

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Estratégias locais de gestão de carregamento
inteligente de frotas de veículos eléctricos**

Victor Augusto Rodrigues Veloso

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira
Co-orientadora: Dra. Fernanda de Oliveira Resende

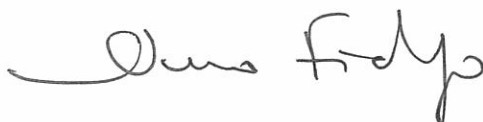
29/07/2011

A Dissertação intitulada

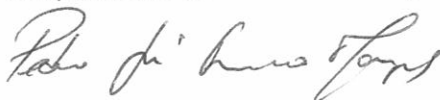
“Estratégias Locais de Gestão de Carregamento Inteligente de Frotas de
Veículos Eléctricos”.

foi aprovada em provas realizadas em 18-07-2011

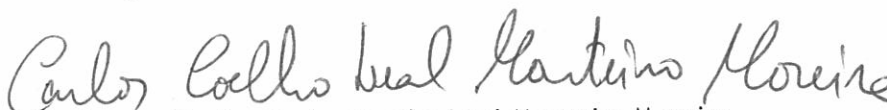
o júri



Presidente Professor Doutor José Nuno Moura Marques Fidalgo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Pedro José Franco Marques
Professor Adjunto Departamento de Engenharia Electrotécnica da Escola Superior e
Tecnologia de Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

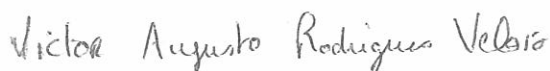


Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professora Doutora Fernanda Oliveira Resende
Professora Auxiliar da Universidade Lusófona

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Victor Augusto Rodrigues Veloso

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

© Victor Augusto Rodrigues Veloso, 2011

*“Sans la liberté de blâmer,
il n’est point d’éloge flatteur.”*

Pierre Beaumarchais

Resumo

A mudança de paradigma no sector dos transportes, com uma aposta forte na integração de veículos eléctricos (VE) nas redes de distribuição, coloca novos desafios ao nível da operação do sistema eléctrico de energia. Os conceitos de Micro-Rede e Multi-Micro-Rede (MMR) podem ser explorados como soluções conceptuais de suporte para progressiva integração dos VE nas redes de distribuição de baixa e média tensão (MT), na medida em que a estrutura hierárquica de controlo e de gestão pode ser utilizada na implementação de funcionalidades de gestão e do carregamento das baterias dos VE, ou seja estratégias inteligentes de carregamento.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta para efectuar a gestão do carregamento inteligente de frotas de VE ligadas sobre as redes de distribuição de MT. A estratégia local desenvolvida foi adaptada para funcionamento em tempo real de modo a poder ser integrada na filosofia de controlo associada ao conceito de MMR. Do ponto de vista do cliente, esta estratégia deverá minimizar o custo de energia consumida de modo a satisfazer as necessidades do carregamento das baterias dos VE. Do ponto de vista da rede, deverá procurar manter as condições de operação da rede de distribuição de MT dentro dos limites de exploração admissíveis.

A metodologia desenvolvida é baseada na resolução de um problema de optimização, cuja função objectivo consiste em minimizar o custo da energia consumida, sujeita a um conjunto de restrições associadas ao estado final de carga pretendido para as baterias e às restrições técnicas de exploração das redes de distribuição. Para isso, recorreu-se ao algoritmo *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO) para determinar os *set-points* de potência activa a definir para cada VE num dado intervalo de tempo, os quais correspondem à taxa de carregamento das baterias. Este algoritmo foi implementado em ambiente MATLAB devido à facilidade oferecida por este *software*, para manipular matrizes.

Os resultados obtidos demonstram o bom desempenho da metodologia desenvolvida.

Abstract

The new transportation paradigm, with a strong bet to integrate Electric Vehicles (EV) in electric power distribution networks, will generate new challenges regarding the power systems operation. In this way, microgrid and multi microgrid concepts can be explored as possible solutions to support progressive integration of EV into low and medium voltage grid. Indeed, the hierarchical management and control structure could be used to implement smart charging strategies.

In this paper, it was developed a tool with the purpose of allowing management batteries charging procedures of EV fleets connected to the medium voltage grid. The local strategy was developed to works in real time application using the multi microgrid concept. In a customer point of view, this strategy must be able to minimize the electrical energy cost so batteries supplies can be satisfied. In a network point of view, strategy must be able to keep the technical grid operation.

The methodology proposed in this paper is based on an optimization problem where objective function consists in minimizing electrical energy cost, with restrictions associated to the final pretended state of charge for the batteries so as the technical grid operation. The Evolutionary Particle Swarm Optimization tool is used to find active power set-points for each EV in a time interval. The EPSO was implemented in Matlab due to the facilities provide by this software on manipulating matrix structures.

The results obtained in this paper, show the good performance of the methodology.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Carlos Moreira, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso e pelo facto de me ter dado a oportunidade de realizar este trabalho.

Em seguida, à co-orientadora no INESC-Porto, a Doutora Fernanda Resende, queria deixar uma palavra de amizade e de profundo agradecimento pela colaboração, disponibilidade e apoio incansável prestados durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais pelo apoio incansável, pela confiança depositada e pelo facto de me terem dado a oportunidade de estudar longe de casa; apesar dos sacrifícios valeu sem dúvida a pena por ter sido a melhor experiência da minha vida.

À minha irmã, pela ajuda constante, por estar sempre a motivar-me e por fazer com que tenha mais confiança nas minhas capacidades.

A todos os meus colegas, pela amizade e pelo apoio ao longo destes últimos cinco anos, espero conservar as amizades criadas por muitos outros.

À minha namorada Eugénia, por todo o incentivo, apoio, afecto e por toda a compreensão e companhia que sempre me proporcionou.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação	1
1.2 - Objectivos.....	2
1.3 - Estrutura da dissertação.....	3
Capítulo 2	4
Soluções conceptuais para integração dos veículos eléctricos	4
2.1 - Introdução.....	4
2.2 - A visão <i>Smart Grid</i> para as redes eléctricas do futuro	4
2.2.1 - O conceito de Micro-Redes	6
2.2.2 - O conceito de Multi-Micro-Redes	8
2.2.3 - O projecto português <i>Inov Grid</i>	11
2.3 - A integração de VE nas redes de distribuição.....	12
2.3.1 - Arquitectura de referência para integração dos VE.....	13
2.3.2 - Estratégias de carregamento das baterias dos VE	17
2.3.2.1 - Estratégia de carregamento não controlada	18
2.3.2.2 - Estratégia de carregamento multi-tarifa	19
2.3.2.3 - Estratégia de carregamento inteligente	19
2.3.2.4 - Estratégia de carregamento baseado no conceito V2G	20
2.4 - Conclusões	21
Capítulo 3	22
Formulação do problema de gestão local do carregamento de frotas de veículos eléctricos....	22
3.1 - Formulação do problema de optimização	23
3.2 - A ferramenta de optimização EPSO	24

3.3 - Conclusões	28
Capítulo 4	29
Metodologia para gestão local do carregamento de frotas de veículos eléctricos	29
4.1 - Definição da partícula	29
4.2 - Função de avaliação.....	30
4.3 - Procedimentos e articulações de algoritmos	33
4.4 - Conclusões	38
Capítulo 5	39
Resultados	39
5.1 - Caso de estudo	39
5.1.1 - Caracterização da frota de VE	40
5.1.2 - Rede teste	43
5.2 - Resultados numa perspectiva do cliente	45
5.2.1 - Estratégia de carregamento não controlado	45
5.2.2 - Estratégia de carregamento inteligente	47
5.2.3 - Comparação das estratégias de carregamento: <i>Dumb charging vs Smart charging</i> ...	55
5.3 - Avaliação dos impactos ao nível da rede de distribuição de MT	57
5.3.1 - Impactos resultantes da estratégia de carregamento não controlado.....	62
5.3.2 - Impactos resultantes da estratégia local de carregamento inteligente	65
5.4 - Avaliação dos impactos incluindo as restrições da rede	68
5.5 - Contribuição da integração de produção distribuída na rede	70
5.6 - Sumário e principais conclusões	72
Capítulo 6	73
Conclusão	73
6.1 - Conclusões	73
6.2 - Desenvolvimentos futuros	74
Referências	75
Anexo A: Dados da rede utilizada no caso de estudo	77

Lista de figuras

Figura 2.1 - Visão <i>Smart Grid</i> para as redes eléctricas [2]	5
Figura 2.2 - Arquitectura de Referência de uma MR [7]	6
Figura 2.3 - Funcionamento de uma MR em modo normal [7]	7
Figura 2.4 - Arquitectura de referência de uma MMR [7]	9
Figura 2.5 - Estrutura de Controlo de uma MMR [7]	10
Figura 2.6 - Pilares do projecto português <i>Inov Grid</i> [5].....	11
Figura 2.7 - Arquitectura técnica de referência do projecto <i>Inov Grid</i> [6]	12
Figura 2.8 - Ponto de carregamento lento individual do tipo público	14
Figura 2.9 - Arquitectura de referência de uma MR incluindo a integração de VE [6]	15
Figura 2.10 - Arquitectura de referência de uma MMR incluindo a integração de VE [6]	16
Figura 2.11 - Sistema de controlo hierárquico que representa o conceito de MMR com VE [6]	17
Figura 2.12 - Ilustração do conceito <i>Vehicle to Grid</i> [14]	20
Figura 3.1 - Representação da partícula no EPSO	25
Figura 3.2 - Movimento de uma partícula, influenciado pelos termos inércia, memória e cooperação	26
Figura 3.3 - Fluxograma representando o funcionamento do algoritmo EPSO	27
Figura 4.1 - Exemplo de uma estrutura da partícula e da sua evolução ao longo do tempo ..	30
Figura 4.2 - Fluxograma do EPSO com função de avaliação desenvolvida detalhada	33
Figura 4.3 - Procedimento para invocar a metodologia que implementa a estratégia inteligente de gestão local do carregamento de frotas de VE	35
Figura 4.4 - Procedimento desenvolvido para verificar as condições técnicas de exploração da rede	37
Figura 5.1 - Esquema unifilar da rede de teste	44

Figura 5.2 - Diagrama de carga típico para um dia (Residencial + Comercial)	44
Figura 5.3 - Diagrama de cargas associado ao carregamento dos VE segundo uma estratégia de carregamento não controlado	47
Figura 5.4 - Diagrama de cargas relativo ao consumo dos VE associado ao período de carregamento iniciado às 8 horas	50
Figura 5.5 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 9 horas	50
Figura 5.6 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 10 horas	51
Figura 5.7 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 11 horas	51
Figura 5.8 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 12 horas	52
Figura 5.9 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 16 horas	52
Figura 5.10 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 17 horas	53
Figura 5.11 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 18 horas	53
Figura 5.12 - Comportamento da <i>fitness</i> associada à melhor solução encontrada em cada iteração para o último período de carregamento	55
Figura 5.13 - Diagrama de cargas associado ao carregamento das baterias de uma frota de VE: <i>Smart charging</i> vs <i>dumb charging</i>	56
Figura 5.14 - Esquema unifilar da rede teste incluindo a ligação de frotas de VE	62
Figura 5.15 - Identificação da zona com problemas de tensão na rede teste	68
Figura 5.16 - Comparação entre diagrama de cargas incluindo ou não as restrições da rede.....	69
Figura 5.17 - Perfil de produção de energia solar no verão	71

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Matriz com os dados de entrada dos VE da frota	42
Tabela 5.2 – Potência activa disponibilizada a cada hora para cada VE numa estratégia de gestão de carregamento não controlado	46
Tabela 5.3 – <i>Set-points</i> atribuídos para cada hora e cada VE recorrendo à estratégia local de gestão de carregamento inteligente adaptada para aplicações em tempo real	49
Tabela 5.4 – Perfis de tensão (em p.u.) em barramentos da rede, sem frotas de VE	58
Tabela 5.5 – Perfis de tensão (em p.u.) em barramentos da rede, sem frotas de VE	59
Tabela 5.6 – Nível de congestionamento (em %) de algumas linhas da rede teste sem frotas de VE (1h até às 12h)	60
Tabela 5.7 – Nível de congestionamento em algumas linhas da rede sem frotas de VE	61
Tabela 5.8 – Perfis de tensão na rede com frotas de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento não controlada (1h até às 12h)	63
Tabela 5.9 – Perfis de tensão na rede com frota de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento não controlada (13h até às 24h)	64
Tabela 5.10 – Perfis de tensão na rede com frota de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento inteligente (1h até às 12h)	66
Tabela 5.11 – Perfis de tensão na rede com frota de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento inteligente (13h até às 24h)	67
Tabela 5.12 – Perfis de tensão na zona problemática da rede incluindo a restrição por parte da rede na estratégia de gestão de carregamento inteligente (13h até às 24h) ...	70
Tabela 5.13 – Perfis de tensão na zona problemática da rede incluindo produção dispersa (1h até às 12h)	71
Tabela 5.14 – Perfis de tensão na zona problemática da rede incluindo produção dispersa (13h até às 24h)	72
Tabela A.1 – Dados correspondente aos parâmetros de geração da rede, em p.u.	77
Tabela A.2 – Dados correspondente aos parâmetros das linhas da rede, em p.u.	78

Tabela A.3 – Dados correspondente aos parâmetros dos barramentos da rede, em p.u. 83

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CACM	<i>Central Autonomous Management Controller</i>
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
CVC	<i>Cluster of Vehicle Controller</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DG	<i>Distributed Generation</i>
DMS	<i>Distribution Management System</i>
DSO	<i>Distribution System Operator</i>
DTC	<i>Distribution Transformer Controllers</i>
EB	<i>Energy Box</i>
EDP	Energias de Portugal
EPSO	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
INESC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores
LC	<i>Load Controller</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MC	<i>Microsource Controller</i>
MGCC	<i>MicroGrid Central Controller</i>
MMR	Multi-Micro-Rede
MR	Micro-Rede
MT	Média Tensão
OLTC	<i>On-Load Tap Changer</i>
PLC	<i>Power Line Communications</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>

RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SI	Sistema de Informação
SVC	<i>Static VAr Compensator</i>
UE	União Europeia
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
VC	<i>Vehicle Controller</i>
VE	Veículo[s] eléctrico[s]

Lista de símbolos

b	Susceptância
b_G	Melhor posição ocupada pelo conjunto total de partículas
CEC	Custo da Energia Consumida
Cehc	Consumo de energia nas horas de cheia
Cehp	Consumo de energia nas horas de ponta
Cehsv	Consumo de energia nas horas de super vazio
Cehv	Consumo de energia nas horas de vazio
dP	Dimensão da Partícula
Ea_i	Energia consumido pelo VE i
EAC_i	Estado Actual de Carga da bateria do VE i
EFC_i	Estado Final de Carga da bateria do VE i
EFCP	Estado Final de Carga Pretendido
Er_i	Energia requisitada pelo VE i
€	Euro
FIT	<i>Fitness</i>
h	hora
I	Corrente
kV	kiloVolt
kW	kiloWatt
kWh	kiloWatt hora
LogN	Distribuição Lognormal
MW	Mega Watt
Nh_i	Número de horas disponíveis para efectuar carregamento
Nhp	Número de horas de ponta num dia
Pehc	Preço da electricidade nas horas de cheia
Pehp	Preço da electricidade nas horas de ponta
Pehsp	Preço da electricidade nas horas de super vazio
Pehv	Preço da electricidade nas horas de vazio

P_{en}	Penalização da partícula
P_d	Potência activa consumida
P_g	Potência activa gerada
P_{max}	Potência Activa máxima
P_{pc}	Preço da potência contratada
P_{php}	Preço da potência nas horas de ponta
P_t	Potência de tomada
p.u.	Por unidade
Q	Potência Reactiva
r	Resistência
τ	Parâmetro de aprendizagem
T_f	Termo fixo
tg	Tangente
V	Tensão
V_i	Velocidade da partícula i
w_i	Parâmetro Estratégico do indivíduo i
x	Reactância
X_i	Parâmetro Objecto do indivíduo i
%	Porcentagem

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório apresentam-se a motivação que levou à realização deste trabalho bem como os objectivos pretendidos. Também é feita uma breve apresentação da estrutura da dissertação de modo a obter uma melhor percepção quanto ao conteúdo do trabalho produzido.

1.1 - Motivação

O crescimento contínuo da integração da produção de energia a partir de fontes renováveis verificado nos últimos anos devido às preocupações ambientais crescentes por parte do governo e da comunidade europeia levou a uma mudança de paradigma no sector eléctrico. De facto, fala-se hoje em dia na visão *Smart Grid* (ou redes inteligentes em português) através da qual se pretende aumentar a integração da micro-produção e da produção distribuída nas redes de distribuição de baixa e média tensão respectivamente, de forma eficiente. Neste contexto, os conceitos de MR e MMR são fundamentais no desenvolvimento deste novo paradigma na medida em que se apresentam ao sistema como células extremamente flexíveis, permitindo desenvolver um conjunto de potencialidades inovadoras ao nível de operação das redes.

Mais recentemente, assistiu-se a nível nacional numa aposta forte na integração de veículos eléctricos, os quais representam um novo elemento das redes de energia eléctrica do futuro. De facto, os VE apresentam-se ao sistema como uma carga na medida em que necessitam de energia eléctrica para carregar as suas baterias. Estas baterias quando ligadas à rede poderão também proporcionar uma capacidade de armazenamento de energia, permitir um aumento da integração de micro-produção e contribuir para o funcionamento em rede isolada em caso de emergência como por exemplo quando ocorre uma falha de energia.

A gestão dos carregamentos das baterias dos VE deverá ser suportada pelo conceito de *Smart Grid* e, em particular, pela extensão dos conceitos de MR e MMR. O aumento progressivo da integração dos VE implica um aumento significativo dos consumos uma vez que as suas baterias apresentam necessidades elevadas de carga. Assim, torna-se necessário efectuar o controlo do carregamento de modo a minimizar os impactos negativos que se podem vir a verificar ao nível da exploração das redes de distribuição.

A ligação de VE à rede poderá envolver pontos de carga de nível individual do tipo doméstico, ou equivalente, ligados à rede de distribuição de baixa tensão e pontos de carga de baterias associadas a frotas de VE ligadas sobre as redes de distribuição de média tensão. Neste caso, dependendo do número de VE que constituem a frota e das necessidades de carregamento das suas baterias, a potência de tomada poderá ser elevada e além disso ser utilizada por curtos intervalos de tempo. No entanto, tratando-se de um sistema de carregamento lento, a implementação de uma estratégia de gestão local para efectuar o carregamento inteligente pode conduzir à redução do valor da potência de tomada e contribuir para a melhoria das condições de operação das redes de distribuição de média tensão, na medida em que potencia a transferência deste consumo adicional para as horas de vazio, em que o custo da energia é mais baixo.

Assim, neste trabalho, foi desenvolvida uma estratégia deste tipo, tendo como objectivo minimizar o custo da energia consumida sem, no entanto deixar de satisfazer os requisitos dos condutores em termos de estado de carga das baterias e procurando minimizar os impactos negativos ao nível das condições de exploração da rede.

1.2 - Objectivos

O desenvolvimento deste trabalho obedeceu aos seguintes objectivos, que serviram como linhas gerais de orientação:

- Revisão bibliográfica e escrita do estado da arte relativamente às soluções conceptuais para suporte da integração de VE nas redes de distribuição;
- Desenvolvimento de ferramentas para efectuar a gestão do carregamento de frotas de VE ligadas sobre as redes de distribuição de MT de modo a minimizar os custos de electricidade, tendo em conta a disponibilidade dos veículos para carregamento das baterias e os requisitos em termos de estado final de carga;
- Adaptação da ferramenta para funcionamento em tempo real de acordo com o conceito de MMR;
- Avaliação dos efeitos ao nível das condições de exploração da rede de distribuição (tensões e congestionamentos) para uma estratégia de gestão de carregamento não controlada (*Dumb Charging* em inglês), uma estratégia de gestão de carregamento inteligente (*Smart Charging* em inglês) e uma estratégia de gestão de carregamento inteligente incluindo restrições por parte da rede;

- Escrita da dissertação.

1.3 - Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos distintos sendo o presente capítulo introdutório, em que se apresentam a motivação que levou a realização deste trabalho bem como os objectivos pretendidos.

O capítulo 2 dedica-se à descrição da visão *Smart Grid* bem como dos conceitos de MR e MMR para depois ser apresentada a descrição de soluções conceptuais que se espera que venham a suportar a integração, de forma eficiente, de VE nas redes de distribuição.

No capítulo 3 é feita uma descrição do problema de gestão local do carregamento de frotas de VE, em que é formulado o problema de optimização para ser resolvido utilizando o algoritmo EPSO como ferramenta de optimização. A metodologia é adaptada para aplicações em tempo real e permite a definição de *set-points* de potência activa para cada VE da frota tendo em conta o seu período de estacionamento e os requisitos de carga da bateria pretendidos bem como as condições de exploração da rede de distribuição de MT.

No capítulo 4 apresenta-se a metodologia adoptada para resolver o problema descrito no capítulo 3, fazendo uma descrição dos procedimentos e articulações de algoritmos desenvolvidos para o efeito.

O capítulo 5 apresenta todos os resultados obtidos utilizando a metodologia descrita no capítulo 4 para um caso de estudo, tendo por objectivo principal demonstrar a vantagem da utilização de uma estratégia de gestão de carregamento inteligente das baterias dos VE face a uma estratégia de carregamento não controlada.

Por último, no capítulo 6 serão apresentadas todas as conclusões retiradas ao longo do trabalho desenvolvido bem como algumas perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Soluções conceptuais para integração dos veículos eléctricos

2.1 - Introdução

Este capítulo pretende apresentar possíveis soluções conceptuais que permitam a integração dos veículos eléctricos nas redes de distribuição de BT e MT. Assim, numa primeira fase será apresentada a visão das redes eléctricas do futuro: a visão *Smart Grid*, detalhando os conceitos de MR e MMR bem como o projecto português *Inov Grid* cujo objectivo é tornar estes conceitos numa realidade, a curto prazo. Numa segunda fase, são apresentadas as soluções baseadas na visão *Smart Grid* como infra-estrutura de suporte à integração dos veículos eléctricos, em cenários de progressiva integração, procurando evitar realização de investimentos em reforço das infra-estruturas da rede.

2.2 - A visão *Smart Grid* para as redes eléctricas do futuro

O actual contexto macroeconómico em que nos encontramos está a obrigar o sector eléctrico a repensar a sua estrutura e a sua organização. De facto, existe a necessidade de explorar cada vez mais fontes de energia alternativas, isto é, substituir fontes que utilizam recursos fósseis por fontes de energia renováveis tais como energia solar, energia eólica, energia das ondas entre outras. É também necessário reduzir cada vez mais o consumo global de energia promovendo a eficiência energética nos vários sectores da actividade económica bem como no sector residencial. Estas necessidades integram-se no actual contexto europeu sobre a energia e as alterações climáticas e resultaram no pacote 20-20-20, em que os países da UE se comprometeram a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 20%, a aumentar a sua eficiência energética em 20% e a atingir 20% do cabaz energético com energias renováveis, até 2020 [1]. O aumento da competitividade exige o desenvolvimento de um sector eléctrico que promove a concorrência nos preços bem como na quantidade de

serviços oferecidos. Finalmente, outra necessidade reside no facto de os consumidores terem um papel cada vez mais activo, em que a partir de informações detalhadas que lhes são fornecidas podem tomar decisões para reduzir a factura de electricidade. Sendo assim, além de serem consumidores passam também a ser produtores. Foi com base nestas novas necessidades crescentes que surgiu um novo conceito de redes eléctricas para a Europa: a visão *Smart Grid* [2] que pretende fazer face aos desafios que se colocam a nível da exploração das redes de distribuição do futuro, integrando quantidades significativas de produção distribuída.

A visão das redes eléctricas inteligentes implica uma mudança de paradigma no que diz respeito à operação dos sistemas eléctricos de energia. De facto, é necessário passar de um modelo de produção centralizado seguido de transporte e distribuição da energia para um modelo de produção descentralizado com elevada integração de produção distribuída a nível das redes de distribuição BT e MT. Esta visão tem como objectivo a gestão activa do sistema, de modo a controlar por exemplo os níveis de congestionamentos nas linhas e os perfis de tensão. A figura 2.1 ilustra a visão futura das redes eléctricas, na qual se pode observar a integração de fontes de energia intermitentes (renováveis), o que implica o recurso a equipamentos que armazenam energia (volantes de inércia, baterias de acumuladores dos veículos eléctricos ou não). A visão *Smart Grid* envolve os conceitos de MR e MMR desenvolvidos no âmbito dos projectos europeus *MICROGRIDS* [3] e *MORE-MICROGRIDS* [4], os quais são apresentados nas secções seguintes.



Figura 2.1 - Visão *Smart Grid* para as redes eléctricas [2]

2.2.1 - O conceito de Micro-Redes

Verifica-se actualmente um constante crescimento da integração de Produção Dispersa nas redes eléctricas de BT, através de tecnologias de micro-geração tais como sistemas de co-geração que possibilitam a produção combinada de electricidade e de calor, turbinas a gás, micro-turbinas, pilhas de combustível, micro geradores eólicos e painéis solares fotovoltaicos. Espera-se uma integração em larga escala destes sistemas nos próximos tempos pelo que é necessário controlar eventuais impactos que possam surgir ao nível das redes devidos a esta integração (nomeadamente impactos nos perfis de tensão, na qualidade da onda de tensão, no congestionamento dos ramos, nos sistemas de protecção e na estabilidade do sistema), incentivando a gestão integrada desses recursos. Foi por isso desenvolvido o novo conceito de MR no que diz respeito às redes de BT.

Para [5], uma MR corresponde a uma rede de distribuição de BT onde são ligados sistemas de micro-geração muito próximos das cargas. Em [6] acrescenta-se o facto de as cargas e de as unidades de Produção Dispersa conectadas à rede serem controladas por sistemas avançados de gestão e controlo. Além disso uma MR também possui equipamentos de armazenamento de energia (volantes de inércia, bateria de acumuladores, supercondensadores), para fazer face à intermitência das energias renováveis e suportar a sua exploração em rede isolada. Juntamente com os dispositivos atrás referidos, uma MR é constituída por um sistema de controlo hierárquico bem definido e suportado por um sistema de comunicações a instalar para o efeito. É possível observar a arquitectura de referência utilizada para uma MR no âmbito do Projecto *MICROGRIDS* com a figura 2.2.

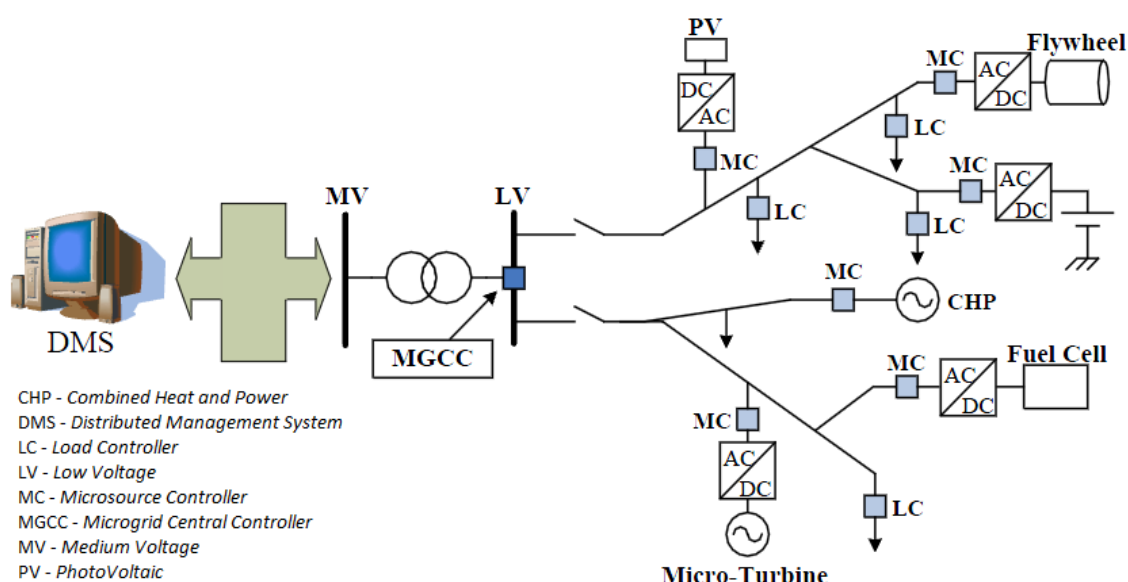


Figura 2.2 - Arquitectura de Referência de uma MR [7]

A MR é controlada centralmente por uma unidade designada por MGCC instalada no posto de transformação MT/BT de onde deriva a MR, como se pode observar na figura 2.2. O MGCC

possui várias funcionalidades cujo principal objectivo é a optimização da operação combinada da micro-geração bem como o controlo activo de cargas locais [5]. Além disso, esta unidade integra funções de sistema de controlo secundário de frequência quando a MR opera em rede isolada (quando ocorre por exemplo uma falha de energia no sistema). Finalmente, o MGCC [8] [9] ainda é responsável pela gestão estratégica de reposição de serviço após ocorrência de colapso na rede, o que tem como consequência directa a diminuição do tempo de reposição logo um aumento da qualidade de serviço. O MGCC terá de comunicar e interagir directamente com os controladores de nível hierárquico inferior, designados por LC, MC. Estas entidades são responsáveis respectivamente pelo controlo das cargas e controlo das fontes de produção. O MC controla por exemplo os níveis de potência activa e reactiva em cada micro-fonte enquanto o LC é responsável das cargas, desligando por exemplo as cargas não prioritárias em caso de emergência, na sequência de uma solicitação por parte do MGCC. Em modo normal, o princípio de funcionamento de uma MR operando em rede interligada pode ser observado através do esquema apresentado na figura 2.3 [7].

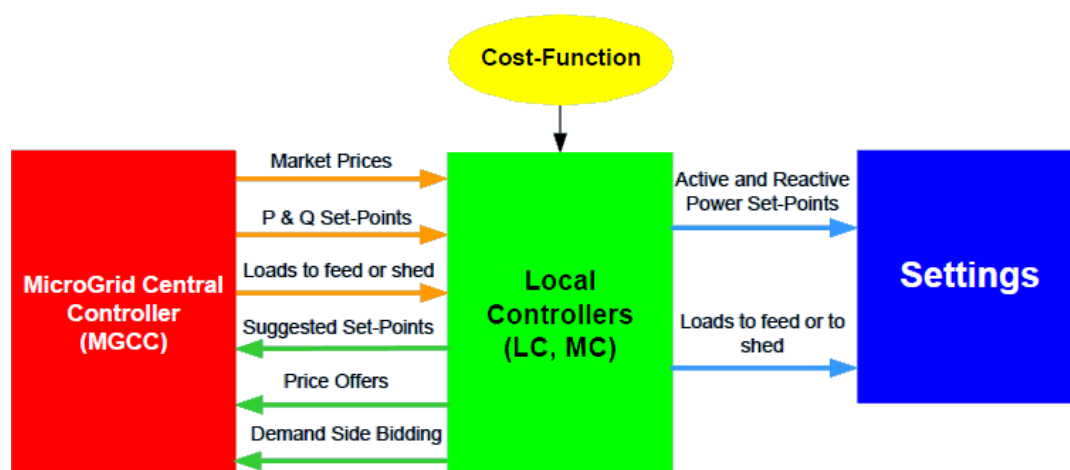


Figura 2.3 - Funcionamento de uma MR em modo normal [7]

Através da análise da figura 2.3, pode verificar-se a existência de comunicação e interacção entre as várias entidades envolvidas, em que o controlador MGCC pode integrar funções de gestão económica de modo a assegurar a operação da MR em ambiente de mercado. Para tal é efectuado o despacho da MR com base em ofertas enviadas pelos controladores MC e LC relativos a preços de mercado bem como informação relativa à previsão de carga e de produção por parte dos sistemas de micro-geração. Em [7], é sugerido que o MGCC também possa comunicar com os sistemas SCADA/DMS do lado do operador da rede de distribuição e assim receber informação adicional acerca de potências activas/reactivas trocadas entre a MR e a rede de distribuição. Com base nesta informação, o MGCC define o cenário óptimo de operação para depois enviar *set-points* tanto para as micro-fontes por intermédio dos MC como para as cargas controláveis através dos LC. Estes *set-points*

podem ser para cada equipamento os seguintes: para o MC (controlar de micro-geração), aumentar ou diminuir a injeção de potência activa/reactiva; para o LC (controlador de cargas), ligar ou desligar cargas; e para os equipamentos de armazenamento de energia, aumentar ou diminuir a injeção/consumo de potência activa [7].

A operação das redes eléctricas de BT, segundo o conceito de MR tem como objectivo determinar o cenário óptimo de operação da rede (função do controlador MGCC) tendo em conta uma série de informações técnicas recolhidas pelas unidades LC e MC. É de referir que a exploração em rede isolada da MR constitui um facto inovador, devido à ausência de máquinas síncronas e ao facto de os sistemas de micro-geração serem ligados à rede através de conversores de electrónica de potência, que se traduz na ausência de inércia [5]. Será por isso necessária a utilização de equipamentos com capacidade de armazenamento de energia como foi possível observar na figura 2.2.

2.2.2 - O conceito de Multi-Micro-Redes

Tal como no caso das redes de distribuição de BT, prevê-se num futuro próximo uma integração massiva de Produção Dispersa directamente ligada às redes de MT, bem como às MR que podem ser operadas como células activas [5]. Para fazer face a esta mudança foi desenvolvido o novo conceito de Multi-Micro-Rede. Em [7] define-se uma MMR como sendo uma estrutura de controlo que resulta da transposição do conceito de MR (referente às redes de BT), para o nível da rede de distribuição MT. Pelo facto de passar a existirem cargas e micro-fontes activas, existe a necessidade de coordenação entre os vários elementos da rede, sendo a MMR uma estrutura com nível mais elevado que as MR. Tal cenário implica também o desenvolvimento de novas ferramentas para o sistema de controlo SCADA/DMS, que é responsável pela supervisão, controlo e gestão da rede de distribuição.

Na figura 2.4 é possível observar a arquitectura de gestão e controlo de uma MMR desenvolvida no âmbito do projecto europeu *MORE MICROGRIDS* [4].

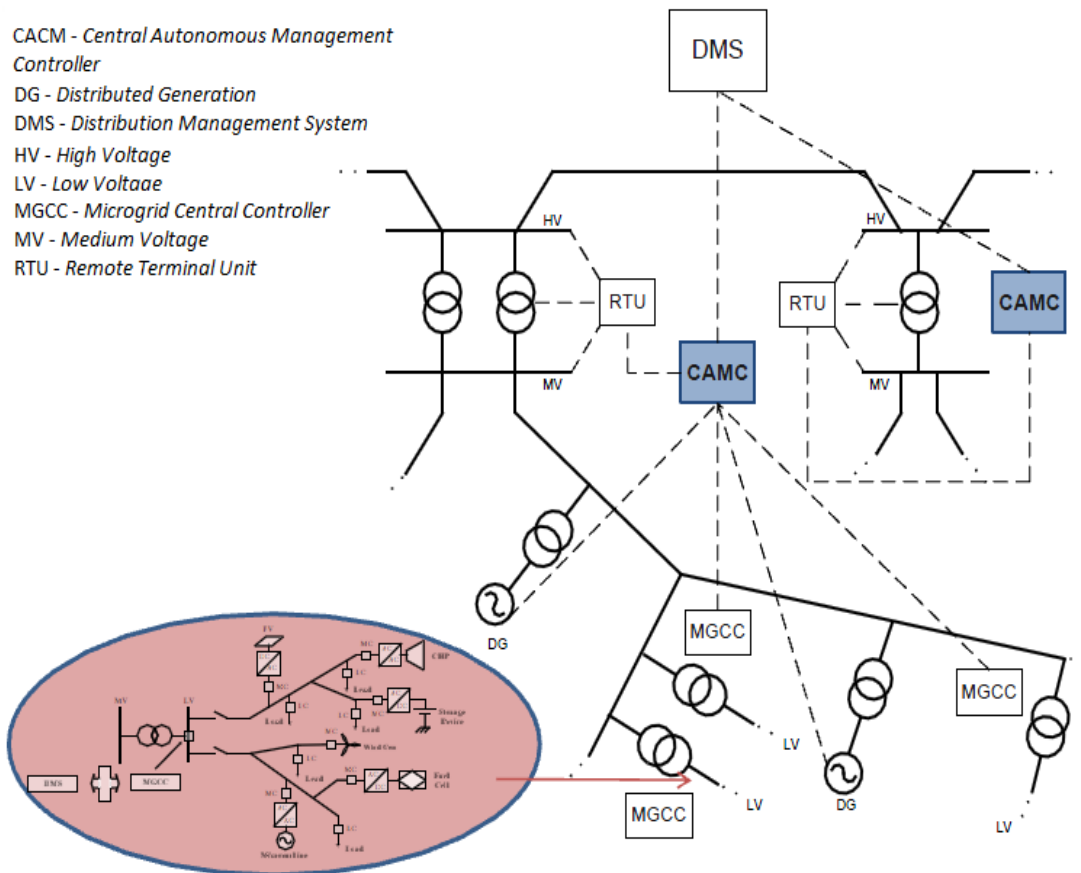


Figura 2.4 - Arquitetura de referência de uma MMR [7]

Os elementos activos da rede MT são geridos por uma unidade de controlo designada por CAMC, de forma central. Esta unidade tem de ser instalada no barramento MT da subestação AT/MT a montante [10]. O CAMC tem um comportamento semelhante a uma aplicação SCADA/DMS, assegurando assim um conjunto de funcionalidades que envolvem entre outras: aquisição e processamento de dados, diálogo com sistemas de informação a montante, isto é, com o SCADA/DMS, recolha de informação disponibilizada pelas unidades de controlo remoto (RTU na figura 2.4) e controlo e gestão técnica e económica do sistema.

O sistema de controlo hierarquizado é constituído por três níveis como é possível observar na figura 2.5.

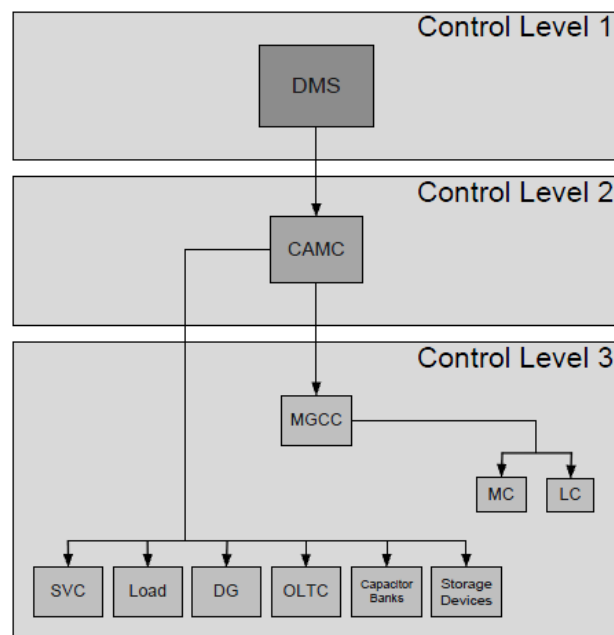


Figura 2.5 - Estrutura de Controlo de uma MMR [7]

O CAMC não precisa de comunicar directamente com os elementos da MR, pois o MGCC actua como interface entre o CAMC e as unidades activas da MR. O controlo de nível 1 corresponde ao controlo de nível mais alto e é assegurado pelo DMS (instalado na rede de AT) que é responsável pela gestão activa de toda a rede de distribuição. O controlo de nível 2 é assegurado pelo CAMC (instalado na rede de MT) que é responsável pela gestão activa das MR a jusante bem como das unidades de Produção Dispersa e das cargas controláveis (veículos eléctricos por exemplo) directamente ligadas sobre a rede de MT. Finalmente, o controlo de nível 3 é assegurado pelo MGCC (instalado na rede de BT), que é responsável pela gestão activa das cargas e das micro-fontes apoiado respectivamente pelos controladores MC, LC [7].

Sendo o CAMC o componente *master* do conceito de MMR, terá como responsabilidade a gestão activa dos equipamentos representados na figura 2.5 no nível de controlo 3. Estes equipamentos são controladores centrais da MR (MGCC), SVC, as cargas directamente ligadas à rede de MT (*Load*), as unidades de produção dispersa ligadas à rede de MT (DG), as posições das tomadas de transformadores (OLTC) bem como bancos de condensadores e equipamentos de armazenamento (*Capacitor Banks* e *Storage Device* na figura 2.5). Cada um destes equipamentos recebe ordens de comando por parte do CAMC e manda periodicamente informação ao mesmo relativamente ao estado actual do sistema bem como dados recolhidos localmente. Desta maneira, o CAMC consegue definir as condições de operação da rede de MT e assim enviar os *set-points* para cada equipamento. Estes *set-points* podem ser os seguintes para os diferentes equipamentos: para o MGCC, aumentar ou diminuir injeção/consumo de potência activa/reactiva; para as cargas, ligar ou desligar as mesmas; para as unidades de Produção Dispersa controláveis, aumentar ou diminuir geração de potência activa/reactiva; para os equipamentos de armazenamento, aumentar ou diminuir geração/consumo de

potência activa; e para os equipamentos tais como banco de condensadores, aumentar ou diminuir a injeção/consumo de potência reactiva [7].

2.2.3 - O projecto português *Inov Grid*

Neste contexto de gestão activa das redes de distribuição, baseada nos conceitos de MR e MMR, estão actualmente em curso a nível europeu vários projectos que visam à materialização da visão de rede inteligente do futuro. Em Portugal, o projecto *Inov Grid* promovido pela EDP Distribuição, potencia a implementação deste conceito, esperando-se que a gestão activa das redes de distribuição seja uma realidade de curto prazo. Este projecto assenta em torno de três pilares como se pode observar na figura 2.6: redes inteligentes, micro-produção/produção distribuída e finalmente telecontagem/gestão energética.

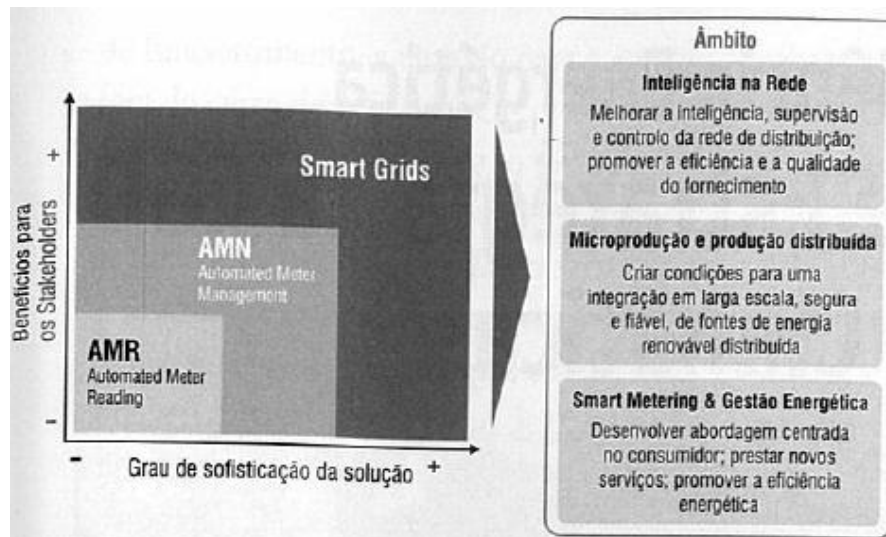


Figura 2.6 - Pilares do projecto português *Inov Grid* [5]

No que diz respeito às redes inteligentes, o projecto pretende promover um aumento da eficiência energética bem como da qualidade de serviço, estendendo os sistemas de supervisão e controlo das redes AT até às redes de distribuição de BT e MT. Relativamente à Produção Distribuída, o projecto irá permitir aumentar os níveis de integração sem degradar as condições de operação da rede, recorrendo a uma gestão activa de todos os elementos da rede. Finalmente, no que diz respeito à telecontagem e gestão energética o projecto pretende criar condições para uma atitude participativa do consumidor, tendo acesso a novos serviços tais como acesso em tempo real a preços do mercado e evolução em tempo real do consumo [5].

A arquitectura *Inov Grid* é ilustrada na figura 2.7, onde é possível observar os diferentes equipamentos que constituem a infra-estrutura do projecto. Existem equipamentos de

contagem, monitorização e gestão de energia designados por *Energy Box* (EB na figura 2.7), que estão instalados juntos dos clientes BT (consumidores e produtores) e que desempenham as funções de LC, MC descritas anteriormente para as MR. Os equipamentos de automação e monitorização são designados por *Distribution Transformer Controllers* (DTC na figura 2.7), e estão instalados nos postos de transformação MT/BT para desempenhar as funções do MGCC, anteriormente descritas no conceito das MR. Além disso, também poderão controlar a iluminação pública ou monitorizar tensões e correntes no transformador. Os sistemas de informação (SI) integram e processam a informação recolhida. Finalmente, uma rede de telecomunicações suporta a integração da infra-estrutura e estende-se desde a casa dos clientes até aos centros de controlo e gestão onde estão instalados os SI. A comunicação entre os SI e os DTC é feita através da rede de comunicações móveis (GPRS). A comunicação entre as EB e os DTC é efectuada através da rede eléctrica (tecnologia PLC). Existe também uma interface entre a EB e os equipamentos domésticos e de domótica através de tecnologias de comunicação envolvendo *ZigBee* ou *Bluetooth* [5].

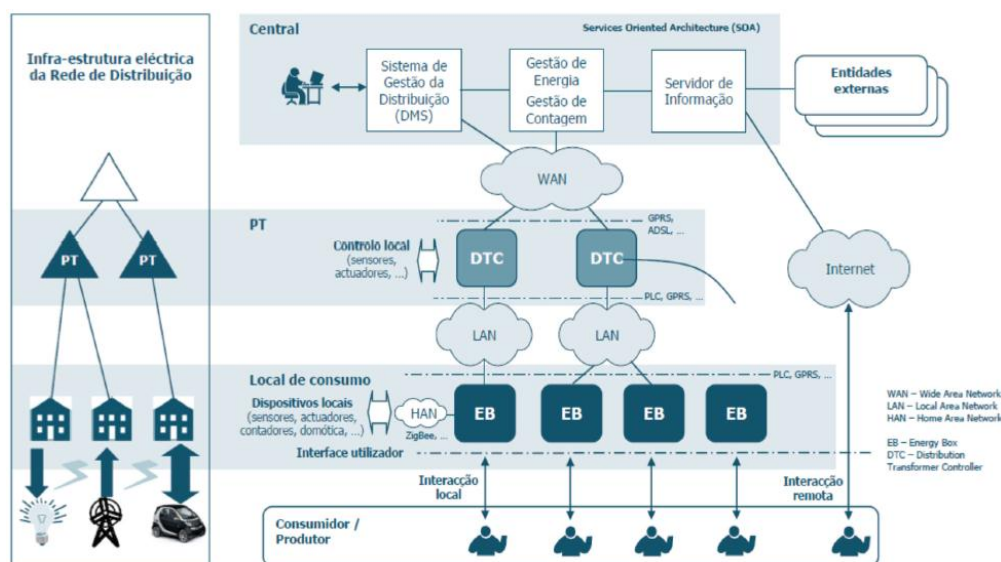


Figura 2.7 - Arquitectura técnica de referência do projecto *Inov Grid* [6]

A seguir são apresentadas as soluções conceptuais que vão suportar a presença de VE em cenários de progressiva integração deste novo elemento na rede.

2.3 - A integração de VE nas redes de distribuição

A mudança de paradigma na mobilidade em um crescente interesse na mobilidade eléctrica terá como consequência directa, alterações profundas no que diz respeito à exploração das redes de distribuição. De facto, a integração de VE conduz a um aumento do consumo de energia significativo devido à necessidade de alimentar a carga adicional

correspondente ao carregamento das baterias dos VE. A resposta a este aumento de consumo passa por duas alternativas bem distintas:

- Reforço das infra-estruturas da rede através de investimentos significativos;
- Desenvolvimento e implementação de estratégias inteligentes para efectuar a gestão do carregamento das baterias dos VE, os quais deverão ser suportados pelos conceitos já atrás apresentados: o conceito *Smart Grid* bem como os conceitos associados de MR e MMR.

De modo a evitar a realização de avultados custos de investimentos, a integração progressiva de VE deve ser suportada pelo conceito de *Smart Grid*, em particular, pelos conceitos de MR e MMR. É portanto necessário fazer uma adaptação/extensão desta arquitectura através da inclusão de funcionalidades de gestão adicionais bem como de equipamento dedicado à integração dos VE nas redes e à gestão de carregamento das suas baterias.

2.3.1 - Arquitectura de referência para integração dos VE

A integração dos VE nas redes de distribuição terá de ser suportada por uma estrutura hierarquizada de controlo e gestão capaz de gerir de forma integrada a operação da rede, incluindo o processo de carregamento das baterias dos VE. A substituição dos carros convencionais por VE passa inevitavelmente por uma disponibilização de infra-estruturas que permitam o carregamento das suas baterias de acordo com as necessidades dos proprietários, envolvendo as seguintes soluções [11]:

- Pontos individuais de carregamento lento (isto é, demorando entre 6h a 8h), para instalações do tipo doméstico (garagem por exemplo) ou do tipo público. Estes tipos de pontos estarão ligados à rede de distribuição BT;
- Pontos individuais de carregamento rápido que permitam o carregamento dos VE entre 20 minutos a 30 minutos;
- Pontos de carregamento associados a frotas de VE (por exemplo estações de serviço, parques de estacionamento, centros comerciais). Estes pontos estarão ligados sobre as redes de distribuição de MT. É de referir que já existem pontos como aquele observado na figura 2.8, espalhados pelo país no âmbito do programa Mobi.E [12].

No entanto, no contexto deste trabalho, apenas foi considerado o terceiro modelo de negócio, sobre o qual foi desenvolvida uma estratégia de gestão de carregamento orientada para o lado do cliente, mas tendo em conta as condições de exploração da rede.



Figura 2.8 - Ponto de carregamento lento individual do tipo público

A arquitectura de referência que irá suportar a integração dos VE nas redes de distribuição será baseada na arquitectura de referência da visão *Smart Grid* (associada aos conceitos de MR e MMR) já atrás apresentada e desenvolvida.

Ao nível das redes de distribuição de BT o controlo coordenado será assegurado através da implementação do conceito de MR integrando funcionalidades de controlo e gestão ao nível da unidade MGCC e da inclusão de equipamento de contagem e monitorização associado aos pontos de carregamento lento do tipo doméstico ou público. Este equipamento deverá ser capaz de executar ordens de comando vindas do MGCC a montante e é designado por VC na figura 2.9. A unidade VC estabelece uma interface de comunicação entre o MGCC e o conversor electrónico de potência que liga as baterias à rede de modo a controlar a taxa de carregamento destas de acordo com as condições de operação da rede e com benefícios para o consumidor na medida em que, sempre que possível, o carregamento seja assegurado em horários que a oferta de energia é elevada e os preços mais baixos [6].

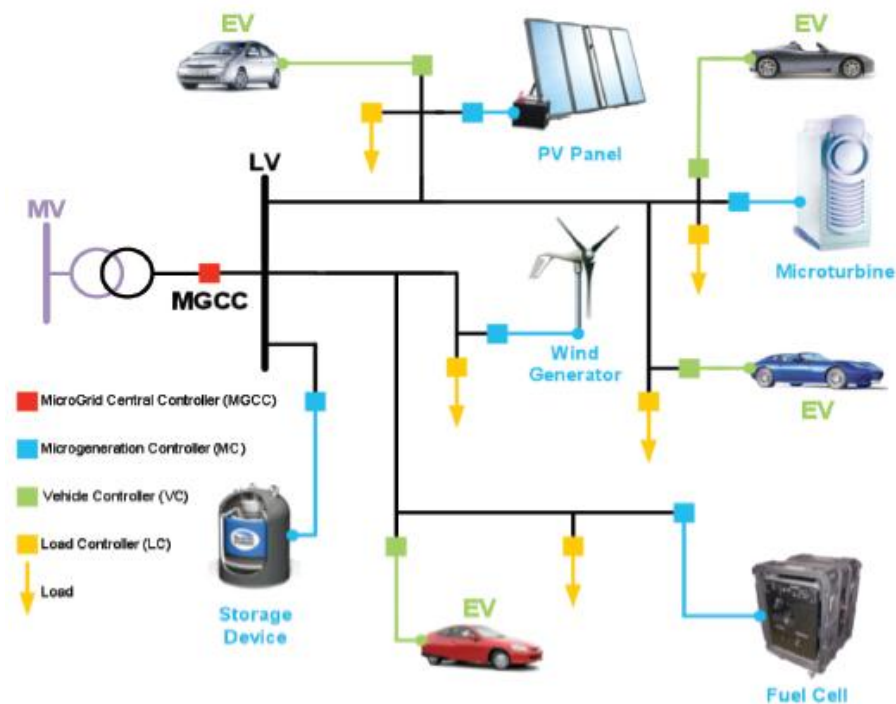


Figura 2.9 - Arquitectura de referência de uma MR incluindo a integração de VE [6]

Por outro lado, a presença de pontos de carregamento ligados sobre as redes de distribuição de MT requer a integração, de um elemento adicional, designado por CVC na arquitectura de referência de conceito de MMR, tal como apresentado na figura 2.10. Este equipamento, para além das funcionalidades de contagem e monitorização da rede, deve ser capaz de receber e executar ordens de comando enviadas pelo seu superior hierárquico designado por CAMC, a montante. Isto é, o CAMC deverá ter funcionalidades adicionais de controlo e gestão do carregamento das baterias dos VE, envolvendo pontos de carregamento lentos associados a frotas de VE, através de uma interface de comunicação por parte do CVC. Por outro lado, o CVC deverá também incluir funcionalidades de gestão do carregamento das baterias dos VE que compõem a frota, as quais deverão ser orientadas para o lado do cliente MT, exigindo um controlo coordenado entre o CVC e o CAMC.

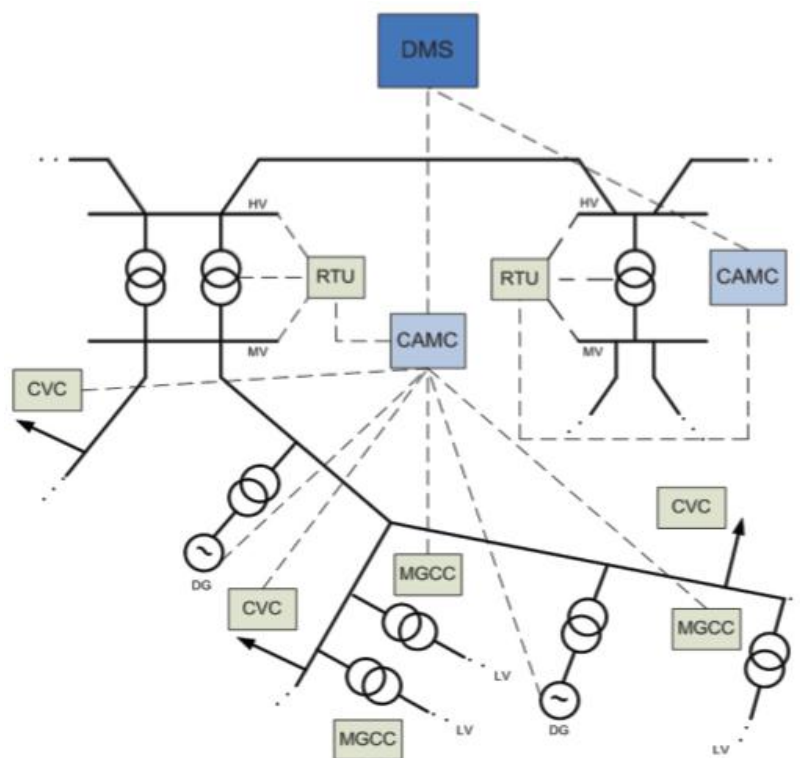


Figura 2.10 - Arquitectura de referência de uma MMR incluindo a integração de VE [6]

A gestão técnica das redes de BT segundo o conceito de MR é efectuada de forma centralizada e assegurada pelo MGCC que possui funcionalidades destinadas à optimização da operação da rede a jusante, tal como referido na primeira parte deste capítulo. Os controladores VC, situados a um nível inferior ao MGCC na hierarquia da arquitectura de referência, asseguram funções de contagem e também de monitorização, pelo que são responsáveis pelo envio de informação sobre as condições técnicas de operação da rede a nível local (por exemplo tensões, potências geradas/consumidas) para o MGCC através de uma rede de comunicação. Com base nas informações recebidas, os algoritmos implementados no controlador MGCC geram *set-points* de potência activa enviados aos VC sob a forma de ordens de comando de modo a assegurar o controlo activo das cargas, das unidades de micro-geração e do carregamento das baterias dos VE.

A unidade de controlo CAMC funcionará como interface entre o sistema central SCADA/DMS e o nível da rede de MT e será responsável pela gestão e controlo da rede de distribuição de MT que se encontra a jusante. O CAMC inclui funcionalidades de controlo que permitem assegurar o bom funcionamento da MMR em modo normal de operação e em modo de emergência. Este equipamento é responsável por gerar ordens de comando (a partir de algoritmos implementados na unidade) para enviar aos elementos activos ligados sobre a rede de MT, nomeadamente sistemas de Produção Dispersa, cargas controláveis, aos CVC associados aos postos de carregamento das baterias dos VE e aos MGCC situados nos postos de transformação MT/BT da área de actuação. No fundo, o MGCC serve de interface entre o

CAMC e os controladores locais da MR, logo o CAMC não precisa de conhecer de forma detalhada a constituição das redes de BT. O sistema de controlo hierárquico que suporta a implementação do conceito de MMR com integração de VE é representado na figura 2.11.

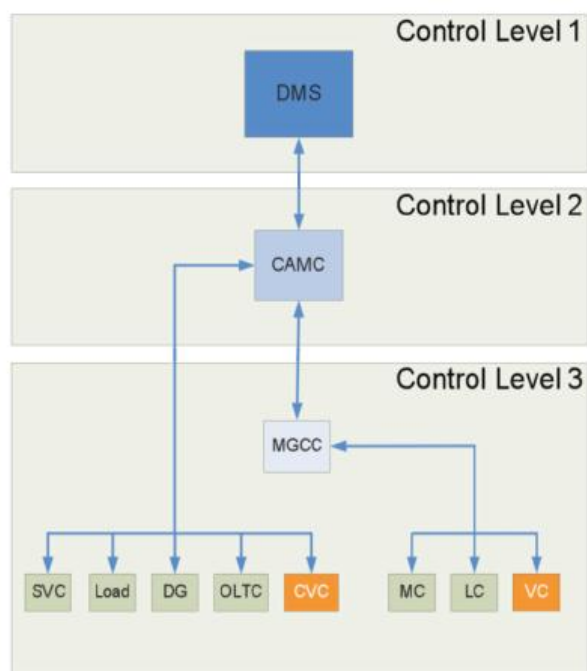


Figura 2.11 - Sistema de controlo hierárquico que representa o conceito de MMR com VE [6]

Em [13], é sugerido que quando a MMR é operada em modo normal de operação, o carregamento das baterias dos VE deve ser gerido por um agente de mercado (designado por fornecedor/agregador) após a validação prévia das condições de operação da rede de MT pelo operador de rede designado por DSO. Para tal, o DMS deve ter informação relativa a previsões de carga, de geração e de consumo das baterias dos VE. O fornecedor/agregador irá assegurar o fornecimento de energia para efectuar o carregamento das baterias dos VE, agrupando VE de acordo com os requisitos comuns dos seus proprietários em termos de estratégia de carregamento. O objectivo deste agrupamento consiste em dar mais visibilidade à participação dos VE no mercado de modo a explorar oportunidades de negócio [13].

2.3.2 - Estratégias de carregamento das baterias dos VE

As baterias dos VE representam do ponto de vista da rede, cargas eléctricas bastante flexíveis com elevado grau de controlabilidade quando comparadas com cargas convencionais. De facto, os pontos de carregamento lento permitem adoptar estratégias de gestão do carregamento das baterias de modo a minimizar os impactos negativos ao nível da rede

provocados pelo aumento de carga através da transferência de carga das horas de ponta para as horas de vazio. Deste modo, garante-se uma exploração das redes de distribuição em condições mais afastadas dos limites de exploração e evitam-se investimentos associados ao reforço das infra-estruturas da rede devido à integração dos VE.

Dependendo do tipo de carregamento escolhido pelo utilizador do VE (rápido ou lento), podem existir ou não estratégias de carregamento interessantes e viáveis. Isto é, no caso em que o utilizador opta pelo carregamento rápido com duração inferior a 40 minutos, as possibilidades em controlar a taxa de carregamento das baterias são poucos prováveis devido aos curtos tempos envolvidos. Por outro lado, se o utilizador optar por um carregamento lento com durações entre 1h e 8h [10], torna-se muito interessante efectuar uma gestão do carregamento das baterias, pois os VE ficarão imobilizados junto aos pontos de carregamento por longos períodos de tempo. No caso dos pontos individuais de carregamento para instalações do tipo doméstico ou público, o período de estacionamento irá acontecer predominantemente durante a noite. Em relação às frotas de VE o carregamento também irá ocorrer à noite pelo que possibilitará a implementação de estratégias inteligentes para gerir a taxa de carregamento das baterias.

Em [11] é sugerido a possibilidade de existirem três tipos de carregamento das baterias dos VE, a saber:

- Carregamento não controlado, na literatura anglo-saxónica designado por *Dumb Charging*;
- Carregamento tendo em conta os tarifários da electricidade;
- Carregamento inteligente, na literatura anglo-saxónica designado por *Smart Charging*.

No entanto, em [13], a estratégia de carregamento inteligente é alargada ao conceito de *Vehicle to Grid* (V2G), em que as baterias dos VE podem também ser utilizadas para a injeção de potência activa na rede. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada um dos modos de carregamento.

2.3.2.1 - Estratégia de carregamento não controlada

O carregamento não controlado constitui uma das opções em que os VE iniciam o carregamento das suas baterias logo a partir do momento em que são ligados à rede. Este tipo de carregamento é efectuado a uma taxa constante até a bateria ter atingido o seu estado final de carga ou até o utilizador interromper o carregamento. Esta opção não possibilita a realização do carregamento das baterias tendo em conta restrições de modo a usufruir de incentivos financeiros relativamente ao preço da electricidade por exemplo. No caso de haver uma integração em larga escala de VE nas redes de distribuição, o aumento significativo da carga adicional na rede sobretudo à hora de ponta, terá inevitavelmente consequências graves ao nível da exploração da rede, em consequência da degradação dos

perfis de tensão, do aumento dos níveis de congestionamento nos ramos da rede bem como do aumento das perdas. Este tipo de carregamento leva inevitavelmente ao reforço das infra-estruturas das redes de distribuição através da realização de investimentos muito grandes pelo que deve ser evitado em cenários de progressiva integração de VE.

2.3.2.2 - Estratégia de carregamento multi-tarifa

O carregamento baseado no preço multi-tarifa, segue uma abordagem não controlada [9] mas tentando tirar benefícios dos diferentes tarifários da electricidade. Isto é, os utilizadores são incentivados a carregar os seus veículos durante o período nocturno, aproveitando as horas de vazio em que a tarifa é mais baixa. O objectivo desta estratégia é potenciar a transferência da carga adicional associada ao carregamento das baterias dos VE para as horas de menor consumo aliviando assim o diagrama de cargas nas horas de cheias e ponta. O grande problema desta estratégia reside no facto de depender quase exclusivamente no comportamento das pessoas e mais concretamente nos proprietários dos VE, pelo que não deverá garantir uma melhoria significativa das condições de exploração da rede relativamente à estratégia de carregamento não controlada.

2.3.2.3 - Estratégia de carregamento inteligente

O carregamento inteligente, implica por parte dos utilizadores, uma disponibilização dos seus VE durante o período em que estão estacionados para efectuar a gestão do carregamento das baterias e eventualmente injectar potência na rede seguindo o conceito V2G [9]. O principal objectivo deste tipo de estratégias é definir taxas de carregamento tendo em conta as condições técnicas de exploração da rede de modo a minimizar os impactos negativos resultantes da alimentação de uma carga adicional e de valor considerável em comparação com a carga convencional. No entanto, a implementação de uma estratégia inteligente para a gestão do carregamento das baterias dos VE terá que ser suportada pela visão *Smart Grid* e, em particular, pelos conceitos de MR e MMR, tal como referido anteriormente.

As unidades de controlo MGCC e CAMC deverão portanto possuir funcionalidades avançadas de gestão para assegurar o carregamento inteligente das baterias dos VE, através da implementação de algoritmos que permitam a determinação de *set-points* de potência activa para um dado intervalo de tempo (15 minutos, 30 minutos, 1 hora) tendo em conta o horizonte temporal correspondente ao período de estacionamento dos VE e as condições de exploração da rede [9]. Estes *set-points* serão enviados com uma dada cadência (15 minutos, 30 minutos, 1 hora) aos controladores VC e CVC através da infra-estrutura de comunicação.

2.3.2.4 - Estratégia de carregamento baseado no conceito V2G

Finalmente, o carregamento utilizando o conceito de V2G representa um modelo similar ao carregamento inteligente. No entanto, admite-se para além da gestão do carregamento das baterias a possibilidade de controlar a injeção de potência na rede por parte dos VE. De facto, em [14] descreve-se o conceito V2G como sendo algo que permita aos VE (híbridos ou não) fornecer potência activa para a rede de distribuição a partir da energia armazenada nas suas baterias. Na figura 2.12 é possível observar o principal objectivo deste novo conceito.

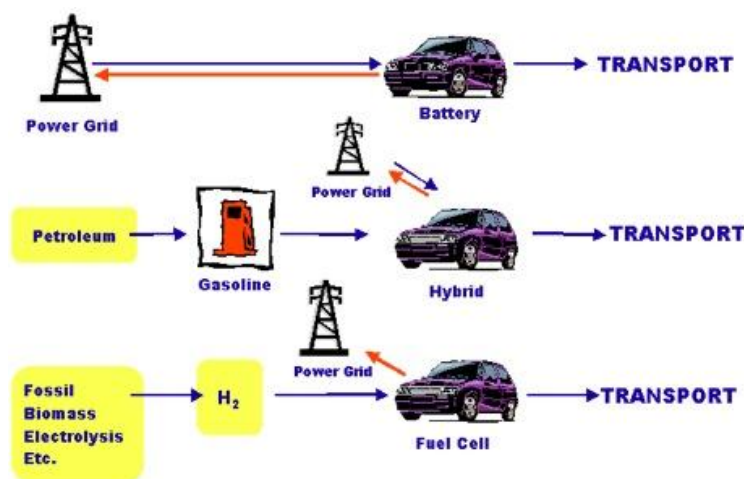


Figura 2.12 - Ilustração do conceito *Vehicle to Grid* [14]

Este método de carregamento torna-se interessante na medida em que permite utilizar a capacidade de armazenamento disponibilizada pelas baterias dos VE quando estes estão ligados às redes de distribuição. De facto, esta abordagem poderá garantir melhores condições na exploração da rede, nomeadamente no que diz respeito à gestão do congestionamento nos ramos e também nos perfis de tensão, potenciando a venda de energia activa nos períodos em que esta é mais cara, com benefícios para os utilizadores dos VE. No entanto, a utilização das baterias dos VE para injectar potência na rede faz com que as mesmas se degradam mais rapidamente (devido à mudança frequente em modo carregamento inteligente para modo de injeção de potência). Para compensar isso, será necessário indemnizar os utilizadores dos VE, oferecendo-lhes um incentivo financeiro para cobrir os custos associados à degradação das baterias. Relativamente à estratégia de carregamento inteligente, a estratégia baseada no conceito V2G não promete um desenvolvimento tão rápido, pelo que se espera num futuro mais distante uma implementação da mesma, dependendo da evolução tecnológica das baterias.

2.4 - Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral do conceito *Smart Grid* incluindo os conceitos de MR e MMR de modo a suportar a integração progressiva de VE nas redes de distribuição, procurando evitar o reforço das infra-estruturas da rede. Neste sentido, a infra-estrutura *Inov Grid* irá desempenhar um papel fundamental na integração dos VE em Portugal, na medida em que a estrutura hierarquizada de gestão e controlo poderá ser explorada para implementar funcionalidades que assegurem a gestão inteligente do carregamento das baterias dos VE. No entanto, a gestão dos pontos de carregamento associados a frotas de VE ligados sobre as redes de distribuição de MT requer a extensão do sistema *Inov Grid* ao nível da subestação AT/MT, à semelhança do conceito MMR e a introdução de um novo elemento de controlo no sistema, o CVC. Este controlador deverá integrar funcionalidades de gestão do carregamento das baterias dos VE que compõem a frota de modo a contribuir com benefícios para o cliente, procurando por exemplo, diminuir a potência de tomada e consequentemente o custo da energia a pagar.

Esta gestão local exige também uma coordenação com o sistema de gestão centralizado, localizado ao nível da subestação AT/MT, de modo a contribuir para a minimização dos efeitos negativos da integração dos VE ao nível das condições de exploração da rede de distribuição de MT.

No capítulo seguinte é apresentada a formulação matemática associada ao problema de implementação de estratégias locais para efectuar a gestão do carregamento de frotas de VE.

Capítulo 3

Formulação do problema de gestão local do carregamento de frotas de veículos eléctricos

Tal como referido anteriormente, a disponibilização de pontos de carregamento de frotas de veículos eléctricos ligados sobre a rede de distribuição de MT envolve a inclusão do CVC na arquitectura de referência associada ao conceito de MMR. Este controlador local será responsável pela gestão do carregamento das baterias dos veículos eléctricos que constituem a frota em coordenação com o nível de controlo hierárquico superior, ou seja com o CAMC.

Do ponto de vista do cliente, a estratégia local tem como objectivo minimizar o custo associado à energia consumida de modo a satisfazer as necessidades do carregamento das baterias dos VE. Do ponto de vista da rede, a estratégia de carregamento local deverá procurar manter as condições de operação da rede dentro dos limites de exploração aceitáveis. Para tal, torna-se necessário assegurar a coordenação com o nível de controlo superior, o CAMC, que integra funcionalidades para gestão dos níveis de congestionamento das linhas e para controlo coordenado da tensão [10], de modo a validar os resultados obtidos pela execução do algoritmo que implementa a estratégia de gestão local do carregamento das baterias dos veículos eléctricos que compõem a frota. Além disso, este algoritmo deverá ter em conta restrições associadas às condições de operação da rede de modo a assegurar que os limites de exploração da rede são respeitados. Estas restrições são determinadas pelas funcionalidades de gestão implementadas ao nível do CAMC e enviadas por este ao CVC.

Assim, o problema de gestão local do carregamento de frotas de VE pode ser formulado como um problema de optimização sujeito a um conjunto de restrições de modo a determinar *set-points* de potência activa para um dado intervalo de tempo, os quais correspondem à taxa de carregamento individual de cada VE ligado à rede tendo em conta o período de tempo em que o VE está estacionado e as necessidades de carregamento da sua bateria. Dado o elevado

número de variáveis envolvidas, as quais são de natureza discreta, o EPSO foi utilizado como ferramenta de optimização.

Assim, na secção 3.1 é apresentada a formulação matemática do problema e na secção 3.2 é apresentada uma descrição resumida do algoritmo utilizado pelo EPSO. O resumo e as principais conclusões deste capítulo são apresentados na secção 3.3.

3.1 - Formulação do problema de optimização

A gestão do carregamento das baterias dos VE numa frota constitui um problema de optimização formulado para minimizar os custos da energia consumida para o efeito. Trata-se de um problema com alguma complexidade, na medida em que se torna necessário determinar *set-points* de potência activa para cada um dos VE ligados à rede de modo a satisfazer os requisitos de carga das suas baterias durante o intervalo de tempo em que estes se encontram estacionados. Além disso, sempre que um VE é ligado à rede, o algoritmo de gestão deverá ser accionado de modo a determinar *set-points* de potência activa para proceder ao carregamento da sua bateria e, eventualmente, reajustar a taxa de carregamento das baterias dos VE cujo carregamento foi iniciado previamente.

Assim, o problema de gestão do carregamento de frotas de VE pode ser formulado através da seguinte função objectivo:

$$\min C = \sum_{k=T1}^{T2} CEC_k \quad (1.1)$$

Sujeito a:

$$EFCD_i \leq EFC_i \leq 100\%, i = 1, \dots, N \quad (1.2)$$

$$V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max} \quad (1.3)$$

$$I_l \leq I_{l\max} \quad (1.4)$$

Em que:

- CEC é o custo da energia consumida;
- $T1$ é o tempo correspondente ao início do período de carregamento do VE;
- $T2$ é o tempo correspondente ao final do período de carregamento do VE;
- K é o intervalo de tempo considerado para o cálculo dos *set-points* de potência activa;

- $EFCD$ é o estado final de carga desejado e especificado pelo condutor;
- EFC é o estado final de carga da bateria;
- N é o número de VE em fase de carregamento;
- V , V_{min} e V_{max} representam a tensão em cada barramento j e os valores mínimo e máximo admissíveis;
- I_l e I_{lmax} representam a corrente na linha l e o valor máximo admissível (limite térmico).

A equação (1.1) representa a função objectivo do problema e consiste em minimizar o custo da energia consumida no carregamento das baterias dos VE da frota durante o intervalo de tempo em que há VE estacionados, ou seja T_2-T_1 . É de realçar que sempre que um VE é ligado à rede, o intervalo de tempo para efectuar o carregamento é actualizado bem como o estado de carga das baterias dos VE já em fase de carregamento.

A equação (1.2) representa a restrição do problema que diz respeito ao estado final de carga da bateria de cada VE quando terminado o período de carregamento especificado pelo condutor.

Por sua vez, as equações (1.3) e (1.4) dizem respeito às restrições técnicas associadas aos limites de exploração da rede de modo a garantir que as correntes nas linhas são inferiores aos seus limites térmicos e que os perfis de tensão se situam dentro dos limites mínimo e máximo admissíveis, ou seja, entre 0,9 e 1,1 p.u., respectivamente.

3.2 - A ferramenta de optimização EPSO

A ferramenta de optimização EPSO foi utilizada neste trabalho para resolver o problema de optimização descrito na secção anterior. Trata-se de uma ferramenta de optimização poderosa e particularmente adequada para a resolução de problemas de natureza combinatória, envolvendo um grande número de possíveis soluções em que as variáveis de decisão são de natureza discreta [15].

O algoritmo que implementa a ferramenta de optimização EPSO resultou da combinação do PSO com as características auto-adaptativas da programação evolucionária, procurando extrair o melhor de ambas as metodologias [16].

Assim, o EPSO baseia-se num processo evolutivo que envolve populações de indivíduos designadas por enxames de partículas. Cada partícula envolve dois conjuntos de parâmetros:

- Parâmetros objecto que incluem as variáveis de decisão, correspondendo, portanto, a potenciais soluções do problema;
- Parâmetros estratégicos envolvendo um conjunto de pesos que são utilizados para conduzir o processo evolutivo de modo a encontrar boas soluções para o problema.

Os parâmetros objecto, X , definem a posição da partícula no espaço de procura e os parâmetros estratégicos, w , condicionam a regra do movimento de modo a determinar a sua nova posição. A representação da partícula é ilustrada na figura 3.1.

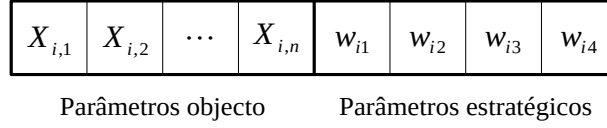


Figura 3.1 - Representação da partícula no EPSO

O algoritmo EPSO é iniciado com a definição do espaço de procura através dos limites mínimo e máximo de cada um dos parâmetros objecto. Uma vez definido o espaço de procura, espera-se que o algoritmo EPSO encontre a solução “óptima” ou uma boa solução no contexto definido pela função objectivo. O conjunto de indivíduos ou partículas estão, portanto, sujeitos a um processo de evolução ao longo de um dado número de gerações através da aplicação dos seguintes operadores genéticos [17]:

- Mutação;
- Reprodução;
- Selecção.

A seguir é apresentada uma breve descrição de cada um destes operadores.

Mutação

Cada uma das partículas que constituem o enxame é replicada r vezes, tendo sido considerado $r=1$ neste trabalho. No decorrer do processo evolutivo os parâmetros estratégicos de cada réplica da partícula sofrem mutação da seguinte forma:

$$\bar{w}_{ik} = w_{ik} [\log N(0,1)]^r \quad (1.5)$$

Em que:

$\log N(0,1)$ é uma variável aleatória com distribuição Lognormal obtida da distribuição Gaussiana $N(0,1)$ com média 0 e variância 1;

τ é um parâmetro de aprendizagem fixado externamente;

k é o índice correspondente aos parâmetros estratégicos de cada indivíduo i .

Reprodução

Após a aplicação do operador mutação cada partícula juntamente com a sua réplica gera um descendente de acordo com a aplicação da equação do movimento. Tendo em conta a posição actual da partícula no espaço de procura, o seu descendente irá ocupar uma nova posição dada pela expressão:

$$X_i^{novo} = X_i + V_i^{novo} \quad (1.6)$$

Em que V_i^{novo} representa a velocidade da partícula dada pela expressão:

$$V_i^{novo} = w_{i1} \times V_i + w_{i2} \times (b_i - X_i) + w_{i3} \times (b_G^* - X_i) \quad (1.7)$$

Na equação (1.7) b_i representa a melhor posição ocupada pela partícula individualmente. Os pesos w_{i1} , w_{i2} , w_{i3} e w_{i4} condicionam os termos inércia, memória e cooperação, respectivamente, tal como se pode observar na figura 3.2.

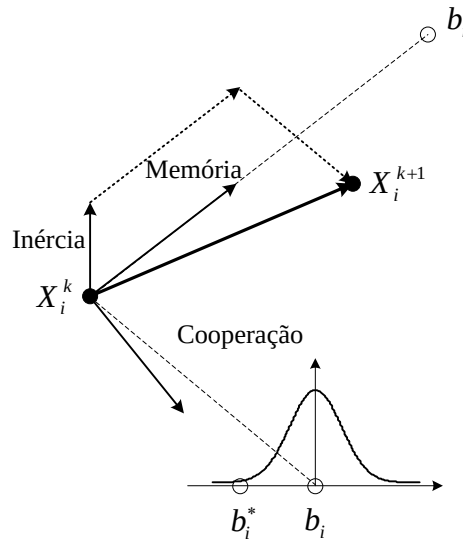


Figura 3.2 - Movimento de uma partícula, influenciado pelos termos inércia, memória e cooperação

Por sua vez b_G^* é dado pela expressão:

$$b_G^* = b_G + w_{i4} \times \log N(0,1) \quad (1.8)$$

Em que b_G representa a melhor posição ocupada até ao momento pelo conjunto total de partículas, w_{i4} é o peso associado e a expressão $\log N(0,1)$ representa uma variável aleatória com distribuição Lognormal obtida da distribuição Gaussiana $N(0,1)$ com média 0 e variância 1.

Seleção

A aplicação do operador reprodução a cada partícula e à sua réplica gera grupos de $r+1$ descendentes, os quais são avaliados de modo a quantificar o seu desempenho no contexto da função objectivo definida na secção 3.1. A aplicação do operador selecção de forma separada a cada grupo de $r+1$ descendentes leva a que apenas um deles sobreviva de modo a fazer

parte da geração seguinte, sendo este aquele que apresenta o melhor desempenho. No entanto, trata-se de um procedimento estocástico em que a melhor partícula do grupo de descendentes é seleccionada com uma dada probabilidade.

Algoritmo

O algoritmo EPSO envolve um processo iterativo em que a aplicação dos operadores genéticos descritos anteriormente se repete até que seja verificada uma condição de paragem que geralmente consiste no número máximo de iterações definido previamente. Na figura 3.3 é apresentado o fluxograma que esquematiza o funcionamento do algoritmo [16].

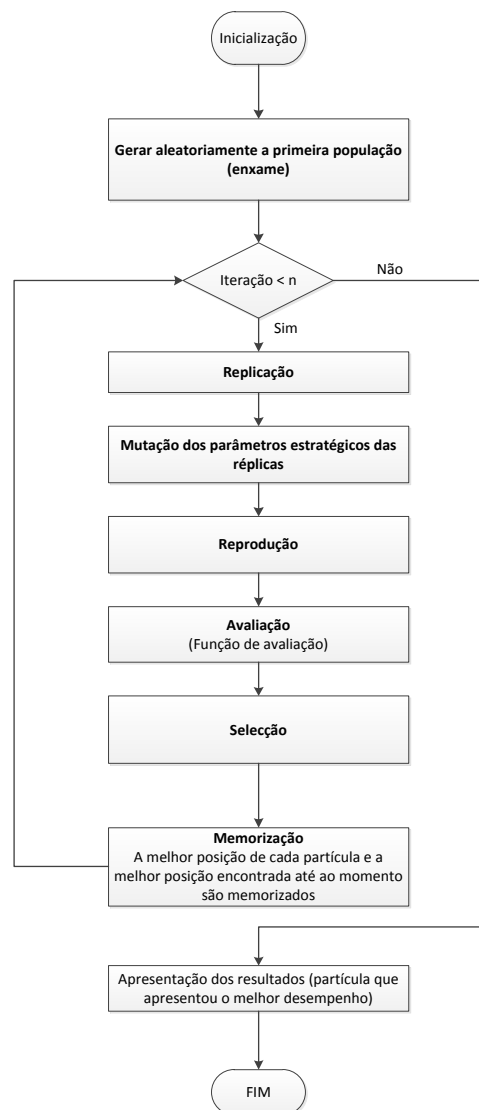


Figura 3.3 - Fluxograma representando o funcionamento do algoritmo EPSO

3.3 - Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a formulação matemática do problema de gestão local do carregamento de frotas de veículos eléctricos. Este problema foi formulado como um problema de optimização cuja função objectivo consiste em minimizar o custo da energia consumida sujeita a um conjunto de restrições técnicas de modo a assegurar que o estado de carga das baterias dos veículos eléctricos é conseguido e que as condições de exploração da rede não são violadas. Foi também apresentada a descrição do algoritmo EPSO que constitui uma ferramenta de optimização promissora para ser aplicada na resolução deste problema. O capítulo seguinte é portanto dedicado ao desenvolvimento da metodologia resultante da aplicação do EPSO.

Capítulo 4

Metodologia para gestão local do carregamento de frotas de veículos eléctricos

Neste capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida para implementar uma estratégia local de gestão de carregamento de uma frota de VE adaptada para funcionamento em tempo real. A utilização do EPSO para resolver o problema de optimização formulado no capítulo 3 envolve o tratamento dos seguintes aspectos:

- Codificação das potenciais soluções através da definição dos parâmetros objecto da partícula, ou seja, através da definição do espaço de procura;
- Definição da função de avaliação ou *fitness* para avaliar o desempenho das partículas no contexto da função objectivo do problema;
- Articulação global do algoritmo.

Cada um destes aspectos é analisado de forma detalhada nas secções seguintes.

4.1 - Definição da partícula

Tal como referido anteriormente, o problema de gestão local do carregamento das baterias de frotas de VE consiste em determinar *set-points* de potência activa correspondentes à taxa de carregamento das baterias dos VE de forma individual tendo em vista o período de tempo em que estes vão estar estacionados. Estes *set-points* de potência activa são determinados com uma periodicidade de 1 hora, correspondendo portanto, à taxa de carregamento horária para cada bateria. Assim, a dimensão da partícula é variável, dependendo do número de veículos que se encontrem ligados à rede e do tempo disponível para efectuar o carregamento. Por esta razão sempre que um VE é ligado à rede, a dimensão da partícula é ajustada de modo a incluir *set-points* de potência activa horários até ao final do período de carregamento. Assim, a dimensão da partícula é dada pela expressão:

$$dP = \sum_{k=1}^N Nh_i \quad (1.9)$$

Em que N é o número de VE ligados à rede e Nh_i é o número de horas disponíveis para efectuar carregamento das suas baterias.

É de realçar que sempre que um novo VE é ligado à rede, a partícula é redefinida de modo a incluir o seu período de carregamento sendo também actualizado o valor de Nh_i referente aos VE ligados anteriormente. Como exemplo consideremos a seguinte situação:

- 2 VE designados por VE1 e VE2 são estacionados às 10 horas permanecendo ligados à rede durante 3 horas;
- 1 VE designado por VE3 é estacionado às 11 horas permanecendo ligado à rede durante 2 horas;
- 1 VE designado por VE4 é estacionado às 12 horas permanecendo ligado à rede durante 3 horas.

A evolução da estrutura da partícula ao longo do tempo, para este exemplo, é apresentada na figura 4.1.

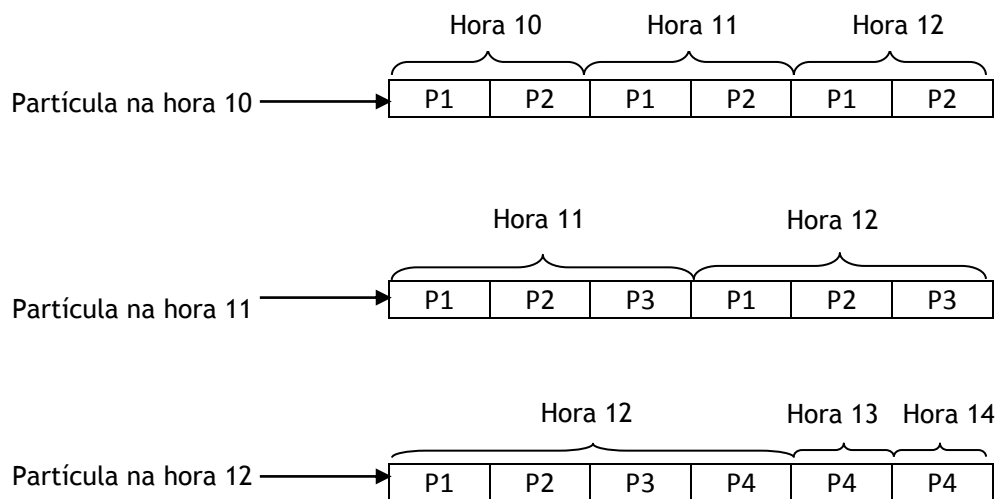


Figura 4.1 - Exemplo de uma estrutura da partícula e da sua evolução ao longo do tempo

Observa-se que os *set-points* de potência activa são designados por P_i , sendo i o índice correspondente a cada um dos VE ligados à rede. A adaptação da partícula apresentada na figura 4.1 resulta da ligação de 4 VE à rede para efectuarem o carregamento das suas baterias a horas diferentes considerando a possibilidade de efectuar a gestão do carregamento enquanto permanecem estacionados.

4.2 - Função de avaliação

Tal como referido anteriormente, a função objectivo consiste na minimização do custo de electricidade associado ao consumo de energia necessário para assegurar o carregamento das baterias dos VE da frota. Estando o ponto de carregamento da frota ligado à rede de

distribuição de MT, estes custos são calculados com base no tarifário em vigor para os clientes de MT. Tendo em conta que a estrutura da tarifa regulada de MT possui um tipo de contagem tetra-horário: ponta (Horas 11, 12, 20 e 21), cheia (Horas 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 22), vazio (Horas 1, 6, 7, 8, 23 e 24) e super vazio (Horas 2, 3, 4 e 5), sendo o custo da energia consumida diariamente expresso em €/dia e dado pela expressão [18]:

$$CEC = T_f + P_{ehp} \times C_{ehp} + P_{ehc} \times C_{ehc} + P_{ehv} \times C_{ehv} + P_{ehsv} \times C_{ehsv} + P_{php} \times \left(\frac{C_{ehp}}{N_{hp}} \right) + P_{pc} \times P_t \quad (1.10)$$

Onde:

- T_f designa um termo fixo expresso em €/dia;
- P_{ehp} designa o preço da energia activa nas horas de ponta em €/kWh;
- C_{ehp} designa o consumo de energia activa nas horas de ponta em kWh;
- P_{ehc} designa o preço da energia activa nas horas de cheia em €/kWh;
- C_{ehc} designa o consumo de energia activa nas horas de cheia em kWh;
- P_{ehv} designa o preço da energia activa nas horas de vazio normal em €/kWh;
- C_{ehv} designa o consumo de energia activa nas horas de vazio normal em kWh;
- P_{ehsv} designa o preço da energia activa nas horas de super vazio em €/kWh;
- C_{ehsv} designa o consumo de energia activa nas horas de super vazio em kWh;
- P_{php} designa o preço da potência nas horas de ponta utilizando a opção contratual “tarifa de longa utilização”, em €/kW.dia;
- N_{hp} designa o número de horas de ponta durante o dia;
- P_{pc} designa o preço da potência contratada em €/kW.dia;
- P_t designa a potência de tomada, isto é, a potência máxima do diagrama de cargas em kW.

A potência contratada depende da potência de tomada (máxima potência do mês medida em 15 minutos) e corresponde à máxima potência de tomada dos últimos 12 meses. Neste trabalho, assumiu-se que a potência contratada será igual à potência máxima verificada no diagrama de cargas dos consumos da frota de VE.

Assim, a função de avaliação é dada pela expressão:

$$FIT = CEC + Pen \quad (1.11)$$

Em que Pen representa as penalizações adicionais no caso de ocorrerem violações nas restrições do problema, sendo dado pela expressão:

$$Pen = Pen_1 + Pen_2 \quad (1.12)$$

Em que Pen_1 diz respeito à penalização da partícula no caso de se verificar que no final do período de carregamento o estado de carga da bateria não corresponde ao desejado. Assim, Pen_1 é determinado da seguinte forma:

$$Pen_1 = \sum_{i=1}^N k_1 \times (Ea_i - Er_i)^2 \quad (1.13)$$

Em que k_1 é uma constante, o índice i diz respeito a cada VE, sendo N o número de VE ligados à rede, Ea_i a energia consumida pelo VE no final do período de carregamento e Er_i a energia necessária para que o estado final de carga da bateria corresponda ao valor especificado pelo utilizador, ou seja, a energia requisitada por cada um dos VE quando ligados à rede. Esta energia é dada pela expressão:

$$Er_i = EAC_i - EFC_i \quad (1.14)$$

Em que EAC_i representa o estado actual de carga da bateria do VE i e EFC_i o estado final de carga pretendido.

A verificação das restrições técnicas exige a resolução de um problema de trânsito de potências multi-horário a partir do qual é determinada a potência máxima disponível para efectuar o carregamento dos VE sem que a alimentação desta carga adicional e de valor significativo provoque violações nas condições de exploração da rede quer em termos do nível de congestionamento das linhas quer ao nível dos perfis de tensão.

Na arquitectura de referência da MMR o valor da potência máxima disponível corresponde a um *set-point* de potência calculado pelo CAMC e enviado ao CVC para ser utilizado como restrição no problema de gestão local do carregamento de frotas de VE. Assim, na equação (1.12), a penalização Pen_2 é determinada da seguinte forma:

$$Pen_2 = \begin{cases} k_2 \times \sum_{k=1}^{Nh} (P_k - P_{k \max})^2, & \text{se } P_k > P_{k \max} \\ 0, & \text{se } P_k \leq P_{k \max} \end{cases} \quad (1.15)$$

Em que k_2 é uma constante, P_k é a potência total para carregar as baterias dos VE ligados à rede na hora k e $P_{k \max}$ é a potência máxima disponível para carregamento dos VE da frota na hora k que assegura o cumprimento das restrições técnicas do problema de optimização. Por sua vez, Nh corresponde ao número de horas associado ao período de carregamento.

4.3 - Procedimentos e articulações de algoritmos

A integração da função de avaliação no algoritmo EPSO encontra-se apresentada no fluxograma da figura 4.2. É de referir que a implementação dos procedimentos e a articulação dos vários algoritmos foi efectuada em MATLAB.

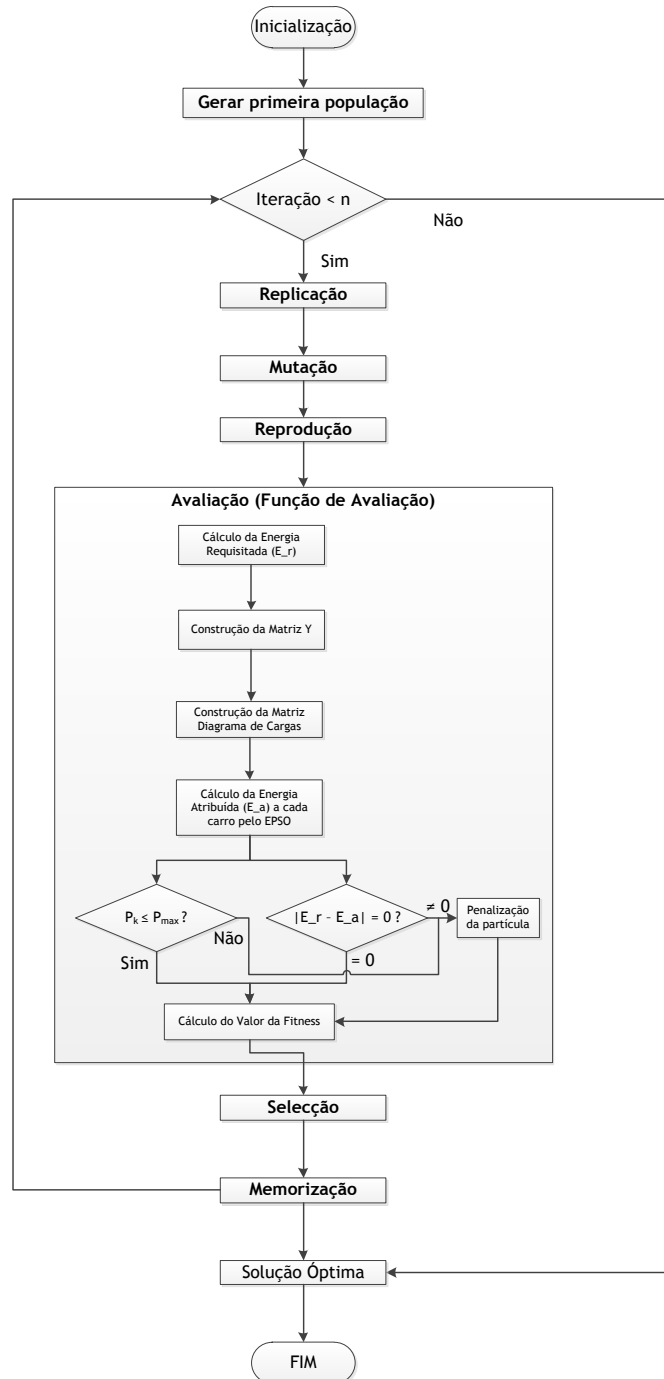


Figura 4.2 - Fluxograma do EPSO com função de avaliação desenvolvida detalhada

Tal como se pode observar na figura 4.2, a função de avaliação envolve um conjunto de rotinas desenvolvidas com o objectivo de calcular a energia consumida pela carga associada ao carregamento das baterias dos VE de uma frota, o custo dessa energia e a verificação das restrições do problema. Assim, a função de avaliação começa por calcular a energia necessária para efectuar o carregamento das baterias dos VE com base nos *set-points* de potência associados a uma dada partícula utilizando a expressão (1.14).

O algoritmo prossegue com o cálculo da matriz *Y* que representa uma matriz auxiliar utilizada para efectuar a correspondência entre os *set-points* de potência activa presentes na partícula e o período de carregamento associado a cada um dos VE de modo a construir posteriormente o diagrama de cargas correspondente ao período de carregamento dos VE ligados à rede.

Na fase seguinte do algoritmo, é determinada a energia atribuída a cada VE através da soma dos *set-points* de potência activa a ele associados de modo a verificar se foi atingido o estado de carga pretendido e também o cumprimento das restrições técnicas da rede. O desempenho das soluções (parâmetros objecto da partícula) é avaliado com base nesta informação e de acordo com a equação (1.11).

O valor da *fitness* é então utilizado pelo operador selecção para formar a geração seguinte e prosseguir com o processo evolutivo associado ao algoritmo EPSO descrito no capítulo 3 de modo a encontrar uma boa solução para o problema.

De modo a emular o funcionamento da metodologia desenvolvida em aplicações em tempo real foi também implementado um procedimento cuja função é invocar a resolução do problema de optimização descrito pelo fluxograma apresentado na figura 4.2 sempre que pelo menos um VE é ligado à rede para efectuar o carregamento da sua bateria. O fluxograma correspondente a este procedimento encontra-se apresentado na figura 4.3.

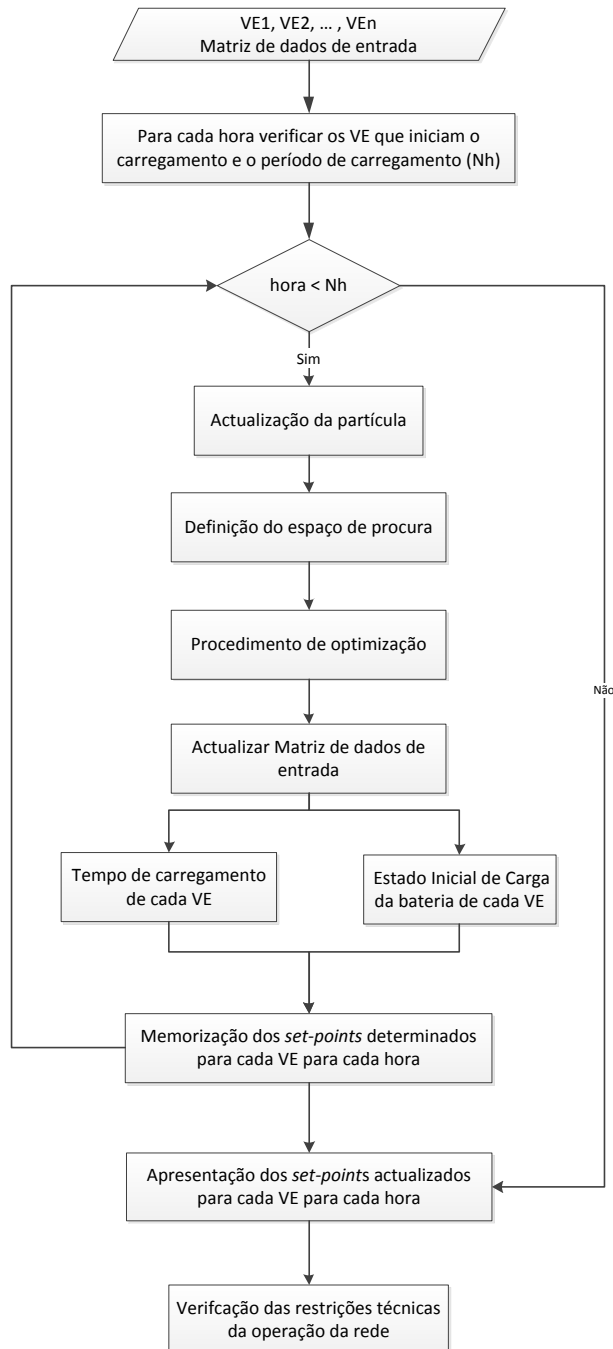


Figura 4.3 - Procedimento para invocar a metodologia que implementa a estratégia inteligente de gestão local do carregamento de frotas de VE

Os dados de entrada envolvem a informação associada a cada um dos VE que compõem a frota, os quais são compilados numa matriz que inclui a hora pretendida para iniciar o carregamento, a capacidade da bateria, o estado actual de carga, o estado final de carga pretendido e ainda a taxa de carregamento.

Para cada intervalo de tempo, que neste trabalho foi considerado de 1 hora, verifica-se quais os VE que iniciam o carregamento das suas baterias e a duração dos mesmos de modo a proceder à actualização da dimensão da partícula de acordo com a expressão (1.9).

O espaço de procura é definido posteriormente através da definição dos limites mínimos e máximo, sendo que o limite mínimo é nulo e o limite máximo corresponde à taxa de carregamento nominal das baterias dos VE.

Uma vez definida a dimensão da partícula e o espaço de procura é possível invocar o procedimento de optimização baseado no EPSO de modo a determinar os *set-points* horários de potência activa, associados à taxa de carregamento das baterias, para um horizonte temporal que inclui o período de carregamento de cada VE ligado à rede. Com base nos *set-points* calculados, a matriz de entrada é actualizada em termos do tempo de carregamento de cada VE e do estado inicial de carga da sua bateria.

De seguida são validadas as condições de operação da rede na sequência da inclusão da carga adicional correspondente ao carregamento das baterias dos VE da frota. Para tal recorre-se à resolução de um problema de trânsito de potências multi-horário, o qual é integrado no procedimento apresentado na figura 4.3 de acordo com o esquema correspondente ao fluxograma apresentado na figura 4.4.

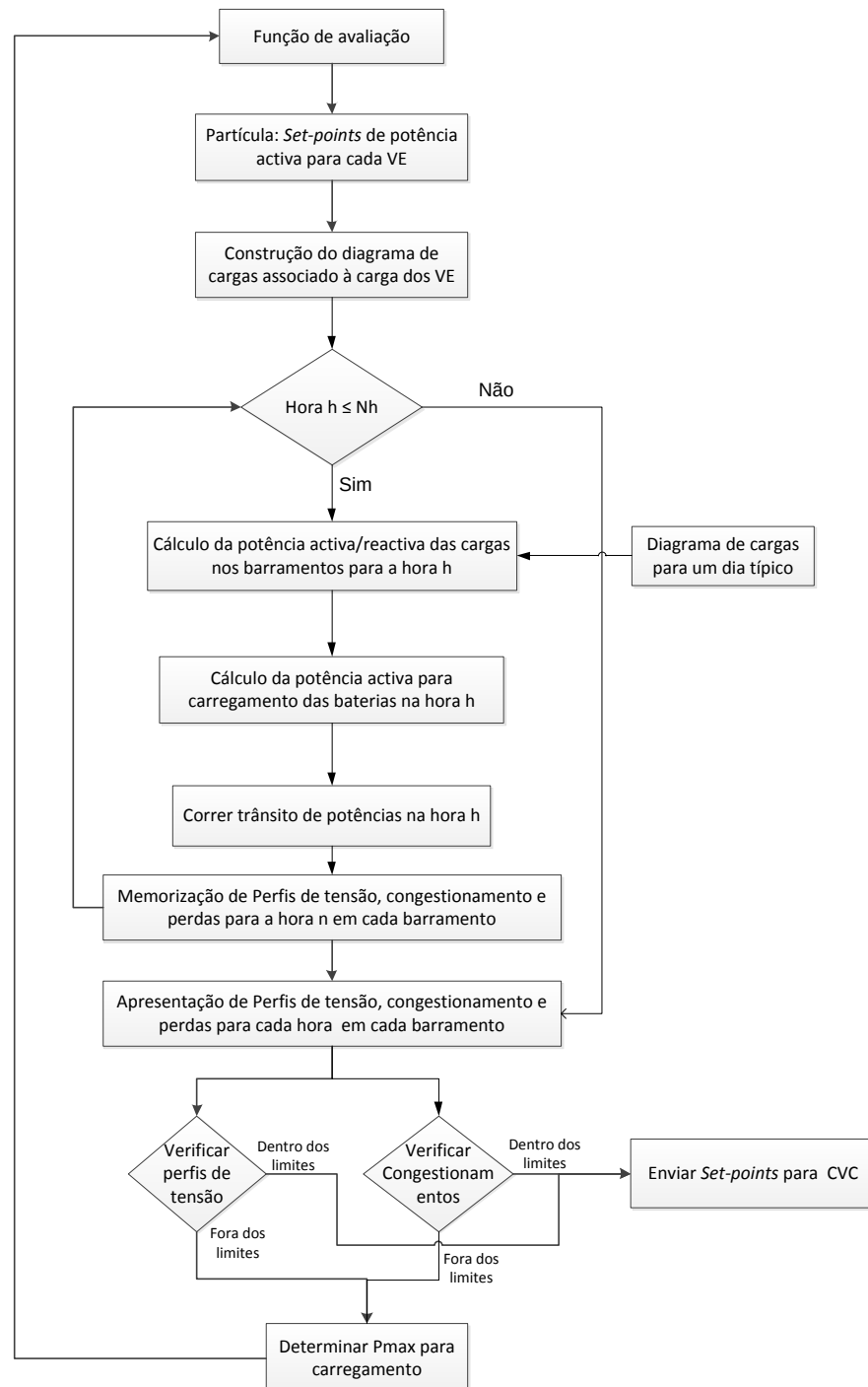


Figura 4.4 - Procedimento desenvolvido para verificar as condições técnicas de exploração da rede

Assim, para um dado período de carregamento designado por Nh , começa-se por determinar o diagrama de cargas associado ao carregamento das baterias dos VE a partir dos *set-points* de potência activa contidos na partícula correspondente. Com base neste diagrama de cargas é determinada a potência activa a especificar para os barramentos onde está ligada a frota de VE.

Tendo em conta o diagrama de cargas típico da rede e assumindo que todas as cargas têm um comportamento semelhante, é determinada a potência activa das cargas ligadas aos vários barramentos, sendo a potência reactiva obtida de acordo com um determinado factor de potência.

De seguida é invocado o algoritmo para efectuar a resolução do problema de trânsito de potências, tendo sido utilizada neste trabalho a ferramenta MATPOWER [19], de modo a analisar os perfis das tensões nos barramentos e os níveis de congestionamento nas linhas com o objectivo de verificar se as condições técnicas de exploração da rede são respeitadas. No caso dos limites técnicos de exploração da rede serem respeitados, o problema fica resolvido e os *set-points* atribuídos a cada VE para efectuar o carregamento das suas baterias são validados. Caso contrário é determinada a potência máxima disponibilizada em cada hora, referente ao período actual de carregamento, a qual será considerada como uma restrição do problema de optimização. Serão então determinados novos *set-points* de potência activa de modo a satisfazer mais esta restrição.

4.4 - Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta para efectuar a gestão local do carregamento de frotas de VE explorando o EPSO como ferramenta de optimização, tendo em vista a sua implementação em aplicações em tempo real.

Para tal foi apresentada a definição da partícula que será actualizada de forma dinâmica de modo a resolver o problema de optimização sempre que pelo menos um dos VE que compõem a frota é ligado à rede. O objectivo é determinar *set-points* de potência activa horários correspondentes à taxa de carregamento individual das baterias dos VE ligados à rede para o horizonte temporal correspondente aos períodos em vão estar estacionados de modo a atingir o estado de carga pretendido pelos condutores e a respeitar as condições de exploração da rede.

No capítulo seguinte a metodologia proposta é aplicada a um caso de estudo de modo a avaliar o seu desempenho.

Capítulo 5

Resultados

De modo a avaliar o desempenho da metodologia desenvolvida apresenta-se, neste capítulo, a sua aplicação à gestão de uma frota de VE correspondente à frota automóvel de uma empresa de serviços. De seguida foi avaliado o impacto resultante da presença de várias frotas de VE ligadas sobre a rede de distribuição de MT e efectuada a comparação com os resultados obtidos no caso de ser adoptada uma estratégia de carregamento não controlado. Assim, na secção 5.1 é apresentado o caso de estudo, envolvendo a caracterização da frota de VE e da rede teste utilizada. Na secção 5.2 são apresentados os resultados obtidos através da aplicação da metodologia desenvolvida para efectuar a gestão local do carregamento das baterias da frota de VE e efectuada a sua comparação com os resultados obtidos pela aplicação de uma estratégia de carregamento não controlado. Estes resultados têm em conta apenas a perspectiva do cliente, no que diz respeito à minimização do custo da energia consumida, pelo que na secção 5.3 são avaliados os impactos ao nível da rede resultantes da presença de múltiplos pontos de carga associados ao carregamento de frotas de VE. É também efectuada a comparação dos resultados obtidos pela aplicação da metodologia desenvolvida e pela aplicação de uma estratégia de carregamento não controlado. Por fim, na secção 5.4, são apresentados os resultados obtidos pela aplicação da metodologia desenvolvida tendo em conta as restrições técnicas de exploração da rede e realçado o contributo da presença de produção distribuída, nomeadamente sistemas fotovoltaicos, para a melhoria das condições de exploração da rede da rede. As principais conclusões do capítulo são apresentadas na secção 5.5.

5.1 - Caso de estudo

Tal como referido anteriormente, a apresentação do caso de estudo envolve a caracterização da frota de VE e da rede de distribuição de MT sobre a qual se encontram ligados vários pontos de carga associados a pontos de carregamento destas frotas.

5.1.1 - Caracterização da frota de VE

O desenvolvimento de uma estratégia inteligente de gestão do carregamento das baterias de uma frota de VE, tendo em vista a sua implementação numa aplicação em tempo real, teve como base um conjunto de dados de entrada envolvendo:

- A hora de chegada dos VE;
- O tempo disponível para carregamento de cada um dos veículos;
- O estado actual de carga das baterias dos VE;
- O estado final de carga pretendido;
- A taxa nominal de carregamento das baterias dos VE.

Neste trabalho foi considerado que a frota é composta por 40 VE do mesmo tipo, possuindo um motor alimentado por uma bateria de iões de lítio com capacidade de 24 kWh e taxa nominal de carregamento de 4 kWh [20] [21], pelo que a duração de um carregamento completo é de 8 horas.

Se a estratégia estivesse implementada numa aplicação real suportada pelo conceito de MMR estes dados seriam recolhidos de forma autónoma de modo a estarem disponíveis no CVC e ser activado o procedimento de cálculo dos *set-points* de potência activa de forma automática sempre que pelo menos um VE é ligado à rede. Não o sendo neste trabalho, foi necessário elaborar a matriz correspondente aos dados de entrada a qual é apresentada na tabela 5.1. As colunas 5 e 7 da matriz foram obtidas multiplicando a percentagem de carga pela capacidade total da bateria, ou seja, por 24 kWh tal como referido anteriormente. A última coluna foi obtida através da diferença entre o valor do estado actual de carga e o valor do estado final de carga, para cada VE.

A elaboração desta matriz, no que diz respeito, nomeadamente, à hora de início dos períodos de carregamento, teve em conta padrões de comportamento de uma frota de carros da empresa Portugal Telecom que disponibilizou a seguinte informação:

- A maioria dos carros da sua frota chega ao final da tarde para ficarem estacionados num parque durante a noite;
- Os funcionários chegam por volta das 8 horas e saem do trabalho por volta das 18 horas;
- Durante a hora de almoço também existe afluência de carros no parque.

Com base nesta informação foi assumido que:

- As baterias dos VE são carregadas sempre que estes se encontram estacionados durante longos períodos de tempo (não inferiores a 3 horas);
- O estado de carga das baterias diminui ao longo das horas do dia, pelo que os VE que carregam de manhã apresentam um estado inicial de carga superior;

Caracterização da frota de VE 41

- Os VE que chegam a partir das 16 horas vão ser utilizados apenas no dia seguinte.

A matriz correspondente aos dados de entrada foi então construída de acordo com o apresentado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Matriz com os dados de entrada dos VE da frota

VE	Hora de chegada (h)	Tempo disponível para carregamento (h)	Estado Inicial de Carga	Estado Inicial de Carga (kW)	Estado Final de Carga	Estado Final de Carga (kWh)	Energia Requisitada (kWh)
1	8h	3	65%	15,6	80%	19,2	3,6
2	8h	3	70%	16,8	80%	19,2	2,4
3	9h	3	65%	15,6	75%	18	2,4
4	9h	3	70%	16,8	80%	19,2	2,4
5	10h	3	55%	13,2	75%	18	4,8
6	10h	3	60%	14,4	75%	18	3,6
7	10h	3	65%	15,6	80%	19,2	3,6
8	10h	3	55%	13,2	75%	18	4,8
9	10h	3	50%	12	75%	18	6
10	11h	3	50%	12	70%	16,8	4,8
11	11h	3	55%	13,2	75%	18	4,8
12	11h	3	50%	12	70%	16,8	4,8
13	11h	3	60%	14,4	75%	18	3,6
14	12h	5	45%	10,8	65%	15,6	4,8
15	12h	5	50%	12	70%	16,8	4,8
16	12h	5	55%	13,2	75%	18	4,8
17	12h	5	40%	9,6	65%	15,6	6
18	12h	5	45%	10,8	65%	15,6	4,8
19	12h	5	50%	12	65%	15,6	3,6
20	12h	5	45%	10,8	70%	16,8	6
21	16h	16	25%	6	85%	20,4	14,4
22	16h	16	30%	7,2	95%	22,8	15,6
23	16h	16	35%	8,4	85%	20,4	12
24	16h	16	25%	6	85%	20,4	14,4
25	16h	16	35%	8,4	95%	22,8	14,4
26	16h	16	30%	7,2	90%	21,6	14,4
27	17h	15	20%	4,8	95%	22,8	18
28	17h	15	25%	6	85%	20,4	14,4
29	17h	15	25%	6	95%	22,8	16,8
30	17h	15	30%	7,2	85%	20,4	13,2
31	17h	15	20%	4,8	90%	21,6	16,8
32	17h	15	30%	7,2	95%	22,8	15,6
33	18h	14	15%	3,6	90%	21,6	18
34	18h	14	20%	4,8	90%	21,6	16,8
35	18h	14	25%	6	85%	20,4	14,4
36	18h	14	20%	4,8	90%	21,6	16,8
37	18h	14	15%	3,6	90%	21,6	18
38	18h	14	25%	6	90%	21,6	15,6
39	18h	14	20%	4,8	95%	22,8	18
40	18h	14	25%	6	90%	21,6	15,6

A dimensão da partícula vai variando de acordo com o número de carros que se encontram ligados à rede em cada hora do dia. Considerando os dados apresentados na tabela 5.1, pode verificar-se que a partícula apresenta uma dimensão máxima a partir das 18 horas, em resultado do número de carros que é ligado à rede e do seu período de carregamento. Estando nessa hora 20 VE ligados à rede com um tempo restante de 14 horas para efectuar o

carregamento das baterias, a partícula terá 280 parâmetros objecto, correspondentes aos *set-points* de potência activa horários a atribuir aos 20 VE da frota.

5.1.2 - Rede teste

A rede de teste utilizada para efectuar a avaliação do impacto da integração de múltiplos pontos de carregamento associados a frotas de VE semelhantes à frota caracterizada na secção anterior é apresentada na figura 5.1, através do seu esquema unifilar [22].

Trata-se de uma rede de distribuição de MT com 210 barramentos, envolvendo duas zonas com diferentes níveis de tensão, as quais são separadas por um transformador de 30/15 kV com possibilidade de regulação em carga. Esta rede alimenta consumidores do tipo residencial e comercial e integra alguns sistemas de produção distribuída. Os dados da rede a utilizar em estudos do comportamento em regime estacionário, ou seja, os dados de entrada para efectuar a resolução do problema de trânsito de potências encontram-se apresentados em anexo.

Devido ao facto da informação detalhada sobre o comportamento das cargas ao longo do dia não estar acessível, foi considerado que todas as cargas apresentam um comportamento semelhante, sendo o perfil de consumo obtido a partir do diagrama de cargas global. Para cada uma das cargas a potência máxima corresponde ao valor da potência activa especificada para o barramento onde se encontra ligada, sendo o valor da potência reactiva calculado para manter uma $\text{tg}(\varphi)=0,4$. Este diagrama de cargas, para um dia típico de Verão, é apresentado na figura 5.2, sendo expresso em percentagem da ponta [22].

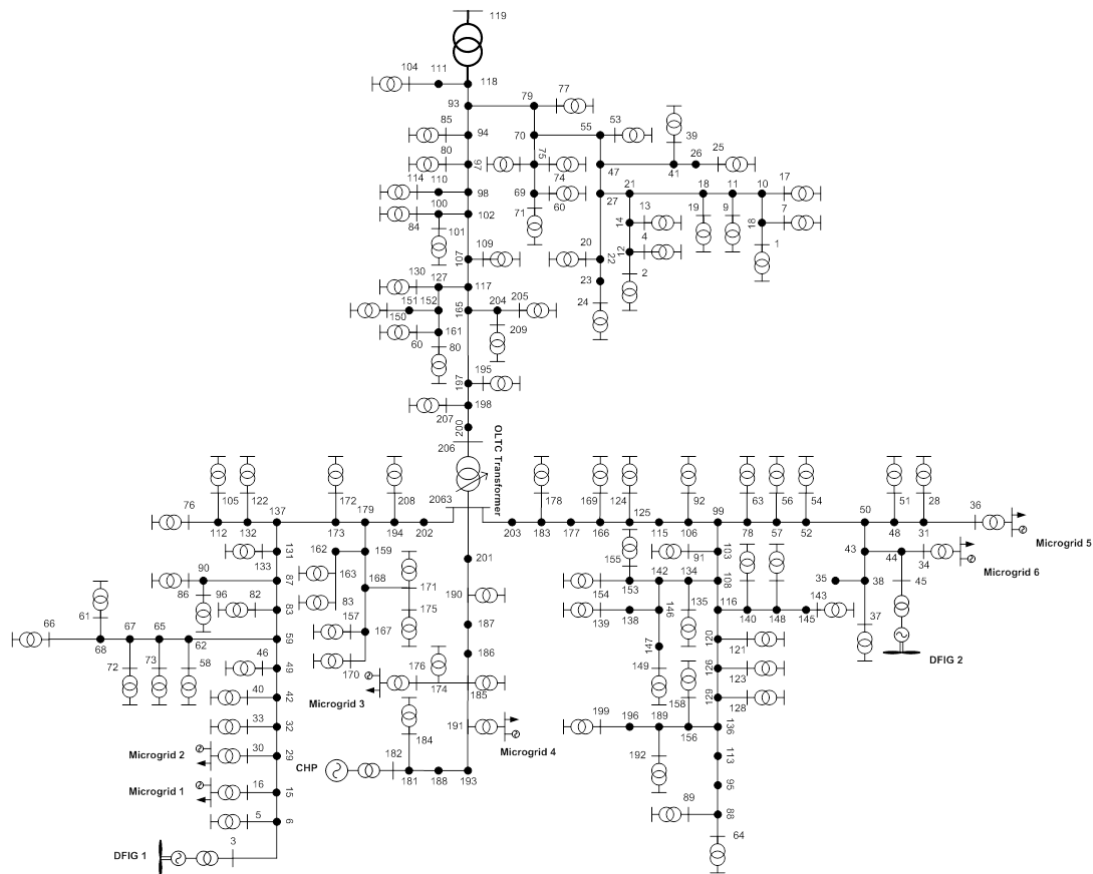


Figura 5.1 - Esquema unifilar da rede de teste

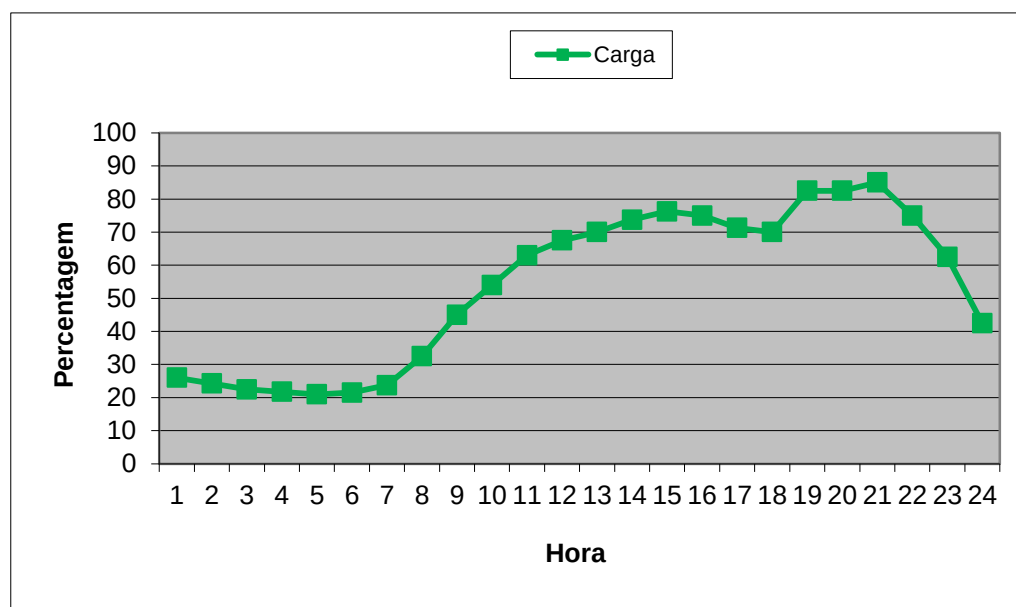


Figura 5.2 - Diagrama de carga típico para um dia (Residencial + Comercial)

Relativamente aos vários sistemas de produção distribuída, foi assumido que a potência gerada se mantém constante ao longo das horas do dia, sendo, contudo, de reconhecer que

em particular no caso dos parques eólicos tal não corresponde à realidade uma vez que a velocidade de vento é variável neste horizonte temporal.

5.2 - Resultados numa perspectiva do cliente

A metodologia desenvolvida foi aplicada ao caso de estudo apresentado na secção 5.1.1, de modo a avaliar o seu desempenho, tendo em conta apenas a minimização do custo da energia consumida para efectuar o carregamento da frota de VE. Foi também efectuada a comparação entre os resultados obtidos pela estratégia local de carregamento inteligente com os resultados obtidos a partir da aplicação de uma estratégia de carregamento não controlado. Assim, na secção 5.2.1 são apresentados os resultados da estratégia de carregamento não controlado, enquanto a secção 5.2.2 é dedicada à apresentação dos resultados obtidos a partir da metodologia desenvolvida.

5.2.1 - Estratégia de carregamento não controlado

O carregamento das baterias dos VE de forma não controlada é iniciado logo que o VE é ligado à rede, sendo a bateria carregada a uma potência constante de acordo com a taxa de carregamento nominal (4 kWh) até ser atingido o estado final de carga ou até o condutor interromper o carregamento. Neste trabalho foi assumido que o carregamento das baterias foi interrompido quando estas atingiram o estado final de carga especificado na tabela 5.1, de modo a efectuar a comparação dos resultados.

A seguir, na tabela 5.2, é apresentada a potência activa disponibilizada a cada hora para carregar as baterias dos VE da frota quando ligados à rede. As horas em que estes não estão ligados à rede VE são assinalados por um traço “-”.

Tabela 5.2 – Potência activa disponibilizada a cada hora para cada VE numa estratégia de gestão de carregamento não controlado

	HORA																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
VEICULO ELÉCTRICO	1	-	-	-	-	-	-	3.6	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	2.4	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	2.4	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	2.4	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	-	-	4	2	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	2	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	0.8	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	2	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	21	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	2.4	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	3.6	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	2.4	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	2.4	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	2.4	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	2	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	2.4	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	0.8	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	1.2	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	0.8	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	3.6	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	2	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	0.8	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	2.4	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	0.8	0	0
	37	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	2	0	0
	38	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	3.6	0	0	0
	39	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	2	0	0
	40	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	3.6	0	0	0

O diagrama de cargas associado ao perfil de carregamento apresentado na tabela 5.2 encontra-se ilustrado na figura 5.2.

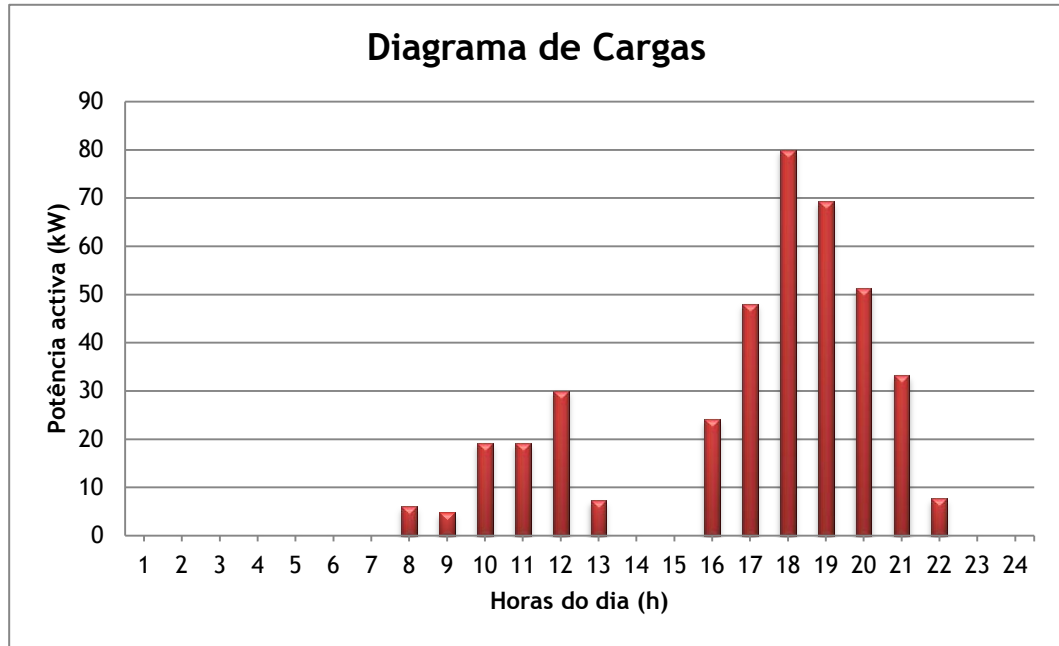


Figura 5.3 - Diagrama de cargas associado ao carregamento dos VE segundo uma estratégia de carregamento não controlado

Nesta figura observa-se a ocorrência de um pico de consumo bastante significativo na hora 18 em resultado do número de VE ligados à rede nesta hora. Por outro lado, pode observar-se que durante a noite, a partir das 22 horas, o consumo associado ao carregamento das baterias dos VE da frota é nulo em resultado do carregamento em simultâneo e a uma taxa constante.

Isto implica uma potência de tomada de valor muito elevado, a qual é utilizada poucas horas durante o dia. Além disso, os períodos de maior consumo coincidem com as horas fora de vazio, ou seja, com os períodos em que o custo da energia é mais elevado.

Com base no diagrama de cargas apresentado na figura 5.2 foi determinado o custo da energia consumida utilizando a equação (1.10) adaptada para o período de Verão [23]. Os valores relativos à tarifa de MT encontram-se em anexo.

$$CEC = 1.4602 + 0.1135 \times Cehp + 0.0866 \times Cehc + 0.0556 \times Cehv + 0.0517 \times Cehsv + 0.2729 \times \left(\frac{Cehp}{4} \right) + 0.0424 \times Pt \quad (1.16)$$

Assim, o proprietário da frota de VE terá que despende uma quantia de 51,98 €/dia.

5.2.2 - Estratégia de carregamento inteligente

A estratégia de carregamento inteligente resulta da aplicação da metodologia desenvolvida no âmbito deste trabalho e apresentada no capítulo 4, a qual se encontra adaptada para vir a ser utilizada em aplicações em tempo real. Ao contrário da estratégia de

carregamento não controlado, a metodologia que implementa a estratégia local do carregamento inteligente tem como objectivo principal determinar a taxa de carregamento das baterias, que assegura o estado final de carga pretendido uma vez decorrido o período de carregamento, de modo a minimizar o custo da energia consumida determinado através da aplicação da equação (1.16) ao diagrama de cargas resultante.

Tal como referido anteriormente, a metodologia utiliza o EPSO como ferramenta de optimização. Neste trabalho foi considerado que o enxame é composto por 20 partículas, sendo a condição de paragem dada pelo número máximo de iterações, o qual foi fixado em 10000 iterações. A solução final do problema, considerando as 24 horas diárias, requer o cálculo de 372 *set-points* de potência activa, muitos dos quais foram reajustados ao longo do procedimento de cálculo. O MATLAB foi utilizado como linguagem de programação e o tempo de computação necessário foi de 1200 segundos. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – *Set-points* atribuídos para cada hora e cada VE recorrendo à estratégia local de gestão de carregamento inteligente adaptada para aplicações em tempo real

		HORA																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
CARRO	1	-	-	-	-	-	-	-	0,2	1,4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	2	0,4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	0,1	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1,8	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2,1	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,3	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1,9	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2,9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,7	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,7	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	3,2	1,5	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	2	0,2	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	2,5	2,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	1,2	1,8	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	2,2	0,3	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	3,6	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	3,6	0,2	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	21	0,1	2,1	0,2	1,3	0,2	4	3,3	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	1,4	1,8
	22	0,1	1,6	3,3	2,4	4	0,4	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0	0	0	0	0	2	0,7	0,7
	23	0,2	0,5	1,1	2,7	0,1	0,3	3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0	0	0	0	0	0	1,9	1,2
	24	0,2	1,3	3,2	0,9	1,7	1,8	3	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	1,1	1,2
	25	4	3,8	0,2	0,3	0,5	0,6	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0	0	0	0	0	0	2,4	1,3
	26	0,2	0,9	0,2	1,9	2,1	4	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0	0	0	0	0	0	0,6	4
	27	0	2,8	3,4	0,1	2,1	1,3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0,2	4
	28	3	0,4	0,3	2,2	0,9	1,4	3,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	2,5	0,3
	29	0,1	4	0,3	3,8	4	1,8	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	2	0,6
	30	4	0,3	4	0	0	1,4	2,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0,2	0,9
	31	0,5	0,4	3,7	0,6	0,5	4	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,4	1,8	0	0	0	0,5	4
	32	3,4	0,1	3,9	3,9	0	4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0,1
	33	3,9	3,9	0,2	0,2	3,3	0,2	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0	0	0	0	2	4
	34	1,5	0,6	0,5	0,5	0,2	0,8	3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1,7	0	0	0	4	3,3
	35	0,2	2,8	1,9	0,5	0,2	2,6	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	0	0	0	0	4	0,3
	36	3,5	0,8	0,3	4	3,9	0,5	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0,6	0,7	0,6
	37	3,9	0,4	0	1,2	3,9	2,3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	1,2	3
	38	1,2	2,1	2,8	3,4	1,6	0,9	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1,3	0	0	0,2	0,8	0,9
	39	1,8	0,4	2,8	0,4	4	0,5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0	0	0	0	3,2	0,5
	40	1,7	4	0,9	3,1	0,2	0,5	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,4	0	0	0	4	0,7

Através da análise da tabela 5.1 é possível verificar que existem VE a iniciar o carregamento das suas baterias em 8 horas distintas, correspondendo a 8 períodos de

carregamento, pelo que o procedimento de optimização é invocado 8 vezes de maneira a determinar e actualizar os diferentes *set-points* de potência activa. A seguir apresentam-se os diagramas de cargas associados ao consumo dos VE da frota para carregamento das suas baterias em cada uma das 8 fases. É, no entanto, de salientar que os diagramas de cargas apresentados representam o valor acumulado da potência necessária para efectuar o carregamento em cada um dos 8 períodos considerados.

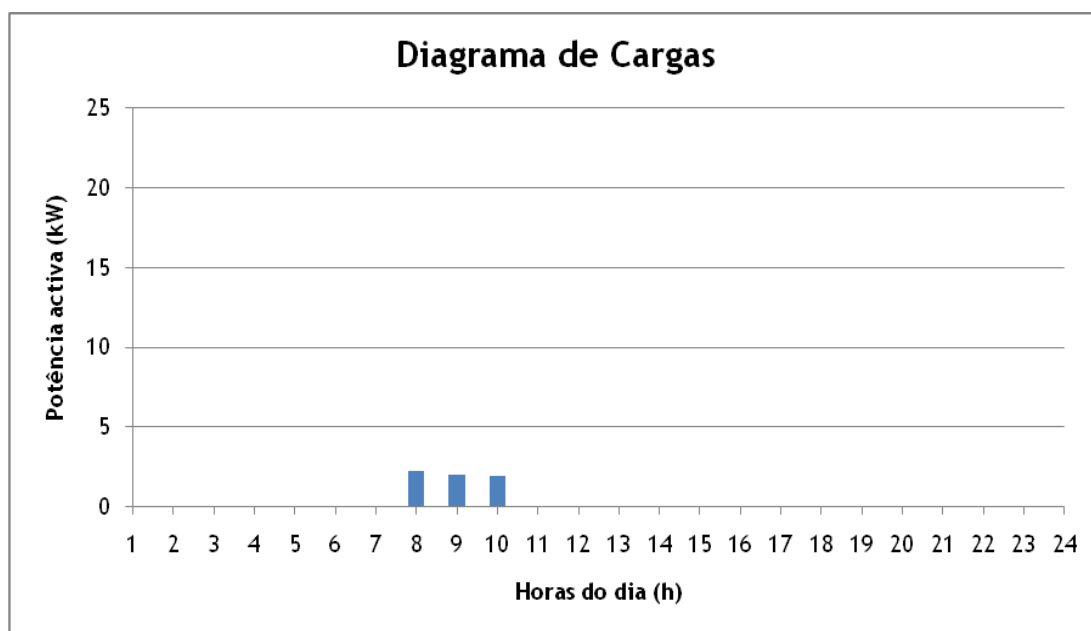


Figura 5.4 - Diagrama de cargas relativo ao consumo dos VE associado ao período de carregamento iniciado às 8 horas

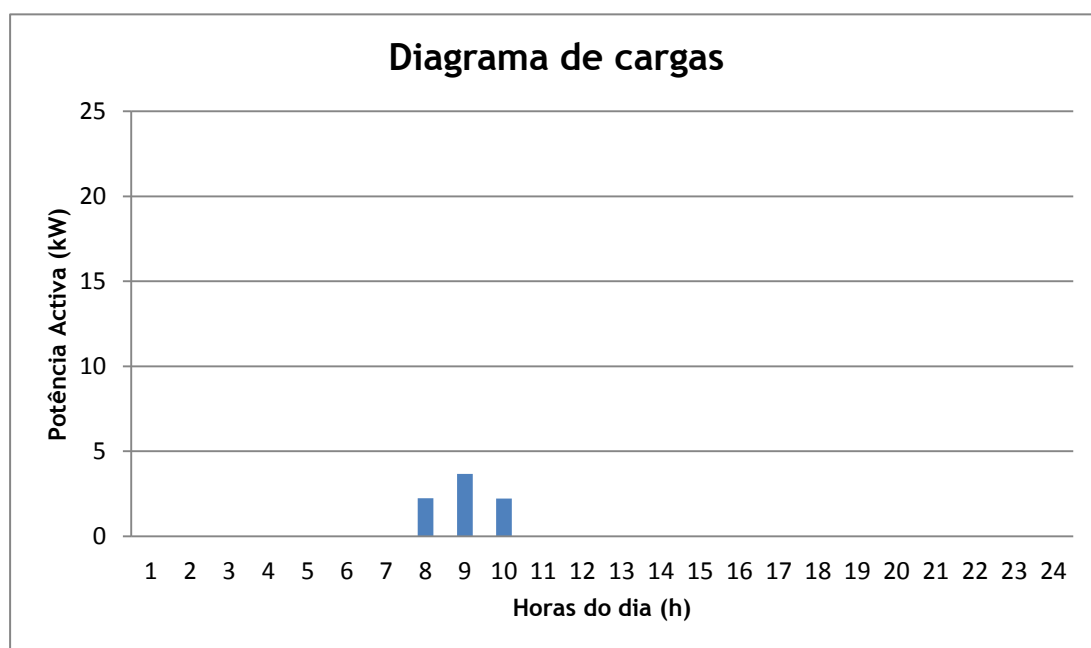


Figura 5.5 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 9 horas

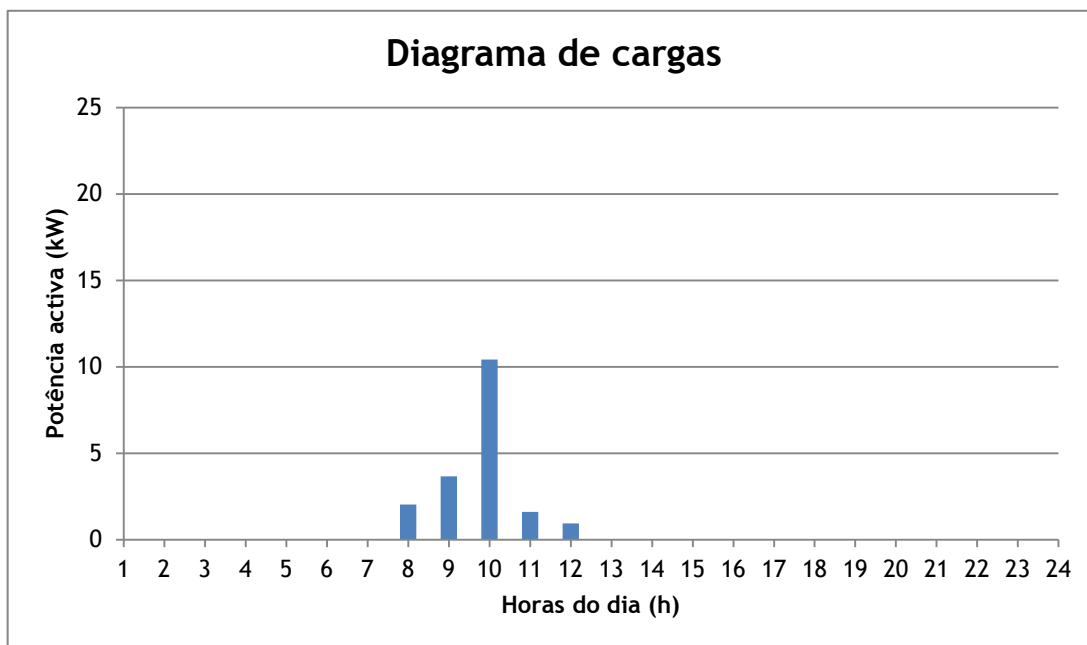


Figura 5.6 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 10 horas

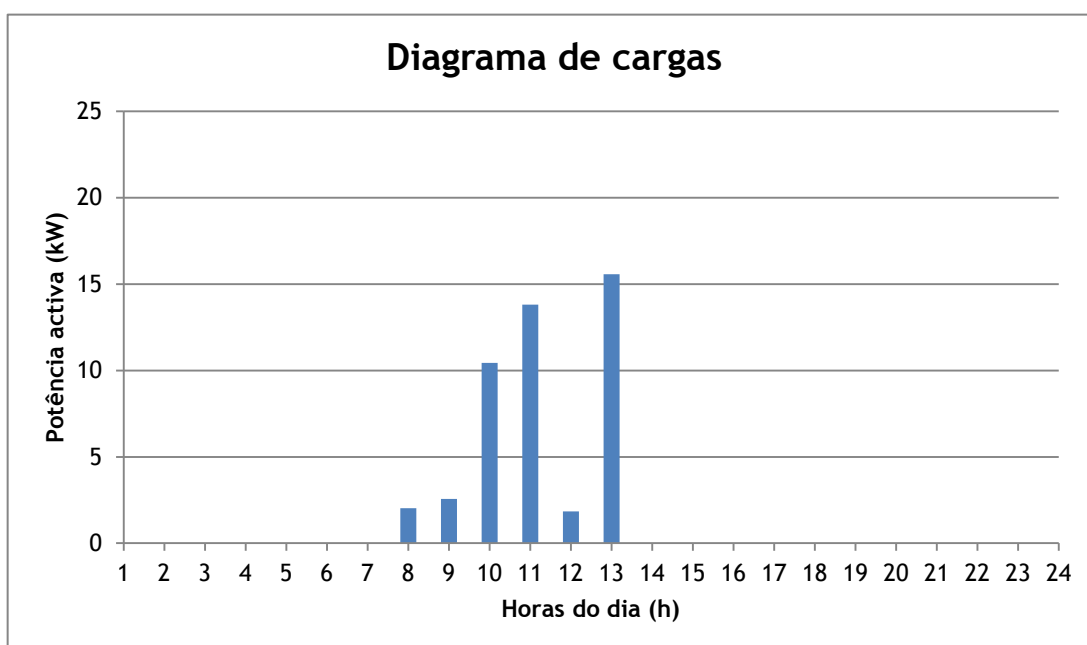


Figura 5.7 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 11 horas

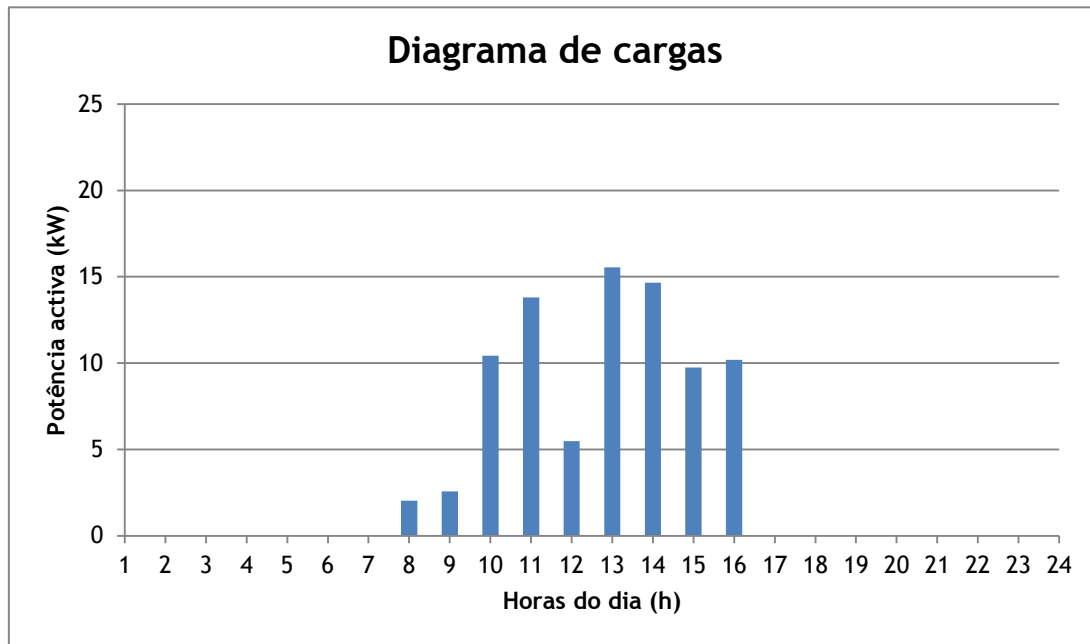


Figura 5.8 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 12 horas

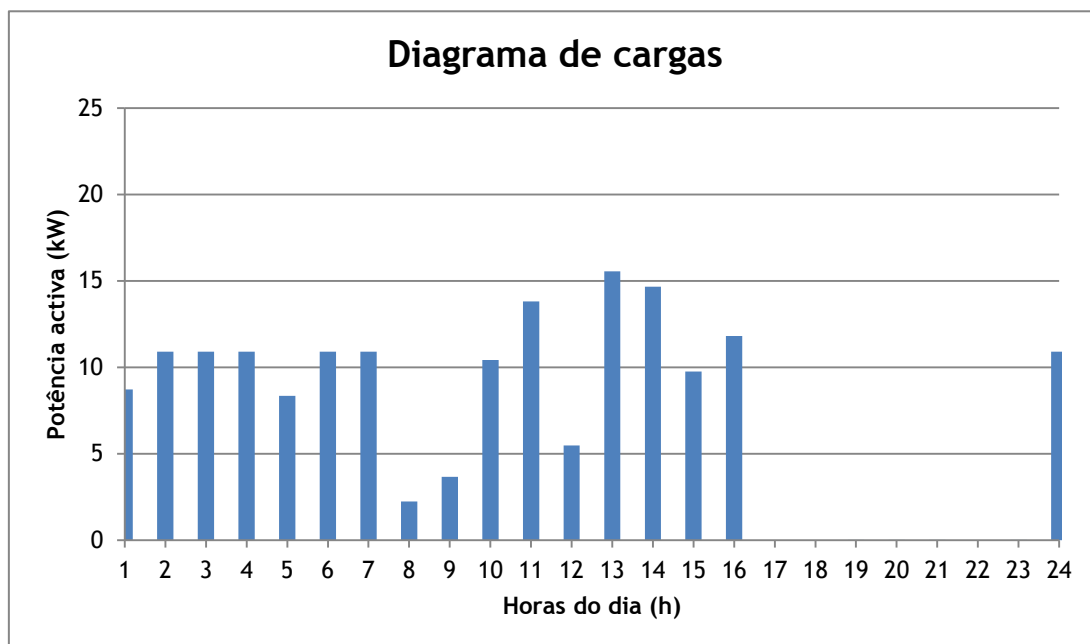


Figura 5.9 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 16 horas

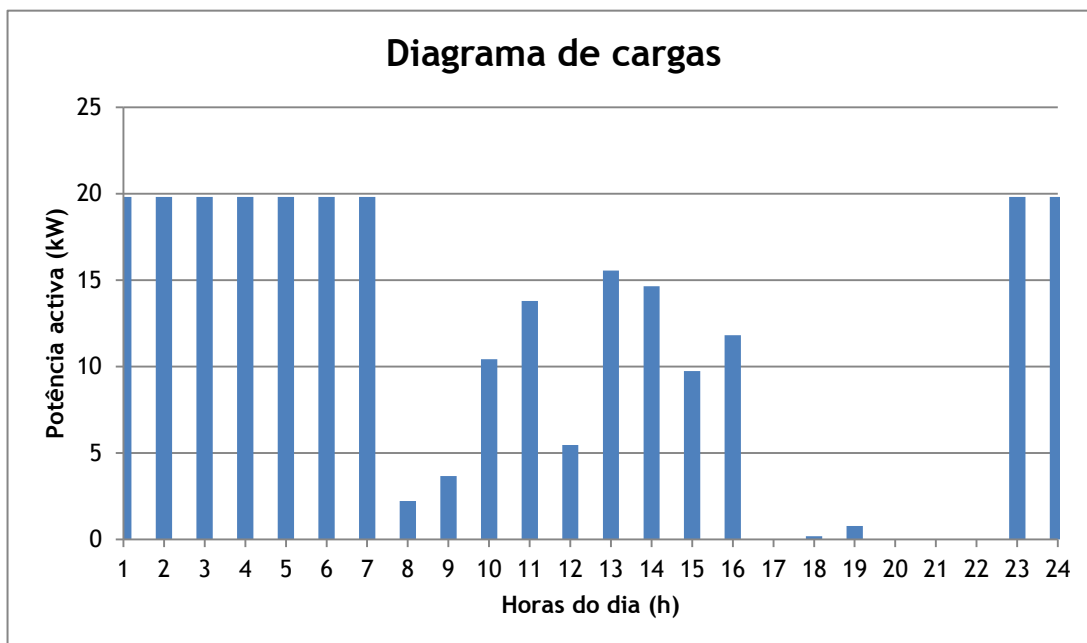


Figura 5.10 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 17 horas

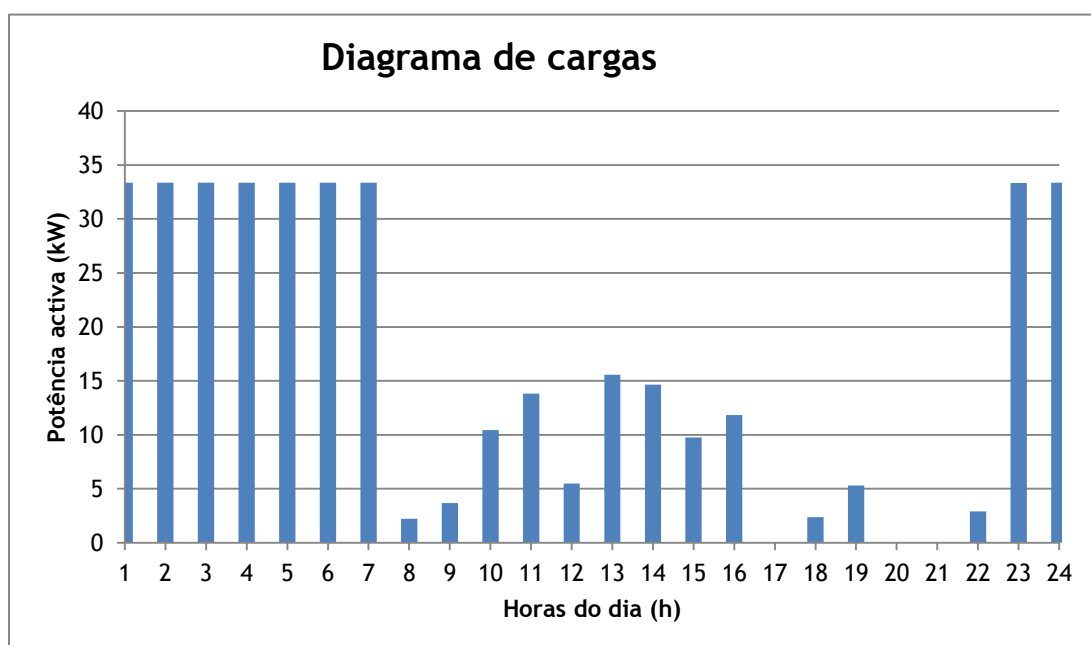


Figura 5.11 - Diagrama de cargas relativo ao consumo acumulado dos VE, incluindo o período de carregamento iniciado às 18 horas

As figuras 5.4 e 5.5 dizem respeito aos dois períodos de carregamento iniciais. Pode observar-se que as taxas de carregamento determinadas para cada hora e para cada VE correspondem a valores baixos de consumo, o que se explica pelo facto do número de VE ser reduzido e do estado inicial de carga das suas baterias ser relativamente elevado.

Nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 é apresentado o valor acumulado da energia consumida nos três períodos de carregamento seguintes, com início às 10, 11 e 12 horas. Pode verificar-se que o consumo subiu substancialmente a partir do início da tarde em consequência do aumento do número de VE ligados à rede às 12 horas, os quais apresentam um estado inicial de carga mais baixo do que aqueles que efectuaram o carregamento nos períodos anteriores.

Os VE que são ligados à rede nos três períodos de carregamento seguintes, os quais têm início às 16, 17 e 18 horas, vão permanecer estacionados até às 8 horas do dia seguinte, pelo que as suas baterias estão disponíveis para efectuar uma gestão inteligente do carregamento durante um longo período de tempo. Assim, tal como se pode observar pelas figuras 5.9, 5.10 e 5.11, o carregamento das baterias destes VE aconteceu predominantemente durante a noite, nomeadamente nos períodos de vazio normal e super vazio que decorrem entre as 23 horas e as 7 horas, aproveitando o custo mais baixo da energia, de modo a reduzir o custo diário da energia consumida para carregar as baterias dos VE da frota, beneficiando assim o cliente. Além disso, é de salientar que o valor da potência de tomada ocorre durante as horas de vazio, sendo mantido no seu valor mínimo uma vez que a potência consumida é mantida aproximadamente constante.

O custo da energia consumida foi determinado a partir do diagrama de cargas apresentado na figura 5.11 e utilizando a equação (1.16), sendo o valor obtido de 29,30 €/dia.

Na figura 5.12 é ilustrado o comportamento da *fitness* (indicador de desempenho) da melhor partícula encontrada em cada iteração pelo algoritmo EPSO. Este comportamento diz respeito ao último período de carregamento, decorrido entre as 18 horas e as 8 horas do dia seguinte, o qual envolve o maior número de VE e, consequentemente, a partícula com maior dimensão. É ainda de realçar que foi verificado um comportamento semelhante nos períodos de carregamento anteriores.



Figura 5.12 - Comportamento da *fitness* associada à melhor solução encontrada em cada iteração para o último período de carregamento

Observa-se nesta figura que o valor da *fitness* evoluiu num sentido decrescente respeitando assim a formulação matemática do problema de optimização, minimizando o custo da energia consumida.

5.2.3 - Comparação das estratégias de carregamento: *Dumb charging vs Smart charging*

De modo a comparar mais facilmente os resultados da aplicação da estratégia inteligente de carregamento implementada através da metodologia desenvolvida neste trabalho com os resultados obtidos no caso de efectuar o carregamento não controlado das baterias dos VE da frota apresenta-se a seguir, na figura 5.13, os diagramas de carga correspondentes:

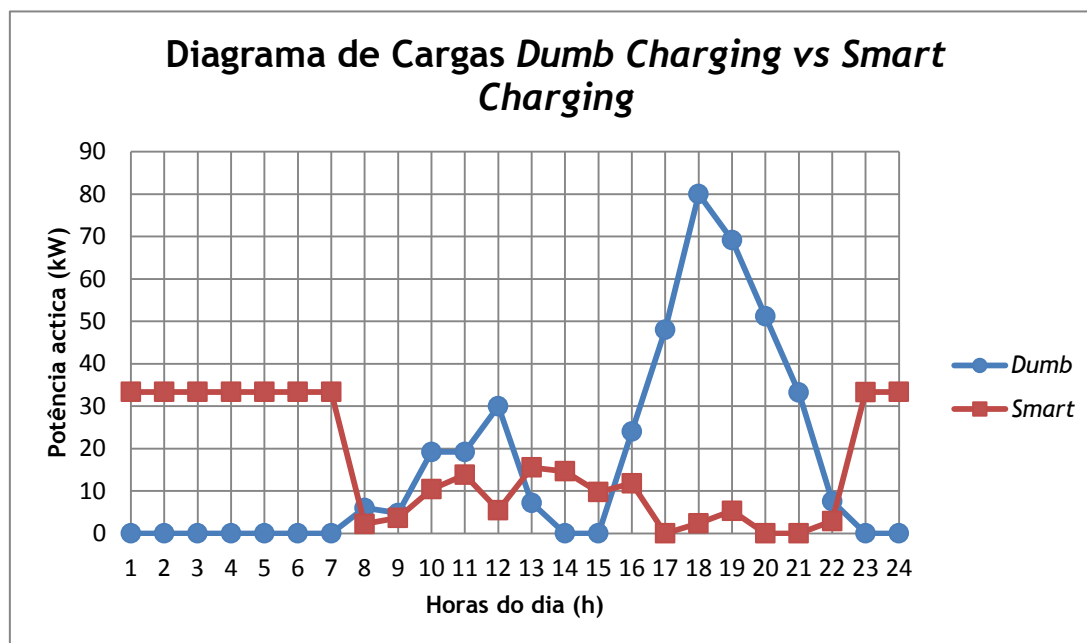


Figura 5.13 - Diagrama de cargas associado ao carregamento das baterias de uma frota de VE: *Smart charging vs dumb charging*

Através da figura 5.13 pode observar-se a diferença entre os perfis de consumo associados ao carregamento das baterias dos VE de uma frota em resultado da aplicação de uma estratégia de gestão local e inteligente de carregamento e em resultado da adopção de uma estratégia de carregamento não controlado.

É de realçar que na estratégia de carregamento não controlado o pico de consumo acontece às 18 horas, coincidindo com as horas de ponta/cheia no diagrama de cargas associado à carga convencional. Durante as horas de vazio o consumo é nulo.

Relativamente à estratégia de carregamento não controlado, a utilização de uma estratégia local de gestão inteligente de carregamento permitiu a diminuição do pico de consumo e, consequentemente, da potência de tomada em cerca de 2,4 vezes. Por outro lado, tornou-se possível efectuar a transferência da carga das horas pontas/cheias para as horas de vazio. Estes dois factos contribuíram para a redução do custo da energia consumida diariamente pelos VE que compõem a frota em cerca de 44%, o que corresponde a uma poupança anual de cerca de 8280 € se considerarmos que o custo da energia consumida diariamente corresponde ao valor médio.

5.3 - Avaliação dos impactos ao nível da rede de distribuição de MT

Nesta secção é realizada a avaliação dos impactos resultantes da integração de frotas de VE na rede de distribuição de MT considerando a estratégia de carregamento não controlado e a estratégia local de gestão inteligente. Para tal foi utilizada a rede teste apresentada na secção 5.1.2, sobre a qual foram determinados trânsitos de potência para as 24 horas de modo a analisar os perfis de tensão nos diferentes barramentos e os níveis de congestionamento nas linhas.

Tendo em conta que a rede teste possui cargas de valor elevado, da ordem dos MW, e que a frota de VE caracterizada na secção 5.1.1 representa uma carga de algumas dezenas de kW (399,6 kW), foi considerado um conjunto de frotas semelhantes (500 frotas) para ligar a alguns dos barramentos da rede de modo a assegurar a representatividade deste tipo de cargas no sistema.

Numa primeira fase, é efectuada a análise das condições de exploração da rede considerando um cenário em que não existem frotas de VE ligadas sobre a rede. Assim, nas tabelas 5.4 e 5.5 são apresentados os perfis de tensão para as 24 horas do dia considerando os barramentos da rede de teste que apresentam um maior risco de violação dos limites mínimos admissíveis. Por sua vez, nas tabelas 5.6 e 5.7 são apresentados os níveis de congestionamento das linhas também para as 24 horas considerando a zona da rede com maior risco de violação dos limites térmicos das linhas.

Tabela 5.4 – Perfis de tensão (em p.u.) em barramentos da rede, sem frota de VE
(1h até às 12h)

		HORA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BARRAMENTO	91	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	99	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06
	103	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	106	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	108	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	115	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	116	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	120	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	134	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	135	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	138	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	139	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	140	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	142	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	143	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	145	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	146	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	147	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	148	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	149	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	153	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	154	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
	155	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,93
	174	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	181	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07
	182	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07
	184	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07
	185	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	186	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	187	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	188	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07
	191	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07
	193	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07
	83	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	86	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	87	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	90	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07
	112	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05	1,04
	131	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06
	132	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06
	133	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06
	137	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06
	173	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06

Através da análise da tabela 5.4 pode verificar-se que as tensões nas doze primeiras horas do dia se encontram dentro dos limites admissíveis, isto é, entre 0.9 p.u. e 1.1 p.u. (sabendo que a tensão base é de 15 kV). No entanto, durante a noite, nas horas de baixo consumo, as tensões apresentam valores elevados, próximos do limite máximo admissível.

Tabela 5.5 – Perfis de tensão (em p.u.) em barramentos da rede, sem frotas de VE
(13h até às 24h)

		HORA											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
BARRAMENTO	91	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,07
	99	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
	103	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,07
	106	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07
	108	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	115	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07
	116	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	120	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	134	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	135	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	138	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	139	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	140	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	142	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	143	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	145	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	146	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	147	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	148	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	149	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	153	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	154	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
	155	0,93	0,92	0,91	0,91	0,92	0,93	0,89	0,89	0,88	0,91	0,95	1,00
	174	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08
	181	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08
	182	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08
	184	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08
	185	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08
	186	1,07	1,07	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
	187	1,07	1,07	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
	188	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08
	191	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08
	193	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08
	83	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
	86	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
	87	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
	90	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
	112	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,04	1,05	1,06
	131	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07
	132	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07
	133	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07
	137	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07
	173	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,07

Na tabela 5.5 pode observar-se que as tensões em alguns barramentos da rede nas horas correspondendo ao final da tarde estão demasiadas baixas, chegando a estar fora do limite inferior admissível, 0.9 p.u. Da mesma maneira, as tensões nas horas do início da tarde nestes mesmos barramentos, estão muito próximas do limite inferior, esperando-se um agravamento das condições de exploração na sequência da integração das frotas dos VE.

Tabela 5.6 – Nível de congestionamento (em %) de algumas linhas da rede teste sem frota de VE (1h até às 12h)

	De	Para	HORA											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BARRAMENTO	91	103	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	99	103	3	3	3	2	2	2	3	4	5	6	7	8
	99	106	16	16	16	16	16	16	16	14	12	11	9	8
	103	108	2	2	2	2	2	2	2	3	4	5	6	7
	106	115	15	16	16	16	16	16	16	14	12	10	8	8
	108	134	2	2	2	2	2	2	2	3	4	5	5	6
	134	142	2	2	2	2	2	2	2	3	4	5	5	5
	138	139	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	2
	138	146	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3
	142	146	2	2	2	2	1	1	2	2	3	4	4	5
	142	153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	146	147	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	147	149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	153	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	153	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	181	184	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	181	188	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	68	68
	185	186	47	47	48	48	48	48	47	47	45	44	43	43
	185	191	37	37	37	38	38	38	37	37	37	36	36	36
	186	187	45	45	45	45	45	45	45	44	43	42	41	40
	188	193	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
	191	193	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
	83	87	15	15	15	15	15	15	15	14	13	13	12	12
	87	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	87	131	14	15	15	15	15	15	15	14	13	12	12	11
	112	132	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	131	133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	131	137	14	14	15	15	15	15	14	14	13	12	11	11
	132	137	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	137	173	14	14	14	14	15	14	14	14	13	12	11	11

A análise da tabela 5.6 permite verificar que o nível de congestionamento nas linhas (expresso em percentagem da sua capacidade) é relativamente baixo, com excepção da linha que liga o barramento 181 ao barramento 188. Mesmo assim nas primeiras doze horas do dia pode-se considerar que esta rede teste não possui problemas ao nível dos congestionamentos. O mesmo acontece para as restantes horas do dia, tal como se pode verificar pela análise da tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Nível de congestionamento em algumas linhas da rede sem frotas de VE (13h até às 24h)

			HORA											
			13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
BARRAMENTO	De	Para												
	91	103	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	99	103	8	9	9	9	8	8	10	10	10	9	7	5
	99	106	8	7	7	7	8	8	6	6	5	7	9	13
	103	108	7	7	8	8	7	7	8	8	9	8	6	4
	106	115	7	6	6	6	7	7	5	5	4	6	9	12
	108	134	6	6	7	7	6	6	7	7	8	7	5	3
	134	142	5	6	6	6	5	5	6	6	6	6	5	3
	138	139	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	138	146	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
	142	146	5	5	5	5	5	5	6	6	6	5	4	3
	142	153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	146	147	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	147	149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	153	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	153	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	181	184	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	181	188	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	69
	185	186	42	42	42	42	42	42	41	41	41	42	43	45
	185	191	36	36	35	35	36	36	35	35	35	35	36	37
	186	187	40	40	39	39	40	40	39	39	38	39	41	43
	188	193	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
	191	193	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
	83	87	12	11	11	11	12	12	11	11	11	11	12	13
	87	90	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	87	131	11	11	11	11	11	11	10	10	10	11	12	13
	112	132	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	131	133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	131	137	11	11	10	11	11	11	10	10	10	11	12	13
	132	137	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	137	173	10	10	10	10	10	10	9	9	9	10	11	13

Verificou-se que a ligação das frotas dos VE não aumenta de forma significativa o nível de congestionamento das linhas, não conduzindo, portanto, a violações dos limites térmicos, razão pela qual as análises posteriores consideram apenas os impactos ao nível dos perfis de tensão nos barramentos.

A seguir na figura 5.14 apresenta-se a rede com as cargas adicionais representando conjuntos de frotas de VE, ligadas em vários barramentos. Procurou-se distribuir na parte inferior da rede (tensão a 15 kV) os vários conjuntos de frotas de maneira a poder analisar os perfis de tensão. Para isso, definiram-se três zonas de interesse na rede teste, onde estão ligadas os conjuntos de frotas de VE como é possível observar na figura 5.13.

Figura 5.14 - Esquema unifilar da rede teste incluindo a ligação de frotas de VE



Figura 5.15 - Esquema unifilar da rede teste incluindo a ligação de frotas de VE

Os resultados obtidos para os perfis de tensão nos barramentos da rede através da estratégia não controlada e da estratégia inteligente de gestão de carregamento das baterias são apresentados nas secções seguintes.

5.3.1 - Impactos resultantes da estratégia de carregamento não controlado

Com base no diagrama de cargas associado aos consumos da frota de VE resultante da aplicação de uma estratégia de carregamento não controlado, o qual se encontra apresentado na figura 5.3, e tendo em consideração os pontos de ligação das frotas de VE à rede teste, de acordo com a figura 5.14, os resultados obtidos para os perfis de tensão durante as 24 horas nos diferentes barramentos da rede encontram-se apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9.

Tabela 5.8 – Perfis de tensão na rede com frotas de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento não controlada (1h até às 12h)

		HORA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BARRAMENTO	91	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,04	1,03	1,04
	99	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,04	1,03	1,05
	103	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,04	1,03	1,04
	106	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,04	1,04	1,05
	108	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,03	1,03	1,04
	115	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,04	1,04	1,05
	116	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,03	1,03	1,04
	120	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,03	1,03	1,04
	134	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	135	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	138	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	139	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	140	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,06	1,06	1,03	1,03	1,04
	142	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	143	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,06	1,06	1,03	1,03	1,04
	145	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,06	1,06	1,03	1,03	1,04
	146	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	147	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	148	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,06	1,06	1,03	1,03	1,04
	149	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	153	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	154	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,06	1,06	1,03	1,03	1,04
	155	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	0,98	0,93	0,91	0,91
	174	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,06
	181	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,06	1,06	1,06
	182	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,06	1,06	1,06
	184	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,06	1,06	1,06
	185	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,06
	186	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,06
	187	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,06
	188	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06
	191	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	193	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	83	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05
	86	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05
	87	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05
	90	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05
	112	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,03
	131	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	132	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	133	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	137	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	173	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,05	1,04	1,05

Observa-se nesta tabela 5.8, que nas sete primeiras horas do dia, as tensões são exactamente iguais àsquelas verificadas quando não existem frotas de VE ligadas à rede. Tal acontece porque durante este período de tempo os VE não estão a carregar as suas baterias. Nas restantes horas a tensão diminuiu ligeiramente devido à presença de carga adicional

correspondente ao carregamento das baterias dos VE. No entanto, as tensões ficam dentro dos limites admissíveis porque a carga adicional é relativamente baixa nestas horas.

Tabela 5.9 – Perfis de tensão na rede com frota de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento não controlada (13h até às 24h)

		HORA											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
BARRAMENTO	91	1,02	1,05	1,06	1,02	0,97	0,90	0,92	0,96	0,99	1,05	1,06	1,07
	99	1,03	1,05	1,06	1,02	0,98	0,92	0,93	0,97	1,00	1,05	1,06	1,07
	103	1,03	1,05	1,06	1,02	0,97	0,91	0,92	0,96	1,00	1,05	1,06	1,07
	106	1,03	1,05	1,06	1,02	0,98	0,92	0,94	0,97	1,00	1,05	1,06	1,07
	108	1,02	1,05	1,06	1,02	0,97	0,90	0,92	0,96	0,99	1,04	1,06	1,07
	115	1,03	1,05	1,06	1,02	0,99	0,93	0,94	0,98	1,00	1,05	1,06	1,07
	116	1,02	1,05	1,06	1,01	0,97	0,89	0,91	0,95	0,99	1,04	1,06	1,07
	120	1,02	1,05	1,06	1,01	0,97	0,89	0,91	0,95	0,99	1,04	1,06	1,07
	134	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	135	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	138	0,88	0,90	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	139	0,88	0,90	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	140	1,02	1,05	1,06	1,01	0,96	0,88	0,90	0,95	0,99	1,04	1,06	1,07
	142	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	143	1,02	1,05	1,06	1,01	0,96	0,88	0,90	0,95	0,99	1,04	1,06	1,07
	145	1,02	1,05	1,06	1,01	0,96	0,88	0,90	0,95	0,99	1,04	1,06	1,07
	146	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	147	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	148	1,02	1,05	1,06	1,01	0,96	0,88	0,90	0,95	0,99	1,04	1,06	1,07
	149	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	153	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	154	1,02	1,05	1,06	1,01	0,96	0,88	0,90	0,95	0,99	1,04	1,06	1,07
	155	0,88	0,91	0,91	0,86	0,82	0,73	0,71	0,77	0,81	0,90	0,95	1,00
	174	1,05	1,06	1,06	1,04	1,02	0,98	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,08
	181	1,05	1,07	1,07	1,05	1,02	0,98	0,99	1,02	1,03	1,06	1,07	1,08
	182	1,05	1,07	1,07	1,05	1,02	0,99	0,99	1,02	1,04	1,06	1,08	1,08
	184	1,05	1,07	1,07	1,05	1,02	0,98	0,99	1,02	1,04	1,06	1,08	1,08
	185	1,05	1,06	1,06	1,04	1,02	0,98	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,07
	186	1,05	1,06	1,06	1,04	1,02	0,98	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,07
	187	1,05	1,06	1,06	1,04	1,02	0,98	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,07
	188	1,05	1,06	1,07	1,05	1,02	0,98	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,08
	191	1,05	1,06	1,07	1,04	1,02	0,98	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,08
	193	1,05	1,06	1,07	1,04	1,02	0,98	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,08
	83	1,04	1,06	1,06	1,04	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,07	1,07
	86	1,04	1,06	1,06	1,03	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,07	1,07
	87	1,04	1,06	1,06	1,04	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,07	1,07
	90	1,04	1,06	1,06	1,03	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,07	1,07
	112	1,02	1,03	1,04	1,01	0,98	0,94	0,95	0,97	0,99	1,03	1,05	1,06
	131	1,04	1,05	1,06	1,03	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,06	1,07
	132	1,04	1,05	1,06	1,03	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,06	1,07
	133	1,04	1,05	1,06	1,03	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,06	1,07
	137	1,04	1,05	1,06	1,03	1,01	0,96	0,97	1,00	1,02	1,05	1,06	1,07
	173	1,04	1,05	1,06	1,03	1,01	0,97	0,98	1,00	1,02	1,05	1,06	1,07

Nesta tabela 5.9, as tensões não se alteram nas horas 23 e 24 pelas mesmas razões apontadas para a tabela anterior. No entanto, para nas restantes horas verifica-se uma redução significativa das tensões em relação ao cenário sem frotas de VE na rede, devido à presença de carga adicional. De facto, nas horas 18, 19, 20, 21 e 22 onde a carga para

carregar as frotas de VE é mais elevada na estratégia de gestão de carregamento não controlada, esta queda é crítica na medida em que em alguns barramentos a tensão chega aos 0.73 p.u. ficando muito abaixo do limite inferior admissível. Nas restantes horas também é possível observar uma queda da tensão, havendo em certos barramentos violação da restrição associada aos valores de tensão. Conclui-se que quando existem conjuntos de frotas de VE ligados à rede teste e utilizando a estratégia não controlada para gerir os carregamentos das baterias dos VE, verifica-se uma degradação significativa das tensões, em particular nas horas de pontas e cheias.

5.3.2 - Impactos resultantes da estratégia local de carregamento inteligente

Considerando agora o diagrama de cargas obtido a partir da aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho, o qual se encontra apresentado anteriormente na figura 5.11, e tendo em conta os pontos de ligação dos conjuntos de frotas indicados na figura 5.14, os resultados obtidos através da resolução do problema de trânsito de potências para as 24 horas são apresentados nas tabelas 5.10, 5.11.

Tabela 5.10 – Perfis de tensão na rede com frota de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento inteligente (1h até às 12h)

		HORA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BARRAMENTO	91	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	99	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,07	1,07	1,05	1,04	1,05
	103	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,07	1,07	1,05	1,04	1,05
	106	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,07	1,07	1,05	1,04	1,05
	108	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	115	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,07	1,07	1,05	1,04	1,05
	116	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	120	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	134	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	135	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	138	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	139	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	140	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	142	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	143	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	145	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	146	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	147	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	148	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	149	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	153	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	154	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	1,06	1,05	1,04	1,05
	155	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	0,98	0,95	0,92	0,92
	174	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06
	181	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,08	1,08	1,07	1,06	1,07
	182	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,08	1,08	1,07	1,06	1,07
	184	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,08	1,08	1,07	1,06	1,07
	185	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06
	186	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06
	187	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06
	188	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,08	1,08	1,07	1,06	1,07
	191	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06
	193	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06
	83	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,08	1,07	1,06	1,05	1,06
	86	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	87	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	90	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	112	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,06	1,05	1,04	1,03	1,04
	131	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	132	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	133	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	137	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,07	1,06	1,05	1,06
	173	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05

Observa-se nesta tabela 5.10 que as tensões da 1h às 7h diminuem significativamente comparado com as tensões verificadas sem frotas de VE ligadas à rede. De facto, a aplicação da estratégia de carregamento inteligente transfere grande parte da carga para as horas do vazio, provocando assim um abaixamento dos níveis de tensão, ainda que não sejam ultrapassados os limites mínimos admissíveis. Estas tensões no entanto mantêm-se dentro dos limites admissíveis, não havendo risco para a rede. Nas restantes horas verifica-se uma ligeira

diminuição das tensões devido à presença de alguma carga adicional, mas sem criar problemas na rede.

Tabela 5.11 – Perfis de tensão na rede com frota de VE utilizando a estratégia de gestão de carregamento inteligente (13h até às 24h)

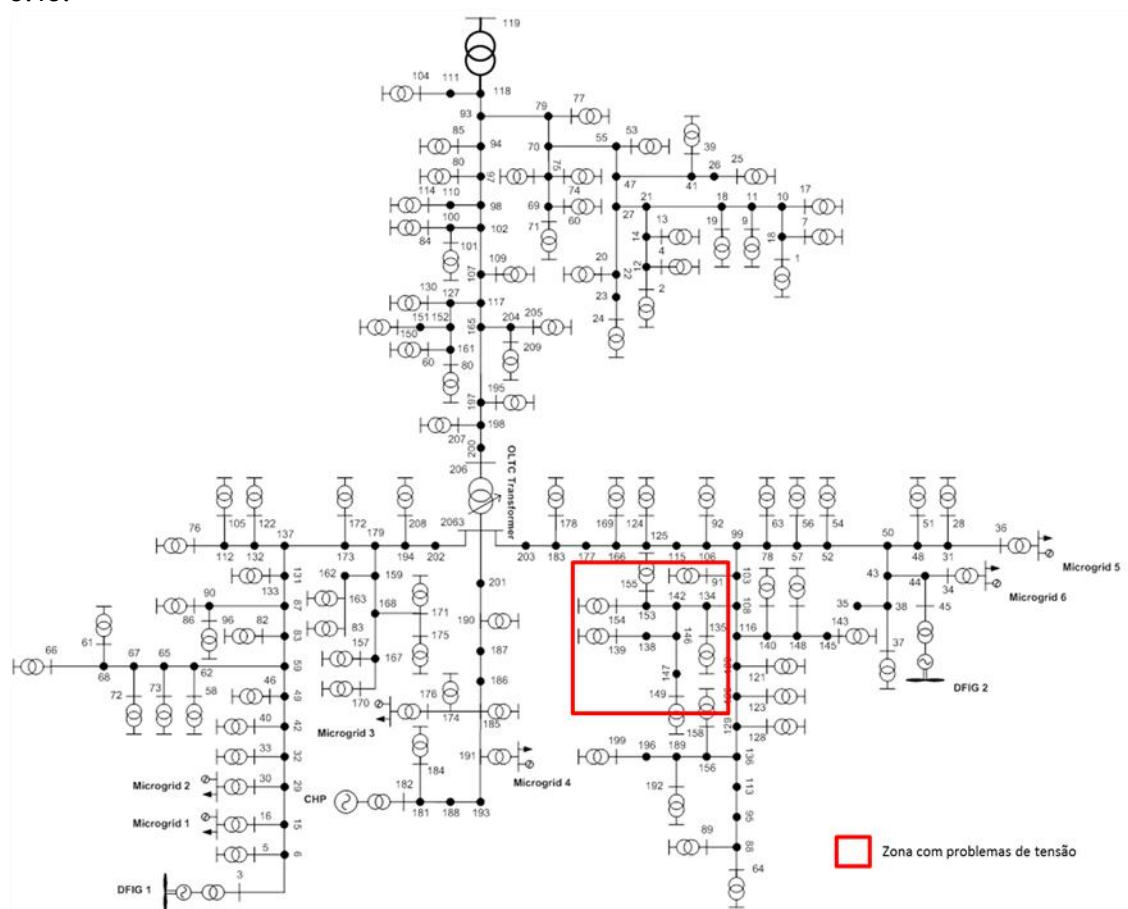
		HORA											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
BARRAMENTO	91	1,03	1,03	1,04	1,04	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,01	1,02
	99	1,04	1,04	1,04	1,04	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,01	1,02
	103	1,03	1,03	1,04	1,04	1,06	1,06	1,05	1,06	1,05	1,05	1,01	1,02
	106	1,04	1,04	1,04	1,04	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,01	1,02
	108	1,03	1,03	1,04	1,04	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	115	1,04	1,04	1,04	1,04	1,06	1,06	1,05	1,06	1,05	1,05	1,01	1,02
	116	1,03	1,03	1,04	1,04	1,06	1,06	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	120	1,03	1,03	1,04	1,04	1,06	1,05	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	134	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	135	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	138	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	139	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	140	1,03	1,03	1,04	1,03	1,06	1,05	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	142	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	143	1,03	1,03	1,04	1,03	1,06	1,05	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	145	1,03	1,03	1,04	1,03	1,06	1,05	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	146	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	147	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	148	1,03	1,03	1,04	1,03	1,06	1,05	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	149	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	153	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	154	1,03	1,03	1,04	1,03	1,06	1,05	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
	155	0,90	0,89	0,89	0,89	0,92	0,92	0,88	0,89	0,88	0,91	0,88	0,93
	174	1,05	1,05	1,06	1,05	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04	1,04
	181	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07	1,04	1,05
	182	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07	1,04	1,05
	184	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07	1,04	1,05
	185	1,05	1,05	1,06	1,05	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04	1,04
	186	1,05	1,05	1,06	1,05	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04	1,04
	187	1,05	1,05	1,06	1,05	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04	1,04
	188	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07	1,04	1,05
	191	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04	1,04
	193	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04	1,05
	83	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,04
	86	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,04
	87	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,04
	90	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,04
	112	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,04	1,01	1,02
	131	1,05	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,03
	132	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,03
	133	1,05	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,03
	137	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,03	1,03
	173	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,05	1,05	1,03	1,03

A análise da tabela 5.11 permite verificar que em determinadas horas o valor da tensão em alguns barramentos diminui relativamente ao cenário em que não existem frotas de VE ligadas à rede, provocando mesmo a violação do limite mínimo admissível. No entanto, o

efeito provocado é muito menor do que aquele verificado para a estratégia de gestão de carregamento não controlada, levando a concluir que a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho contribui de forma significativa para a não degradação das condições de exploração da rede.

5.4 - Avaliação dos impactos incluindo as restrições da rede

A partir da análise dos resultados apresentados anteriormente foi possível identificar a zona da rede mais problemática em termos da ocorrência de problemas de tensão, os quais são bastante agravados com a presença das frotas de VE. Esta zona foi assinalada na figura 5.15.



as 23 horas ser muito reduzida, as restrições de rede foram consideradas apenas nas horas 13, 14, 15 e 16, de modo a repor o valor das tensões no seu limite mínimo admissível, ou seja em 0.9 p.u.

As potências máximas determinadas para cada hora foram as seguintes:

- Para a hora 13, $P_{max} = 13$ kW;
- Para a hora 14, $P_{max} = 7$ kW;
- Para a hora 15, $P_{max} = 1$ kW;
- Para a hora 16, $P_{max} = 6$ kW;

Assim, após incluir a restrição por parte da rede no problema de optimização, os resultados obtidos utilizando a estratégia de gestão de carregamento inteligente são apresentados a seguir na figura 5.16.

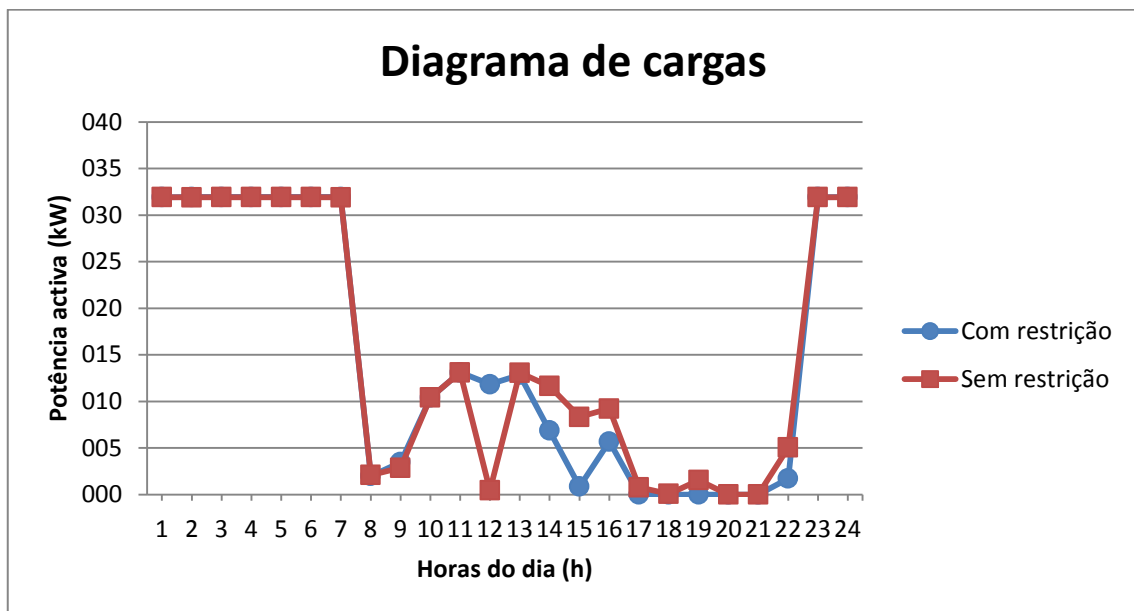


Figura 5.17 - Comparação entre diagrama de cargas incluindo ou não as restrições da rede

Tal como se pode observar através da figura 5.16, a potência utilizada para efectuar o carregamento das baterias nas horas 13, 14, 15 e 16 corresponde ao valor da potência máxima definido anteriormente. No entanto, de modo a satisfazer o estado final de carga pretendido relativamente às baterias dos VE em fase de carregamento neste período de tempo, a potência requerida às 12 horas aumentou de forma significativa. O impacto desta estratégia de carregamento ao nível dos perfis das tensões pode verificar-se através da análise dos resultados apresentados na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Perfis de tensão na zona problemática da rede incluindo a restrição por parte da rede na estratégia de gestão de carregamento inteligente (13h até às 24h)

		HORA											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
BARRAMENTO	134	0,902	0,903	0,908	0,902	0,924	0,923	0,888	0,892	0,884	0,910	0,883	0,937
	135	0,902	0,903	0,908	0,902	0,924	0,923	0,888	0,892	0,884	0,910	0,883	0,937
	138	0,901	0,902	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,883	0,909	0,882	0,937
	139	0,901	0,902	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,883	0,909	0,882	0,937
	142	0,901	0,903	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,884	0,909	0,882	0,937
	146	0,901	0,902	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,883	0,909	0,882	0,937
	147	0,901	0,902	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,883	0,909	0,882	0,937
	149	0,901	0,902	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,883	0,909	0,882	0,937
	153	0,901	0,903	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,883	0,909	0,882	0,937
	155	0,901	0,903	0,907	0,901	0,923	0,922	0,887	0,891	0,883	0,909	0,882	0,937

A inclusão da restrição associada às condições de exploração da rede na resolução do problema de optimização (função de avaliação) descrito pela equação (1.15) permitiu repor o valor das tensões nos barramentos, respeitando assim o limite mínimo admissível.

5.5 - Contribuição da integração de produção distribuída na rede

De modo a avaliar a contribuição da produção distribuída para a melhoria das condições de exploração da rede, foi considerado, nesta secção, que o posto de carregamento associado à frota de VE tem instalado um conjunto de sistemas solares fotovoltaicos com uma potência nominal de 15 kW. O efeito desta consideração foi avaliado para o barramento 139 da rede teste, situado na zona onde se verifica a ocorrência de problemas de tensão.

Para definir a potência activa gerada a cada hora do dia pelo sistema fotovoltaico foi utilizado o perfil de produção apresentado na figura 5.17.

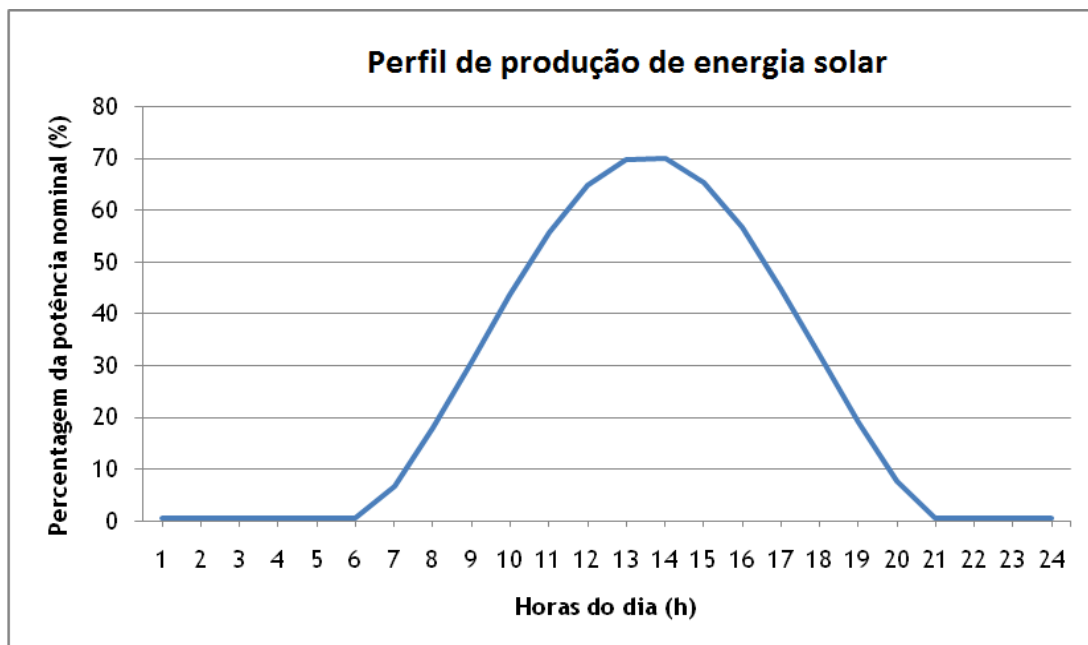


Figura 5.18 - Perfil de produção de energia solar no verão

Os perfis de tensão obtidos nos diferentes barramentos da zona problemática para as 24 horas são apresentados a seguir nas tabelas 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13 – Perfis de tensão na zona problemática da rede incluindo produção dispersa (1h até às 12h)

		HORA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BARRAMENTO	134	0,975	0,980	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,016	0,996	0,981	0,995
	135	0,975	0,980	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,016	0,996	0,981	0,995
	138	0,975	0,979	0,983	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995
	139	0,975	0,979	0,983	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995
	142	0,975	0,979	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995
	146	0,975	0,979	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995
	147	0,975	0,979	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995
	149	0,975	0,979	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995
	153	0,975	0,979	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995
	155	0,975	0,979	0,984	0,985	0,987	0,986	0,987	1,033	1,015	0,996	0,981	0,995

Tabela 5.14 – Perfis de tensão na zona problemática da rede incluindo produção dispersa (13h até às 24h)

		HORA											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
BARRAMENTO	134	0,976	0,969	0,967	0,957	0,975	0,959	0,905	0,902	0,885	0,908	0,880	0,935
	135	0,976	0,969	0,967	0,957	0,975	0,959	0,905	0,902	0,885	0,908	0,880	0,935
	138	0,976	0,968	0,966	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,907	0,880	0,934
	139	0,976	0,968	0,966	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,907	0,880	0,934
	142	0,976	0,969	0,967	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,908	0,880	0,935
	146	0,976	0,968	0,966	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,908	0,880	0,934
	147	0,976	0,968	0,966	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,908	0,880	0,934
	149	0,976	0,968	0,966	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,908	0,880	0,934
	153	0,976	0,969	0,967	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,908	0,880	0,934
	155	0,976	0,969	0,967	0,956	0,975	0,959	0,905	0,901	0,884	0,908	0,880	0,934

É de referir que nestas duas tabelas continuam ligados os conjuntos de frotas de VE. Observa-se que as tensões em quase todas as horas estão dentro dos limites admissíveis. Nas horas onde existiam alguns problemas de tensão (isto é, nas horas 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20 e 22), as tensões aumentaram relativamente ao cenário analisado anteriormente na secção 5.4. Apenas nas horas 21 e 23 ainda se verificam problemas de tensão porque a produção de energia a partir do sistema fotovoltaico é muito reduzida nestas horas.

5.6 - Sumário e principais conclusões

A adopção de uma estratégia de carregamento não controlado para pontos de carregamento associados a frotas de VE ligados sobre as redes de distribuição de MT contribui para uma degradação significativa das condições de exploração da rede, na medida em que o pico de consumo coincide com as horas cheias e de ponta do diagrama de cargas convencional.

No entanto, a utilização de uma estratégia de carregamento inteligente implementada através da metodologia desenvolvida no âmbito deste trabalho, permite efectuar a transferência do consumo associado ao carregamento das baterias dos VE da frota das horas cheias e pontas para as horas de vazio, diminuindo de forma significativa os impactos negativos verificados ao nível das condições de exploração da rede. Além disso, permite que o cliente beneficie dos preços da electricidade mais baixos, os quais são praticados nas horas de vazio, e contribui para a redução da potência de tomada, reduzindo assim o custo da energia consumida.

Por último, a integração de sistemas de produção distribuída, nomeadamente sistemas solares fotovoltaicos, nos postos de carregamento das frotas de VE, contribui para a melhoria das condições de exploração da rede.

Capítulo 6

Conclusão

6.1 - Conclusões

A integração em larga escala dos VE irá colocar novos desafios ao nível da operação do sistema de distribuição em média e baixa tensão. De modo a minimizar os impactos resultantes do facto da rede ter que alimentar uma carga adicional de valor considerável associada ao carregamento das baterias dos VE torna-se necessário desenvolver ferramentas de gestão inteligente do carregamento, as quais podem ser suportadas pelos conceitos de MR e MMR, de modo a evitar a realização de avultados investimentos para reforçar as infra-estruturas de rede. No que diz respeito à ligação de pontos associados ao carregamento de frotas de VE ligados sobre as redes de distribuição de MT, torna-se ainda necessário desenvolver estratégias locais de gestão inteligente do carregamento das baterias dos VE de modo a minimizar a potência de tomada e, em simultâneo, conter os impactos negativos causados ao nível das condições técnicas de exploração da rede.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma estratégia de gestão de carregamento inteligente das baterias de frotas de VE ligadas à rede de distribuição de MT, adaptada para funcionamento em tempo real. Assim, o problema de gestão do carregamento foi formulado como um problema de optimização, cuja função objectivo consiste em minimizar o custo da energia consumida, sujeita a um conjunto de restrições que envolve os requisitos de carga das baterias especificados pelos condutores e os limites técnicos de exploração da rede de distribuição. O EPSO foi utilizado como ferramenta de optimização de modo a determinar *set-points* de potência activa correspondentes à taxa de carregamento individual das baterias dos VE numa base de tempo de 1 hora.

Os resultados obtidos permitem concluir que este tipo de estratégia é fundamental na medida em que permite reduzir em quase metade os custos de electricidade associados aos consumos quando comparado com a utilização de uma estratégia de gestão de carregamento não controlado. Além disso, a estratégia de carregamento inteligente permite reduzir os

impactos negativos ao nível das condições de operação da rede e caso se verifique violações das condições técnicas existe a possibilidade de repor os valores dentro dos limites admissíveis.

Por isso, a implementação de estratégias de gestão inteligente para carregamento das baterias dos VE torna-se fundamental de modo a possibilitar a transição para o paradigma da mobilidade eléctrica de forma segura e eficiente.

6.2 - Desenvolvimentos futuros

Tendo em vista a utilização da metodologia desenvolvida em aplicações em tempo real, os desenvolvimentos futuros são ambiciosos, na medida em que exigem tempos de resposta exigentes utilizando recursos técnicos limitados. Assim, os aspectos a melhorar são muitos, sendo de realçar os principais desenvolvimentos apresentados a seguir:

- Implementar a metodologia numa linguagem de programação que reduza o tempo computacional, como por exemplo o JAVA;
- Reduzir a dimensão da partícula através da identificação de relações entre os *set-points* de potência activa para cada VE;
- Avaliar o desempenho de outras ferramentas de optimização de modo a reduzir o esforço computacional;
- Incluir as incertezas associadas à previsão dos consumos e ao comportamento dos sistemas de produção distribuída utilizando recursos de origem renovável, como é o caso dos sistemas eólicos e solares fotovoltaicos.

Também seria interessante avaliar o impacto da estratégia de carregamento tendo em conta níveis elevados de integração de produção distribuída nas redes de distribuição de MT.

Referências

- [1] “Pacote sobre energia e alterações climáticas bem recebido pelo Parlamento Europeu”, (24-01-2008), disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20080121STO19278+0+DOC+XML+V0//PT>, consultado em 20-05-2011.
- [2] European Commission “Towards Smart Power Networks, lessons from Europeans research FP5 projects”, Directorate-General for research sustainable energy power systems, 2005, <http://www.smartgrids.eu/>
- [3] European Research and Development Project MICROGRIDS - Large scale integration of microgeneration to low voltage grids, Contract No. ENK-CT-2002-00610, <http://www.microgrids.eu/micro2000/index.php>
- [4] European Research and Development Project MORE MICROGRIDS - Advanced architectures and control concepts for More MicroGrids, Contract No. SES6-019864, <http://www.microgrids.eu/index.php>
- [5] J. A. Peças Lopes, António M. Aires Messias, Rui M. P. Gonçalves, “Redes de energia inteligentes como contributo da engenharia portuguesa para o desenvolvimento sustentável”, revista da ordem dos engenheiros InGenium, nº 112, (2009)
- [6] C. Moreira, F. Resende, “Desenvolvimento das redes eléctricas inteligentes”, publicado em Renováveis Magazine nº 4, (4º trimestre de 2010).
- [7] C. Moreira, “Identification and Development of MicroGrids Emergency Control Procedures”, Tese de doutoramento em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, (Julho 2008).
- [8] J.A. Peças Lopes, C.L. Moreira, A.G. Madureira, ”Defining control strategies for analysing microgrids islanded operation”, Power Tech, (2005) IEEE Russia
- [9] J.A. Peças Lopes, “Advanced MicroGrids as a component for active management of distribution networks”, Power Engineering, Energy and Electrical Drives, (2009). POWERENG '09. International Conference on
- [10] A.G. Madureira, J.A. Peças Lopes, ”Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids”, Renewable Power Generation, IET (December 2009)
- [11] João Abel Peças Lopes, Filipe Joel Soares, Pedro Miguel Rocha Almeida, “Identifying Management Procedures to Deal with Connection of Electric Vehicles in the Grid”, IEEE Bucharest PowerTech 2009, Bucharest, Roménia, Junho, 2009.

- [12] INTELI, Inteligência em inovação “Mobilidade eléctrica” (2010), disponível em: <http://www.mobie.pt/>, consultado em 25-05-2011.
- [13] J. A. Peças Lopes, F. J. Soares, P. M. Rocha Almeida, “Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System”, Vol.99, n.º 1, January 2011, Proceedings of the IEEE.
- [14] University of Delaware, “Vehicle to grid Technology” (2009), disponível em <http://www.udel.edu/V2G/page2/page9/page9.html>, consultado em 22-05-2011.
- [15] A. Karnama, F.O. Resende, J.A. Peças Lopes, “Optimal Management of Battery Charging of Electric Vehicles: A New Microgrid Feature”, IEEE.
- [16] V. Miranda, “Computação Evolucionária: Uma Introdução”, Versão 2.0 - Março 2005.
- [17] Cristina A. A. Cerqueira, “Estudo de variantes de optimização por enxames evolucionários de partículas (EPSO) e o seu comportamento num problema real de previsão de potência de um parque eólico”, (Outubro de 2005), INESC Porto.
- [18] M. Aguas, “Preços da energia - electricidade”, Disciplina Gestão da Energia: 2008/2009 - IST, Lisboa.
- [19] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, “Matpower’s Extensible Optimal Power Flow Architecture,” Power and Energy Society General Meeting, 2009 IEEE, pp. 1-7, July 26-30 2009.
- [20] “Renault Kangoo Express Z.E. et maxi Z.E.” (2011), disponível em: www.renault.pt, consultado em 21-02-2011
- [21] “Goods transport: Fiorino (Cargo)” (2009), disponível em: www.microvett.it/index_en.php, consultado em 21-02-2011
- [22] A.G. Madureira, “Coordinated and Optimized Management of Distribution Networks with Multi-MicroGrids”, Tese de doutoramento em engenharia electrotécnica e de computadores, (2009).
- [23] EDP Serviço Universal “Tarifa transitória de venda a clientes finais em MT”, 2011. Disponível em www.edp.pt, consultado em 25-02-2011.

Anexo A: Dados da rede utilizada no caso de estudo

Tabela A.1 – Dados correspondente aos parâmetros de geração da rede, em p.u.

Barramentos	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	Estado	Pmax	Pmin
16	0,0574	0	0	0	1	100	1	0,0574	0
30	0,0574	0	0	0	1	100	1	0,0574	0
176	0,3031	0	0	0	1	100	1	0,3031	0
191	0,3031	0	0	0	1	100	1	0,3031	0
34	0,0121	0	0	0	1	100	1	0,0121	0
36	0,0121	0	0	0	1	100	1	0,0121	0
182	1,8	0	0,72	-0,36	1	100	1	1,8	0
3	0,5786	0	0,1157	-0,058	1	100	1	0,5786	0
45	0,5786	0	0,1157	-0,058	1	100	1	0,5786	0
119	0	0	9999	-9999	1	100	1	9999	0

Tabela A.2 – Dados correspondente aos parâmetros das linhas da rede, em p.u.

De	Para	r	x	b	rateA	rateB	rateC	ratio	ângulo	Estado inicial do ramo
1	8	0,20466	0,11032	7,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
2	12	0,12677	0,06833	4,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
3	6	0,14147	0,07626	0	3	4,63	3	1	0	1
4	12	0,18143	0,0978	6,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
5	6	0,20684	0,06987	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
6	15	0,21704	0,19843	1,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
7	8	0,00551	0,00186	0	4,54	6,92	4,54	1	0	1
8	10	0,06758	0,02283	1,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
9	11	0,05531	0,02981	2,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
10	11	0,03963	0,01339	1,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
10	17	0,05181	0,02793	2,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
11	18	0,14618	0,04938	3,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
12	14	0,0268	0,01445	1,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
13	14	0,00131	0,00044	0	4,54	6,92	4,54	1	0	1
14	21	0,07935	0,04277	3,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
15	16	0,00682	0,00368	0	3	4,63	3	1	0	1
15	29	0,44081	0,40302	2,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
18	19	0,07504	0,04045	2,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
18	21	0,07795	0,02633	2,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
20	22	0,04157	0,01769	1,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
21	27	0,14618	0,04938	3,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
22	23	0,10899	0,02774	2,00E-05	3,79	5,73	3,79	1	0	1
22	27	0,14238	0,06059	4,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
23	24	0,0963	0,02451	1,00E-05	3,79	5,73	3,79	1	0	1
25	26	0,00011	4,00E-05	0	14,81	14,81	12,59	1	0	1
26	41	0,21832	0,11768	7,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
27	47	0,34953	0,14873	9,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
28	31	0,19296	0,10401	0	3	4,63	3	1	0	1
29	30	0,10493	0,05656	0	3	4,63	3	1	0	1
29	32	0,09475	0,08663	0	4,19	6,57	4,19	1	0	1
31	36	0,38226	0,20605	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
31	48	1,12407	0,6059	2,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
32	33	0,08354	0,04503	0	3	4,63	3	1	0	1
32	42	0,17402	0,1591	1,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
34	44	0,20605	0,11107	0	3	4,63	3	1	0	1
35	38	0,04483	0,02416	0	3	4,63	3	1	0	1
37	38	0,14531	0,03621	0	1,87	2,83	1,87	1	0	1
38	43	0,10391	0,05601	0	3	4,63	3	1	0	1
39	41	0,0314	0,00799	0	3,79	5,73	3,79	1	0	1
40	42	0,0039	0,0021	0	3	4,63	3	1	0	1
41	47	0,2609	0,06641	4,00E-05	3,79	5,73	3,79	1	0	1
42	49	0,42224	0,38604	2,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
43	44	0,38599	0,13038	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1

Dados correspondentes aos parâmetros das linhas da rede, em p.u. 79

43	50	0,49897	0,26896	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
44	45	0,34691	0,11718	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
46	49	0,22593	0,12178	0	3	4,63	3	1	0	1
47	55	0,20673	0,08797	5,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
48	50	0,58404	0,31481	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
48	51	0,24614	0,13268	0	3	4,63	3	1	0	1
49	59	0,37639	0,34412	1,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
50	52	0,06627	0,03572	0	3	4,63	3	1	0	1
52	54	0,14277	0,04822	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
52	57	0,28552	0,1539	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
53	55	0,09884	0,05328	3,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
55	70	0,1623	0,06906	4,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
56	57	0,25247	0,08528	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
57	78	0,47938	0,2584	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
58	62	0,19621	0,10576	0	3	4,63	3	1	0	1
59	62	0,14746	0,07949	0	3	4,63	3	1	0	1
59	83	0,26475	0,24205	1,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
60	69	0,09965	0,05371	3,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
61	68	0,18029	0,09718	0	3	4,63	3	1	0	1
62	65	0,17876	0,09636	0	3	4,63	3	1	0	1
63	78	1,00339	0,25541	1,00E-05	1,89	2,86	1,89	1	0	1
64	88	0,50419	0,27177	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
65	67	0,12297	0,06629	0	3	4,63	3	1	0	1
65	73	0,27714	0,09361	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
66	68	0,21733	0,11714	0	3	4,63	3	1	0	1
67	68	0,05699	0,03072	0	3	4,63	3	1	0	1
67	72	0,07894	0,04255	0	3	4,63	3	1	0	1
69	71	0,00666	0,00359	0	6,01	9,26	6,01	1	0	1
69	75	0,06879	0,03708	2,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
70	75	0,03785	0,0204	1,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
70	79	0,0618	0,0263	2,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
74	75	0,01762	0,0095	1,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
75	81	0,0324	0,01747	1,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
76	112	1,63373	0,41586	1,00E-05	1,89	2,86	1,89	1	0	1
77	79	0,00374	0,00201	0	6,01	9,26	6,01	1	0	1
78	99	0,4483	0,24164	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
79	93	0,14065	0,05985	4,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
80	97	0,08659	0,04667	3,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
82	83	0,59529	0,32088	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
83	87	0,09795	0,08955	0	4,19	6,57	4,19	1	0	1
84	100	0,0817	0,04404	3,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
85	94	0,05774	0,03112	2,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
86	90	0,05282	0,02847	0	3	4,63	3	1	0	1
87	90	0,12844	0,06923	0	3	4,63	3	1	0	1
87	131	0,65069	0,59491	2,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1

80 Anexo A: Dados da rede utilizada no caso de estudo

88	89	0,00409	0,00221	0	3	4,63	3	1	0	1
88	95	0,12583	0,06783	0	3	4,63	3	1	0	1
90	96	0,22143	0,11936	0	3	4,63	3	1	0	1
91	103	0,46382	0,11806	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
92	106	0,55533	0,18758	1,00E-05	2,27	3,46	2,27	1	0	1
93	94	0,06812	0,05014	3,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
93	118	0,29046	0,21382	0,00013	7,31	11,38	7,31	1	0	1
94	97	0,06368	0,04688	3,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
95	113	0,32087	0,17295	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
97	98	0,00347	0,00256	0	7,31	11,38	7,31	1	0	1
98	102	0,15296	0,1126	7,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
98	110	0,08907	0,0379	2,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
99	103	0,48533	0,2616	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
99	106	0,23129	0,12467	0	3	4,63	3	1	0	1
100	101	0,00144	0,00049	0	4,54	6,92	4,54	1	0	1
100	102	0,00828	0,00447	0	6,01	9,26	6,01	1	0	1
102	107	0,04855	0,03574	2,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
103	108	0,30991	0,16705	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
104	111	0,01708	0,00617	0,00023	14,81	14,81	12,59	1	0	1
105	112	0,29015	0,07386	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
106	115	0,30374	0,16372	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
107	109	0,00131	0,00044	0	4,54	6,92	4,54	1	0	1
107	117	0,08802	0,0648	4,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
108	116	0,84088	0,45326	2,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
108	134	1,22494	0,31181	1,00E-05	1,89	2,86	1,89	1	0	1
110	114	0,00012	9,00E-05	0	6,66	10,17	6,66	1	0	1
111	118	0,07538	0,03208	2,00E-05	5,26	8,05	5,26	1	0	1
112	132	1,35143	0,34401	1,00E-05	1,89	2,86	1,89	1	0	1
113	136	1,00064	0,53937	2,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
115	125	0,40964	0,22081	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
116	120	0,55144	0,29724	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
116	140	0,81829	0,27641	1,00E-05	2,27	3,46	2,27	1	0	1
117	127	0,09776	0,03302	2,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
117	165	0,29891	0,22004	0,00014	7,31	11,38	7,31	1	0	1
118	119	0,04871	0,03585	2,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
120	121	0,00643	0,00164	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
120	126	0,29643	0,15978	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
122	132	0,24559	0,13238	0	3	4,63	3	1	0	1
123	126	0,05425	0,02924	0	3	4,63	3	1	0	1
124	125	0,01575	0,00532	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
125	166	0,74554	0,40186	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
126	129	0,3266	0,08314	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
127	130	0,02257	0,00762	0	4,54	6,92	4,54	1	0	1
127	152	0,19827	0,06697	4,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
128	129	0,14434	0,04876	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
129	136	0,19184	0,04883	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1

Dados correspondentes aos parâmetros das linhas da rede, em p.u. 81

131	133	0,00884	0,00476	0	3	4,63	3	1	0	1
131	137	0,12234	0,11185	0	4,19	6,57	4,19	1	0	1
132	137	0,36948	0,09405	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
134	135	0,06246	0,0211	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
134	142	0,35305	0,08987	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
136	156	0,97439	0,24803	1,00E-05	1,89	2,86	1,89	1	0	1
137	173	0,62798	0,57414	2,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
138	139	0,00884	0,00171	1,00E-05	5,46	5,46	4,64	1	0	1
138	146	0,20596	0,11102	0	3	4,63	3	1	0	1
140	148	0,21258	0,07181	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
140	154	0,43093	0,14556	1,00E-05	2,27	3,46	2,27	1	0	1
141	148	0,18004	0,06081	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
142	146	0,12864	0,03275	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
142	153	0,32778	0,17668	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
143	145	0,03327	0,01124	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
144	162	0,76684	0,1952	1,00E-05	1,89	2,86	1,89	1	0	1
145	148	0,03182	0,01075	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
146	147	0,0486	0,01237	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
147	149	0,00652	0,00368	0	2,84	4,31	2,84	1	0	1
150	151	0,00404	0,00091	3,00E-05	10,91	10,91	9,28	1	0	1
151	152	0,03031	0,01024	1,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
152	161	0,07033	0,02376	1,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
153	155	0,1286	0,04344	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
153	164	0,22707	0,1224	0	3	4,63	3	1	0	1
156	158	0,42556	0,22939	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
156	189	1,15133	0,29307	1,00E-05	1,89	2,86	1,89	1	0	1
157	167	0,22837	0,1231	0	3	4,63	3	1	0	1
159	162	0,0523	0,02819	0	3	4,63	3	1	0	1
159	168	0,26014	0,06622	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
159	179	0,36286	0,19559	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
160	161	0,00131	0,00044	0	4,54	6,92	4,54	1	0	1
161	180	0,10655	0,03599	2,00E-05	4,54	6,92	4,54	1	0	1
162	163	0,03411	0,01839	0	3	4,63	3	1	0	1
165	197	0,12097	0,08905	6,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
165	204	0,16803	0,09057	5,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
166	169	0,01995	0,00674	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
166	177	0,14716	0,07932	0	3	4,63	3	1	0	1
167	168	0,27106	0,09156	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
167	170	0,02958	0,00999	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
168	171	0,23227	0,05912	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
171	175	0,05852	0,01026	4,00E-05	4,03	4,03	3,42	1	0	0
172	173	0,07138	0,02411	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
173	179	0,06652	0,06082	0	4,19	6,57	4,19	1	0	1
174	176	0,07064	0,02209	9,00E-05	7,4	7,4	6,29	1	0	1
174	185	0,12671	0,02624	8,00E-05	5,07	5,07	4,31	1	0	1

82 Anexo A: Dados da rede utilizada no caso de estudo

175	176	0,01297	0,00406	2,00E-05	7,4	7,4	6,29	1	0	1
176	182	0,07297	0,01279	5,00E-05	4,03	4,03	3,42	1	0	0
177	183	0,06335	0,03415	0	3	4,63	3	1	0	1
178	183	0,03359	0,01135	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
179	194	0,11421	0,10442	0	4,19	6,57	4,19	1	0	1
181	184	0,02224	0,00695	3,00E-05	7,4	7,4	6,29	1	0	1
181	188	0,09305	0,00827	2,00E-05	2,6	2,6	2,21	1	0	1
182	184	0,03409	0,01066	4,00E-05	7,4	7,4	6,29	1	0	1
183	203	0,60812	0,32779	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
185	186	0,01927	0,00431	2,00E-05	4,78	4,78	4,06	1	0	1
185	191	0,06311	0,01225	4,00E-05	5,46	5,46	4,64	1	0	1
186	187	0,00317	0,00066	0	5,07	5,07	4,31	1	0	1
187	190	0,03767	0,00843	4,00E-05	4,78	4,78	4,06	1	0	1
188	193	0,18639	0,02421	8,00E-05	3,35	3,35	2,85	1	0	1
189	192	0,07147	0,01819	0	1,89	2,86	1,89	1	0	1
189	196	0,28764	0,09716	0	2,27	3,46	2,27	1	0	1
190	201	0,4383	0,23626	1,00E-05	3	4,63	3	1	0	1
191	193	0,01112	0,00249	1,00E-05	4,78	4,78	4,06	1	0	1
194	202	0,20906	0,19113	1,00E-05	4,19	6,57	4,19	1	0	1
194	208	0,99573	0,24813	1,00E-05	1,87	2,83	1,87	1	0	1
195	197	0,00081	0,00044	0	6,01	9,26	6,01	1	0	1
196	199	0,12117	0,02351	7,00E-05	5,46	5,46	4,64	1	0	1
197	198	0,00559	0,00412	0	7,31	11,38	7,31	1	0	1
198	200	0,04726	0,03479	2,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
198	207	0,09892	0,05332	3,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
200	206 ₃	0,03857	0,02839	2,00E-05	7,31	11,38	7,31	1	0	1
201	206	0,01024	0,0032	1,00E-05	7,4	7,4	6,29	1	0	1
202	206	0,0098	0,00307	1,00E-05	7,4	7,4	6,29	1	0	1
203	206	0,00721	0,00225	1,00E-05	7,4	7,4	6,29	1	0	1
204	205	0,00333	0,00179	0	6,01	9,26	6,01	1	0	1
204	209	0,04978	0,02683	2,00E-05	6,01	9,26	6,01	1	0	1
206	206 ₃	0	1,158	0	5	5	5	1,03	0	1
206	206 ₃	0	1,158	0	5	5	5	1,03	0	1

Tabela A.3 – Dados correspondente aos parâmetros dos barramentos da rede, em p.u.

Barramentos	Tipo de barramento	Pd	Qd	Gs	Bs	area	Vm	Va	baseKV	zone	maxVm	minVm
1	1	0,032	0,0032	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
2	1	0,008	0,0008	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
3	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
4	1	0,0135	0,00135	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
5	1	0,0285	0,00285	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
6	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
7	1	0,0175	0,00175	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
8	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
9	1	0,0145	0,00145	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
10	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
11	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
12	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
13	1	0,0125	0,00125	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
14	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
15	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
16	1	0,037	0,00368	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
17	1	0,0045	0,00045	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
18	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
19	1	0,001	0,0001	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
20	1	0,2145	0,02145	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
21	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
22	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
23	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
24	1	0,0165	0,00165	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
25	1	0,078	0,0078	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
26	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
27	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
28	1	0,0035	0,00035	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
29	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
30	1	0,037	0,00368	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
31	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
32	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
33	1	0,0185	0,00185	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
34	1	0,0151	0,00152	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
35	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
36	1	0,0151	0,00152	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
37	1	0,0028	0,00028	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
38	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
39	1	0,0015	0,00015	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
40	1	0,0105	0,00105	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
41	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
42	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
43	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9

84 Anexo A: Dados da rede utilizada no caso de estudo

44	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
45	1	0,006	0,0006	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
46	1	0,014	0,0014	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
47	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
48	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
49	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
50	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
51	1	0,0015	0,00015	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
52	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
53	1	0,018	0,0018	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
54	1	0,0445	0,00445	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
55	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
56	1	0,0325	0,00325	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
57	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
58	1	0,0155	0,00155	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
59	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
60	1	0,0085	0,00085	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
61	1	0,0337	0,00337	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
62	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
63	1	0,0375	0,00375	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
64	1	0,001	0,0001	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
65	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
66	1	0,0545	0,00545	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
67	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
68	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
69	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
70	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
71	1	0,0355	0,00355	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
72	1	0,0083	0,00083	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
73	1	0,0035	0,00035	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
74	1	0,0325	0,00325	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
75	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
76	1	0,0095	0,00095	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
77	1	0,011	0,0011	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
78	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
79	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
80	1	0,01	0,001	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
81	1	0,0235	0,00235	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
82	1	0,026	0,0026	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
83	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
84	1	0,0005	4,80E-05	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
85	1	0,0135	0,00135	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
86	1	0,0035	0,00035	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
87	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
88	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
89	1	0,0035	0,00035	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9

Dados correspondentes aos parâmetros dos barramentos da rede, em p.u. 85

90	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
91	1	0,054	0,0054	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
92	1	0,0325	0,00325	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
93	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
94	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
95	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
96	1	0,0165	0,00165	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
97	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
98	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
99	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
100	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
101	1	0,0075	0,00075	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
102	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
103	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
104	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
105	1	0,012	0,0012	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
106	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
107	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
108	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
109	1	0,013	0,0013	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
110	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
111	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
112	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
113	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
114	1	0,234	0,0234	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
115	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
116	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
117	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
118	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
119	3	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
120	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
121	1	0,0205	0,00205	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
122	1	0,0105	0,00105	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
123	1	0,026	0,0026	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
124	1	0,028	0,0028	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
125	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
126	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
127	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
128	1	0,021	0,0021	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
129	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
130	1	0,0075	0,00075	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
131	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
132	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
133	1	0,0165	0,00165	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
134	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9

86 Anexo A: Dados da rede utilizada no caso de estudo

135	1	0,001	0,0001	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
136	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
137	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
138	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
139	1	0,125	0,0125	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
140	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
141	1	0,015	0,0015	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
142	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
143	1	0,004	0,0004	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
144	1	0,005	0,0005	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
145	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
146	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
147	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
148	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
149	1	0,008	0,0008	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
150	1	0,0705	0,00705	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
151	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
152	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
153	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
154	1	0,0155	0,00155	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
155	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
156	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
157	1	0,019	0,0019	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
158	1	0,011	0,0011	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
159	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
160	1	0,0025	0,00025	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
161	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
162	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
163	1	0,002	0,0002	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
164	1	0,0115	0,00115	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
165	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
166	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
167	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
168	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
169	1	0,003	0,0003	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
170	1	0,0105	0,00105	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
171	1	0,02	0,002	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
172	1	0,0035	0,00035	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
173	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
174	1	0,064	0,0064	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
175	1	0,0285	0,00285	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
176	1	0,1814	0,01814	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
177	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
178	1	0,018	0,0018	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
179	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
180	1	0,0085	0,00085	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9

Dados correspondentes aos parâmetros dos barramentos da rede, em p.u. 87

181	1	0	0	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
182	1	0,013	0,0013	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
183	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
184	1	0,0155	0,00155	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
185	1	0,0435	0,00435	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
186	1	0	0	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
187	1	0	0	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
188	1	0	0	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
189	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
190	1	0,161	0,0161	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
191	1	0,1814	0,01816	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
192	1	0,0065	0,00065	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
193	1	0	0	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
194	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
195	1	0,0025	0,00025	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
196	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
197	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
198	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
199	1	0,0132	0,00132	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
200	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
201	1	0	0	0	0	1	1	0	15	2	1,1	0,9
202	1	0	0	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
203	1	0	0	0	0	1	1	0	15	4	1,1	0,9
204	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
205	1	0,055	0,0055	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
206	1	0	0	0	0	1	1	0	15	1	1,1	0,9
207	1	0,0105	0,00105	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
208	1	0,008	0,0008	0	0	1	1	0	15	3	1,1	0,9
209	1	0,0105	0,00105	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9
2063	1	0	0	0	0	1	1	0	30	1	1,1	0,9