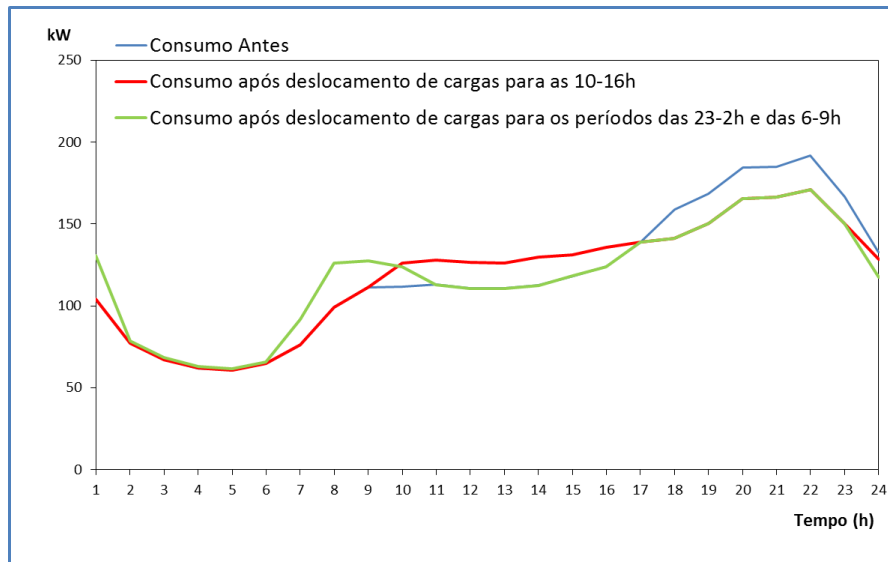


Figura 5.10 - Comportamento do perfil de consumo ao aplicar cargas controláveis

Posteriormente são resumidas, nas tabelas 5.2 e 5.3, as ações a aplicar em cada cenário obtido na estratégia de despacho, quer para o caso em que a geração local é superior à carga, quer para o caso em que a geração local é inferior à carga.

5.4.5 $P_{renewable} > P_{Load}$

Tabela 5.2 - Ações a aplicar para os diferentes cenários quando $P_{renewable} > P_{Load}$

Cenário	Ação	Fórmulas
I	1- Energia gerada em excesso é armazenada nas baterias.	$P_{Batt\ Charge} = P_{renewable} - P_{Load} \quad \text{Eq. 5.9}$ $E_{Batt}(T) = E_{Batt}(0) + \int_0^T P_{Batt\ Charge}(t) dt \quad \text{Eq. 5.10}$ $P_{Batt\ Discharge} = \eta \cdot P_{Batt\ Charge} \quad \text{Eq. 5.11}$
II	1- Deslocamento das cargas controláveis para o período de excesso de geração.	$P_{Total\ Load} = P_{Load\ c1} + P_{Load} \quad \text{Eq. 5.12}$ $E_{Load}(T) = E_{Load}(0) + \int_0^T P_{New\ Load}(t) dt \quad \text{Eq. 5.13}$ $P_{load\ c1} = x * P_{Load\ Control} \quad \text{Eq. 5.14}$ $P_{Load\ Control} = \sum_{i=1}^{n_{control}} P(i) \quad \text{Eq. 5.15}$

I + II	1- Desloca as cargas controláveis para o período de excesso de geração;	$P_{Total Load} = P_{Load Control} + P_{Load}$	Eq. 5.16
	2- A restante energia é armazenada nas baterias.	$P_{Batt Charge} = P_{renewable} - P_{Load} - P_{Load Control}$	Eq. 5.17

Em que:

- $P_{Batt Charge}$ – Potência de entrada na bateria;
- $P_{Batt Discharge}$ – Potência de saída na bateria;
- E_{Batt} – Energia armazenada na bateria;
- η – Eficiência do ciclo completo de carga e descarga na bateria.
- $P_{Load Control}$ – Potência de cargas que é possível controlar;
- $P_{Total Load}$ – Potência total após o aumento do número de cargas;
- E_{Load} – Energia de consumo;
- $n_{control}$ – Número de equipamentos disponíveis para controlar (ligar/desligar);
- x – Percentagem de cargas a que se vai aplicar o controlo.

5.4.6 $P_{renewable} < P_{Load}$

Tabela 5.3 - Ações a aplicar para os diferentes cenários quando $P_{renewable} < P_{Load}$

Cenário	Ação	Fórmulas	
IV	1- Energia armazenada é deslocada para as cargas	$P_{Batt Discharge} = \eta \cdot P_{Batt Charge}$	Eq. 5.18
		$P_{Batt Discharge} = P_{Load} - P_{renewable}$	Eq. 5.19
		$E_{Load}(T) = E_{Load}(0) + \int_0^T P_{Batt Discharge}(t) dt$	Eq. 5.20
V	2- Energia da rede é deslocada para as cargas.	$P_{Load} = P_{PV} + P_{Wind} + P_{Grid}$	Eq. 5.21
		$E_{Load}(T) = E_{Load}(0) + \int_0^T P_{Grid}(t) dt$	Eq. 5.22
VI	1- Deslocamento das cargas controláveis para o período de excesso de geração ou período nocturno.	$P_{Total Load} = P_{Load} - P_{Load Control}$	Eq. 5.23
		$E_{Load}(T) = E_{Load}(0) - \int_0^T P_{Load Control}(t) dt$	Eq. 5.24
		$P_{Load Control} = \sum_{i=1}^{n_{control}} P(i)$	Eq. 5.25

<i>IV + V</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1- Energia armazenada é deslocada para o consumo; 2- A restante energia de consumo é fornecida pela rede de energia elétrica. 	$P_{Load} = P_{renewable} + P_{Grid} + P_{Batt\ Discharge}$ <p style="text-align: right;"><i>Eq. 5.26</i></p>
<i>IV + VI</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1- Deslocamento das cargas controláveis disponíveis; 2- A restante energia de consumo é fornecida pela energia armazenada nas baterias. 	$P_{Load} = P_{renewable} - P_{Load\ Control} + P_{Batt\ Discharge}$ <p style="text-align: right;"><i>Eq. 5.27</i></p>
<i>V + VI</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1- Deslocamento das cargas controláveis disponíveis; 2- A restante energia de consumo é fornecida pela rede de energia elétrica. 	$P_{Load} = P_{renewable} - P_{Load\ Control} + P_{Grid}$ <p style="text-align: right;"><i>Eq. 5.28</i></p>
<i>IV + V + VI</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1- Deslocamento das cargas controláveis disponíveis; 2- Energia armazenada é deslocada para o consumo; 3- A restante energia de consumo é fornecida pela rede de energia elétrica. 	$P_{Load} = P_{renewable} - P_{Load\ Control} + P_{Batt\ Discharge} + P_{Grid}$ <p style="text-align: right;"><i>Eq. 5.29</i></p>

5.5 Resultados e Discussões

Nesta secção são exemplificados os resultados para os diferentes cenários obtidos através da estratégia de otimização da figura 5.9. A estrutura principal do código do programa está apresentada no anexo 9. Tendo em conta o perfil de consumo para o condomínio e o perfil de geração de eletricidade, foram realizadas várias simulações de otimização da energia em excesso de modo a reduzir a compra de energia da rede e utilizar os recursos disponíveis pelo sistema. Como resultados de possíveis otimizações são exemplificadas três soluções para fornecer energia aos consumidores. No primeiro exemplo, apenas são utilizadas as baterias, no segundo e terceiro exemplos recorre-se ao deslocamento de cargas controláveis, combinando com o uso das baterias. Em cada exemplo são usados vários cenários de otimização da tabela 5.2, para o caso de excesso de geração, e da tabela 5.3 no caso que a geração é inferior ao consumo.

O primeiro exemplo ilustrado na figura 5.11 consiste apenas no uso das baterias. Neste caso, a energia de geração fotovoltaica em excesso é totalmente armazenada nas baterias e, posteriormente, deslocada para consumo nas horas de maior carga ou custos mais elevados. Para otimização foram usados os cenários I, IV e IV+V.

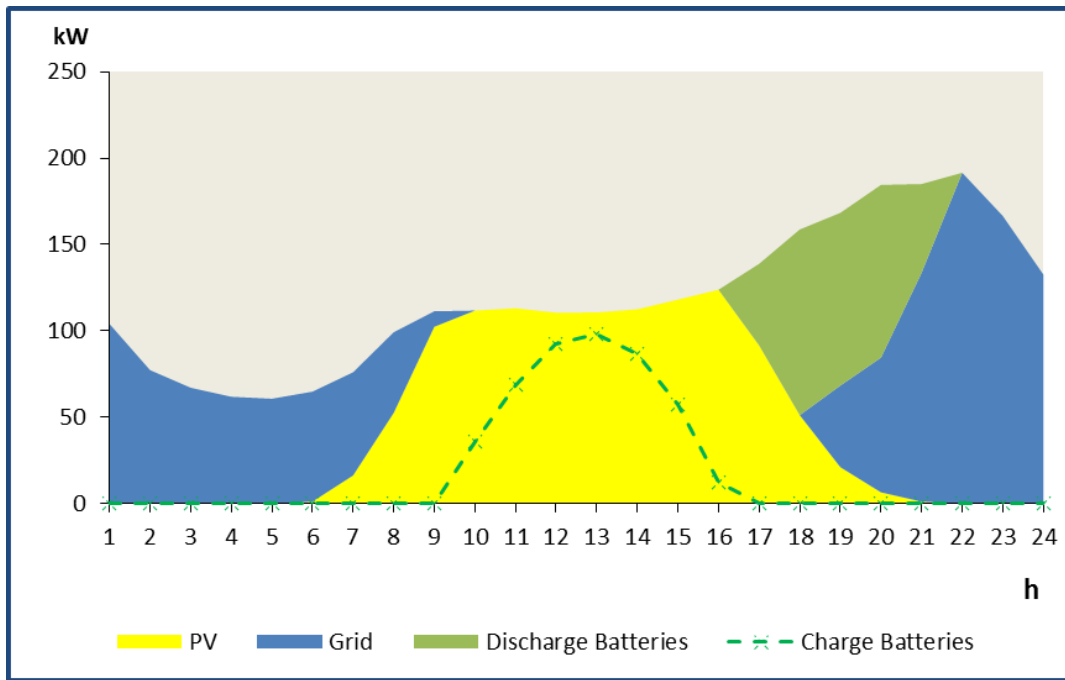


Figura 5.11 - Exemplo de otimização com utilização apenas do armazenamento

No segundo exemplo pode-se observar o perfil de consumo fornecido pela energia da rede, geração fotovoltaica, cargas controláveis e energia armazenada nas baterias. Neste exemplo foram utilizados todos os recursos que o sistema proporciona. Parte das cargas foram deslocadas para as horas em que a geração é superior ao consumo e a energia em excesso foi armazenada nas baterias para ser deslocada para as cargas assim que haja necessidade de compra de energia da rede. A restante energia é fornecida pela rede de energia elétrica. A capacidade máxima de cargas controláveis de máquinas de lavar e secar onde é possível realizar controlo é de 50%. Do total de 50%, foi considerado aplicar este valor de modo a utilizar 15% da geração em excesso por cargas controláveis. Os restantes 85% são assim deslocados para as baterias. Neste exemplo foram utilizados os seguintes cenários de otimização: I+II, IV+V e V+VI. O diagrama de cargas detalhado pelo modo de fornecimento de energia é apresentado na figura 5.12.

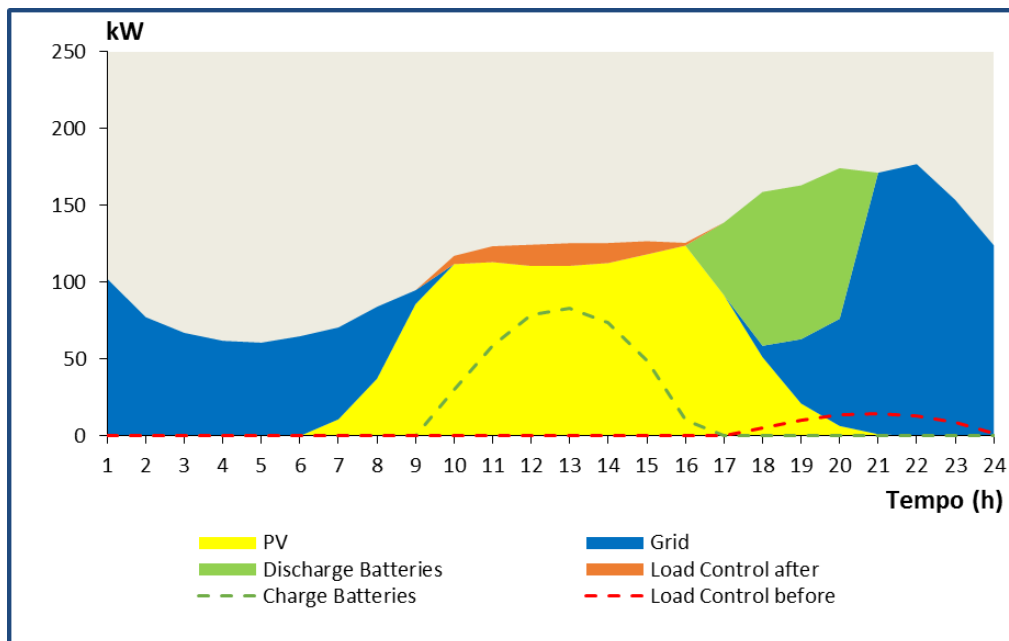


Figura 5.12 - Exemplo de otimização com utilização da armazenagem e cargas controláveis para as horas de excesso de geração

A figura 5.13 corresponde à otimização semelhante à anterior só que neste caso ao realizar o deslocamento de cargas, estas são movidas para período noturno de menor consumo, desde as 23h até às 2h, e período da manhã, desde as 6h até às 9h, conforme mostra a área laranja na figura 5.13. Neste caso as baterias carregaram com toda a energia em excesso da geração. Esta energia é utilizada para assegurar o consumo após as 17h ilustrada na área a verde da figura. Neste caso teve-se em conta o objetivo de atenuar as variações no perfil de consumo de modo a obter um consumo constante ao longo do dia.

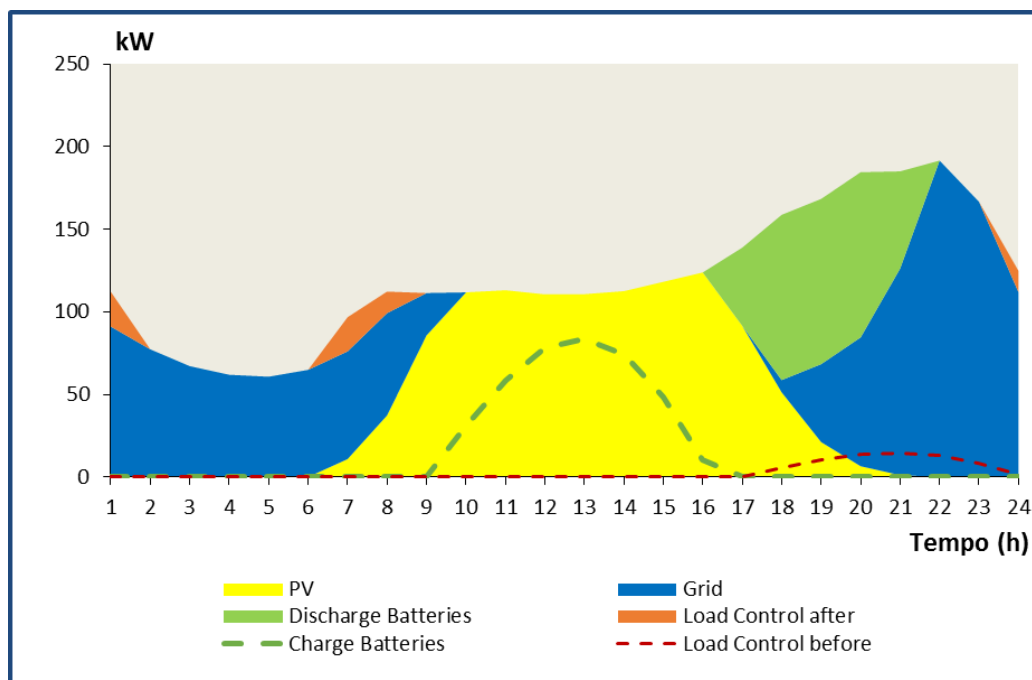


Figura 5.13 - Exemplo de otimização com utilização da armazenagem e cargas controláveis para as horas noturnas e manhã do dia seguinte

Os resultados dos três exemplos podem ser comparados na tabela 5.4 em termos de energia fornecida por cada tecnologia, face ao cenário de ter de comprar toda a energia da rede. Utilizando também os exemplos que correspondem aos vários cenários de otimização foi determinada a opção mais económica, isto é, a opção em que o custo total de energia foi menor.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos dos diferentes exemplos de otimização

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
	Só utiliza Energia da Rede	Energia da Rede + Geração fotovoltaica	Energia da Rede + Energia Fotovoltaica + Energia das Baterias	Energia da Rede + Energia Fotovoltaica + Energia das Baterias + Cargas Controláveis (10-16h)	Energia da Rede + Energia Fotovoltaica + Energia das Baterias + Cargas Controláveis (noite)
Perfil de consumo diário					
Consumo Total (kWh)	2848,93	2848,93	2848,93	2848,93	2848,93
Geração Fotovoltaica (kWh)	-	1144,31	1144,31	1144,31	1144,31
Baterias (kWh)	-	-	406,12	324,90	406,12
Rede de Energia Elétrica (kWh)	2848,93	1704,62	1200,39	1290,64	1246,68
Cargas Controláveis (kWh)	-	-	-	90,25	90,25
Perdas no Armazenamento (kWh)	-	-	49,69	36,10	45,12
Poupança face à energia da rede (%)	-	40,17	54,42	54,74	54,74
Custos diários					
Custos de compra de energia da rede (€)	359,44	215,03	161,98	161,27	170,16
Poupança comparando c/ Caso 1 (€)	-	144,41	197,46	198,17	189,28
Poupança comparando c/ Caso 1 (%)	-	40,18	54,94	55,13	47,34

Para calcular o custo diário de cada caso foi utilizado o valor referente ao preço da energia da rede, cerca de 0,1405€/kWh (tarifa simples do mercado regulado da energia)(EDP, 2013). Este valor foi aplicado nos valores de percentagem da figura 5.4 para determinar o preço em cada hora do dia.

Através da análise da tabela, pode-se concluir que a opção mais barata, em termos de reduzir a compra de energia da rede, foi o caso 4 ilustrado na figura 5.12 tendo em conta as tarifas em tempo real. Foi obtido um custo diário de 161,27 € com uma redução de cerca de 55.13% face a um perfil de consumo totalmente fornecido pela rede. É também de notar que neste caso a energia de fonte renovável fornecida é superior à energia da rede, satisfazendo quase 55% da carga.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo apresenta-se um resumo das conclusões tiradas no decurso deste trabalho, fazendo uma análise crítica dos resultados obtidos. Indicam-se ainda algumas sugestões de trabalho futuro.

6.1 Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado o conceito do *Energy Router* aplicado em cidades inteligentes, com o principal objetivo de projetar e desenvolver uma arquitetura orientada para serviços abertos, bem como desenvolver uma estratégia de otimização, de modo a reduzir o consumo de energia da rede e equilibrar a geração de energia renovável local, nomeadamente a partir de painéis fotovoltaicos, e o consumo em bairros de edifícios, recorrendo também à utilização de armazenamento de energia. De modo a atingir tais objetivos, a infraestrutura do *Energy Router* tem como base uma plataforma inteligente constituída por tecnologias de informação e comunicação, em que o consumo é monitorizado e controlado continuamente.

O projeto ENERSip, que serviu de base para o desenvolvimento da arquitetura do *Energy Router*, consiste numa plataforma inteligente em que o consumo de energia é controlado continuamente de forma a aumentar a eficiência energética e adaptando o perfil da geração renovável local ao perfil de consumo dos bairros. A otimização do sistema de consumo e de produção faz com que certos consumos sejam eliminados ou movidos para outros períodos, apresentando assim benefícios económicos, ambientais e de fiabilidade da rede.

Nesta dissertação foram analisadas as tecnologias de armazenamento de energia que permitem a aplicação em grande escala: o armazenamento de energia elétrica e o armazenamento de energia térmica. As tecnologias que melhor correspondem ao critério de fornecer serviços de gestão de energia elétrica adequados e rápidos, nas redes de um SEE, são as baterias de elevada energia. No caso da energia térmica, o armazenamento de calor latente através dos materiais de mudança de fase (PCM) foi a opção mais adequada a aplicar no *Energy Router*.

As baterias de iões de lítio, zinco-ar e NaS com densidades energéticas de 620kWh/m^3 , 800kWh/m^3 e 400kWh/m^3 , respetivamente, serão tecnologias muito promissoras para o armazenamento de energia elétrica. Em conjunto com estas tecnologias, as baterias NaNiCl (Cloreto de Sódio e Níquel) podem também desempenhar um papel importante nos edifícios, uma vez que apresentam elevado tempo de vida e elevada capacidade de energia de pico. Contudo, é necessário melhorar algumas propriedades de tais tecnologias, como o aumento da eficiência dos sistemas, baixos custos e prolongar os tempos de vida útil.

Através da análise do *Energy Hub*, conclui-se que, em termos de elementos básicos, o bloco do *Energy Hub* a aplicar no sistema final, deve ser constituído por conexões diretas, conexão

com a energia elétrica de geração renovável, conversões e armazenamento. Foram assim obtidas duas hipóteses possíveis para os elementos que vão constituir o bloco do *Energy Hub*. A hipótese *Energy Hub 1*, que integram entradas e saídas para as redes de energia elétrica e térmica, sendo constituído por um transformador, um permutador de calor e as tecnologias de armazenamento de energia elétrica e térmica. A hipótese de *Energy Hub 2* é semelhante à hipótese 1 tendo adicionalmente na entrada uma rede de gás natural e uma central de cogeração, permitindo a conversão de gás natural em eletricidade e calor. Esta hipótese apenas se pode integrar em zonas onde existam redes de gás natural. A arquitetura do *Energy Router* foi dividida em domínios e subdividida em blocos, nomeadamente: no domínio do edifício com os blocos I-BECI e I-BEGI, no domínio do bairro com os blocos *Energy Hub* e armazenamento, no domínio do sistema de gestão da rede com os blocos *GMS Regional* e *GMS Enterprise* e no domínio do sistema de suporte de decisões com o bloco da inteligência do sistema *Energy Router*. Em cada domínio e blocos foram definidas tecnologias de comunicação de modo a permitir a troca de informações e comandos ao longo do sistema.

De modo a determinar o modelo de otimização do *Energy Router* foram considerados três objetivos principais: utilizar ao máximo os recursos disponíveis, reduzir a dependência da rede de energia e diminuir os custos de compra da energia. Também foi verificado que, de modo a diminuir os picos no diagrama de cargas, os consumos a que se podem aplicar cargas controláveis são as máquinas de lavar e secar, a refrigeração e cargas AVAC.

Foi realizada a análise do custo nivelado da energia elétrica para o sistema do *Energy Router* que conjuga painéis fotovoltaicos e baterias, considerando um tempo de vida do projeto de 25 anos, obteve-se o resultado de 0,1787€/kWh pela energia servida do sistema, tendo em conta os custos atuais das tecnologias. Em comparação, para o LCOE do sistema que integra apenas painéis fotovoltaicos foi obtido o valor de 0,1132€/kWh e num sistema que usa apenas baterias o valor de 0,3422€/kWh.

Para a otimização do *Energy Router* foram relacionados os perfis de geração e de consumo de energia elétrica disponíveis. Foi obtido o cenário em que a geração local é superior ao consumo (entre as 9:15h e as 17h), o cenário de equilíbrio em que a energia renovável gerada é igual ao consumo e, por fim, o cenário em que a geração local é inferior ao consumo (depois das 17h até às 9:30h). As ações possíveis a aplicar para o primeiro cenário foram as seguintes: energia gerada em excesso é armazenada nas baterias e deslocamento das cargas controláveis para o período de excesso de geração. As ações a aplicar para o terceiro cenário foram as seguintes: energia armazenada é deslocada para as cargas, compra de energia elétrica da rede, no caso das cargas controláveis adia ou evita a operação de máquinas de lavar e secar e desliga as cargas de refrigeração e AVAC disponíveis. As otimizações podem ser realizadas com apenas uma ação ou com a conjugação de várias ações.

Como resultados de otimização do *Energy Router* foram apresentados três exemplos e calculado o custo total diário de compra de energia da rede, necessária para satisfazer o consumo. O primeiro consistiu no deslocamento de toda a energia gerada em excesso para as baterias, esta energia foi, posteriormente, deslocada para o consumo assim que a geração

era inferior ao consumo. Neste caso, houve um período em que a energia foi fornecida pelas baterias e pelos painéis fotovoltaicos, que consistiu numa poupança de 54,94% face ao cenário em que toda a energia fornecida é comprada à rede.

O segundo exemplo de otimização incluiu as baterias e as cargas controláveis, neste cenário 15% da energia gerada em excesso foi utilizada por cargas controláveis, isto é, o deslocamento de máquinas de lavar e secar de modo a operarem no período das 10h às 17h, e 85% da energia foi deslocada para as baterias. Como aconteceu no cenário anterior, a energia armazenada nas baterias é deslocada para consumo assim que a geração seja insuficiente. Este foi o exemplo mais económico, em que a compra de energia da rede foi de 161,27€, alcançando-se uma poupança de 55,13%. O terceiro exemplo é semelhante ao segundo apenas difere no deslocamento das cargas controláveis, em que neste caso as cargas são movidas para o período noturno, nomeadamente das 23h à 1h e das 6h às 8h. Neste caso, a energia em excesso foi totalmente deslocada para as baterias, sendo movida para o consumo quando a geração é inferior ao consumo. Com este exemplo obteve-se uma poupança de 47,34% face ao fornecimento total da rede.

Em suma, o caminho para o desenvolvimento de sistemas *Energy Router* é bastante desafiante, mas os benefícios que trará para os utilizadores e para o ambiente merecem a sua exploração. A eficiência energética, na procura e o no fornecimento de energia, irá desempenhar um papel fundamental em atingir os objetivos com sucesso. Além disso, compreender os valores que influenciam as decisões dos consumidores é de crucial importância, pelo que é necessário segmentar os consumidores, com base em fatores não tradicionais, como atitudes e motivação em questões do uso de energia.

6.2 Trabalho Futuro

A otimização do *Energy Router* foi realizada com base em dados médios, que foram calculados tendo em conta um conjunto de habitações. A utilização de dados reais, detalhados pelos meses do ano, poderia obter resultados mais realistas e dinâmicos. Também na aplicação dos algoritmos de otimização, os perfis da geração e consumo foram disponibilizados com valores em intervalos de 1h. Para uma análise mais pormenorizada do modelo de otimização poder-se-ia usar valores de geração e consumo com intervalos de, por exemplo, 15 minutos.

Dada a dimensão da arquitetura do *Energy Router* é necessário estudar em grande detalhe cada bloco e domínio que o constitui, com o objetivo determinar a melhor tecnologia para determinada aplicação específica. É também importante efetuar um estudo sobre as tecnologias utilizadas na comunicação, de modo a confirmar a fiabilidade da sua utilização em cada segmento da arquitetura para um elevado tráfego de dados.

Bibliografia

- Almeida, A. De et al (2008). Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe, European Commission (Intelligent Energy - Europe)
- Arnold, M. J. (2011). *On Predictive Control for Coordination in Multi-Carrier Energy Systems*, MSc. Thesis. Power Systems Laboratory, ETH Zurich, 181 pp.
- Ataer, O. E. (2006). Storage Of Thermal Energy, Encyclopedia of Life Support Systems, Mechanical Engineering Department, Gazi University
- CEC. (2005). Improving The Value Of Wind Energy Generation Through Back-Up Generation And Energy Storage, (December). California Wind Energy Collaborative, California
- CEN/CENELEC/ETSI. (2012). CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group Smart Grid Reference Architecture Contents.
- Cloogy. (2013). Cloogy. visitado a 1 de Julho de 2013, <http://cloogy.com/pt/>
- Craemer, K. De, & Deconinck, G. (2010). Analysis of State-of-the-art Smart Metering Communication Standards, Katholieke Universiteit Leuven, Pages: 1-6.
- Dieckmann, D. J. H. (2012). Latent heat storage in concrete, Department of Construction Physics and Technical Equipment, University of Kaiserslautern
- Editor, M. W., Bøhm, B., & Sipilae, K. (2005). Dynamic Heat Storage Optimisation And Demand Side Management, IEA Implementing Agreement on District Heating and Cooling including the integration of CHP, 87 pp.
- EDP. (2013). Tarifa Simples. Visitado a 27 de Julho de 2013, de <https://energia.edp.pt/particularshome/particulares/eletricidade/casa/tarifarios.aspx>
- ESA. (2011). Electricity Storage Association. Visitado a 6 de Junho de 2013, de http://www.electricitystorage.org/images/uploads/static_content/technology/technology_resource
- Fadlullah, Z. M., Fouda, M. M., Kato, N., Takeuchi, A., Iwasaki, N., & Nozaki, Y. (2011). Towards Intelligent Machine-to-Machine Communications in Smart Grid, IEEE Communications Magazine, Volume: 49, Issue: 4, pages: 60–65.
- Faninger, G. (1998). Thermal Energy Storage, Advanced Energy Systems, Helsinki University of Technology, 1–27.
- Faruqui, A., & Palmer, J. (2011). Dynamic Pricing of Electricity and its Discontents, The Brattle Group, Inc., Regulation Magazine, Volume: 102, Issue: 3, Pages: 1-17.
- Fonseca, P., Aníbal, A. De, Markogiannakis, G., Kofod, C., & Feilberg, N. (2009). Characterization of the household electricity consumption in the EU , potential energy

savings and specific policy recommendations, *Energy and Buildings Magazine*, Volume: 43, Issue: 8, Pages: 781–793.

Geidl, M. (2007). *Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems*, Doctor of Science, Eidgenössische Technische Hochschule, Pages: 143

Geidl, M., Koepfel, G., Favre-perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G., & Fröhlich, K. (2007). *The Energy Hub – A Powerful Concept for Future Energy Systems*, (March), Power Systems and High Voltage Laboratories, ETH Zurich, Switzerland, 13–14.

Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergüt, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. P. (2011). *Smart Grid Technologies : Communication Technologies and Standards*, *Industrial Informatics*, IEEE Transactions on., Volume: 7, Issue: 4, Pages: 529-539.

IEA. (2005). *Two-Step Decision And Optimisation Model For Centralised Or Decentralised Thermal Storage In Dh&C Systems*, IEA, Netherlands Agency for Energy and the Environment.

IEA. (2011). *Technology Roadmaps: Smart Grids*, International Energy Agency, France

IEEE. (2013). *Smart Grid Conceptual Model*. Visitado a 25 de Junho de 2013 de: <http://smartgrid.ieee.org/ieee-smart-grid/smart-grid-conceptual-model>

IRENA. (2013). *Thermal Energy Storage*, (January), Energy Technology Systems Analysis Programme and International Renewable Energy Agency (IRENA).

IRES. (2012). Chatzivasileiadi, K., *Electrical energy storage technologies and the built environment*, Welsh School of Architecture, Cardiff University, Wales, United Kingdom.

Koepfel, G., & Andersson, G. (2007). *Energy hubs for the future*, *IEEE Power & Energy Magazine*, 5(1): 24–30.

Kost, C., & Thomsen, J. (2012). *Study Levelized Cost Of Electricity Renewable Energies Levelized Cost Of Electricity*, Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems ISE (May).

López, G., Moura, P., Moreno, J. I., & Almeida, A. De. (2013). *ENERSip : M2M-based platform to enable energy efficiency within energy-positive neighbourhoods*, *IEEE Energy Magazine*, Pages: 217 - 222.

M/490. (2011). *Smart Grid Mandate, Standardization Mandate to European Standardisation Organisations (ESOs) to support European Smart Grid deployment Scope & Objectives*, Directorate - General for Energy, European Commission, Brussels.

Martin, M., & Thornley, P. (2013). *The potential for thermal storage to reduce the overall carbon emissions from district heating systems*, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of Manchester.

Merei, G., & Sauer, D. U. (2012). *Optimization of an Off-Grid hybridPV-Wind-Diesel-Battery System*, Electrochemical Energy Conversion and Storage Systems Group,

Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA), RWTH Aachen University, Juelich Aachen Research Alliance, JARA-Energy, Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS), E.ON ERC, RWTH Aachen University, Germany, Pages:1–11.

Mi, L. (2012). Analysis on Energy Balance for a Smart Grid in Stadshavens Area, Rotterdam, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 97 pp.

Moura, P. S., López, G. L., Carreiro A. & A. de Almeida (2012), *Evaluation Methodologies and Regulatory Issues in Smart Grid Projects with Local Generation-Consumption Matching*, International Workshop on Energy Efficiency for a More Sustainable World (EEMSW2012), Ponta Delgada, Açores, 2012

Moura, P. S., López, G. L., Moreno, J. I., & Almeida, A. T. De. (2013). The Role of Smart Grids to Foster Energy Efficiency, *Energy Efficiency Journal*, Springer Netherlands, 1–36.

NIST. (2012). NIST Smart Grid Conceptual Model. Visitado a 20 de Agosto de 2013, <http://smartgrid.ieee.org/ieee-smart-grid/smart-grid-conceptual-model>

NREL. (2012). Renewable Electricity Futures Study, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Volume: 2.

Register, R. (1993). *Ecocity Berkeley: Building Cities for a Healthy Future*, North Atlantic Books, 152 pp.

Schoenung, S. M., & Hassenzahl, W. V. (2003). Long- vs . Short-Term Energy Storage Technologies Analysis, A Life-Cycle Cost Study, A Study for the DOE Energy Storage Systems Program, Sandia National Laboratories, California.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume: 13, Issue: 2, Pages: 318 - 345.

ANEXOS

Anexo 1

Modelos e Tecnologias das *Smart Grids*

Este anexo tem como objetivo, servir de continuação para a secção 2.1 das *Smart Grids*. São apresentadas arquiteturas e modelos conceptuais das *Smart Grids*, e também as tecnologias de comunicação utilizadas atualmente.

1.1 Arquiteturas e Modelos Conceptuais

Modernizar a infraestrutura de eletricidade existente para a *Smart Grid* é um dos maiores e mais complexos desafios de sempre para a engenharia. Existe assim a necessidade de formulação do problema em diferentes níveis de abstração, seguindo uma abordagem “*top-down*”. O *National Institute of Standards and Technology* (NIST) desenvolveu um modelo conceptual para *Smart Grid*, em que define sete domínios principais: Geração, Transmissão, Distribuição, Clientes, Operadores da rede, Comercializadores e Empresas de serviços da rede (NIST, 2012).

Através da delegação da União Europeia M/490 (M/490, 2011), as instituições *CEN/CENELEC/ETSI*, entidades que estudam e desenvolvem padrões para redes, desenvolveram o modelo conceptual *NIST Smart Grid* que foi adaptado aos requerimentos do mercado da energia elétrica europeu, adicionando um domínio novo relacionado com os Recursos na Distribuição de Energia como representado na figura A1.1 (CEN/CENELEC/ETSI, 2012).

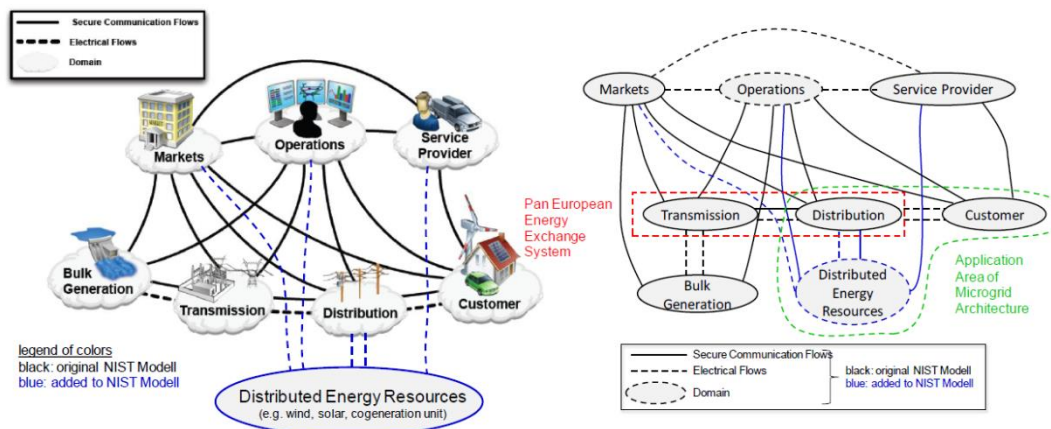


Figura A1.1 - Comparação entre os modelos *Smart Grid* da NIST e *Smart Grid* do CEN/CENELEC/ETSI

Na figura A1.2 encontra-se o modelo tridimensional da arquitetura CEN/CENELEC/ETSI baseado na figura A1.1.

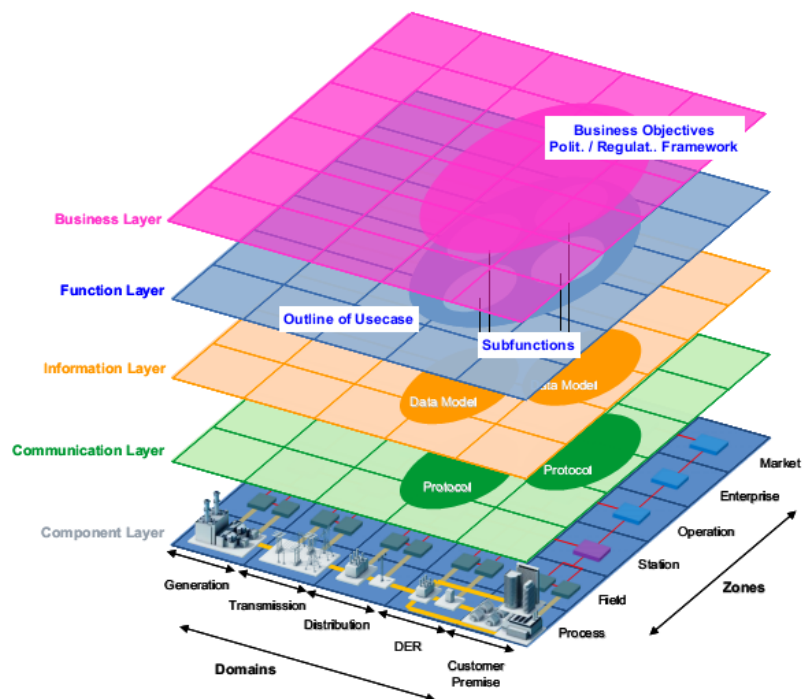


Figura A1.2 - Modelo 3D da arquitetura do CEN/CENELEC/ETSI (CEN/CENELEC/ETSI, 2012)

1.2 Tecnologias das *Smart Grids*

As *Smart Grids* são baseadas na partilha de informação. Assim, as ICTs são uma tecnologia fundamental para o seu desenvolvimento. As *Smart Grids* são divididas por diversas áreas tecnológicas, cada área específica é assegurada por diverso hardware e software.

As principais áreas tecnológicas das *Smart Grids* estão apresentadas na tabela A1.1.

Tabela A1.1 – Tecnologias das *Smart Grids* (IEA, 2011)

Área Tecnológica	Hardware	Sistemas e Software
Controlo e Monitorização	Unidades de medição fasorial (PMU) e outros equipamentos do tipo sensor.	Sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA), sistemas de monitorização dos cabos (WAMS), proteção, controlo e monitorização de cabos (WAAPCA).
Tecnologia de informação e comunicação	Equipamento de comunicação (linha, WIMAX, LTE, rede em malha, celular), routers, relés, gateway, interruptores, computadores (servidores).	Software de planeamento de recursos empresariais (ERP), sistema de informação para o cliente (CIS).
Geração renovável	Equipamento de condicionamento da energia para suporte da rede, hardware de controlo e comunicação para a geração e possibilitar o armazenamento.	Sistema de gestão de energia (EMS), sistemas de gestão da distribuição de energia (DMS), SCADA, sistema de informação geográfica (GIS).
Transmissão	Supercondutores, FACTS, HVDC	Análise da estabilidade da rede, sistemas de recuperação automática.
Gestão da rede de transmissão	Religadores automáticos, interruptores e condensadores, controlo remoto da geração e do armazenamento, sensores para transformadores, sensores para cabos e fios.	Sistema de informação geográfica (GIS), sistema de gestão da distribuição (DMS), sistema de gestão das interrupções (OMS), sistema de gestão geral (WMS).
Infraestrutura de medição avançada	<i>Smart meters</i> , displays, servidores, relés.	Sistema de gestão do dados dos <i>smart meters</i> (MDMS).
Infraestrutura para carga de veículos elétricos	Infraestrutura que permita a carga, baterias, inversores.	Sistema de facturação da energia, metodologias inteligentes de carga <i>grid-to-vehicle</i> (G2V) e descarga <i>vehicle-to-grid</i> (V2G).
Sistemas de controlo pelos consumidores finais	<i>Smart appliances</i> , routers, displays, sistemas de automação para edifícios, acumuladores térmicos, termóstatos inteligentes.	Gamas de eficiência, sistemas de gestão de energia, aplicações para tablets e smart phones sobre os consumos de energia.

1.2.1 Tecnologias de Informação e Comunicação

As ICT e as comunicações M2M (*Machine-to-Machine*) são dois conceitos fundamentais para que a infraestrutura das *Smart Grid* se torne realidade, uma vez que permitem a requerida comunicação bidirecional entre um grande número de equipamentos, de forma a serem monitorizados e controlados os consumos, os perfis de seus utilizadores, e também os sistemas de informação onde reside inteligência. Na figura A1.3 é apresentada uma arquitetura de comunicações M2M típica para o sector da distribuição.

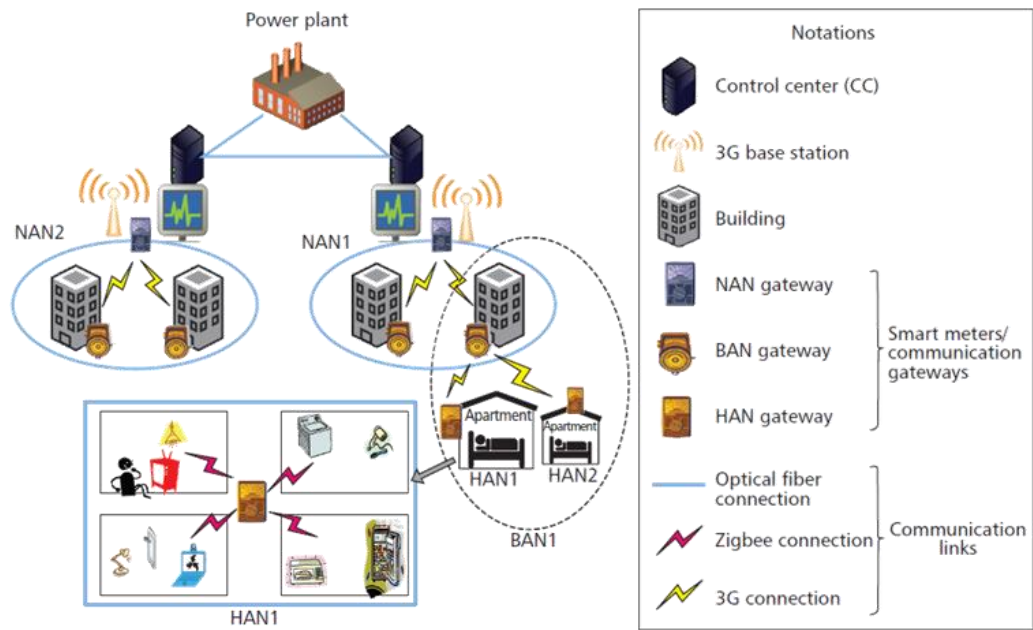


Figura A1.3 – Arquitetura típica M2M para uma *Smart Grid* (Fadlullah et al., 2011)²

Na tabela A1.2 é apresentada uma lista exaustiva das tecnologias mais relevantes de comunicação para cada segmento da rede (Moura et al., 2013).

² **Legenda:** HAN (Home Area Network); BAN (Building Area Network); AN (Access Network; NAN (Neighbourhood Area Network)

Tabela A1.2 - Resumo das tecnologias usadas para comunicação (Moura et al., 2013)

Tecnologias de Comunicação		HAN	AN/BAN	NAN/MAN/WAN	
Sem fios	Zigbee (Inicialmente baseada em IEEE 802.15.4)	✓	(Ocasionalmente usa topologias em rede)		
	Bluetooth	✓			
	Z-Wave	✓			
	EnOcean (ISO/IEC 14543-3-10) (EnOcean, 2012)	✓			
	Wi-Fi (IEEE 802.11)	✓	✓		
	WiMAX (IEEE 802.16)		✓		
	White Spaces		✓	✓	
	Satélite			✓	
	Cellular			✓	
	Insteon	✓			
	Com fios	KNX	✓		
		LonWorks	✓		
PLC (e.g., BACnet, HomePlug)		✓	✓ (e.g., PRIME, G3-PLC, G.hnem)		
Ethernet (e.g., Ethernet rápida)		✓		✓ (e.g., 1G/10G Ethernet)	
DSL			✓		
Cabo (DOCSIS)			✓		
Fibra			✓ (p.e., FTTH)	✓ (p.e., SONET/SDH)	

As tecnologias mencionadas na tabela A.1.2 correspondem às camadas base de comunicação. Nas camadas mais altas, chamadas camadas de aplicação, existem também vários protocolos e *standards*, muitos deles não só ligados a um segmento da rede, mas expandidos através de toda a rede de comunicação. A tabela A1.3 sumariza os mais relevantes (Gungor et al., 2011) (Craemer & Deconinck, 2010) (Moura et al., 2013).

Tabela A1.3 – Protocolos e *standards* usados nas camadas mais elevadas (Gungor et al., 2011)(Craemer & Deconinck, 2010)(Moura et al., 2013)

Nome	Detalhes	Aplicação
U-SNAP	<i>Standard</i> para permitir a interoperabilidade na HAN.	HAN
M-Bus	<i>Standard</i> europeu que fornece os requisitos de leitura remota para todos os tipos de contadores. Recentemente também tem sido aplicado M-Bus com wireless.	AN/AMI
DLMS/COSEM (IEC 62056)	<i>Standard</i> para a troca de informações de leituras de contadores, tarifas e controlo de cargas.	AMI
ANSI C12.19	Modelo de medição flexível para estruturas de dados comuns e vocabulário industrial para comunicações de dados medidos pelos contadores.	AMI
OpenADR	Desenvolvido originalmente por Lawrence Berkeley Labs. Plataforma aberta e independente, e <i>Standard</i> E2E para a <i>demand response</i> .	DR, DSM
DNP3	<i>Standard</i> para as comunicações ente centros de controlo, RTUs (<i>Remote Terminal Units</i> – Unidades terminais remotas) e IDEs (<i>Intelligent Electronic Devices</i> – Equipamentos eletrónicos inteligentes) Muito usado nos EUA e Canadá.	SCADA
IEC 60870-5-101	<i>Standard</i> para as comunicações ente centros de controlo, RTUs e IDEs. Muito usado na Europa.	SCADA
IEC 60870-5-104	Incluí melhoramentos no IEC 60870-5-101 para todas as camadas de comunicações.	SCADA
IEC 61970/61969	Define o modelo de informação que é necessário para a troca de dados entre os equipamentos e as redes. O IEC 61970 trabalha nos domínios de transmissão, enquanto que o IEC 61969 trabalha nos domínios de distribuição.	Sistemas de Gestão de Energia
IEC 61850	<i>Standard</i> aberto e flexível para comunicações entre e com subestações.	Automação de Subestações
MODBUS	Protocolo de mensagens na camada de aplicações que fornece comunicação entre os equipamentos ligados através de vários barramentos e redes. Pode ser implementado através de Ethernet ou usando transmissão serial assíncrona sobre EIA 232, EIA 422, EIA 485.	Automação de Subestações
IEC 60870-6	Protocolo para a troca de dados entre os centros de controlo das <i>utilities</i> .	Centro de Controlo de Comunicações

A figura A1.4 fornece uma visão global do modelo OSI (*Open System Interconnection*), onde estão incluídos alguns dos protocolos e *standards* apresentados.

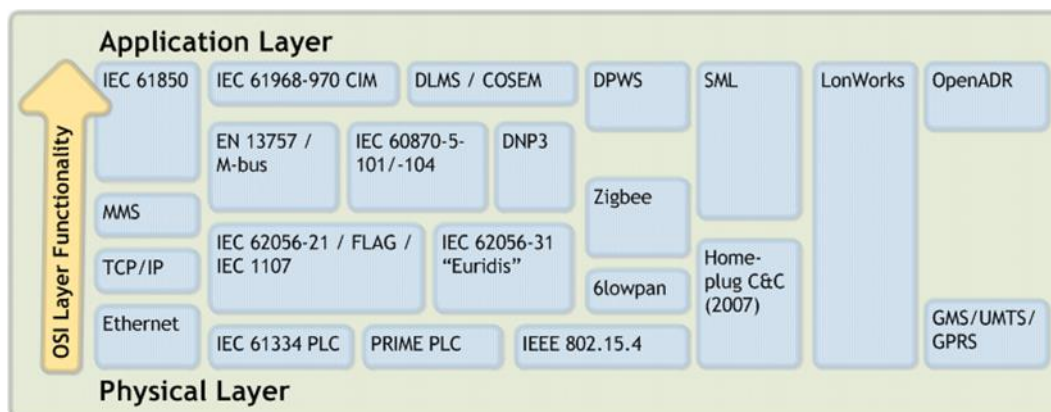


Figura A1.4 – Modelo OSI e padrões usados (Craemer & Deconinck, 2010)

As soluções com PLC estão a ganhar cada vez mais interesse sendo uma das preferidas pelas *utilities* para, por exemplo, aplicações de AMI. Existem dois tipos de comunicações PLC, a banda larga (B-PLC ou BPL) e banda estreita (NB-PLC). As comunicações NB-PLC foram desenvolvidas para ultrapassar problemas relacionados com a compatibilidade eletromagnética e para a travessia de redes de baixa tensão para média tensão. A tabela A1.4 resume as principais características de algumas destas tecnologias baseadas em comunicações PLC.

Tabela A1.4 – Resumo das tecnologias de comunicação PLC (Craemer & Deconinck, 2010)(Gungor et al., 2011)(Moura et al., 2013)

Nome	Tipo	Detalhes	App
IEEE 1901	BPL	PLC de elevada velocidade. Até 100 Mbps.	HAN/Redes de multimédia domésticas
BACnet	NB 1G	Padrão ASHRAE para automação de edifícios e controlo de redes.	HAN
HomePlug	BPL	Tecnologia específica não padronizada para HomePlug Powerline. Usado para ligar <i>smart appliances</i> usando a rede de eletricidade doméstica.	HAN
HomePlug Green PHY	NB 1G	PLC de custo otimizado para uma rede específica de baixa potência.	HAN
G3-PLC	NB 2G	Tem como objetivo permitir interoperabilidade, segurança e robustez com redução de custos	AN/AMI
PRIME	NB 2G	Padrão global e aberto para uma compatibilidade de vários fornecedores	AN/AMI
G.HNEM	NB 2G	Padrão ITU-T com o objetivo de harmonizar uma segunda geração de NB-PLC	AN/AMI

1.2.2 *Smart Meters e Smart Appliances*

O equipamento *Smart Meter* (contador inteligente) tem como função básica medir, eletronicamente, a quantidade de energia que está a ser usada, permitindo a comunicação desta informação para outro aparelho, o qual, é utilizado pelo cliente de forma a visualizar a energia que está a ser consumida e o custo associado. Os *Smart Meters* têm várias funções principais: fornecer informação da energia usada para o utilizador final e ajudar a controlar o consumo e custos associados; enviar informação para a empresa comercializadora, controlo das cargas, controlo de picos de consumo e desenvolver estratégias para os preços de energia baseadas nas informações de consumo. Existem ainda outras informações adicionais que os *Smart Meters* podem proporcionar, como o histórico do consumo de energia, emissões de gases de efeito de estufa, opções tarifárias, tarifas de *demand response*, controlo remoto de “ON/OFF”, controlo e monitorização dos aparelhos, termóstato, monitorização da qualidade de energia, comutação e medição pré-paga (Moura et al., 2013).

Estas tecnologias têm sido desenvolvidas de forma a aumentar a eficiência operacional (aumento de informação nas tarifas, faturas mais precisas e rápida interrupção e restauro pelo controlador), melhorar a eficiência energética (transmitindo para o consumidor informações para uma maior consciência do seu consumo de energia), e ir ao encontro de uma série de requisitos do cliente e oportunidades do mercado. Além disto, os programas que incluem a integração de *Smart Meters* não são só uma questão relacionada com as empresas operadoras da rede, fazem também parte das políticas energéticas de muitos governos de vários países.

As *Smart Appliances* utilizam um computador moderno e tecnologias de comunicação de modo a que as suas funções sejam rápidas, baratas e mais eficientes. As *Smart Appliances* monitorizam, protegem, e ajustam automaticamente a sua operação de acordo com a necessidade do utilizador. O principal objetivo de tais aparelhos é assegurar uma estratégia de gestão de energia elétrica inteligente para otimizar o perfil de consumo, de acordo as necessidades de energia e da disponibilização de geração renovável.

1.2.3 **Sistemas de Monitorização e Controlo**

A monitorização da energia elétrica e o controlo de sistemas agrega as características dos *Smart Meters*, que têm como principal função a monitorização do consumo, e o controlo remoto das tomadas, fornecendo informação sobre todo o consumo energético doméstico e assegurar o controlo (ON/OFF) dos eletrodomésticos, individualmente (Moura et al., 2013).

A figura A1.3 mostra um exemplo de comunicação utilizando a rede *wireless* (rede sem fios) entre os vários aparelhos que constituem uma residência habitacional e o controlador principal que agrega todas as informações. Estando, assim, ligado diretamente com o dispositivo central de forma a relacionar os fluxos de energia elétrica que entra na residência e aquele que é consumido por cada aparelho elétrico (Cloogy, 2013).

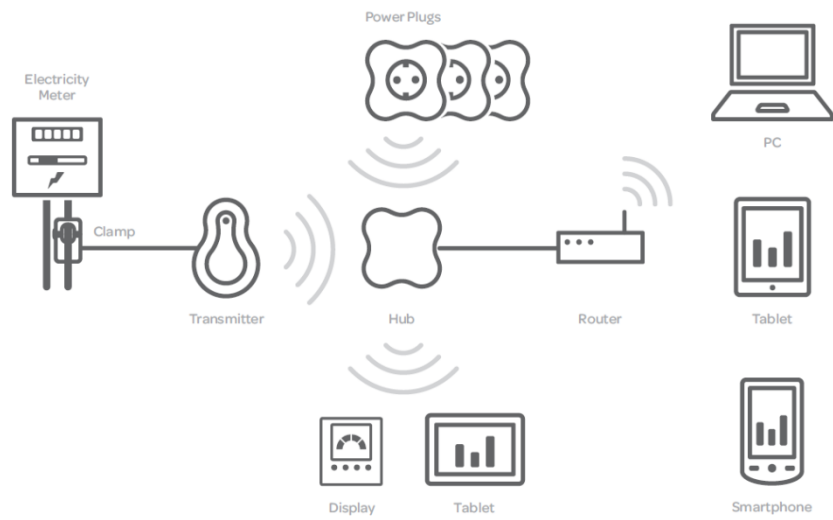


Figura A1.5 – Exemplo de equipamento de monitorização do consumo de energia (Cloogy, 2013)

Anexo 2

Impactos das *Smart Grids*

2.1 Benefícios

Como as *Smart Grids* envolvem todas as áreas do sistema de energia elétrica, podem apresentar impactos múltiplos em tecnologias de diferentes áreas e serviços no SEE. Os benefícios que se podem alcançar com as *Smart Grids* incluem (IEA, 2011):

- Consumidores – Disponibiliza informação que incentiva e desincentiva (oferecendo motivação e escolhas) o consumidor a alterar o seu perfil de consumo de forma a contribuir para um equilíbrio entre geração e consumo assegurando viabilidade, dadas as amplas opções de preços variáveis e serviços de *demand response*, usando *feedback* indireto através da medição de consumos e faturação.
- Geração e Armazenamento – Agregação e gestão das diferentes opções de geração e armazenamento; integração de novos recursos (incluindo energias renováveis, pequena escala de cogeração e armazenamento de energia) ao longo do SEE, desde a geração até aos comercializadores e também utilizadores finais.
- Produtos e Serviços – Cria a oportunidade de fornecer novos produtos e serviços para os consumidores e permite a introdução no mercado da energia a empresas terceiras. Os consumidores têm a opção de escolher através de várias empresas que oferecem serviços de gestão.
- Qualidade da Energia Elétrica – Melhora a fiabilidade da rede de energia elétrica evitando interrupções e perturbações. Através de métodos de controlo avançados que monitorizam os componentes essenciais, dispendo de diagnósticos rápidos e soluções para eventos que possam afetar a qualidade de energia elétrica.
- Utilização de recursos – Otimiza os recursos para uma operação eficiente; assegurando o ajuste dos sistemas de controlo e uma manutenção contínua de forma a reduzir perdas e eliminar o congestionamento do fluxo de energia.
- Resiliência – Assegura a proteção contra ataques e desastres naturais na infraestrutura física (subestações, transformadores, cabos, etc.) e na infraestrutura cibernética (mercado, sistemas, software e comunicações), através do isolamento de elementos problemáticos do resto do sistema e restauro para operação normal.

Todos os impactos acima mencionados irão levar a três benefícios principais: baixos custos de operação (melhorando a manutenção da rede), baixos preços de energia (melhorando a fiabilidade e evitando custos desnecessários) e melhor utilização dos recursos pela sociedade (utilização dos recursos com elevada penetração renovável promovendo a redução das emissões de gases de efeito de estufa e redução da necessidade de importação de combustíveis fósseis).

2.2 Poupança de Energia Elétrica

Um benefício importante que as *Smart Grids* proporcionam é a poupança de energia elétrica. Estas poupanças são asseguradas pela mudança de comportamentos impulsionados pelas capacidades de monitorização (detecção de elevados consumos e consumos fora do normal) e de controlo (adaptação do perfil do consumo em resposta a ações de DR e pelas tarifas dinâmicas).

Um estudo desenvolvido na América do Norte, Europa e Austrália (Faruqui & Palmer, 2011) demonstrou que a utilização da tecnologia para monitorização e controlo de cargas contribui fortemente para alcançar poupanças no consumo de energia. A integração de tecnologias mais avançadas aumenta a capacidade de resposta ao preço da energia em tempo real. No estudo desenvolvido foi conseguido uma média de redução de pico de 23%. Os impactos estão ilustrados na figura A2.1.

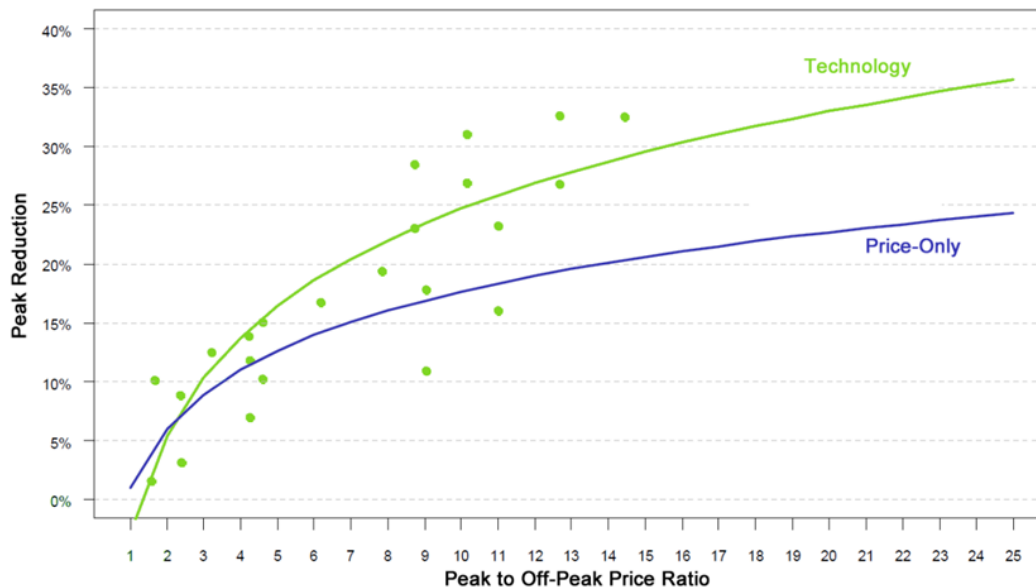


Figura A2.1 - Impacto ao melhorar a tecnologia (Faruqui & Palmer, 2011)

Do mesmo estudo (Faruqui & Palmer, 2011) foram retiradas as seguintes conclusões:

- Os clientes respondem aos custos dinâmicos de eletricidade diminuindo o seu consumo de pico, mas apenas uma baixa percentagem;
- A magnitude de suas respostas varia com os custos associados à energia;
- Os clientes respondem de forma idêntica ao longo de vários anos, resultados demonstrados em vários projetos-piloto, com idênticos perfis de *demand response* em diferentes verões;
- Os clientes já estão a ficar habituados a pagar valores diferentes durante diferentes momentos do dia para o preço da energia (tarifas bi e tri-horária);
- A satisfação dos clientes com o preços dinâmicos de energia nos projetos-piloto é elevada.

Anexo 3

Armazenamento de Energia Elétrica

As tecnologias de armazenamento de energia elétrica são tipicamente caracterizadas pelas suas aplicações finais, frequentemente em termos de tempo de descarga. Na tabela A3.1 são apresentados as três categorias mais comuns.

Tabela A3.1 - Aplicações típicas dos sistemas de armazenamento de energia (CEC, 2005)

Tempo de descarga requerido	Exemplo de aplicações típicas
1 a 10 segundos	Qualidade da energia: fornecer energia às cargas críticas durante cavas de tensão ou interrupções de muito curta duração. Estabilidade transitória, regulação da frequência.
10 a 300 segundos	Qualidade da energia: fornecer energia às cargas críticas durante cavas de tensão e interrupções breves. Permitir o arranque de sistemas de geração de emergência. Reservas para contingências, capacidade de fornecimento rápido.
5 a 60 minutos	Todas as aplicações anteriores, mais o fornecimento de energia para interrupções mais longas.
1 a 4 horas	Nivelamento do diagrama de cargas, capacidade de armazenamento firme, diferimento do T&D.
4 horas a vários dias	Todas as aplicações anteriores, mais a aplicação em sistemas de geração à base de energias renováveis, permitindo o seu funcionamento em modo isolado ou compensando a intermitência.

As primeiras categorias de aplicação das tecnologias de armazenamento correspondem à gama de serviços de sistema que não permitem descarregamento por períodos de tempo longos. Estas podem proporcionar benefícios para a qualidade da energia elétrica local, como a estabilidade da tensão através da transferência de energia reativa para a rede.

As duas últimas categorias correspondem à flexibilidade de energia, isto é, a capacidade de deslocar energia produzida num determinado período para outro onde haja grande procura.

Os sistemas mais adequados para aplicar ao nível do utilizador final ou ao nível do posto de transformação, para um conjunto de habitações, são os sistemas de armazenamento com autonomia muito longa, de preferência de várias horas podendo atingir alguns dias. A figura A3.1 apresenta o intervalo de tecnologias disponíveis para armazenamento de energia.

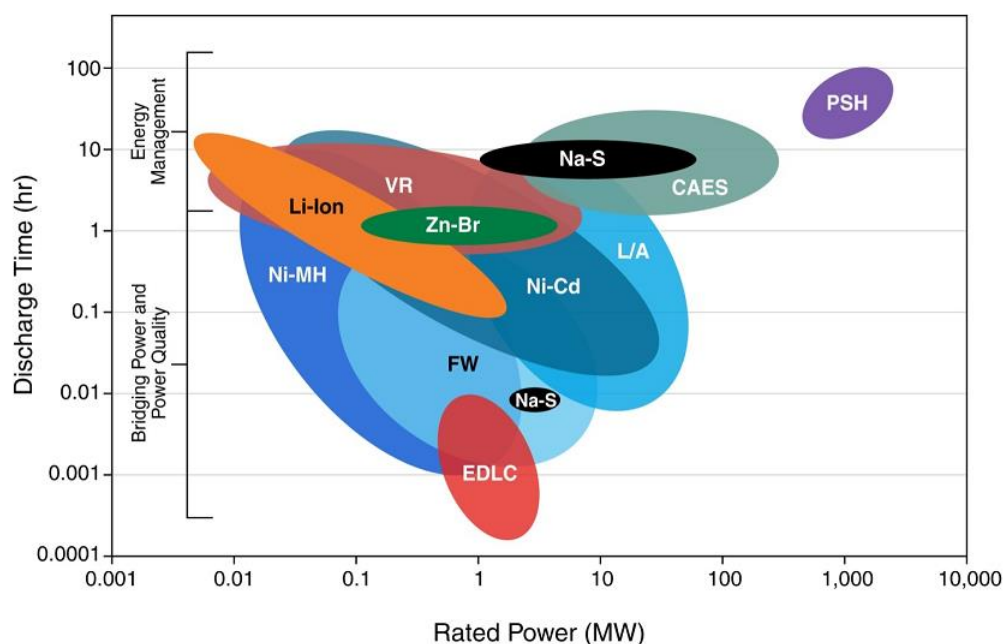


Figura A3.1 - Aplicações e Tecnologias de armazenamento de energia³ (ESA, 2011)

3.1 Tecnologias incluídas em cenários de elevada produção renovável

Num cenário de elevada produção renovável, o maior desafio para a integração na rede, consiste na simultaneidade da geração de energia renovável com a procura de eletricidade. Consequentemente, o correto dimensionamento de tecnologias de armazenamento é centralizado em capacidades que possam disponibilizar serviços de gestão de energia ou possam armazenar ou descarregar continuamente durante várias horas (8-15 horas dependendo do tipo de tecnologia).

De entre as tecnologias apresentadas, as que mais correspondem ao critério de fornecer adequados serviços de gestão de energia elétrica nas redes de um SEE são: as baterias de elevada energia, hidroelétrica reversível com o uso de bombagem e o armazenamento de ar comprimido.

Como este se foca em edifícios de habitação, ou seja, ao nível da distribuição para um conjunto de edifícios, a tecnologia mais adequada para este tipo de aplicações são as baterias de elevada energia.

³ Legenda: CAES – Armazenamento de ar comprimido; FW – *Flywheels*; L/A – Baterias de Chumbo-ácido; Li-Ion – Baterias de Lítio-íon; Na-S – Baterias de Sódio-Enxofre; Ni-Cd – Baterias de Níquel-Cádmio; Ni-MH – Baterias de Hidretos Metálicos de Níquel; PSH - Bombagem Hídrica; VR – Baterias de Vanádio-Redox; Zn-Br – Baterias de Brometo de Zinco.

3.2 Baterias de Elevada Energia

De entre os vários tipos de baterias, existem baterias com uma considerável sobreposição entre gestão de energia e aplicações de curta duração. Além disso, as baterias, em geral, conseguem fornecer respostas rápidas, o que significa que as baterias construídas para gestão de energia têm o potencial de fornecer serviços para todas as aplicações e escalas temporais discutidas na figura A3.1.

Muitos tipos de baterias têm sido desenvolvidas e demonstradas para aplicações em gestão de energia. As baterias disponíveis para aspetos comerciais, destinadas a gestão de energia, classificam-se em dois tipos: baterias de elevada temperatura e baterias de fluxo eletroquímicas.

As baterias de elevada temperatura operam acima dos 250°C e usam materiais fundidos que correspondem aos elementos positivo e negativo da bateria. As baterias de elevada temperatura mais desenvolvidas e usadas são as de Sódio-Enxofre (NaS), com capacidade de instalações pelo mundo a exceder os 270 MW (NREL, 2012).

A segunda classe das baterias de elevada temperatura são as chamadas baterias de fluxo eletroquímicas, que usam um líquido eletrolítico separado por uma membrana de troca de iões (NREL, 2012). A vantagem deste tipo de tecnologia é o facto de a componente de armazenagem e a componente onde ocorre a reação química serem dimensionadas independentemente, uma vez que os eletrólitos são armazenados separadamente nos tanques de armazenamento. Têm sido desenvolvidos dois tipos de baterias de fluxo eletroquímicas: brometo de vanádio e brometo de zinco. Outras combinações, como polisulfeto de brometo têm sido testados e novos químicos estão sob desenvolvimento (NREL, 2012).

Na tabela A3.2 pode-se observar as características mais importantes das várias tecnologias de armazenamento de energia elétrica.

Tabela A3.2 - Características das tecnologias de armazenamento de energia elétrica (IRES, 2012)

Baterias	Baterias Convencionais			Baterias Avançadas			Baterias de Fluxo		
	Pb-ácido	NiCd	NiMH	Li-ion	NaS	NaNiCl	V-redox	ZnBr	Zinco-Ar
Potência nominal (MW)	<70	<40	10 ⁻⁶ - 0.2	0.1 - 5	0.5 - 50	<1	0.03 - 7	0.05 - 2	Várias
Energia nominal (kWh)	10 ² - 10 ⁵	10 ⁻² - 1.5 × 10 ³	10 ⁻² -500	10 ⁻² - 10 ⁵	6 * 10 ³ - 6 × 10 ⁵	120 - 5 × 10 ³	10 - 10 ⁴	50 - 4 × 10 ³	× 10 ³
Tempo de Descarga	s - 3h	s - h	h	min - h	s - h	min - h	s - 10h	s - 10h	6h
Tempo de Resposta	ms	ms	ms - s	ms	ms	ms	<1 ms	<1 ms	ms
Energia específica (Wh/kg)	30 - 50	45 - 80	60 -120	100 - 250	150 - 240	125	75	60 - 80	400
Potência específica (W/kg)	75 - 300	150 - 300	700 - 756	230 - 340	90-230	130 - 160	N/D	50 - 150	1350
Densidade energética (kWh/m ³)	~75	<200	<350	250-620	<400	150 - 200	20 - 35	20 - 35	800
Densidade de potência (kW/m ³)	90 - 700	75 - 700	500 - 3000	1300 - 10000	120 - 160	250 - 270	0.5 - 2	1 - 25	50 - 100
Temperatura de operação (°C)	~27	40 a +45	2 a +45	10 - +50	~300	40 a +70	0 a +40	20 a +50	0 a +50
Rendimento (%)	80 - 90	70 - 75	70 - 75	90 - 98	85 - 90	90	~75	70 - 75	60
Tempo de vida (anos)	3 - 15 (a)	15 - 20	5 - 10	8 - 15	12 - 20	12 - 20	10 - 20	5 - 10	30
Ciclos	~2 × 10 ³	1.5 × 10 ³	3 × 10 ² - 5 × 10 ²	> 4 × 10 ³	2 × 10 ³ - 4.5 × 10 ³	10 ³ - 2.5 × 10 ³	> 13 × 10 ³	> 2 × 10 ³	> 2 × 10 ³
Custo (€/kW)	200 - 650	350 - 1000	120% * NiCd	700 - 3000	700 - 2000	100 - 200	2500	500 - 1800	~785
Custo (€/kWh)	50 - 300	200 - 1000	120% * NiCd	200 - 1800	200 - 900	70 - 150	100 - 1000	100 - 700	~126
Área requerida (m ² /kWh)	0.06	0.03	0.02?	0.01?	0.0019	0.03?	0.04	0.02	<0.005?
Impacto ambiental	médio	médio	baixo	muito baixo	muito baixo	N/A	baixo	baixo	baixo
Comerciável desde	1870	1915	1995	1991	1998	1995	1998	2009	2013/2014
Tempo de recarga	8 - 16h	1h	2 - 4h	min - h	~9h	6 - 8h	min	3 - 4h	N/D
Reciclável	5	4 - 5	4 - 5?	4	5	5	5	5	3
Transportável	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	sim	sim
Aplicações	UPS, qualidade de energia, reserva girante, nivelamento do consumo, regulação da tensão e da frequência	UPS, arranque de geradores, reserva girante, estabilização da rede	Veículos elétricos híbridos	Reserva de energia, regulação da frequência, estabilização da rede	Gestão da geração renovável, nivelamento do diagrama de cargas	Sector dos transportes	UPS, nivelamento do consumo, estabilização da geração renovável, potência de backup para armazenamento sazonal, qualidade de energia	Qualidade de energia, armazenamento sazonal	Armazenamento sazonal, qualidade de energia

A tabela A3.2 apresenta as seguintes considerações:

- As baterias de fluxo zinco - ar são recarregáveis e refere-se a uma tecnologia que tem sido desenvolvida muito recentemente.
- Os impactos ambientais são classificados numa escala de 5 pontos (elevado, médio, baixo, muito baixo, não apresenta).
- O tempo de recarga para cada tecnologia é proporcional à dimensão do sistema.
- O espaço requerido e as taxas de reciclagem são baseados na literatura ou no seu próprio julgamento (indicados com um ponto de interrogação neste caso). Para a reciclagem é usada uma escala de 5 valores onde 1=fraca, 5=excelente.
- N/D = Não disponível na literatura;

As baterias podem ser aplicadas nas várias áreas do sistema de energia elétrica, mas não são sempre a opção menos dispendiosa (Schoenung & Hassenzahl, 2003). As baterias iões de lítio oferecem uma boa capacidade de energia, elevada densidade energética até 620 kWh/m³, elevado rendimento, baixo peso e dimensões reduzidas, embora ainda apresentam um custo elevado.

Existem também problemas de segurança com a sua operação, como é o caso das baterias NiCd e NaS. As baterias de elevada temperatura NiCd e NaNiCl sofrem de efeitos de memória. As baterias de chumbo-ácido são o estado-da-arte da tecnologia para o armazenamento de energia fotovoltaica e asseguram um sistema de fornecimento ininterrupto com um baixo custo de investimento por kWh, embora tenham um tempo de vida relativamente limitado e a imagem de uma tecnologia antiga.

As baterias de zinco-ar têm baixos custos e requerem pouco espaço, exibindo uma notável densidade de energia de 800kWh/m³, no entanto, têm como desvantagem a baixa eficiência do ciclo completo de carga e descarga e ainda não existe nenhum sistema disponível no mercado. As baterias de *redox-flow* são sistemas versáteis e estão a começar a despertar interesse pela comunidade para uma opção de armazenamento de grandes dimensões, mas ainda é necessário mais investigação e desenvolvimento para adequar estas baterias a aplicações desejadas.

As baterias de iões de lítio e zinco-ar com densidades energéticas de 620kWh/m³ e 800 kWh/m³, respetivamente, parecem ser tecnologias muito promissoras para o armazenamento de energia elétrica. Em conjunto com estas tecnologias, as baterias NaNiCl (cloreto de sódio e níquel) são também esperadas para desempenhar um papel importante nos edifícios, uma vez que apresentam elevado tempo de vida e elevada capacidade de energia de pico. Contudo, é necessário melhorar algumas propriedades de tais tecnologias, como o aumento da eficiência dos sistemas, baixos custos e prolongar os tempos de vida útil.

Anexo 4

Armazenamento de Energia Térmica

O armazenamento de energia térmica pode ser definido como uma retenção temporária de energia sob forma de calor ou frio. O armazenamento de energia pode reduzir o desfasamento entre períodos de grande produção e os períodos de elevada procura, desempenhando um papel importante na conservação da energia. Atualmente, o armazenamento de energia térmica é interligado às redes de aquecimento urbano.

Um estudo da IEA analisou informações acerca de redes de aquecimento urbano (DH – *District Heating*) na Dinamarca, Alemanha e Finlândia com o objetivo de determinar as vantagens das técnicas de otimização com armazenamento de calor nos sistemas de DH (Editor, Bøhm, & Sipilae, 2005). Os resultados mostraram que em sistemas de DH com CHP, o armazenamento de calor pode aumentar a capacidade de geração de eletricidade, levando a melhorias significativas no equilíbrio do consumo e na redução de emissões. Para redes de DH, com ou sem produção de eletricidade, o armazenamento de calor pode ser usado para cobrir uma interrupção do fornecimento. Por outro lado, o armazenamento de calor facilita a gestão da procura (DSM – *Demand Side Management*), assim o operador pode exercer maior possibilidade de escolha em relação à utilização de centrais CHP e fontes de combustíveis.

Segundo a IEA (IEA, 2005), as principais razões para a instalação de armazenamento de energia térmica centralizado e descentralizado nas redes de DH ou nos sistemas de refrigeração inclui:

- A eliminação de restrições e limitações na geração de calor;
- A eliminação de restrições e limitações na rede de distribuição;
- Redução dos picos de consumo;
- Melhorar a utilização de resíduos na produção de calor;
- Permitir o agendamento do uso de calor ou eletricidade no caso das centrais CHP;
- Aumentar os ganhos tomando as vantagens das tarifas de energia variáveis;
- Substituir a produção normal de calor durante curtos períodos planeados ou paragens não planeadas.

A maior prioridade consiste na produção e distribuição da energia na forma economicamente mais eficiente. No caso das centrais CHP, o armazenamento é usado para deslocar no tempo a geração de eletricidade, maximizando a produção de calor em períodos com tarifas de eletricidade reduzidas. O excesso de calor produzido durante estes períodos é armazenado e usado quando as tarifas de eletricidade são elevadas.

4.1 Armazenamento de Energia Térmica nas redes de DH

A tecnologia de armazenamento de calor normalmente usada em DH consiste em tanques de aço com água, normalmente cilíndricos, com volumes entre os 5 m³ e os 75 000 m³ para

fornecimento de calor a edifícios (Martin & Thornley, 2013). Durante a carga, a água quente é fornecida no topo do tanque simultaneamente com a extração de água fria do fundo do tanque. As águas, quente e fria, são separadas com uma diferença na gravidade através de uma camada de separação de aproximadamente 1 metro. Durante a descarga ocorre o fenómeno semelhante.

O armazenamento de energia térmica é ligado com o sistema DH através das centrais de CHP, conforme ilustrado na figura A4.1. A operação de armazenamento é simples: carrega quando a produção de calor é superior ao consumo, e descarrega quando a produção de calor é inferior ao consumo. Isto permite que a central CHP opere com flexibilidade, em particular, quando as tarifas de eletricidade são mais favoráveis.

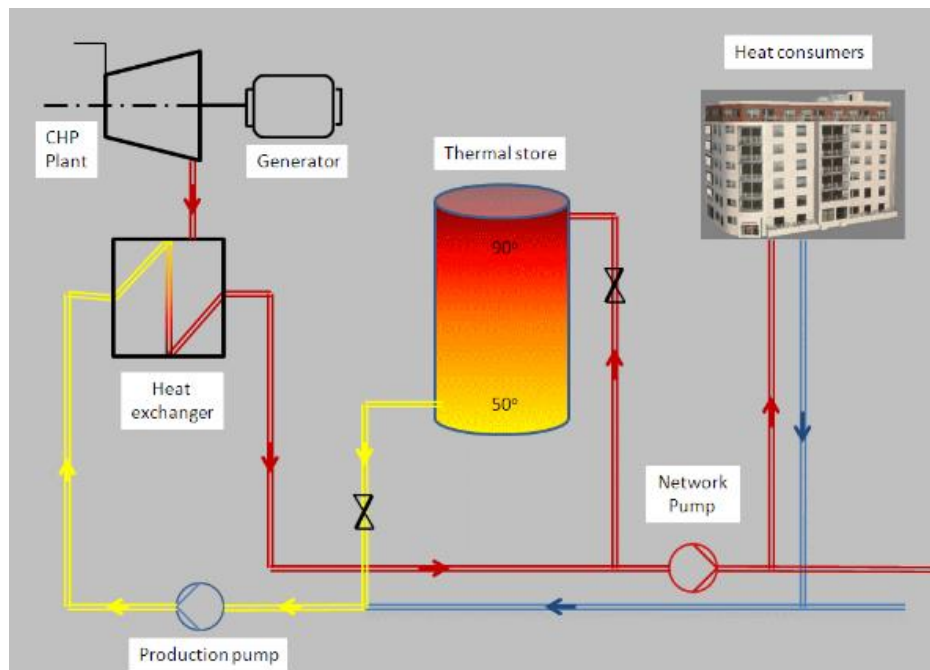


Figura A4.1 - Armazenamento de energia térmica integrado em rede de DH (Martin & Thornley, 2013)

A integração de armazenamento de energia térmica num sistema CHP-DH assegura grande flexibilidade de operação e aumentar a eficiência, permitindo também:

- A produção conjunta de calor e eletricidade durante períodos com tarifas de eletricidade elevadas, e se existir excesso de calor, este pode ser usado para carga da tecnologia de armazenamento. Este modo de operação é importante especialmente em redes com tarifas que diferem ao longo do dia.
- Para grandes sistemas CHP-DH, a central CHP pode produzir eletricidade até atingir a carga completa do armazenamento, quando existe escassez de eletricidade na rede.
- Reduzir ou evitar as perdas, por exemplo, se a eletricidade produzida, em conjunto com o calor gerado, vai ser vendida abaixo dos custos de produção, a central CHP deve ser desligada e o calor é fornecido para as cargas através do armazenamento.
- Compensar as variações de carga no consumo de energia térmica, durante por exemplo a noite, reduzir o número de arranques das turbinas das centrais CHP e o uso das caldeiras da central, durante os períodos de pico diários.

O custo para o armazenamento de energia térmica é de aproximadamente 1150 €/m^3 , ao qual se adiciona os dispositivos necessários com um custo estimado de 4000 €. Embora seja difícil pormenorizar qual a necessidade por dispositivos de controlo adicionais, em certos casos é necessário investir 35-40000€ para um sistema completo de armazenamento de energia térmica (Martin & Thornley, 2013).

4.2 Métodos de Armazenamento de Energia Térmica

Existem vários métodos para armazenamento de energia térmica (Ataer, 2006):

- Aquecimento de um líquido ou de um sólido, sem alterar o seu estado (fase): Este método é chamado de *armazenamento de calor sensível* e a quantidade de energia armazenada depende da mudança de temperatura do material.
- Aquecimento de material, sendo submetido a mudança de fase: Este método é chamado *armazenamento de calor latente*. A quantidade de energia armazenada (E) depende da massa (m) e do calor latente de fusão (λ) do material. ($E = m\lambda$)
O sistema opera isotermicamente no ponto de fusão do material. Se a operação isotérmica é dificultada, o sistema opera no intervalo de temperaturas que incluem o seu ponto de fusão.
- Uso de calor para produzir uma certa reação físico-química e seguidamente absorver a energia libertada. A energia é obtida e absorvida durante a rutura ou reposição das ligações moleculares numa reação química completa com reversibilidade.

A tabela A4.1 resume os métodos de armazenamento de energia térmica.

Tabela A4. 1 - Formas de armazenamento de energia térmica (Ataer, 2006)

Tipo de armazenamento	Princípio funcional	Fases	Exemplos
Calor sensível	Variação da temperatura dependendo da capacidade do material sem mudança de fase.	1-Líquido 2-Sólido	1-Água quente, líquidos orgânicos, sal fundido, metais líquidos. 2-Metals, Minerais, cerâmicas.
Calor latente	Calor de mudança de fase de um material.	1-Líquido – Sólido 2-Sólido – Sólido	1-Nitritos, cloreto, hidróxidos, carbonatos, fluoretos, eutéticos. 2-Hidróxidos.
Energia de Ligação	Calor de reações físico-químicas realizadas no material através de mudanças de pressão e temperatura.	1-Sólido – Gás 2-Gás – Gás 3-Líquido – Gás	1- $\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_2/\text{NH}_3$ 2- $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ 3- $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$

4.3 Armazenamento de Calor Sensível

No caso de armazenamento de calor sensível, a energia é contida ou extraída aquecendo ou arrefecendo um líquido ou um sólido, que não muda de fase durante o processo. Nestes sistemas são usados uma grande variedade de materiais: líquidos como a água, óleos, sal inorgânico fundido e sólidos como rochas, seixos e materiais do tipo refratário. No caso dos

sólidos, como o calor está contido no material este é extraído através de um gás ou líquido que atravessa as lacunas entre o material.

A escolha do tipo de material a usar depende do nível de temperatura que se pretende usar. A água é usada para temperaturas abaixo dos 100°C e material do tipo refratário é usado para temperaturas de aproximadamente 1000°C. Os sistemas de calor sensível são de projeto e construção simples, quando comparados com os de calor latente ou calor de reações químicas, mas têm como grande desvantagem o elevado tamanho. Uma segunda desvantagem é o facto de não se conseguir fornecer calor a temperatura constante.

Na tabela A4.2 encontram-se os materiais líquidos utilizados no armazenamento de calor sensível.

Tabela A4.2 - Propriedades de líquidos para armazenamento de calor sensível (Ataer, 2006)

Material	Tipo do fluido	Temp. (°C)	Densidade (kg/m ³)	Capacidade calorífica (J/kg.K)	Condutividade (W/m.K)
Água	-	0 a 100	1000	4190	0.63 a 38°C
Água – Etilenoglicol 50/50	-	-	1050	3470	-
Caloria HT43	Petróleo	-10 a 315	-	2300	-
Dowtherms	Petróleo	12 a 260	867	2200	0.112 a 260°C
Therminol 55	Petróleo	-18 a 315	-	2400	-
Therminol 66	Petróleo	-9 a 343	750	2100	0.106 a 343°C
Etilenoglicol	-	-	1116	2382	0.249 a 20°C
Hitec	Sal fundido	141 a 540	1680	1560	0.61
Petróleo combustível	Petróleo	Mais de 160	888	1880	0.145
Lítio	Sal líquido	180 a 1300	510	4190	38.1
Sódio	Sal líquido	100 a 760	960	1300	67.5
Etanol	Líquido orgânico	Mais de 78	790	2400	-
Propanol	-	Mais de 97	800	2500	-
Butanol	-	Mais de 118	809	2400	-
Isobutanol	-	Mais de 100	808	3000	-
Isopentanol	-	Mais de 148	831	2200	-
Octane	-	Mais de 126	704	2400	-

Na tabela A4.3 encontram-se os materiais sólidos utilizados no armazenamento de calor sensível.

Tabela A4.3 - Propriedades de sólidos para armazenamento de calor sensível (Ataer, 2006)

Material	Densidade (kg/m^3)	Calor específico ($J/kg.K$)	Capacidade calorífica ($J/m^3.K$)	Condutividade ($W/m.K$)	Difusividade térmica (m^2/s)
Alumínio	2707	896	2.4255	204 a 20°C	84.100
Óxido de alumínio	3900	840	3.2760	-	-
Sulfato de alumínio	2710	750	2.0325	-	-
Tijolo	1698	840	1.4263	0.69 a 29°C	0.484
Tijolo de magnésia	3000	1130	3.3900	5.07	1.496
Betão	2240	1130	2.5310	0.9 – 1.3	0.356-0.514
Ferro fundido	7900	837	6.6123	29.3	4.431
Ferro puro	7897	452	3.5694	73 a 20°C	20.45
Cloreto de cálcio	2510	670	1.6817	-	-
Cobre	8954	383	3.4294	385 a 20°C	112.3
Terra (molhada)	1700	2093	3.5581	2.51	0.705
Terra (seca)	1260	795	1.0017	0.25	0.25
Cloreto de potássio	1980	670	1.3266	-	-
Sulfato de potássio	2660	920	2.4472	-	-
Carbonato de sódio	2510	1090	2.7359	-	-
Pedra de granito	2640	820	2.1648	1.73 – 3.98	0.799-1.84
Pedra calcária	2500	900	2.2500	1.26 – 1.33	0.56-0.591
Pedra de mármore	2600	800	2.0800	2.07 – 2.94	0.995-1.413
Arenito	2200	710	1.5620	1.83	1.172

4.4 Armazenamento de Calor Latente

No armazenamento de calor latente, o princípio baseia-se no facto de quando o material é submetido a calor a sua fase é alterada, por exemplo, de líquido para sólido. Nestas condições a mudança de fase verifica-se quando ocorre a transferência de energia térmica. Assim, os materiais de calor latente são chamados de materiais de mudança de fase (PCM – *Phase change material*). Inicialmente os PCMs agem como os materiais de armazenamento convencionais, pois a temperatura aumenta à medida que absorvem calor. Os PCMs permitem a absorção e adsorção de calor praticamente a uma temperatura constante e conseguem armazenar 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume, quando comparados com materiais de calor sensível. Grande número de PCMs é conhecido por fundir com um calor de fusão dentro da gama requerida, contudo de modo a proporcionar a sua aplicação estes materiais devem apresentar as requeridas propriedades termodinâmicas, cinéticas e químicas (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009). Adicionalmente, é importante ter em consideração os aspetos económicos e a fácil disponibilidade destes materiais. A tabela A4.4 mostra um conjunto de propriedades que os materiais de mudança de fase devem conter para o projeto de sistemas de armazenamento de calor.

Tabela A4.4 - Propriedades dos materiais de mudança de fase (Sharma et al., 2009)

Propriedades Térmicas	Propriedades Físicas	Propriedades Cinéticas	Propriedades Químicas	Propriedades Económicas
1-Temperatura de mudança de fase adequada; 2-Transição com calor latente de elevado; 3-Boa transferência de calor (condutividade).	1-Equilíbrio de fase estável; 2-Densidade elevada; 3-Pequena mudança de volume na transformação de fase; 4-Vapor de pressurização baixo nas temperaturas de operação.	1-Capacidade de esfriamento baixa; (processo de baixar a temperatura); 2-Taxa de cristalização adequada.	1-Estabilidade química prolongada; 2-Compatibilidade com materiais de construção; 3-Não tóxico; 4-Não inflamável; 5-Não explosivo.	1-Abundante; 2-Disponível em quantidades de grande escala; 3-Rentável; 4-Baixo custo.

Ao selecionar um determinado material PCM para uma aplicação particular, a temperatura de operação de aquecimento ou arrefecimento deve coincidir com a temperatura de transição do material.

O armazenamento de calor sensível pode ter a vantagem de ser relativamente barato mas os materiais apresentam uma densidade energética relativamente baixa da ordem dos 25 kWh/m^3 , em contrapartida, os materiais de mudança de fase com densidades 4 vezes superiores, da ordem dos 100 kWh/m^3 , são cada vez mais usados prevendo-se a diminuição dos custos nos próximos anos (Faninger, 1998). Para determinados materiais PCM podem ser atingidas as densidades da ordem do 300 kWh/m^3 .

Uma forma comum de conter os PCMs são as cápsulas de plástico, sendo colocadas em tanques onde circula o fluido de transferência de calor, usualmente a água, que funde ou solidifica o material PCM. Vários tipos de PCMs com pontos de fusão entre -21°C e 120°C são atualmente comercializados (Ataer, 2006).

Na tabela A4.5 pode-se observar os materiais de mudança de fase mais usados e as suas respetivas características técnicas e económicas.

Tabela A4.5 - Características técnicas e económicas dos materiais de mudança de fase mais usados (Sharma et al., 2009)

PCM	Temp.	Densidade Média	Condutividade Média	Capacidade Média	Capacidade de Volume	Custos Médios por kg	Custos Médios por kWh _t
	Frio - Quente (°C)	(kg/m ³)	(W/mK)	(kJ/kgK)	(kWh _t /m ³)	(€/kg)	(€/kWh _t)
NaNO ₃	308	2257	0.5	200	125	0.20	3.6
KNO ₃	333	2110	0.5	267	156	0.30	4.1
KOH	380	2044	0.5	150	85	1.00	24.0
Sal-Cerâmicas (NaCO ₃ -BaCO ₃ /MgO)	500-850	2600	5.0	420	300	2.00	17.0
NaCl	802	2160	5.0	520	280	0.15	1.2
Na ₂ CO ₃	854	2533	2.0	276	194	0.20	2.6

O armazenamento é uma característica crítica dos sistemas de energia que asseguram aquecimento de espaços através de calor e de água quente. De forma a atingir uma elevada eficiência com aceitável custo e num volume adequado para o mercado, deve ser selecionado

um material apropriado de elevada densidade de armazenamento térmico, tendo pelo menos o triplo da capacidade de armazenamento da água. Tal material, ainda não foi descoberto, mas os potenciais candidatos incluem o micro encapsulamento de PCMs e os materiais seletivos de absorção e adsorção de água.

Na tabela A4.6 pode-se comparar as características dos três principais materiais para armazenamento de energia térmica.

Tabela A4.6 - Comparativo dos três materiais principais para armazenamento de energia térmica (Ataer, 2006)

	Calor Sensível		Calor Latente
	Água	Rocha	Material PCM (sólido-líquido)
Intervalo de temperatura de operação	Limitado (0-100°C)	Grande	Grande, dependendo do material
Calor Específico	Elevado	Baixo	Médio
Conductividade Térmica	Baixa, efeitos de convecção	Baixo	Muito Baixo, isolante
Capacidade de armazenamento por unidade de massa e volume para pequenas diferenças de temp.	Baixo	Baixo	Elevado
Estabilidade aos ciclos térmicos	Boa	Boa	N/A
Disponibilidade	Muito Elevada	Elevada	Dependo da escolha do Material
Custo	Barato	Barato	Caro
Custo das Bombas, ventoinhas, etc.	Barato	Elevado	Baixo
Tempo de vida	Longo	Longo	Curto

4.5 Classificação dos materiais de mudança de fase

Existe um vasto número de materiais de mudança de fase (orgânicos, inorgânicos, e eutéticos) distribuídos por diversos intervalos de temperaturas de acordo com as necessidades. A figura A4.2 ilustra a classificação dos PCMs. De entre vários materiais orgânicos e inorgânicos, alguns podem ser identificados como PCM pelo ponto de vista da temperatura e do calor latente de fusão. Contudo, exceto para o ponto de fusão no intervalo de operação, a maioria dos materiais de mudança de fase não satisfaz os critérios requeridos de um meio adequado de armazenamento de energia térmica. Como um único material não consegue preencher todas as propriedades requeridas da tecnologia ideal de armazenamento, a solução é utilizar os materiais disponíveis e tentar melhorar as propriedades físicas negativas, através de um sistema adicional adequado. Por exemplo, o arrefecimento pode ser suprimido através da introdução de um agente nuclear. A condutividade dos PCMs pode ser aumentada com condutores metálicos e as fusões inesperadas podem ser diminuídas com o uso da espessura adequada (Sharma et al., 2009).

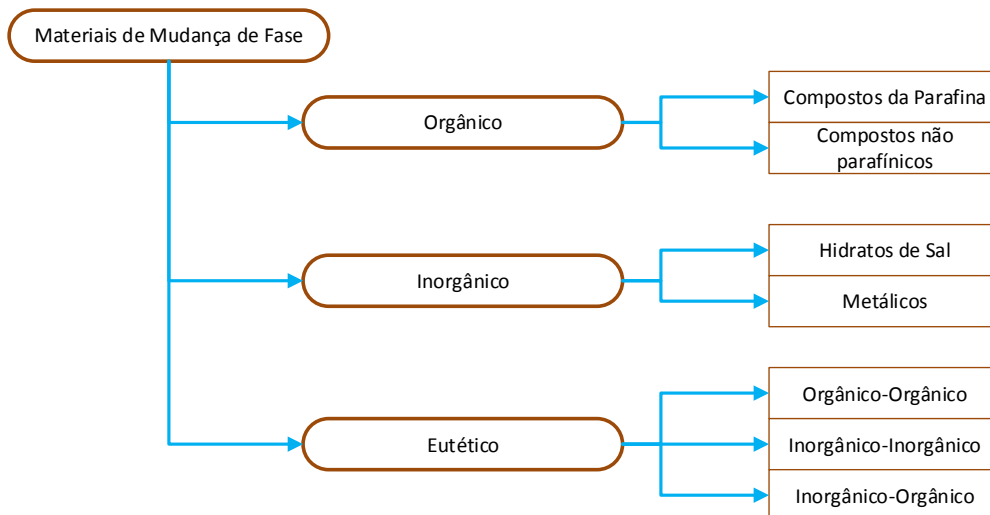


Figura A4.2 - Classificação dos PCMs (Sharma et al., 2009)

A figura A4.3 ilustra os vários tipos de materiais de mudança de fase de acordo com a temperatura de fusão (*melting temperatura*) e a entalpia de fusão (*melting enthalpy*).

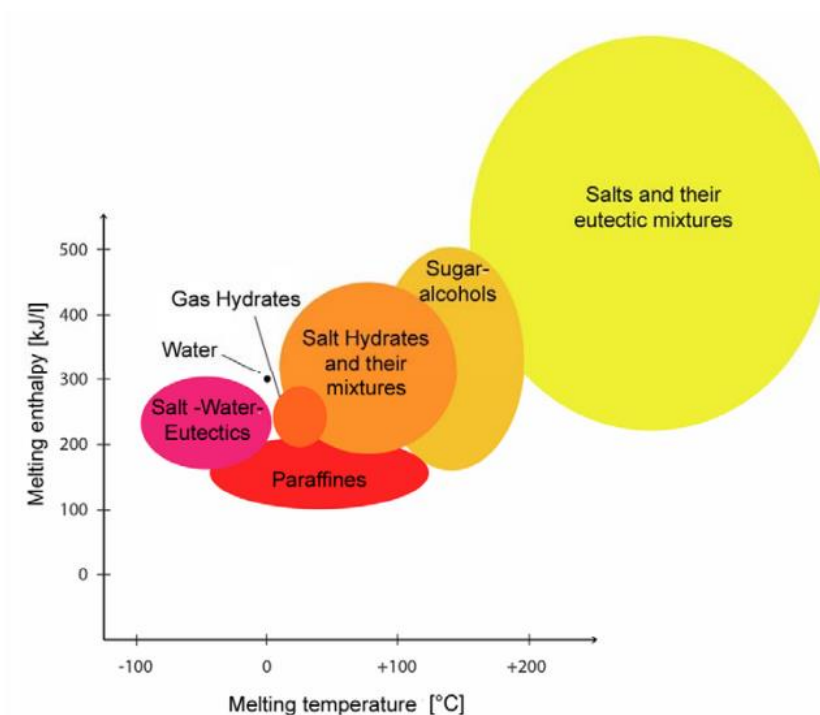


Figura A4.3 - Temperatura de fusão e entalpia de fusão para os materiais PCMs (Dieckmann, 2012)

Os compostos orgânicos e inorgânicos são os dois grupos mais comuns nos PCMs. Os orgânicos são não corrosivos e quimicamente estáveis, exibindo reduzido ou nenhum sub-resfriamento, são compatíveis com a maioria dos materiais de construção e têm um calor latente elevado por unidade de peso e pressão baixa. Como desvantagens apresentam, baixa condutividade térmica, grandes variações no volume na mudança de fase e inflamabilidade. Os compostos inorgânicos apresentam um elevado calor latente por unidade de volume a elevada condutividade, são não inflamáveis e exibem um baixo custo em comparação com os compostos orgânicos. No entanto, são corrosivos para a maioria dos metais e sofrem de

decomposição e sub-resfriamento, que pode alterar a suas propriedades de mudança de fase (Martin & Thornley, 2013).

O armazenamento de calor com materiais PCM pode ser aplicado nos sistemas solares de aquecimento de água, sistemas solares de aquecimento de ar, cozinha solar, habitações verdes a energia solar, aquecimento ou esfriamento de interiores nos edifícios, sistemas de armazenamento de eletricidade, sistemas de recuperação de calor residual, etc.

4.6 Armazenamento de Frio

A energia térmica também pode ser armazenada a baixas temperaturas, como a produção de gelo. A motivação para o uso de um sistema de armazenamento de frio é o potencial para diminuir os custos de operação e custos de energia elétrica. Através deste sistema é possível usar as tarifas mais baixas da energia elétrica, oferecidos pelos comercializadores, durante os períodos de menor consumo (como períodos noturnos) para produzir gelo em determinadas dimensões, que possa ser utilizado durante o período diurno com circulação do ar de resfriamento de temperatura em edifícios ou escritórios. O investimento é feito somente com a perspectiva de poupar dinheiro a longo prazo.

Anexo 5

Modelos para o *Energy Hub*

Neste anexo são especificados e detalhados dois modelos a aplicar no *Energy Hub*: um modelo para as tecnologias de conversão e um modelo no caso das tecnologias de armazenamento.

5.1 Conversões

Um modelo genérico, a aplicar nos conversores de energia, pode ser determinado focando nas suas entradas e saídas os fluxos de energia e colocando a hipótese de considerar a tecnologia como uma “caixa preta” caracterizada pela sua eficiência. Como os conversores podem ter múltiplas entradas e saídas, estes podem ser classificados segundo quatro tipos de conversão de acordo com o número de entradas e saídas:

- Entrada simples e saída simples (p. ex., conversão de gás natural totalmente para calor);
- Entrada simples e saída múltipla (p. ex., conversão de gás natural para eletricidade e aproveitamento do calor para cogeração);
- Entrada múltipla e saída única (p. ex., bomba de calor convertendo calor de baixa temperatura e eletricidade em calor de elevada temperatura);
- Entrada múltipla e saída múltipla (p. ex., um sistema reversível de célula de combustível que funciona a hidrogénio e água, e fornece eletricidade e calor).

Pode-se assim, desenvolver um modelo para a conversão dividido em dois passos. Inicialmente com entrada e saída simples, conforme a figura A5.1, e posteriormente generalizado com múltiplas entradas e saídas.



Figura A5.1 - Conversor com entrada e saída simples

Considerando o dispositivo de conversão indicado na figura A5.1, que converte a forma de energia α na forma β , pode-se chegar à seguinte fórmula (Arnold, 2011):

$$L_{\beta} = c_{\alpha\beta}P_{\alpha} \quad \text{Eq. A5.1}$$

Onde P_{α} e L_{β} são as energias de entrada e saída, respetivamente, e $c_{\alpha\beta}$ é o fator de acoplamento que, para um conversor simples, corresponde à eficiência energética do conversor. Dada a conservação de energia, a energia resultante deve ser menor ou igual à que entra no conversor portanto o fator de acoplamento é limitado:

$$L_{\beta} \leq P_{\alpha} \Rightarrow 0 \leq c_{\alpha\beta} \leq 1 \quad \text{Eq. A5.2}$$

As tecnologias conversoras atuais apresentam valores variáveis de eficiência dependendo do nível de energia convertida, assim pode-se escrever o fator de acoplamento como função da energia convertida:

$$c_{\alpha\beta} = f_{\beta}(P_{\alpha}) \quad \text{Eq. A5.3}$$

Para entradas e saídas múltiplas podem ser utilizados apenas uma única tecnologia ou uma combinação de conversores. Generalizando a equação A5.3 pode-se chegar ao seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} L_{\alpha} \\ L_{\beta} \\ \vdots \\ L_{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\alpha\alpha} & c_{\beta\alpha} & \cdots & c_{\omega\alpha} \\ c_{\alpha\beta} & c_{\beta\beta} & \cdots & c_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\alpha\omega} & c_{\beta\omega} & \cdots & c_{\omega\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\alpha} \\ P_{\beta} \\ \vdots \\ P_{\omega} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. A5.4}$$

A matriz dos conversores de acoplamento descreve o mapeamento das conversões combinadas com as várias formas de energia entre as entradas e as saídas.

Para a arquitetura do *Energy Hub*, o elemento de conversão, para transformar uma forma de energia em outra, deve ser aplicado apenas caso o elemento disponha de entrada para o gás natural. Inicialmente foi considerado que o *Energy Hub* era constituído com entradas para eletricidade e a energia térmica, sendo estas transmitidas de forma direta para a saída. Com a adição de uma infraestrutura de gás natural na entrada surge a possibilidade de introduzir conversores de gás natural para eletricidade com a vantagem da cogeração como turbinas a gás, e ainda conversores de gás natural para calor através da queima do gás. A figura A5.2 ilustra um exemplo deste tipo de aplicação.

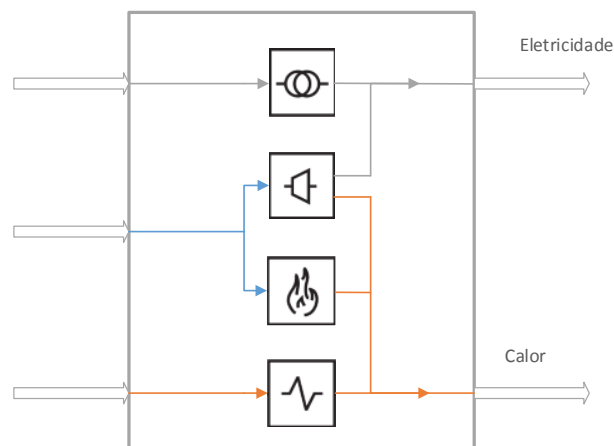


Figura A5.2 - Exemplo do *Energy Hub* que contém um transformador, uma microturbina, um queimador e um permutador de calor

Na figura A5.2 pode-se observar um sistema que consome eletricidade, gás natural e calor. As infraestruturas que se encontram à saída das tecnologias de conversão são apenas a eletricidade e a rede térmica, que estão ligadas às cargas. No caso da eletricidade e da energia térmica, estas apenas sofrem conversão para as quantidades de energia requeridas no

consumo, ou seja, na rede de energia elétrica temos um transformador entre a entrada e a saída, sendo semelhante na energia térmica com um permutador de calor entre a entrada e a saída de forma a regular a quantidade de calor requerida para a carga. A rede de gás natural apresenta duas opções de transporte: pode ser aproveitado para geração de energia elétrica, com turbina a gás e com cogeração, rentabilizando o sistema ao máximo possível, ou pode ser deslocado para uma caldeira produzindo calor destinado à rede de energia térmica (Geidl, 2007).

Através do sistema indicado na figura A5.2 deriva-se a matriz de conversores de acoplamento de forma a descobrir uma relação entre as entradas e as saídas. Considerando as entradas de eletricidade, gás natural e energia térmica como P_e, P_g, P_t e as saídas de eletricidade e energia térmica como L_e e L_t , respetivamente. Estes são os vetores de entrada e saída. É necessário ainda definir um fator de despacho para a rede de gás natural uma vez que pode ter dois destinos diferentes.

- $P_{g1} = \gamma P_g$: como combustível para turbina a gás, *Eq. A5.5*

- $P_{g2} = (1 - \gamma)P_g$: como combustível para a queima, *Eq. A5.6*

Com $0 \leq \gamma \leq 1$.

Considerando um sistema simples, os valores da eficiência das tecnologias de conversão são assumidos como constantes: η_{ee}^T para o transformador, η_{ge}^{GT} e η_{gt}^{GT} para a turbina a gás, η_{gt}^F para o forno de queima e η_{tt}^{HE} para o permutador de calor. A energia na saída, neste exemplo, resulta em (Arnold, 2011):

$$\begin{cases} L_e = \eta_{ee}^T P_e + \gamma \eta_{ge}^{GT} P_g \\ L_t = \gamma \eta_{gt}^{GT} P_g + (1 - \gamma) \eta_{gt}^F P_g + \eta_{tt}^{HE} P_t \end{cases} \quad \text{Eq. A5.7}$$

Escrevendo em notação de matriz tem-se:

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{ee}^T & \gamma \eta_{ge}^{GT} & 0 \\ 0 & \gamma \eta_{gt}^{GT} + (1 - \gamma) \eta_{gt}^F & \eta_{tt}^{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \\ P_t \end{bmatrix} \quad \text{Eq. A5.8}$$

5.2 Armazenamento

O modelo para o armazenamento pode ser desenvolvido tendo em conta os fluxos de energia de carga e descarga na tecnologia. Inicialmente, considera-se uma tecnologia simples de armazenamento de modo a definir o elemento de armazenamento. A figura A5.3 ilustra um exemplo de um elemento de armazenamento.

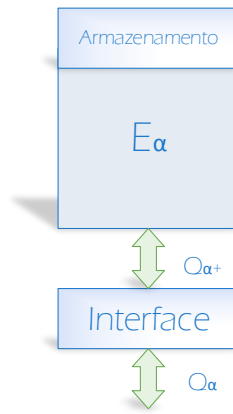


Figura A5.3 - Exemplo de um elemento de armazenamento⁴

Em regime permanente os valores de entrada e saída da energia podem ser relacionados através da equação, $Q_{\alpha+} = e_{\alpha}Q_{\alpha}$ onde e_{α} descreve o rendimento da tecnologia. A energia armazenada durante um certo período de tempo T é igual (Arnold, 2011):

$$E_{\alpha}(T) = E_{\alpha}(0) + \int_0^T Q_{\alpha+}(t)dt \Rightarrow Q_{\alpha+} = \frac{dE_{\alpha}}{dt} \approx \frac{\Delta E_{\alpha}}{\Delta t} \triangleq \dot{E}_{\alpha} \quad \text{Eq. A5.9}$$

Como aproximação inicial para o *Energy Hub* considera-se a integração de tecnologias de armazenamento de a energia elétrica e de energia térmica, ligadas às suas respectivas infraestruturas no lado do consumo do *Energy Router*. Assim, a energia proveniente da rede ou a energia proveniente das tecnologias de geração local pode ter dois destinos: ser deslocada para as tecnologias de armazenamento ou diretamente para consumo.

Num cenário com a introdução de uma rede de gás natural onde ocorre na conversão para energia térmica e/ou eletricidade pode ser acrescentado um terceiro sistema de armazenamento para o gás natural, a ser instalado antes do modulo de conversão.

As respetivas tecnologias a aplicar em cada infraestrutura são indicadas na secção 3.4 tendo em conta os custos, impactos, rendimentos e potencialidades de otimização. No caso do gás natural, como esta forma de energia é atualmente armazenada em sistemas de grande escala, como por exemplo cavernas/grutas, não existe grande necessidade de integrar mais sistemas de armazenamento na sua rede.

⁴ E_{α} – Energia armazenada; $Q_{\alpha+}$ – Energia interna; Q_{α} – Energia transferida

Anexo 6

Interfaces na Arquitetura do *Energy Router*

Esta secção tem como objetivo identificar as interfaces entre os blocos que constituem a arquitetura do *Energy Router*. As interfaces são divididas em dentro do domínio - *Intra-Domain* (interfaces entre blocos que pertencem ao mesmo domínio) e fora do domínio - *Inter-Domain* (interfaces entre blocos que pertencem a domínios diferentes). Adicionalmente há as interfaces externas que correspondem a interfaces entre o sistema e as *utilities* ou terceiros, possibilitando a introdução de novos modelos de negócio.

6.1 Interfaces *Intra-Domain*

6.1.1 *Building Domain: In-Building Energy Consumption Infrastructure (I-BECI)*

- *Smart Appliances* ↔ BEMC

As *smart appliances* tem a capacidade para medir todos os consumos elétricos dos equipamentos, permitindo um registo constante da monitorização do consumo de energia dos eletrodomésticos, enviando para o BEMC através da tecnologia sem fios Zigbee ou com PLC. Além disso, o BEMC deve ter a capacidade de enviar comandos, em tempo real, para controlar o estado de funcionamento de cada *smart appliance*. A comunicação será assim bidirecional e assimétrica, em termos de padrões de tráfego.

- Sensores de Conforto ↔ BEMC

Os sensores de conforto irão medir diferentes variáveis do ambiente envolvente que são importantes para determinar o estado de funcionamento dos equipamentos maximizando a eficiência e os níveis de conforto, tais como a temperatura, humidade, luminosidade, qualidade de ar e movimento. Os sensores irão também transmitir as informações recolhidas para o BEMC através da rede sem fios Zigbee ou PLC. Esta comunicação classifica-se por unidirecional, em termos de tráfego de dados. O fluxo de informação provém dos sensores para o BEMC, visto que os sensores funcionam como fontes de dados.

- Atuadores ↔ BEMC

Os atuadores nesta infraestrutura são classificados em dois grupos baseados no conjunto de aparelhos que controlam: as tomadas controláveis que atuam no fornecimento de energia elétrica através do corte (nomeadamente ON ou OFF), por exemplo associados a equipamentos de frio doméstico ou máquinas de lavar. Estes dispositivos vão receber comandos de nível superior (nomeadamente do DSS), mas também enviar informação relacionada com o consumo do dispositivo individual a que está ligado. O segundo tipo de atuadores são as *Smart Appliances* que permitirá controlar o estado de consumo dos dispositivos “inteligentes”, como frigoríficos, máquinas de lavar e secar, aparelhos de ar condicionado ou micro-ondas. As plugs

vão ser usadas em todos os equipamentos que não têm de origem capacidade de monitorização e controlo remoto, ou seja, que não são *Smart Appliances*.

- *Smart Meters* ↔ BEMC

Os *Smart Meters* dividem-se no tipo de rede de energia em que se inserem: *Smart Meter* de Energia Elétrica e *Smart Meter* de Energia Térmica. O *Smart Meter* de Energia Elétrica vai ser instalado à entrada de cada apartamento ou habitação, permitindo a monitorização, registo e comunicação em tempo real da energia elétrica que entra na habitação. No caso do *Smart Meter* de Energia Térmica, será mais indicado efetuar a sua instalação ao nível do edifício ou prédio, mas também existe a possibilidade de instalar à entrada de um espaço que requer grandes consumos de calor (p. ex. superfície comercial ou escritórios). A comunicação com o BEMC será bidirecional e assimétrica uma vez que existe a possibilidade de envio de controlos de configuração do DSS (p. ex. enviar a leitura da energia consumida ou reduzir/aumentar a periodicidade dos envios), e realizar-se-á através de redes sem fios Zigbee ou com fios PLC.

6.1.2 *Building Domain: In-Building Energy Generation Infrastructure (I-BEGI)*

- Tecnologias de Geração ↔ BEMC

Os painéis fotovoltaicos ou a microturbinas eólicas são ligados ao seu respetivo inversor. Isto permite a comunicação bidirecional entre o inversor e o BEMC. O inversor irá registar como as tecnologias de geração estão a funcionar e comunicar para o DSS. O inversor pode também funcionar como atuador recebendo comandos do sistema de informação para gerir e controlar a tecnologia de geração. Esta comunicação pode ser realizada com fios (TCP/IP) ou sem fios (Wireless) dependendo da instalação.

- Sensores ↔ BEMC

Na ligação física de diferentes sensores (estação meteorológica e analisador da rede) para o BEMC pode ser usado LAN ou sem fios (p. ex. frequência 868 MHz). Da estação meteorológica para o BEMC poder ser usado o protocolo TCP/IP ou novamente sem fios. Como os sensores apenas enviam os dados recolhidos para o DSS a interface é unidirecional. Os tipos de sensores incluídos na estação meteorológica podem medir: temperatura, humidade, direção e velocidade do vento, radiação solar e pluviómetro. Estes sensores recolhem informação relacionada com o rendimento de geração de eletricidade (analisador da rede) e informação usada para prever a geração (estação meteorológica).

- *Smart Meter* de Geração ↔ BEMC

Os contadores de geração registam a energia elétrica produzida. Existem dois contadores: um para medir a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos e outro para medir a energia produzida pelas microturbinas eólicas. Os contadores vão estar ligados com um respetivo BEMC, de modo a enviar os dados de geração em tempo

real ou intervalos de tempo definidos para o DSS, e também receber comandos de configuração. A interface é bidirecional e baseada também em TCP/IP ou RS485.

6.1.3 *Neighborhood Domain*

- *Smart Meter* ↔ NEMC

Esta é a interface entre os *Smart Meters* e os *Neighborhood Energy Management Systems* (NEMC) no *Energy Hub*. A principal função de cada *Smart Meter* é a de monitorizar os fluxos de energia antes e após a conversão em cada rede de energia. Com este sistema de monitorização vai ser possível verificar a eficiência de cada elemento de conversão, determinar a estratégia melhor no uso eficiente da energia, e também efetuar leitura da quantidade de energia que entra no sistema do *Energy Router*, em tempo real. No caso da energia elétrica, apenas vai ser colocado um *Smart Meter* após o transformador devido à elevada eficiência que este apresenta. A comunicação é unidirecional e baseada em tecnologia com fios TCP/IP ou RS485.

6.1.4 *Grid Management System (GMS)*

- Concentrador ↔ Plataforma M2M

Esta é a interface entre o *GMS Regional* localizado ao nível de um bairro inteiro de edifícios, sendo constituído por vários concentradores (CNTR) distribuídos pelo bairro, e o *GMS Enterprise*, que se encontra ligado diretamente com o *Decision Support System*. O concentrador irá receber toda a informação dos NEMC e BEMC, também vai enviar comandos da plataforma M2M e encaminha-os para o NEMC ou BEMC correto. A plataforma M2M é a infraestrutura que se irá assegurar a ligação direta com o DSS. A comunicação entre os concentradores e a plataforma M2M será suportada por diferentes canais, de modo intensificar a fiabilidade da infraestrutura de comunicações: *Cellular based Data Channel* é o canal principal para a realização das comunicações, usado por predefinição para enviar comandos e receber eventos; *SMS over GSM* é o canal de reserva (*backup*) em caso de falha do canal principal, a comunicação vai ser realizada através de SMS, este canal não irá ser usado para comandos regulares mas só para os de grande prioridade no caso da indisponibilidade do primeiro.

6.1.5 *Decision Support System (DSS)*

- DSS ↔ Utilizadores Finais

O *Decision Support System* irá recolher toda a informação disponível de todas as fontes, incluindo dados do consumo de energia e dados da energia gerada bem como o estado das tecnologias de armazenamento. Tal informação é compilada e sincronizada com as informações da meteorologia, e tarifas em tempo real. Os dados são processados e armazenados na base de dados do sistema e desencadeados os comandos de controlo para assegurar a otimização do sistema. Os utilizadores finais poderão ter acesso à informação recolhida através de serviços vindos do DSS. A comunicação com os utilizadores é baseada em serviços web.

6.2 Interfaces *Inter-Domain*

- BEMC (*Building Domain*) \longleftrightarrow Concentrador (*GMS Regional*)
Esta interface irá permitir a comunicação entre o *Building Domain* e o *GMS Regional*. Cada edifício pode ter dois dispositivos, BEMC um que se encontra integrado na I-BEGI e envia os dados da infraestrutura de geração de energia para o DSS e ao mesmo tempo pode receber comandos de controlo e gestão vindos do DSS, e um segundo que se encontra na I-BECI efetuando todo o conjunto de operações relacionadas com o consumo de energia. O *GMS Regional* é responsável por transportar as informações/comandos para/do DSS via o *GMS Enterprise*. Cada Concentrador gere e controla um grupo de dispositivos BEMC, isto é, encaminha a informação vinda de cada BEMC para o DSS e também encaminha os comandos vindos do DSS para o BEMC apropriado. Deste modo, os canais de comunicação de longa ou curta distância são bidirecionais e irão efetuar-se via a tecnologia sem fios 802.11 (Wi-Fi) ou com fios PLC.
- BEMC (*Building Hot Water Controller System*) \longleftrightarrow Concentrador (*GMS Regional*)
Esta interface irá permitir a comunicação entre o *Building Hot Water Controller System* e o *GMS Regional*. Cada edifício vai ser constituído por um sistema de controlo de energia térmica, nomeadamente o fluxo de água quente que posteriormente é utilizado para fins domésticos ou para aquecimento do meio interior. Com esta interface vai haver um controlo da temperatura e armazenamento de curto tempo da energia térmica que entra no edifício, assim torna-se possível calcular as perdas durante o transporte da energia térmica para o edifício. A comunicação com o concentrador vai ser bidirecional visto que o controlador pode enviar dados para o DSS mas também receber comandos de configuração/controlo deste. Os canais de comunicação de longo ou curta distância irão efetuar-se via a tecnologia sem fios 802.11 (Wi-Fi) ou com fios PLC.
- BEMC (*Energy Storage*) \longleftrightarrow Concentrador (*GMS Regional*)
Esta é a interface entre as tecnologias de armazenamento e o *GMS Regional*. Cada sistema de armazenamento terá um BEMC que irá comunicar com o respetivo *GMS Regional* visto que os sistemas de armazenamento podem vir a ser instalados a distâncias diferentes do concentrador. Existe também a possibilidade de haver vários sistemas de armazenamento, quer de energia elétrica quer de energia térmica instalados pelo bairro, cada um com o respetivo BEMC. A interface de comunicação entre estes elementos da arquitetura realizar-se-á via tecnologia sem fios 802.11 (Wi-Fi) ou com fios PLC, dependendo da análise económica. A interface é bidirecional e assimétrica dada a necessidade constante de controlo do armazenamento, bem como obter informações da energia já armazenada.
- NEMC (*Energy Hub*) \longleftrightarrow Concentrador (*GMS Regional*)
Esta é a interface entre a zona de conversão de energia do bairro (*Energy Hub*) e o *GMS Regional*. No *Energy Hub*, cada elemento de conversão das redes de energia

vai ser constituído por um NEMC permitindo a comunicação de todo o sistema de conversão com o DSS. O *Energy Hub* é uma peça fundamental para o funcionamento do sistema, através deste torna-se possível controlar o fornecimento de energia para os consumidores e optar, por exemplo, pelo uso da energia local que é gerada no momento ou pela energia armazenada nas baterias e nos tanques de material PCM. Deste modo, os canais de comunicação de longa ou curta distância são bidirecionais e irão efetuar-se via a tecnologia sem fios 802.11 (Wi-Fi) ou com fios PLC dependendo também da análise económica na instalação.

- Plataforma M2M (*GMS Enterprise*) ↔ *Decision Support System (DSS)*
Com esta interface toda a informação do *Building Domain* e do *Neighborhood Domain* é transmitida para o DSS. Da mesma forma, o *Building Domain* e o *Neighborhood Domain* recebem todos os comandos de otimização vindos do DSS. Esta interface envolve a plataforma M2M e o DSS utilizando comunicações bidirecionais com elevada largura de banda, de forma a ser robusta e fiável. A comunicação realizar-se-á com tecnologias com fios (nomeadamente fibra ótica).

6.3 Interfaces com as *Utilities*

Como já foi mencionado, o objetivo da plataforma do *Energy Router* é de gerir e controlar o consumo de energia e a geração nos bairros. Contudo, a rede de energia elétrica de um dado bairro onde esteja integrado o *Energy Router* tem de interagir com grandes infraestruturas de eletricidade, como outros sistemas de distribuição de energia (*Distribution System Operators – DSOs*), sistemas de transporte (*Transport System Operators – TSOs*), ou as entidades/empresas de geração de energia (*National Dispatchers – ND*). Portanto, existe a necessidade de uma interface que permita a comunicação com tais entidades ou empresas.

Uma interface com as *utilities* irá manter a plataforma do *Energy Router* aberta a novos interessados e irá permitir que o sistema seja integrado em redes vizinhas, de modo a que o próprio sistema do *Energy Router* possa gerir e coordenar as várias redes, proporcionando assim, a interoperabilidade e a escalabilidade do *Energy Router*.

6.4 Energy Services Marketplace (Mercado dos Serviços de Energia)

Energy Services Marketplace permite fornecer serviços para o utilizador final, mas também possibilitar a entrada de empresas terceiras que poderão realizar interfaces (leituras) dos atuais serviços e ainda acesso a informação, por exemplo, de consumos, fluxos de energia, geração, etc., que é transmitida ao longo da arquitetura do *Energy Router*.

A interface com o utilizador será baseada numa aplicação web que pode permitir subscrever e utilizar serviços de energia fornecidos por terceiros.

Tais serviços podem tirar partido da informação sobre consumo da energia que é gerada no bairro, para disponibilizar serviços relacionados com o nível de conforto adequados e a criação de oportunidades com benefício económico para o consumidor final, tais como a

participação em programas de *demand response*. A entidade terceira pode estabelecer contratos com a *utility* e um conjunto de consumidores, gerindo as cargas desses consumidores em resposta aos pedidos da *utility*, e partilhando com os consumidores o incentivo económico recebido da *utility*.

Anexo 7

Elementos de otimização

Neste anexo são apresentados os detalhes de alguns elementos da otimização, a carga das baterias, o sistema de gestão das baterias, os painéis fotovoltaicos e as microturbinas eólicas.

7.1 Painéis Fotovoltaicos

A radiação total numa superfície inclinada é composta por três tipos de radiação: direta, difusa e refletida. A radiação em tempo real depende da posição diurna do sol e da rotação anual do planeta em torno do sol. A radiação total pode ser assim calculada através da seguinte função (Merei & Sauer, 2012):

$$H_t(\beta, \delta) = H_{dir}(\beta, \delta) + H_{dif}(\beta, \delta) + H_{ref}(\beta, \delta) \quad \text{Eq. A7.1}$$

Em que:

- H_t – Radiação total numa superfície inclinada;
- $H_{dir}, H_{dif}, H_{ref}$ – Radiação direta, difusa e refletida;
- β, δ – Ângulos de azimute e inclinação.

É assumido que os painéis fotovoltaicos operam sempre no ponto de potência máxima (*Maximum Power Point* - MPP). Através da característica I-V das células fotovoltaicas é determinado o ponto de potência máxima indicando os valores da corrente (I_{MPP}) e da tensão (U_{MPP}). A potência total gerada é calculada de acordo com a Eq. A7.2.

$$P_{MPP} = z_p \cdot I_{MPP} \cdot z_s \cdot U_{MPP} \quad \text{Eq. A7.2}$$

Em que:

- P_{MPP} – Potência gerada no ponto de potência máxima;
- I_{MPP} – Corrente no ponto de potência máxima;
- U_{MPP} – Tensão no ponto de potência máxima;
- z_p – Número de painéis ligados em série;
- z_s – Número de painéis ligados em paralelo.

Para otimização vão ser utilizados os resultados obtidos do projeto ENERSip onde foi calculado a radiação solar em vários países na Europa, durante os 12 meses do ano, com o objetivo de determinar um gráfico médio da radiação solar por m^2 . Na figura A7.1, encontra-se a radiação solar para a cidade de Lisboa.

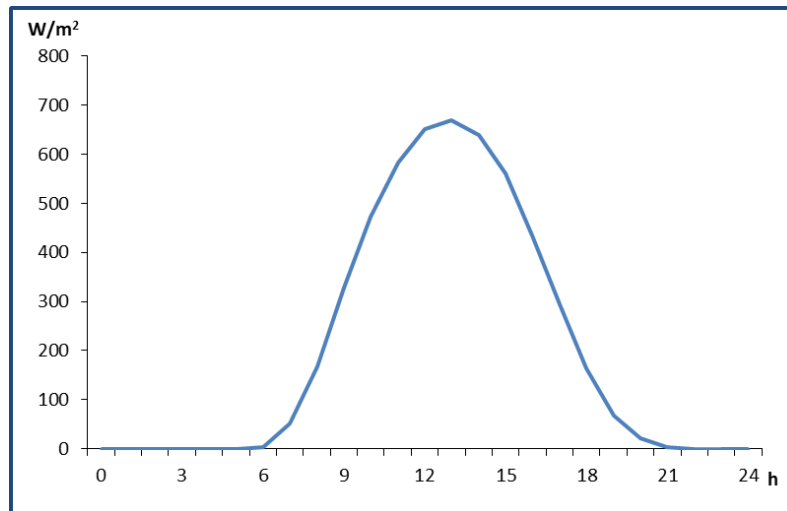


Figura A7.1 - Média da radiação solar anual em Lisboa

7.2 Microturbinas Eólicas

Como segunda fonte de energia renovável possível foi considerado as microturbinas eólicas. A energia do vento pode ser útil para complementar a geração fotovoltaica ou gerar eletricidade durante os períodos noturnos quando não existe radiação solar. A energia do vento é proporcional à velocidade do vento ao cubo e depende ainda da área do rotor.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_l \cdot A \cdot v^3 \cdot \eta_{el,m} \quad \text{Eq. A7.3}$$

Em que:

- C_p – Limite de Betz, $C_p = 4a(1 - a)^2$. Onde $a = \frac{(V_1 - V_2)}{V_1}$;
- ρ_l – Densidade do ar = 1.26 kg/m³;
- A – Área do rotor (m²);
- v – Velocidade do vento (m/s);
- η – Eficiência total do gerador e do conversor de potência combinados.

No caso de estudo aplicado na dissertação, não foi considerado a instalação de microturbinas eólicas nos edifícios, dada a instalação do sistema ser em ambiente urbano. Nas cidades a energia do vento pode variar fortemente, podendo ser afetada pelos edifícios altos, por outros obstáculos que reduzem o caudal e pela velocidade do vento, limitando a energia elétrica gerada. A viabilidade destes sistemas, em ambientes urbanos, é também afectada pelas turbulências do vento que diminui o rendimento da turbina. Assim, esta fonte de energia, apenas vai ser definida nas fórmulas do algoritmo como sendo uma segunda fonte de geração de energia que se pode aplicar no sistema para fins de otimização.

7.3 Baterias

A tensão de uma bateria depende, fortemente, da química desta, do estado de carga (*State of Charge* - SOC), da temperatura e do estado de saúde (*State of Health* - SOH). O estado de carga (SOC) da bateria no tempo t é calculado através do método de contagem de Coulomb.

$$SOC(t) = SOC_0 + \int_0^t \frac{I_{eff}(\tau)}{C(\tau)} d\tau \quad \text{Eq. A7.4}$$

Em que:

- SOC_0 – Estado de carga inicial (%);
- $C(\tau)$ – Capacidade da bateria (Ah);
- $SOC(t)$ – Estado de carga atual (%);
- $I_{eff}(\tau)$ – Corrente eficaz de carga/descarga da bateria (A).

A corrente eficaz pode ser obtida através da divisão da potência da bateria pela tensão tendo em conta as perdas elétricas e ainda perdas adicionais devido à gaseificação no caso das baterias chumbo-ácido.

No geral, a performance de uma bateria depende da sua capacidade nominal e dos fatores de operação, como os limites SOC e o estado de carga. Por isso, estes são os parâmetros de otimização para cada tipo de bateria. Adicionalmente, o rendimento de uma bateria é afetado pelo seu estado de “saúde” (SOH). Este estado é calculado com base na idade específica da bateria, na temperatura e no estado atual de uso da bateria.

Na tabela A7.1 encontra-se a tabela utilizada para o dimensionamento do banco de baterias a instalar, desenvolvido na secção 5.3.1.

Tabela A7.1 - Determinação da capacidade de carga diária para as baterias

Horas	Consumo (kW)	Geração (kW)	Baterias (kW)
1	104,086	0,000	0,000
2	77,276	0,000	0,000
3	67,082	0,000	0,000
4	61,880	0,000	0,000
5	60,700	0,000	0,000
6	64,839	1,170	0,000
7	76,032	16,302	0,000
8	99,201	52,459	0,000
9	111,353	102,350	0,000
10	111,774	147,645	35,871
11	113,043	182,063	69,019
12	110,544	202,797	92,253
13	110,671	208,703	98,032
14	112,477	199,437	86,960
15	118,111	175,234	57,123
16	123,804	135,791	11,988
17	138,819	91,558	0,000
18	158,677	51,247	0,000
19	168,345	21,111	0,000
20	184,514	6,517	0,000
21	185,020	1,170	0,000
22	191,536	0,000	0,000
23	166,577	0,000	0,000
24	132,566	0,000	0,000
		Total	451,245

7.4 Sistema de Gestão das Baterias

O sistema de gestão vai conter todo o hardware que permite o controlo e regulação dos fluxos de energia através do DSS. Os casos de energia em excesso (carga das baterias) e energia em défice (descarga das baterias) vão ser analisados separadamente. No caso de escassez de energia elétrica, devido a fraca geração renovável local, o sistema escolhe o conjunto de baterias que causam o menor impacto para fornecer a energia requerida, com o objetivo de minimizar a degradação da bateria. Assumindo que cada bateria com carga ($SOC > SOC_{min}$) é capaz de fornecer energia suficiente para satisfazer uma parte da carga, só o conjunto de baterias com menor degradação é selecionado.

No caso de energia em excesso no sistema (p. ex. devido à elevada geração renovável) um ou mais conjuntos de baterias vão ser carregadas. A decisão, sobre qual o conjunto a carregar, é feita estimando os benefícios que cada um pode oferecer futuramente. Os benefícios são determinados com base em estimativas de atingir o máximo tempo de vida esperado para a tecnologia. Cada bateria tem um estado específico de carga ótimo (L_{opt}), no qual o máximo tempo de vida espectável pode ser atingido. Por exemplo as baterias de ácido-chumbo atingem um tempo de vida longo quando armazenam energia até à sua capacidade máxima, no entanto, as baterias de iões de lítio atingem um tempo de vida ótimo quando funcionam como um SOC de aproximadamente 20%. O benefício, que uma bateria fornece, depende assim da sua potência nominal e do atual SOC (Merei & Sauer, 2012)

$$B_i = E_{N,i} \cdot C_i \cdot \left(\frac{L_{opt,i} - L_{float}(SOC)}{L_{opt,i}} \right) \quad \text{Ep. A7.5}$$

Em que:

- $E_{N,i}$ – Energia nominal da bateria (kWh);
- C_i – Custo da bateria (€/kWh);
- B_i – Benefício da bateria i ;
- $L_{opt,i}$ – Tempo de vida ótimo operando no SOC_{opt} .

Devido ao facto de o carregamento das baterias apresentar potências limitadas, pode existir a necessidade de proceder à carga de mais baterias ao mesmo tempo, por isso, o grupo de baterias que apresentar maior benefício para o sistema é o que vai ser carregado em primeiro lugar. Se ainda existir energia em excesso disponível, o próximo grupo de baterias em linha vai ser carregado e assim sucessivamente.

Para as baterias, o SOH (*State of health*) é verificado pelos sinais de envelhecimento e pelo número de ciclos já efetuados. Se, por exemplo, numa bateria o envelhecimento for superior ao número dos ciclos realizados, esta bateria em particular vai ser, propositadamente, usada para carga e descarga. Isto proporciona um prolongamento da uma vida útil de cada bateria.

Anexo 8

Otimização de Energia Térmica

Neste anexo é apresentada a estratégia de despacho para a energia térmica. A maior diferença, comparando com o caso da energia elétrica, é que neste caso as cargas controláveis não se aplicam, apenas são introduzidas as tecnologias de armazenamento de energia térmica.

Legenda:

P_{dhl} : $P_{dh} - P_{load}$

P_{dh} : $P_{district\ heat}$ (potência de aquecimento urbano)

P_{char} : maximum chargeable power for battery (potência máxima de carga do tanque de armazenamento)

P_{disch} : maximum dischargeable power for battery (potência máxima de descarga do tanque de armazenamento)

Cap_{SOC} : Capacity State of Charge (Capacidade do estado de carga)

$SOC_{máx}$: Maximum State of Charge (Estado de carga máximo)

SOC_{min} : Minimum State of Charge (Estado de carga mínimo)

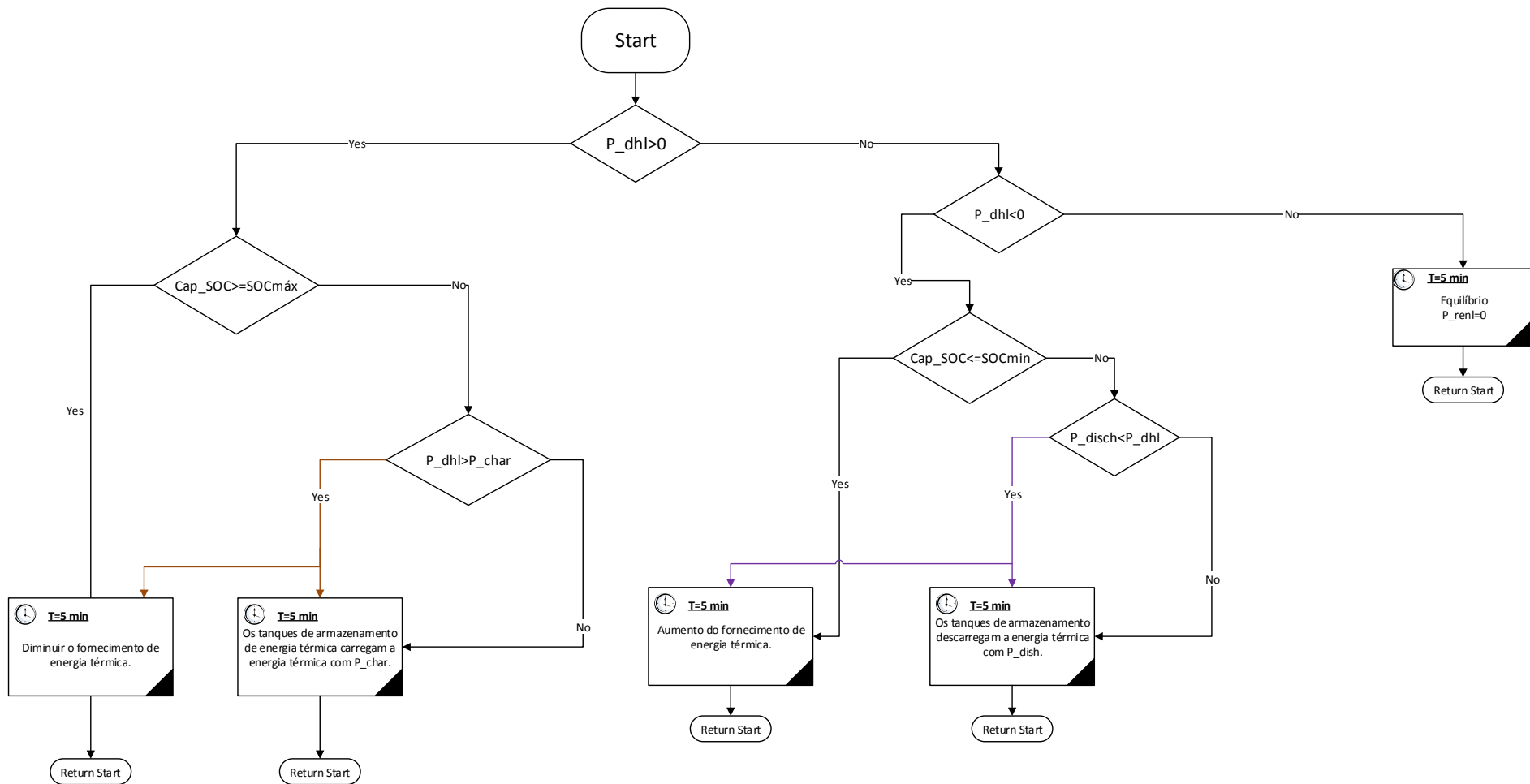


Figura A8.1 - Estratégia de despacho da Energia Térmica

Anexo 9

Código da estratégia de despacho para a Energia Elétrica

```
classdef analizador < handle

    properties
        %%% user variables
        P_renewable;
        P_load;
        P_renl;
        P_char;
        P_disch;
        P_lon;
        P_lc1;
        P_lc2;
        P_lc;
        P_Grid;
        Cap_SOC;
        SOCmax;
        SOCmin;
        i;
        j;

        %%%%%%%%% other definitions
        i_max=36;
        j_max=12;
        dt=5; %minutos
        eficiencia=.9;
        y;
        x_2;
        x_6;
        P_total_load;
        wait_time=0.1; % segundos

        file_data;
        gui;
        graf;
        iter=0;
        running=0;
        pause=0;
        start_first_time=1;
    end

    methods

        function obj=analizador()
            %%%%%%%%% EDIT THIS (DOWN) %%%%%%%%%
            filename='Dados.xlsx';
            obj.P_renewable=0;
            obj.P_load=104;
            obj.P_renl=obj.P_renewable - obj.P_load;
            obj.P_char=0;
            obj.P_disch=0;
            obj.P_lon=0;
        end
    end
end
```

```

obj.P_lc1=0;
obj.P_lc2=0;
obj.P_lc=0;
obj.P_Grid=104;
obj.Cap_SOC=0;
obj.SOCmax=100;
obj.SOCmin=0;
obj.i=0;
obj.j=0;
obj.y=1; % usado no bloco 5
obj.x_2=1; % usado no bloco 2
obj.x_6=1; % usado no bloco 6

%%%%%%%%%% EDIT THIS (UP) %%%%%%%%%%%

obj.read_file(filename);
obj.gui=guihandles(analizador_gui);
set(obj.gui.start_but, 'callback', @(src, event)
start_but_Callback(obj, src, event));
set(obj.gui.pause_but, 'callback', @(src, event)
pause_but_Callback(obj, src, event));
set(obj.gui.stop_but, 'callback', @(src, event)
stop_but_Callback(obj, src, event));

obj.running_cicle()
end

function running_cicle(obj)
%
return;
while(obj.start_first_time)
pause(1);
try haaa=get(obj.gui.analizador_gui_fig);
catch err
obj.gui = [];
return
end
end

while(obj.running)
if ~obj.pause
obj.start();
end
drawnow;
end

end

function start(obj)
P_renl = obj.P_renl(end);
P_char = obj.P_char(end);
P_disch = obj.P_disch(end);
P_lon = obj.P_lon(end);
P_lc1 = obj.P_lc1(end);
P_lc2 = obj.P_lc2(end);
P_lc = obj.P_lc(end);
P_Grid = obj.P_Grid(end);
Cap_SOC = obj.Cap_SOC(end);
i = obj.i(end);
j = obj.j(end);

```

```

if P_renl > 0
    if P_lon >= P_renl
        obj.Block2();
    else
        if P_lon == 0
            if Cap_SOC < obj.SOCmax
                obj.Block1();
            end
        else
            if Cap_SOC >= obj.SOCmax
                obj.Block2();
            else
                if (P_renl - P_lon) > P_char
                    obj.Block1();
                    obj.Block2();
                else
                    obj.Block1();
                end
            end
        end
    end
end

else
    if P_renl < 0
        if P_lc >= P_renl
            if P_lc2 == 0 % Chpoint1
                if i <= obj.i_max
                    obj.Block6();
                else
                    if Cap_SOC <= obj.SOCmin %% Chpoint2
                        obj.Block4();
                    else
                        if P_disch < P_renl
                            obj.Block3();
                            obj.Block4();
                        else
                            obj.Block3();
                        end
                    end
                end
            else
                if P_lc1 == 0
                    if j <= obj.j_max
                        obj.Block5();
                    else
                        if Cap_SOC <= obj.SOCmin %% Chpoint2
                            obj.Block4();
                        else
                            if P_disch < P_renl
                                obj.Block3();
                                obj.Block4();
                            else
                                obj.Block3();
                            end
                        end
                    end
                else
                    if i <= obj.i_max
                        obj.Block6();
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        if j <= obj.j_max
            obj.Block5();
        end
        if ((i > obj.i_max) || (j>obj.j_max))
            if Cap_SOC <= obj.SOCmin %%% Chpoint2
                obj.Block4();
            else
                if P_disch < obj.P_renl
                    obj.Block3();
                    obj.Block4();
                else
                    obj.Block3();
                end
            end
        end
    end
end
end
end
else
    if P_lc ~= 0
        if Cap_SOC <= obj.SOCmin
            obj.Block4();
        else
            if P_disch < obj.P_renl
                obj.Block3();
                obj.Block4();
            else
                obj.Block3();
            end
        end
    end
    %%% Chpoint1
    if P_lc2 == 0 % Chpoint1
        if i<=obj.i_max
            obj.Block6();
        else
            if Cap_SOC <= obj.SOCmin %%% Chpoint2
                obj.Block4();
            else
                if P_disch < obj.P_renl
                    obj.Block3();
                    obj.Block4();
                else
                    obj.Block3();
                end
            end
        end
    end
end
else
    if P_lc1 == 0
        if j <= obj.j_max
            obj.Block5();
        else
            if Cap_SOC <= obj.SOCmin %%%
                obj.Block4();
            else
                if P_disch < P_renl
                    obj.Block3();
                    obj.Block4();
                else
                    obj.Block3();
                end
            end
        end
    end
end

```

Chpoint2

Chpoint2

```

        end
        end
    else
        if i <= obj.i_max
            obj.Block6();
        end
        if j <= obj.j_max
            obj.Block5();
        end
        if ((i > obj.i_max) || (j>obj.j_max))
            if Cap_SOC <= obj.SOCmin %%%
                obj.Block4();
            else
                if P_disch < P_renl
                    obj.Block3();
                    obj.Block4();
                else
                    obj.Block3();
                end
            end
        end
    end
end %% end chpoint1
else
    if Cap_SOC <= obj.SOCmin %%% Chpoint2
        obj.Block4();
    else
        if P_disch < P_renl
            obj.Block3();
            obj.Block4();
        else
            obj.Block3();
        end
    end
end
end
else
    obj.Block7(); % Equilibrio
end
end
obj.variables_update();
obj.graphic_update();
pause(obj.wait_time);
end

function Block1(obj)
    obj.P_char = cat(1,obj.P_char, obj.P_renewable(end)-
obj.P_load(end));
    obj.Cap_SOC = cat(1,obj.Cap_SOC,      obj.Cap_SOC(end) + obj.dt
* obj.P_char(end));
    obj.P_disch = cat(1,obj.P_disch,      obj.eficiencia *
obj.P_char(end));
end

function Block2(obj)
    obj.P_total_load = cat(1,obj.P_total_load,
obj.P_lc1(end) + obj.P_load(end));
    obj.P_lc1 = cat(1,obj.P_lc1,          obj.x_2*
obj.P_lc(end));
end
```

```

        obj.P_lon          = cat(1,obj.P_lon,          obj.P_lc(end)
- obj.P_lc1(end));
    end

```

```

    function Block3(obj)
        obj.P_disch       = cat(1,obj.P_disch,      obj.eficiencia *
obj.P_char(end));
        obj.P_Grid        = cat(1,obj.P_Grid,      obj.P_load(end) -
obj.P_renewable(end));
    end

```

```

    function Block4(obj)
        obj.P_load = cat(1,obj.P_load,      obj.P_renewable(end) +
obj.P_Grid(end));

```

```

    end

```

```

    function Block5(obj)
        obj.j=obj.j+1;
        obj.P_total_load= cat(1,obj.P_total_load,      obj.P_load(end)-
obj.P_lc2(end));
        obj.P_lc1          = cat(1,obj.P_lc1,          obj.y *
obj.P_lc(end));
    end

```

```

    function Block6(obj)
        obj.i=obj.i+1;
        obj.P_total_load = cat(1,obj.P_total_load,      obj.P_load(end) -
obj.P_lc1(end));
        obj.P_lc1          = cat(1,obj.P_lc1,          obj.x_6 *
obj.P_lc(end));

```

```

    end

```

```

    function Block7(obj)

```

```

    end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```