



Leonor Fernandes Trovão

Avaliação do Impacto do Carregamento de Veículos Eléctricos numa Rede de Distribuição

Setembro 2011



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Avaliação do Impacto do Carregamento de Veículos Eléctricos numa Rede de Distribuição

Leonor Fernandes Trovão

Júri:

Presidente: Professor Doutor Jaime Batista dos Santos

Orientador: Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Vogal: Professor Doutor Manuel Marques Crisóstomo

Coimbra, Setembro de 2011



Laboratório de Gestão de Energia

Ano Lectivo de 2010/2011

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

– Especialização em Energia –

Avaliação do Impacto do Carregamento de Veículos Eléctricos numa Rede de Distribuição

Aluno:

Leonor Fernandes Trovão

Orientador:

Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

“Querer é quase sempre poder, o que é excessivamente raro é o querer.”

Alexandre Herculano

Agradecimentos

Durante este trabalho houve avanços e recuos, mas foram eles que fizeram com que este projecto fosse um interessante desafio. Todavia, muitas foram as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação. Umhas pelo tempo, meios ou conhecimentos que generosamente puseram à minha disposição e outras com a sua compreensão, apoio e dedicação.

De entre todos, e correndo o risco de me esquecer de alguém, gostaria de agradecer em primeiro lugar, ao meu orientador, Prof. Doutor Humberto Jorge, o apoio e orientação prestada ao longo deste trabalho e a contribuição na revisão do texto da dissertação.

Ao Prof. Paulo Pereirinha e ao ISEC, por me ter facultado acesso a equipamentos para realizar as monitorizações, que foram uma mais-valia e um excelente complemento a este trabalho.

Gostaria também de agradecer ao INESC Coimbra por me ter dado a oportunidade de participar na minha primeira conferência internacional, onde contactei com outras abordagens sobre esta temática, e pude apresentar e discutir a metodologia aqui proposta.

Aos meus colegas do LGE, agradeço o incentivo e ambiente de camaradagem que me proporcionaram ao longo deste trabalho.

Ao Hugo pela paciência...

Ao João Pedro pela inspiração que me levou a escolher Engenharia Electrotécnica, bem como pelo constante apoio, partilha de conhecimentos e experiências.

À Donzília pelo companheirismo, motivação e apoio incondicional.

À Mariana, pelos pequenos momentos de boa disposição que me proporcionou.

Finalmente, aos meus Pais porque sem eles nada disto seria possível!

A todos, o meu sincero obrigado.

Leonor

Resumo

A preocupação ambiental hoje existente e o constante aumento do preço dos combustíveis fósseis fomentam o desenvolvimento e a utilização do Veículo Eléctrico. A sua utilização acarreta um acréscimo de consumo de energia eléctrica devido à necessidade diária de carregar as suas baterias, portanto, o veículo eléctrico apresenta-se como uma nova carga no sector residencial. Não sendo esta uma carga linear devido à especificidade do seu carregador, que a torna, do ponto de vista da rede, numa carga não linear, leva ao aparecimento de um conjunto de preocupações para o distribuidor de energia eléctrica. Logo, impõe-se uma análise cuidada a várias variáveis intrínsecas ao sistema de energia eléctrica, sobretudo ao nível da rede de distribuição de baixa tensão.

Assim, neste trabalho, efectuou-se um estudo do impacto, sobre diversas características da rede de distribuição, causado pelo aumento da procura de energia, por parte do carregamento dos veículos eléctricos numa rede de distribuição de baixa tensão. Foram implementados e comparados possíveis cenários de carregamento e analisada a sua influência nas principais variáveis do sistema de baixa tensão, tais como: alteração dos perfis de consumo, aumento do trânsito de energia reactiva, evolução do factor de potência e do valor eficaz da tensão de alimentação. Estudou-se o efeito da utilização massiva dos carregadores de baterias no aumento da distorção harmónica, e sobretudo procurou-se identificar e validar possíveis soluções que permitissem, com as redes actualmente existentes, manter um fornecimento de qualidade a todos os consumidores, minimizando o investimento em alterações estruturais das redes de distribuição de energia eléctrica.

O estudo realizado é baseado numa abordagem metodológica, onde se desenvolveram e aplicaram vários cenários de carregamento, através de simulações realizadas em ambiente MATLAB/SIMULINK[®]. No caso particular do estudo da degradação da distorção harmónica, utilizou-se a teoria de desagregação da potência aparente em componente fundamental e componente não fundamental. Os estudos realizados indicam que o futuro carregamento massivo de veículos eléctricos só poderá ser efectivo nas actuais rede de distribuição, se monitorizado e sobretudo controlado, não só do ponto de vista do aumento da procura de energia, mas também, do aumento da potência aparente não fundamental. A metodologia proposta de carregamento com nivelamento de carga revelou-se poder ser uma excelente ajuda nessa matéria.

Palavras-chave: Veículo Eléctrico; Rede de distribuição; Procura/Oferta de energia; Distorção harmónica; Estratégias de carregamento.

Abstract

The environmental concern existing today and the constant increase in fossil fuel prices encourage the development and use of the Electric Vehicle. The EV's use leads to an increase in electricity consumption due to the daily needs to load its batteries. So, the EV is representing a new load in the residential sector. In addition, this is not a linear load due to the specificity of its charger, which makes it, from the point of view of the network, a nonlinear load. This brings a set of concerns for the electricity supplier and requires a careful consideration of many intrinsic variables of the electric power system, particularly in terms of the low voltage distribution.

Therefore, in this work, a study of the impact on various characteristics of the distribution network, caused by increased demand for energy by charging EV on a low-voltage distribution network, is done. Charging scenarios were implemented and compared, and their influences are analyzed in the fundamental variables of the low voltage system, such as: changing consumption patterns, reactive power increases, power factor evolution and RMS voltage values. The effect of widespread use of EV battery chargers in the increase of harmonic distortion is also studied, in order to especially identify and validate possible solutions that allow, with the existing networks, supplying all consumers with a good power quality, minimizing the investment in structural changes of the electricity distribution networks.

The study is based on a methodological approach, which developed and applied various charging scenarios through simulations in MATLAB/SIMULINK[®]. In the specific case study of the harmonic distortion degradation, the apparent power decomposition theory in fundamental component and non-fundamental component is used. The results indicate that the future massive EV charging can only be effective in the current distribution network, especially if monitored and controlled, not only from the standpoint of increased energy demand, but also the increase of non-fundamental apparent power. The proposed method of the load levelling control can be proved to be a great help in this subject.

Keywords: Electric Vehicle; Distribution network; Energy supply and energy demand; Harmonic distortion; Charging strategies.

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Siglas e Acrónimos.....	xv
Simbologia	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Organização da Dissertação.....	3
1.4. Publicações científicas.....	4
2. Abordagem Metodológica.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Modelo Considerado.....	5
2.3. Perfis de Procura e Oferta.....	7
2.4. Metodologia de Carregamento não Controlado.....	8
2.5. Metodologia de Carregamento com Incentivo Tarifário	9
2.6. Metodologia de Carregamento com Nivelamento de Carga	9
2.7. Casos de estudo	11
2.7.1. Carregamento não Controlado	11
2.7.2. Carregamento Controlado com Incentivo Tarifário	12
2.7.3. Carregamento com Nivelamento de Carga.....	13
3. Monitorização do carregamento de baterias.....	15
3.1. Introdução.....	15
3.2. Analisador de Rede.....	15
3.3. Caracterização dos Carregadores.....	16
3.3.1. Carregador Trifásico de Baterias Ácido-Chumbo.....	18
3.3.2. Carregador Monofásico de Baterias NiMH	20
4. Simulação de uma rede de distribuição com cargas não lineares	23
4.1. Introdução.....	23
4.2. Utilização do SIMULINK®	24
4.3. Blocos utilizados na Implementação do Modelo Global em SIMULINK®	25
4.3.1. Fonte Trifásica.....	25

4.3.2.	Linhas de Transmissão e Distribuição	26
4.3.3.	Transformador	27
4.3.4.	Carga Trifásica Programável	28
4.3.5.	Carga Monofásica Programável	29
4.3.6.	Aparelhos de Medida e Registo dos Dados	29
4.4.	Modelo global	30
5.	Estudo de casos	31
5.1.	Introdução	31
5.2.	Estudo por Simulação	31
5.2.1.	Construção da Rede de BT	31
5.2.2.	Transformador	32
5.2.3.	Consumidores	32
5.3.	Cenário sem Veículos Eléctricos	33
5.4.	Carregamento Não Controlado	34
5.5.	Carregamento com Incentivo Tarifário	36
5.6.	Cenário Misto	37
5.7.	Nivelamento de Carga	38
6.	Distorção harmónica	41
6.1.	Introdução	41
6.2.	Topologias Tradicionais de Carregadores	42
6.3.	Análise da distorção harmónica	43
6.3.1.	Harmónicos causados pelos rectificadores	43
6.3.2.	Quantificação da distorção harmónica	44
6.4.	Análise da Distorção harmónica dos Carregadores de Baterias	45
6.4.1.	Carregador trifásico – Baterias de ácido-chumbo	45
6.4.2.	Carregador monofásico:	47
6.5.	Estudo do Aumento da Potência Aparente Não Fundamental	49
6.6.	Minimização de Problemas Relacionados com Poluição Harmónica	55
7.	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	57
7.1.	Conclusões	57
7.2.	Conclusões ao Trabalho Desenvolvido	57
7.3.	Trabalhos Futuros	59
8.	Referências Bibliográficas	61

9. Anexos.....	65
9.1. Consumidores Monofásicos – Resultados de Simulação	65
9.2. Consumidores Trifásicos - Resultados de Simulação.....	69

Lista de Figuras

Figura 1: Distribuição normal	6
Figura 2: Diagrama de carga tipicamente doméstico.	7
Figura 3: Algoritmo da estratégia do nivelamento de carga para N Veículos.	10
Figura 4: Impacto dos VE dia típico inverno – carregamento não controlado	11
Figura 5: Impacto dos VE dia típico verão – carregamento não controlado.....	11
Figura 6: Impacto dos VE dia típico de inverno – carregamento com incentivo tarifário	12
Figura 7: Impacto dos VE dia típico de verão – carregamento com incentivo tarifário	13
Figura 8: Impacto dos VE dia típico de inverno para o cenário nivelamento de carga.	13
Figura 9: Impacto dos VE dia típico de verão para o cenário nivelamento de carga.	14
Figura 10: Hioki 3197	16
Figura 11: Veículos eléctricos estudados: a) empilhador industrial; b) Veículo eléctrico citadino	17
Figura 12: a) carregador trifásico para o empilhador; b) <i>Pack</i> de baterias de ácido-chumbo de 48V; c) carregador monofásico e módulo de baterias NiMH	18
Figura 13: Algoritmo de carga das baterias ácido-chumbo usado pelo carregador trifásico [21]	18
Figura 14: Potência activa e reactiva do carregador trifásico	19
Figura 15: Factor potência do carregador trifásico	20
Figura 16: Algoritmo de carga das baterias usado pelo carregador monofásico [22].	20
Figura 17: Potência activa e reactiva do carregador monofásico.....	21
Figura 18: Factor potência do carregador monofásico.....	21
Figura 19: Biblioteca de blocos do SIMULINK®	25
Figura 20: Bloco do SIMULINK® “ <i>3-phase programmable source</i> ” e respectiva caixa de diálogo.....	26
Figura 21: Bloco do SIMULINK® “ <i>3-phase RLC series element</i> ” e respectiva caixa de diálogo.....	26
Figura 22: Bloco do SIMULINK® “ <i>3-Phase Saturable Transformer</i> ” e respectiva caixa de diálogo.....	27
Figura 23: Esquema equivalente por fase do transformador trifásico.....	27
Figura 24: Bloco do SIMULINK® “ <i>3-Phase Dynamic Load</i> ” e respectiva caixa de diálogo..	28

Figura 25: Bloco do SIMULINK® “ <i>Single-Phase Dynamic Load</i> ” e respectiva caixa de diálogo.....	29
Figura 26: Blocos do SIMULINK® “ <i>3-phase RLC series element</i> ”, “ <i>Three-Phase V-I Measurement</i> ” respectiva caixa de diálogo, “ <i>RMS, PQ, THD Measurement</i> ” e “ <i>Save to Workspace</i> ”	30
Figura 27: Vista global da implementação de uma rede de distribuição com Blocos do SIMULINK®	30
Figura 28: Vista global da implementação de uma rede de distribuição com Blocos do SIMULINK®	31
Figura 29: Monitorização da BT do transformador para o cenário sem VE	34
Figura 30: Monitorização da BT do transformador para o cenário não controlado.....	35
Figura 31: Monitorização da BT do transformador para o cenário com incentivo tarifário. ...	36
Figura 32: Monitorização da BT do transformador para o cenário misto.....	38
Figura 33: Monitorização da BT do transformador para o cenário de nivelamento de carga..	39
Figura 34: Representação de uma rede de distribuição e proliferação dos harmónicos resultantes de cargas não lineares.....	42
Figura 35: Espectro da distorção harmónica da corrente absorvida por um carregador monofásico e trifásico ($P = 4$ e $P = 6$).....	43
Figura 36: curva da tensão de um carregador trifásico.	45
Figura 37: Curva da corrente de um carregador trifásico.....	46
Figura 38: Carregador trifásico - evolução dos valores de THD_i para uma carga completa....	46
Figura 39: Carregador trifásico - evolução dos valores da corrente RMS para uma carga completa.	46
Figura 40: Curva da tensão para um carregador monofásico.....	47
Figura 41: Curva da corrente para um carregador monofásico.....	47
Figura 42: Registo do THD_v para uma carga completa de um carregador monofásico.....	47
Figura 43: Carregador monofásico - evolução dos valores de THD_i para uma carga completa.	48
Figura 44: Carregador monofásico - evolução dos valores de corrente RMS para uma carga completa.	48
Figura 45: Desagregação da potência aparente total, em fundamental e não fundamental, para o carregador monofásico durante uma carga completa.....	51

Figura 46: Desagregação da potência aparente total, em fundamental e não fundamental, para o carregador trifásico durante uma carga completa	51
Figura 47: Evolução diária das taxas de distorção harmónica da tensão e da corrente na Baixa tensão do transformador de distribuição sem VEs.	52
Figura 48: Desagregação da potência aparente total, em fundamental e não fundamental, na baixa tensão do transformador	53
Figura 49: Evolução da potência aparente total na baixa tensão do transformador para a estratégia de carregamento baseada no controlo de carga.....	54
Figura 50: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário sem VE.....	65
Figura 51: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário não controlado.....	65
Figura 52: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário com incentivo tarifário....	66
Figura 53: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário misto.....	66
Figura 54: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário de nivelamento de carga .	67
Figura 55: Resultados para os consumidores trifásicos para o cenário sem VE	69
Figura 56: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário não controlado.....	69
Figura 57: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário com incentivo tarifário	70
Figura 58: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário misto.....	70
Figura 59: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário de nivelamento de carga..	71

Lista de Tabelas

Tabela 1: Preços da electricidade (EDP 2011) e o custo do carregamento VE com carga média.	9
Tabela 2: Características das baterias e respectivos carregadores.	17
Tabela 3: Desagregação dos consumidores de uma rede de baixa tensão	32

Lista de Siglas e Acrónimos

<i>Sigla</i>	<i>Significado</i>
AC	<i>Alternate Current</i> (Corrente Alternanda)
DC	<i>Direct Current</i> (corrente Contínua)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
VE	Veículo(s) Eléctrico(s)
BT	Baixa Tensão (tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1 kV)
BTN	Instalação em baixa tensão com uma potência contratada igual ou inferior a 41,4kVA.
DF	<i>Displacement Factor</i> (Factor de Deslocamento)
NiMH	<i>Nickel-metal hydride battery</i> (A bateria de níquel-hidreto metálico)
VEIL	Veículo Eléctrico Isento de Licença de condução (IPC-ISEC ©)
PT	Posto de Transformação
V2G	<i>Vehicle-to-grid</i> (conceito de injectar energia do VE na rede de energia eléctrica)
EU	<i>European Union</i> (União Europeia)
QEE	Qualidade de Energia Eléctrica
P_{dem_i}	Necessidade energética no instante i
P_{cont_i}	Procura de energia no instante i
PEV_i	Necessidade energética dos VE no instante i
$P_{dem_{MAX}}$	Pico máximo de necessidade energética
TN	Tensão Nominal
BS	Baterias em Série
D	Ligação Triângulo do lado da alta tensão do transformador
yn	Ligação Estrela com neutro acessível do lado da baixa tensão do transformador
S_T	Potência Aparente Total (Método do <i>IEEE Working Group</i>)
SEE	Sistema de Energia Eléctrica
S_1	Potência Aparente fundamental
S_N	Potência Aparente Não fundamental (Método do <i>IEEE Working Group</i>)
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmónica Total)

Simbologia

<i>Símbolo</i>	<i>Nome/Significado</i>	<i>Unidade</i>	<i>Abreviatura</i>
P	Potência Eléctrica Activa	Watt	W
Q	Potência Eléctrica Reactiva	Volt-ampére-reactivo	Var
S	Potência Eléctrica Aparente	Volt-ampére	VA
D	Potência de Distorção	Volt-ampére	VA
λ	Factor de Potência	Adimensional	--
V	Tensão (Valor Eficaz)	Volt	V
I	Corrente (Valor Eficaz)	Ampére	A
f	Frequência	Hertz	Hz
ω	Frequência angular	Radiano/Segundo	Rad/s
R	Resistência óhmica	Ohm	Ω
L	Indutância	Henry	H
C	Capacidade	Farad	F
Z	Impedância	Ohm	Ω
p	Índice de pulsação	Adimensional	--
ϕ	Ângulo de Fase	Radianos, graus	rad, °
u	Média	Adimensional	--
σ	Desvio Padrão	Adimensional	--
$f(X)$	Densidade de probabilidade	Adimensional	--
a	Coefficiente da série trigonométrica de Fourier	Adimensional	--
b	Coefficiente da série trigonométrica de Fourier	Adimensional	--
k	Constante	Adimensional	--
i	Constante	Adimensional	--

Subscritos

h, H	Ordem harmónica	1	Termo fundamental	n	Nominal
i	Corrente ou instante temporal	v	Tensão	N	Não Fundamental

1. Introdução

1.1. Motivação

Actualmente os combustíveis fósseis ainda representam uma grande parte das fontes de energia primária, o que faz com que se esteja muito dependente da economia do petróleo.

Na União Europeia (EU), entre 1970 e 2000, a mobilidade de passageiros duplicou, onde em média cada indivíduo viaja cerca de 35 km/dia. Uma consequência directa do aumento dessa mobilidade é o crescente aumento de consumo de energia no sector dos transportes, ou seja um aumento ao recurso do petróleo e seus derivados.

A título de exemplo, em 2007, o consumo nacional de petróleo foi de 54% do total de energia consumida, o que representa mais de metade. [1]

Como forma de tentar minimizar essa dependência, surge a introdução na rede eléctrica das energias renováveis conjuntamente com a introdução no sistema dos transportes dos veículos eléctricos híbridos e dos veículos eléctricos, nos quais se antevê a possibilidade de recarga pela rede [2]. Os veículos eléctricos são essencialmente baseados em sistemas de armazenamento de energia, onde se destaca principalmente as baterias. Entre outras vantagens, está-se perante sistemas recarregáveis em larga escala, onde se pode armazenar energia eléctrica. Esta particularidade acarreta preocupações crescentes aos distribuidores de energia visto poder alterar completamente os perfis de procura de energia.

Conhecendo os problemas ambientais hoje existentes e directamente relacionados com o transporte de pessoas e bens, o veículo eléctrico particular surge como uma tentativa de minimizar os impactos ambientais nefastos dos transportes convencionais e diminuir o deficit energético fundamentalmente dependente do petróleo. Assim os veículos eléctricos apresentam-se como uma alternativa aos veículos de combustíveis fósseis e conduzem a um desenvolvimento sustentável da mobilidade. Estes poderão ser um auxílio para a rede em termos de uniformização do diagrama de carga, quando acompanhados por um carregamento controlado e terem um carácter de armazenamento operacional, que poderá ser uma ajuda na gestão da energia produzida pelas fontes de energia renovável e na gestão da distribuição de energia eléctrica de proximidade.

Apesar das inúmeras vantagens que o veículo eléctrico apresenta na sua utilização, este padece de algumas desvantagens tais como a vida útil das baterias (2000-5000 ciclos), o problema da sua reciclagem, e a necessidade, quando recarregados pela rede eléctrica, de recorrer a conversores de electrónica de potência, comportando-se assim como cargas não

lineares e portanto responsáveis pelo aumento do índice da poluição harmónica na rede eléctrica que o vai recarregar.

Os carregadores de baterias são equipamentos com uma grande componente não linear devido ao seu princípio de funcionamento e à presença de elementos semicondutores de comutação de energia. Portanto, os harmónicos de corrente e de tensão provocados pela ligação do carregador são em geral bastante elevados. Estes podem degradar rapidamente a qualidade da energia eléctrica hoje existente nas redes de distribuição e, por conseguinte, afectar os consumidores em geral. [3] [4]

Assim, as principais motivações subjacentes a este trabalho prendem-se com a avaliação dos impactos da entrada massiva dos veículos eléctricos, do ponto vista do seu recarregamento pela rede eléctrica, tanto ao nível da alteração dos perfis de consumo, respectivo aumento do trânsito de energia activa, bem como ao nível do aumento da distorção harmónica resultante da utilização dos carregadores, e principalmente identificar e validar possíveis soluções metodológicas que permitem, com as redes actualmente existente, manter a qualidade da energia fornecida aos consumidores, minimizando o investimento em alterações estruturais das redes de distribuição de energia eléctrica.

1.2. Objectivos

Esta dissertação tem como principais objectivos o estudo e avaliação do impacto do recarregamento de veículos eléctricos numa rede de distribuição de baixa tensão, analisando vários cenários de recarregamentos. A base do estudo apresentado é a situação em que não existe nenhum carregamento, portanto sem qualquer veículo eléctrico ligado à rede eléctrica, crescendo para um aumento gradual do número de veículos a carregar, até um máximo de 100%, o que significa que cada consumidor doméstico terá pelo menos um veículo eléctrico em casa com necessidade de carregamento. O referido estudo foi orientado para as variáveis fundamentais e determinantes de qualquer sistema de energia eléctrica, a saber, alterações ao nível da procura de energia, potência activa e reactiva, flutuação do valor eficaz da tensão à saída do transformador de baixa tensão e finalmente a degradação da distorção harmónica, quantificada pela potência aparente não fundamental. Também é objectivo deste trabalho apresentar e validar soluções metodológicas de controlo dos carregamentos sem recurso a alterações estruturais das redes de distribuição de energia eléctrica. As metodologias estudadas são o carregamento descontrolado, carregamento com incentivos tarifários, carregamento misto onde se considera que apenas uma pequena percentagem de

consumidores possuem contratos com incentivos tarifários, e finalmente o carregamento de carga controlada. Esta última metodologia foi desenvolvida para fazer face aos problemas registados a partir do estudo das anteriores e pretende reduzir ao mínimo os impactos registados pela introdução massiva do carregamento doméstico de veículos eléctricos.

1.3. Organização da Dissertação

O capítulo 1 faz uma ligeira introdução à entrada de uma nova carga no sector eléctrico, o veículo eléctrico. Apresentando as principais motivações para este trabalho, objectivos e organização da dissertação. De seguida, no capítulo 2, é feita uma abordagem metodológica do estudo e apresentação dos conceitos utilizados no trabalho, nomeadamente, os cenários estudados e as metodologias que pretendem minimizar os impactos dos carregamentos massivos de veículos eléctricos.

No capítulo 3, para validar com os conceitos e as conclusões apresentados no capítulo anterior, é apresentada a realização de monitorizações efectuadas para cargas completas de dois tipos de baterias actualmente utilizadas em veículos eléctricos e os resultados obtidos.

Após a obtenção de diagramas de carga reais de carregamentos completos de baterias utilizadas em veículos eléctricos, o capítulo 4 é reservado à descrição do modelo de simulação em MATLAB/SIMULINK[®] utilizado para implementação de um estudo em maior escala e impacto das cargas em estudo nos equipamentos que compõem a rede de distribuição, nomeadamente o transformador.

No capítulo 5 é feita a exposição dos resultados no secundário do transformador de uma rede de distribuição de energia eléctrica, obtidos através de simulações utilizando uma distribuição real de vários perfis de consumidores de baixa tensão, os diagramas de carga dos carregadores, os cenários apresentados no capítulo 2 e um crescente incremento do número de veículos na rede.

No capítulo 6 aborda-se de forma particular o tema da distorção harmónica através da avaliação do aumento da potência aparente não fundamental, apresentando-se resultados em diversos pontos da rede e fez-se uma análise quantitativa do aumento da distorção. Além disso discutiu-se possíveis soluções de minimização da distorção harmónica.

Por último, no capítulo 7 são expostas as conclusões alcançadas e sugestões de trabalhos futuros.

1.4. Publicações científicas

Artigo publicado e apresentado:

Leonor Trovão, Humberto M. Jorge, “*Power Demand Impacts of the Charging of Electric Vehicles on the Power Distribution Network in a Residential Area*”, 3rd International Youth Conference on Energetics 2011, Leiria, Portugal, 7-9 Jul. 2011.

Artigo aceite para publicação e apresentação:

João P. Trovão, Paulo G. Pereirinha, Leonor Trovão, Humberto M. Jorge, “*Electric Vehicles Chargers Characterization: Load Demand and Harmonic Distortion*”, 11th International Conference on Electrical Power Quality And Utilization (EPQU'11), Lisbon, Portugal, 17-19 October 2011 (aceite para publicação).

2. Abordagem Metodológica

2.1. Introdução

Neste capítulo, descreve-se a metodologia desenvolvida para o estudo do impacto dos carregamentos dos veículos eléctricos ao nível do aumento da procura energética. Procurou-se fazer um estudo simples com pouco números de veículos eléctricos para ter a percepção da influência dos carregamentos num diagrama de carga doméstico típico. Este estudo teve como objectivo principal estudar e validar os vários métodos de carregamentos estudados e desenvolvidos. Assim, neste capítulo descreve-se todos os conceitos abordados na metodologia utilizada e implementação em termos de simulação em Excel, apresentando-se os resultados do recurso aos vários métodos de carregamento apresentados sob a forma de diagrama de carga diários para as estações de verão e inverno.

2.2. Modelo Considerado

Foi considerado um modelo matemático com o objectivo de aproximar o problema à realidade, tanto quanto possível, para futuramente ser usado em simulação de larga escala.

Nesse sentido considerou-se um trajecto diário médio de uma pessoa que resida numa cidade média Europeia como sendo 35km [5] e com um consumo energético de 200Wh/km, uma potência média de carregamento do veículo eléctrico de 3kW e considerou-se 18kWh para a capacidade das baterias [5]. Assim unicamente os carregamentos domésticos, definidos como carregamentos lentos, foram tidos em conta neste estudo, visto ser apenas objectivo deste trabalho o estudo dos impactos em redes de distribuição de baixa tensão, logo referindo-se apenas a um carregamento doméstico que ocorre preferencialmente durante a noite e em casa de cada consumidor, detentor de veículo eléctrico. Assim, no sentido de aproximar este estudo à realidade, considera-se:

- Diferentes procuras para cada consumidor, devido a nem todos os consumidores terem o mesmo trajecto diário;
- Diferentes instantes de ligação à rede, visto, os utilizadores não terem as mesmas rotinas diárias.

Para todas as metodologias de carga consideradas, a ligação dos VE à rede é feita logo após a chegada a casa e o carregamento da bateria é iniciado de modo gradual, em diferentes intervalos consoante a metodologia em estudo, tal como as outras cargas domésticas [6]. Para representar este início dos carregamentos gradual foi utilizado uma distribuição normal.

Para representar as diferentes necessidades energéticas dos veículos eléctricos, classificou-se em seis níveis diferentes de energia, {1, 5, 7, 9, 15, 18}kWh, dependendo da sua probabilidade de acontecimento. A procura média é 7kWh, correspondendo ao trajecto diário médio dos 35km.

Para representar a ligação gradual à rede dos veículos durante os intervalos de carga (função da metodologia) utilizou-se uma distribuição normal cumulativa [7].

Assim, multiplicou-se o resultado das duas distribuições normais para obter a procura energética dos consumidores dentro do intervalo de tempo em análise.

A escolha da distribuição normal para a criação dos modelos, deve-se ao facto de este tipo de distribuição ser a que melhor representa os acontecimentos da vida real. E neste caso em particular pode-se verificar através do gráfico da distribuição normal (Figura 1), que aplicando ao intervalo de tempo pretendido representará uma ligação gradual à rede dos veículos em função do tempo [8] [9].

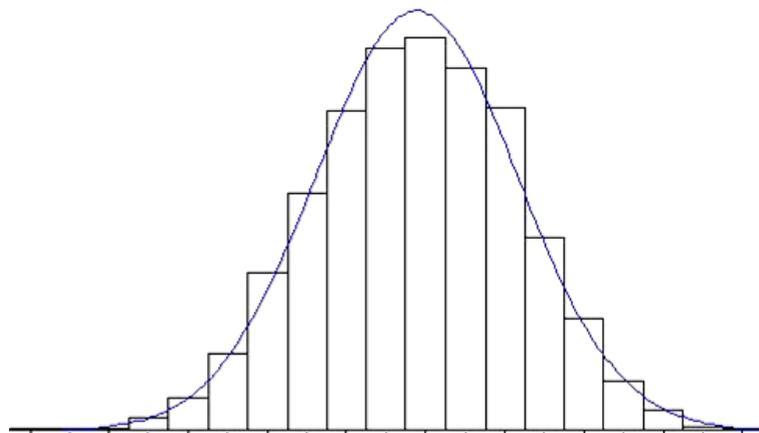


Figura 1: Distribuição normal

Assumindo uma distribuição normal, a densidade de probabilidade $f(X)$, com a média é representada por μ e o desvio padrão por σ pode ser expressa da seguinte forma:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

A distribuição normal é completamente definida pela média e pelo desvio padrão, estes dois parâmetros são independentes. Logo, a primeira distribuição normal assume uma média de 7kW e um desvio padrão de 5. A probabilidade do acontecimento pode ser encontrada aplicando a expressão (1), obtendo a seguinte expressão:

$$f(X) = \frac{1}{5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-7)^2}{2 \cdot 5^2}} \quad (2)$$

onde X representa a procura energética dos VE no intervalo de tempo pretendido.

A segunda distribuição assume uma média de 75 minutos dentro de um intervalo de tempo de 150 minutos e um desvio padrão de 35. A probabilidade do acontecimento pode ser calculada aplicando novamente (1) dando origem à seguinte expressão:

$$f(X) = \frac{1}{35\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-75)^2}{2 \cdot 35^2}} \quad (3)$$

onde X representa o número de veículos eléctricos ligados à rede no intervalo de tempo escolhido.

É de referir que autores como Csaba et al. em [10], abordam o problema do número de veículos ligados à rede através de estudos estocásticos que se aproximam bastante da distribuição normal utilizada neste estudo.

2.3. Perfis de Procura e Oferta

Nesta fase do estudo, foi utilizado um perfil de carga diário de consumidores domésticos, de inverno e verão, com resolução temporal de 15 em 15 minutos [11] [12]. Foi-lhe aplicado uma média normalizada e seguidamente multiplicado pelo número de casas a serem estudadas, que neste caso foi escolhido um número de 35 consumidores para estudar o aumento da procura de energia e as metodologias de carregamento consideradas. Portanto, o gráfico de consumo típico para 35 casas de inverno e verão, obtido pelo procedimento acima descrito, é apresentado na Figura 2.

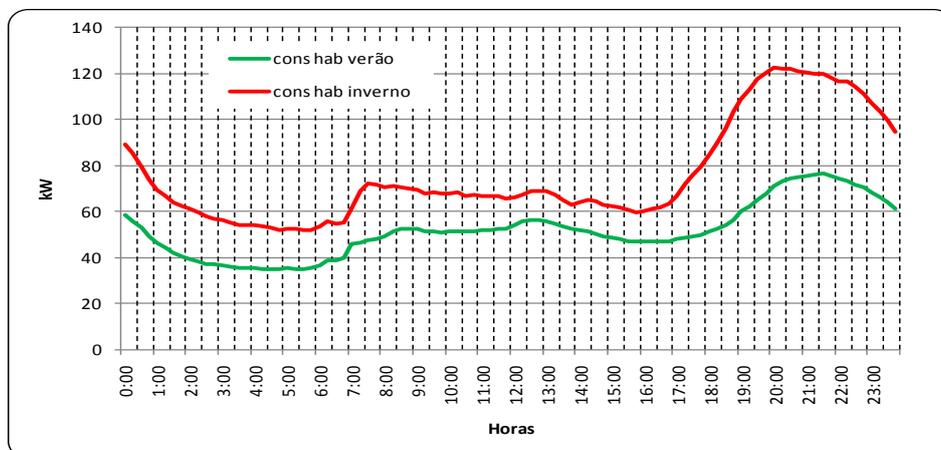


Figura 2: Diagrama de carga tipicamente doméstico.

O pico do diagrama corresponde ao intervalo de tempo em que os consumidores regressam a suas casas que tem início pelas 18h, com uma procura máxima entre as 20h as 21h, correspondendo a uma potência máxima de 120kW no inverno e de 78kW no verão.

Após obter as curvas dos perfis de carga para o número de casas consideradas sem o carregamento dos veículos eléctricos, foi considerado três cenários diferentes [13] para os carregamentos dos veículos eléctricos.

- Carregamento não controlado: carregamento iniciado logo que o consumidor chega a sua casa sem a preocupação de horários ou de tarifas;
- Carregamento com incentivo tarifário: carregamento baseado no incentivo tarifário associado à tarifa bi-horária, ou seja o consumidor procura efectuar o carregamento em período em que o custo do kWh é mais baixo (em horas de vazio).
- Nivelamento de carga: cenário perfeito de carregamento, onde as necessidades energéticas acrescidas dos veículos são acomodadas no diagrama de carga actual, aproveitando as horas de vazio, minimizando o pico de procura adicional.

A entrada na rede foi efectuado segundo os seguinte escalões de posse de veículos eléctricos na zona residencial, 25%, 50%, 75% e 100% do total dos agregados familiares considerados para o estudo.

Neste estudo inicial considerou-se que um carregamento completo demora cerca de 6 horas. Portanto, com um carregamento completo, o utilizador conseguirá efectuar o seu trajecto por dois dias, assim não será necessário carregar o veículo todos os dias, pelo que o escalão de carregamento da totalidade dos veículos será pouco provável.

Foi adicionado separadamente aos diagramas de verão e inverno os diferentes cenários de carregamento estipulados.

2.4. Metodologia de Carregamento não Controlado

Esta metodologia corresponde ao caso mais simples, em que o utilizador efectua a ligação do seu VE à rede quando o entender ou pretender, sem qualquer tipo de preocupação, e provavelmente logo após a sua chegada a casa. O recarregamento das baterias inicia-se de imediato após a interligação do VE à rede. Portanto, neste caso o carregamento das baterias é modelizado pela distribuição normal consequência de entrada em carga durante o período compreendido no intervalo das 18:00 às 20:30.

2.5. Metodologia de Carregamento com Incentivo Tarifário

A grande vantagem do carregamento dos veículos eléctricos é sem dúvida o preço da electricidade, desde que o preço dos combustíveis fósseis continue bastante acima da energia eléctrica [14]. Neste estudo inicial, uma carga completa do veículo eléctrico corresponde a um consumo de 18kWh. A Tabela I mostra o preço para uma carga média (7kWh) com o tarifário de 2011 para consumidores domésticos [15].

Tabela 1: Preços da electricidade (EDP 2011) e o custo do carregamento VE com carga média.

Tarifa de venda a clientes finais em BTN (≤ 20.7 kVA e > 2.3 kVA)			
Tarifa	Período	€/kWh	Custo do carregamento €
Simple		0.1326	0.9282
Bi-horaria	Horas de ponta	0.1448	1.0136
	Horas de vazio	0.0778	0.5446
Tri-horaria	Horas de ponta	0.1593	1.1151
	Horas de cheias	0.1373	0.9611
	Horas de vazio	0.0778	0.5446

Independentemente da tarifa escolhida, o carregamento do VE é muito mais barato do que o tradicional veículo a gasolina ou gasóleo. Em termos de preço, dependendo da altura do dia em que se realizam os recarregamentos, o carregamento será mais barato nas horas de vazio. Em termos de duração do carregamento para o sector doméstico, como já referido anteriormente, em média estes terão uma duração de 6 a 8 horas, quando ligados a uma tomada simples 16A / 230V, dependendo do tamanho da bateria e das características do carregador. Para carregamentos rápidos, o tempo do carregamento será substancialmente menor, mas esse tipo de carregamento só será efectuado de forma esporádica e não está contextualizado no domínio dos carregamentos domésticos [5].

2.6. Metodologia de Carregamento com Nivelamento de Carga

Após analisar em pormenor as metodologias acima apresentadas, verificou-se a necessidade de procurar uma nova metodologia que garantisse o carregamento solicitado por todos os VE sem aumentar o pico de potência que potencialmente ocorrerá com as anteriores metodologias. A metodologia aqui apresentada baseia-se no nivelamento da carga dos VE. A Figura 3 mostra o algoritmo implementado para a estratégia do nivelamento de carga. Cada ciclo é de 15 minutos, o algoritmo inicia com $P_{dem_i} = P_{cont_i}$ onde P_{cont_i} é a procura de

energia em tempo real. De seguida o algoritmo avalia se se encontra num período de incentivo tarifário, se a resposta é positiva significa que estamos perante um período de vazio, caso contrário retorna ao início e incrementa mais um ciclo. Posteriormente verifica se cada veículo se encontra com carga completa ($EV_j = OFF$) para o total dos EV (N), se a resposta for “yes” passa ao item seguinte e verifica se a necessidade energética (P_{dem_i}) mais a necessidade energética dos veículos (P_{EV_i}) está acima do pico máximo de procura original ($P_{dem_{MAX}}$) se a resposta for positiva então a procura energética original mantém-se constante caso contrário a nova necessidade energética será igual a soma da procura original mais a procura dos veículos, assim os veículos iniciam o carregamento. Nesse caso significa que se encontra num período de baixo consumo do diagrama de carga e então será possível encaixar o carregamento dos VE no diagrama de carga.

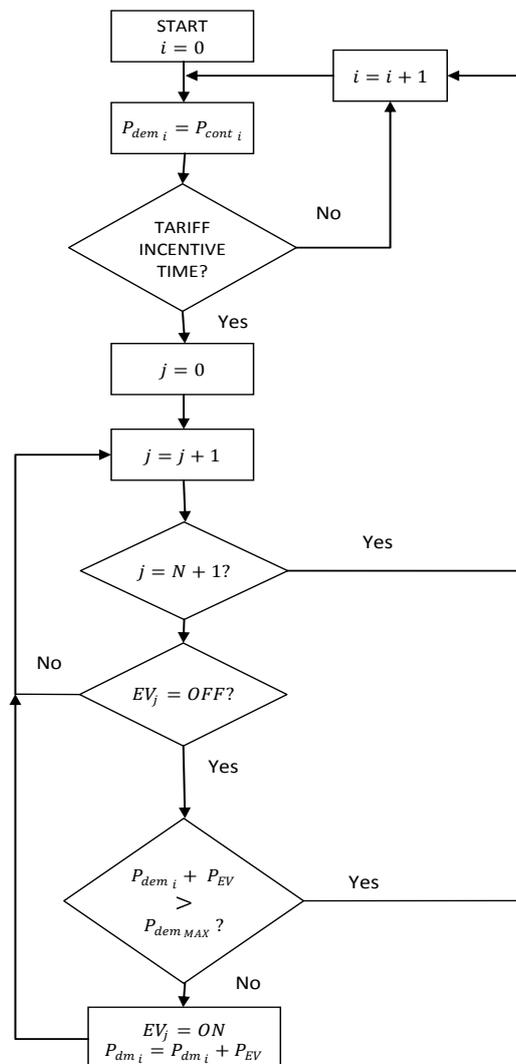


Figura 3: Algoritmo da estratégia do nivelamento de carga para N Veículos.

2.7. Casos de estudo

2.7.1. Carregamento não Controlado

O diagrama de carga típico do sector residencial apresenta um período de ponta no horário correspondente ao período normal de regresso a casa dos consumidores após o dia de trabalho, ligando as cargas necessárias à sua rotina de final de dia. O carregamento não controlado corresponde a ligar os VE logo que os seus utilizadores chegam a casa, sem nenhuma preocupação do aumento de carga e sem qualquer controlo de carga. Considerou-se que o carregamento era efectuado depois das 18h. O impacto desta estratégia de carregamento no diagrama global de carga é apresentado na Figura 4 e 5.

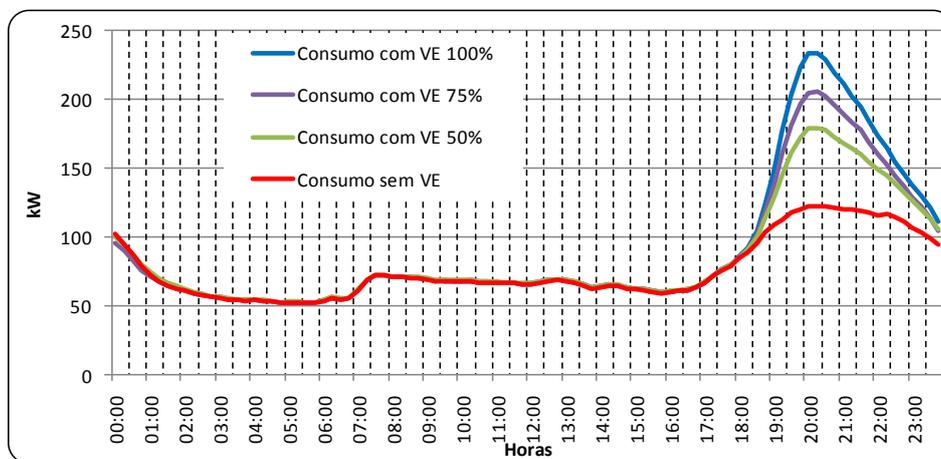


Figura 4: Impacto dos VE dia típico inverno – carregamento não controlado

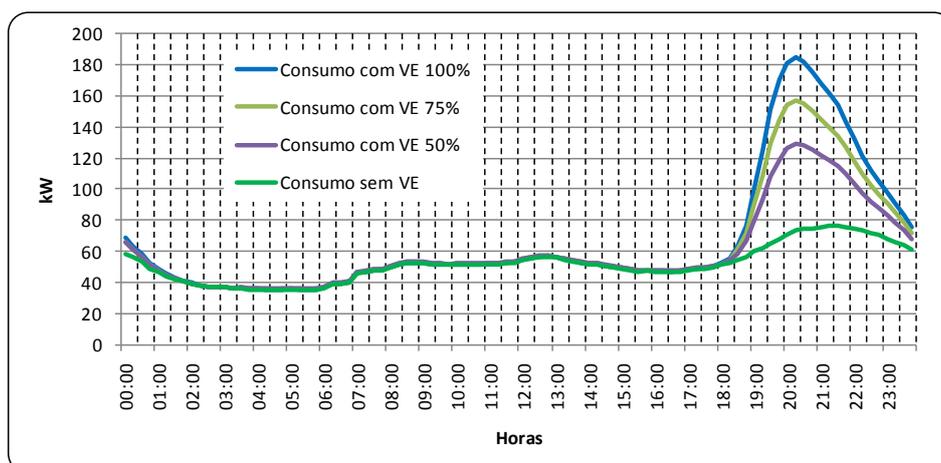


Figura 5: Impacto dos VE dia típico verão – carregamento não controlado.

Como pode ser observado na Figura 4 e 5 este tipo de carregamento irá aumentar o pico de procura já existente. Tendo em conta o que foi descrito a cima, a probabilidade de todos os veículos da mesma zona residencial carregarem o seu carro no mesmo dia é quase inexistente, mas mesmo assim sabendo que tipicamente os transformadores de distribuição são dimensionados para o dobro da potência requerida em períodos de ponta, vê-se no diagrama de carga de inverno, que a potência requerida por todos os veículos considerados é praticamente duas vezes a actual, pelo que será uma situação a evitar. Observa-se ainda que no diagrama de verão, mesmo tendo em consideração a curva azul, que provoca o maior pico de procura de energia verifica-se que esse pico não é superior ao pico de inverno sem veículos, podendo-se então afirmar que esta situação não provocará problemas de sobrecarga para a rede de distribuição em questão, no entanto prejudica o factor de carga do diagrama e contribui para um aumento das perdas na rede que poderia ser reduzido se não aumentasse a ponta de potência existente.

2.7.2. Carregamento Controlado com Incentivo Tarifário

Neste caso o controlo é feito deslocando o processo de carregamento para horas em que os preços de energia são mais baixos para o consumidor, tirando partido da tarifa bi-horária, onde neste estudo considerou-se o início às 22 horas [13]. Nas Figuras 6 e 7 apresentam-se os resultados obtidos para o aumento de carregamentos de VE com base na opção tarifária bi-horária.

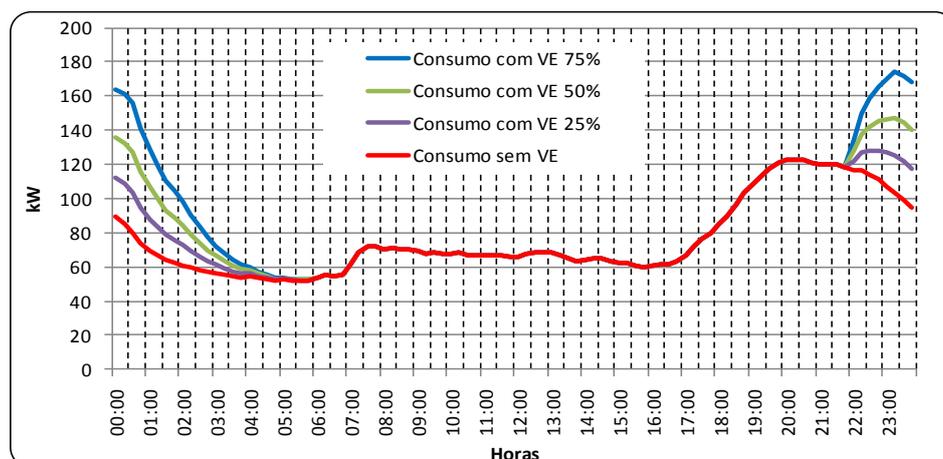


Figura 6: Impacto dos VE dia típico de inverno – carregamento com incentivo tarifário

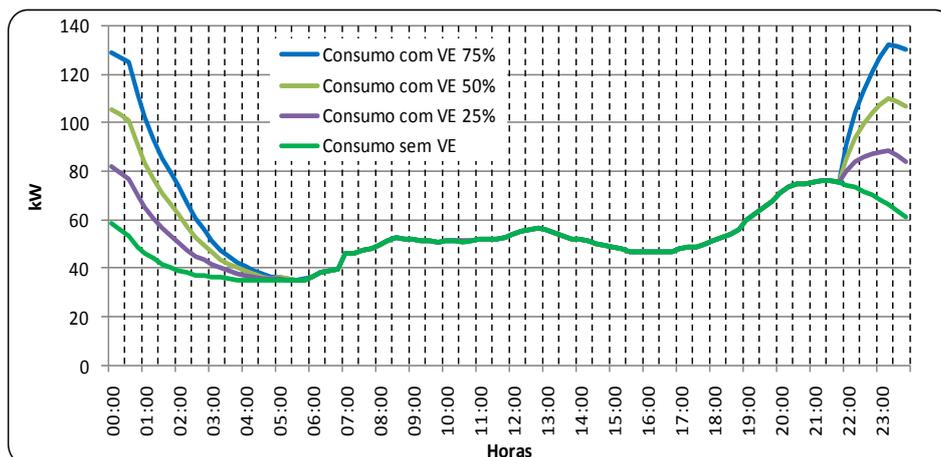


Figura 7: Impacto dos VE dia típico de verão – carregamento com incentivo tarifário

Das Figuras 6 e 7 apresentadas, pode-se observar que o carregamento com incentivo tarifário, apenas desloca o carregamento, tendo um início mais tardio, correspondendo à ocupação do espaço denominado por horas de vazio, mas não consegue efectuar um nivelamento do diagrama de carga e desloca a ponta máxima para mais tarde (depois das 22h), embora menor do que aquela que resulta de um carregamento não controlada, mas bastante maior que a original, o que também não é desejável.

2.7.3. Carregamento com Nivelamento de Carga.

Este tipo de carregamento tem como objectivo controlar a procura acrescida de energia provocada pelos VE. O controlo é feito nivelando o diagrama de carga durante o período nocturno aproximadamente entre as 22h e as 7h [16]. Considerou-se 7h como sendo a hora em que todos os veículos deverão estar disponíveis e com carga máxima [17]. Nos gráficos apresentados nas Figuras 8 e 9, mostra-se o impacto do carregamento dos VE considerados para as horas de menor procura energética.

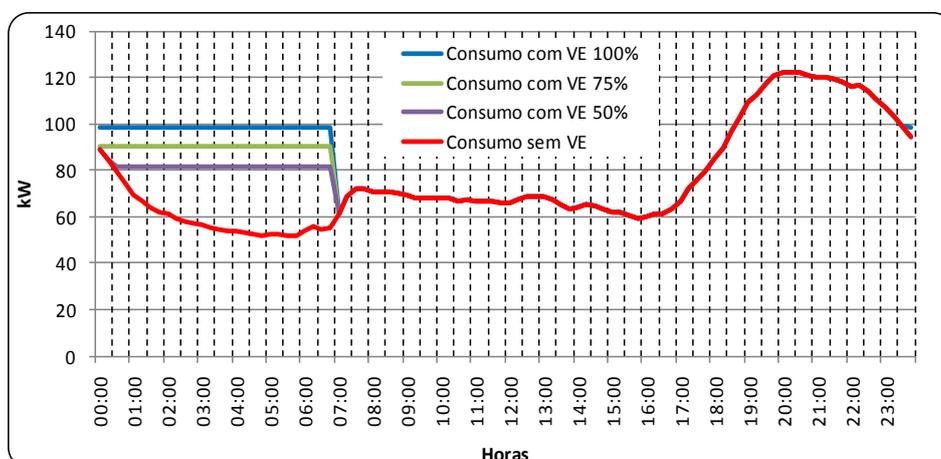


Figura 8: Impacto dos VE dia típico de inverno para o cenário nivelamento de carga.

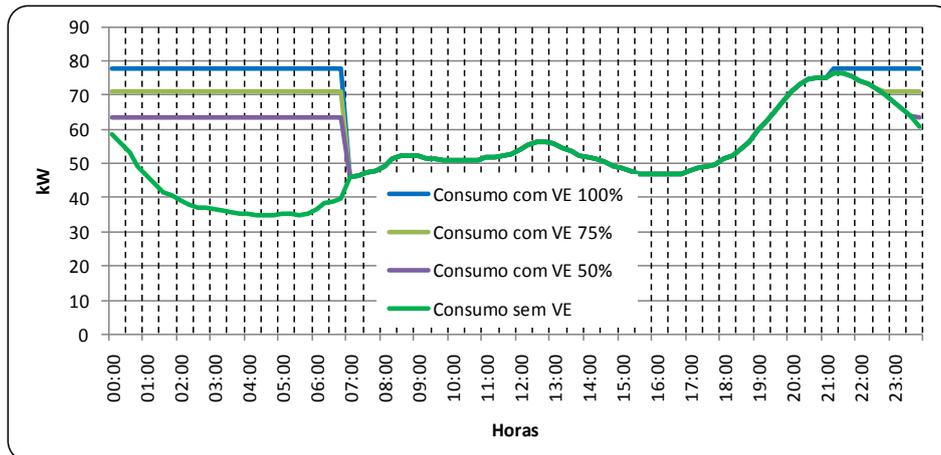


Figura 9: Impacto dos VE dia típico de verão para o cenário nivelamento de carga.

Observando as Figuras 8 e 9, verifica-se que encaixando os carregamentos dos VE nas horas de menor procura energética por parte dos consumidores, o pico provocado pelo carregamento dos veículos não será superior àquele já existente, resultante da rotina diária dos consumidores, ou seja esta estratégia permite que o aumento de procura energética devido aos VE seja perfeitamente acomodada no diagrama de carga original, sem diminuição da capacidade de fornecimento de energia por parte da rede.

3. Monitorização do carregamento de baterias

3.1. Introdução

Neste capítulo, descreve-se o procedimento e apresentam-se os registos de monitorizações realizadas a dois tipos de baterias, ácido – chumbo e níquel-hidreto metálico (NiMH). Para isso, utilizou-se um analisador moderno de rede de energia eléctrica com capacidades de registo.

Após o estudo de forma genérica do impacto dos carregamentos dos veículos eléctricos, realizou-se uma caracterização completa de dois carregadores de VE, monitorizando a carga completa dos dois tipos de bateria, de forma a obter um diagrama de carga real dos carregamentos dos VE e aproximar o estudo subsequente por simulação da realidade. Neste capítulo, registou-se a procura energética em termos de potência activa e reactiva, factor de potência, evolução do valor eficaz das correntes absorvidas e efectuou-se ainda uma análise à distorção harmónica, sendo que pela sua particularidade, esta última será apenas apresentada e analisada no capítulo 6.

3.2. Analisador de Rede

Um analisador de energia eléctrica é um equipamento de medição programável que mede, calcula e regista em memória os principais parâmetros das grandezas eléctricas da rede de alimentação em baixa tensão. São equipamentos portáteis, fáceis de transportar devido às suas dimensões e peso, e de utilização intuitiva. Possuem quatro pinças amperimétricas e quatro pontas de tensão, que permitem fazer as leituras das diferentes grandezas eléctricas.

Existem modelos de analisadores de energia eléctrica que permitem registos dos valores instantâneos, médios e máximos em intervalos de tempo definidos pelo utilizador, relativos às tensões, correntes, factores de potência, potências activas, reactivas e aparentes, e consumos energéticos.

Alguns modelos permitem também medir e analisar a distorção harmónica total (THD) e o factor de deslocamento (DF) até à 50.^a ordem, permitindo estudar a influência das cargas na rede de distribuição tais como: o aquecimento nos equipamentos de medida e protecção, sobrecarga no neutro.

Os analisadores de energia eléctrica são instrumentos que servem também de apoio às auditorias energéticas, devido à informação por ele recolhida, permitindo tirar conclusões relativamente às grandezas eléctricas de um sistema eléctrico, de uma instalação ou de um equipamento [18].

Neste trabalho o modelo que serviu de apoio há obtenção dos dados, foi o Hioki 3197, apresentado na Figura 10.



Figura 10: Hioki 3197

As principais grandezas registadas por este tipo de equipamento são as seguintes:

- Potência activa e reactiva
- Tensões RMS (AC + DC)
- Intensidades de Corrente RMS (AC + DC)
- Frequência
- Potência aparente e factor de potência
- THD (tensão e corrente)

3.3. Caracterização dos Carregadores

Na realização destas monitorizações, tentou-se registar os carregamentos de VE reais, um deles do tipo industrial e o outro do tipo doméstico [19]. O primeiro é um empilhador eléctrico apresentado na Figura 11 a) e o segundo é um pequeno VE para utilizações em trajectos urbanos apresentado na Figura 11 b).

O empilhador utiliza um pacote de baterias de ácido-chumbo projectado para alimentar o respectivo sistema de tracção, com uma tensão de alimentação de 48V. Este veículo tem uma utilização diária e efectua pequenas distâncias, mas a sua função de carga e empilhamento consome a maior parte da energia armazenada nas baterias. O outro pequeno VE estudado é a uma plataforma de estudo e desenvolvimento denominado por VEIL baseado na conversão de um pequeno veículo com motor de combustão interna da marca LIGIER, modelo 162 GL e desenvolvido para uma utilização diária em pequenos trajectos urbanos. O veículo pode utilizar até seis bancos de baterias NiMH com 96V de tensão nominal. As características das baterias são apresentadas na Tabela 2 [20].

Tabela 2: Características das baterias e respectivos carregadores.

Bateria	Fabricante	TNxBS ¹	Capacidade	Energia total
Ácido-chumbo	AUTOSIL	2 x 24 = 48V	600 Ah (@ C/5)	28.8 kWh
NiMH - VH module	SAFT	12 x 8 = 96 V	6 x 13.5 Ah (@ 2C)	8.7 kWh

Carregador	Fabricante	Tensão	Corrente	Potência
Trifásico	ATIB Electrónica	400 V	10.4 A	7.2 kW
Monofásico ²	SAFT	230 V	0.5 A	0.65 kW

¹ TN: Tensão nominal; BS: Baterias em série;

² No carregamento do *pack* de baterias de NiMH, considerou-se a utilização simultânea de 48 carregadores monofásicos.

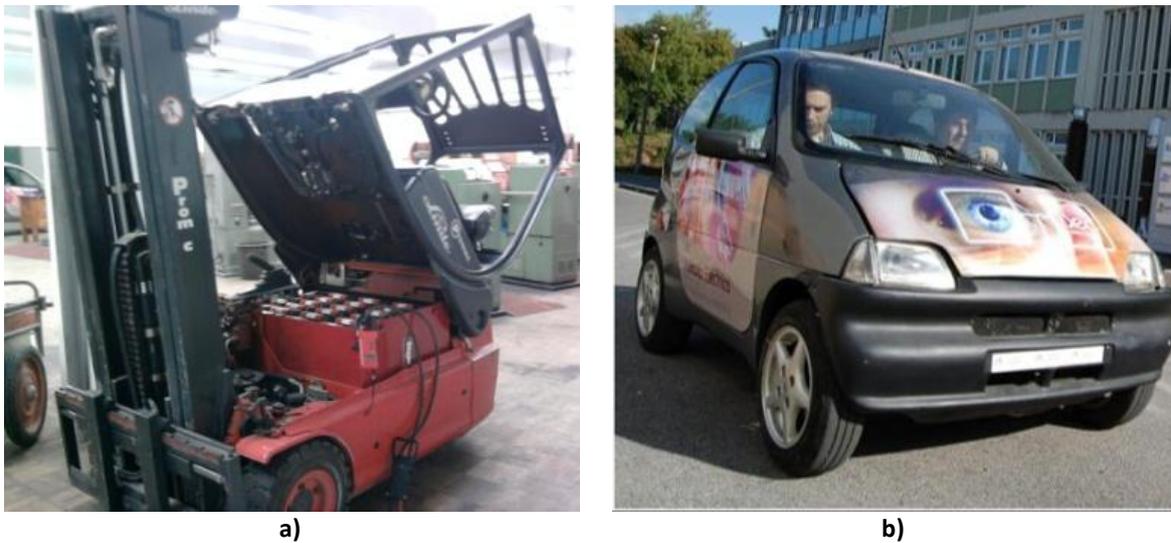


Figura 11: Veículos eléctricos estudados: a) empilhador industrial; b) Veículo eléctrico citadino

Embora os veículos considerados para este estudo terem aplicações diferentes, do ponto de vista da rede, ambos precisam efectuar recarregamento. Estes carregamentos não se reflectirão apenas na quantidade extra de energia pedida à rede. O carregamento dos dois sistemas será distinto não pela química da bateria, mas principalmente pelas características dos seus carregadores e respectivos algoritmos de carga. Devido ao primeiro veículo eléctrico ser de utilização industrial, este será recarregado através um carregador trifásico, cujas características são apresentadas na Tabela 2. Por outro lado, o segundo será recarregado através de um carregador monofásico e o seu carregamento será preferencialmente realizado em períodos nocturnos, já que se trata de um veículo cujo seu carregamento será realizado no sector residencial. As suas características também são apresentadas na Tabela 2.

Na Figura 12 são apresentadas fotografias das baterias utilizadas e os seus respectivos carregadores.

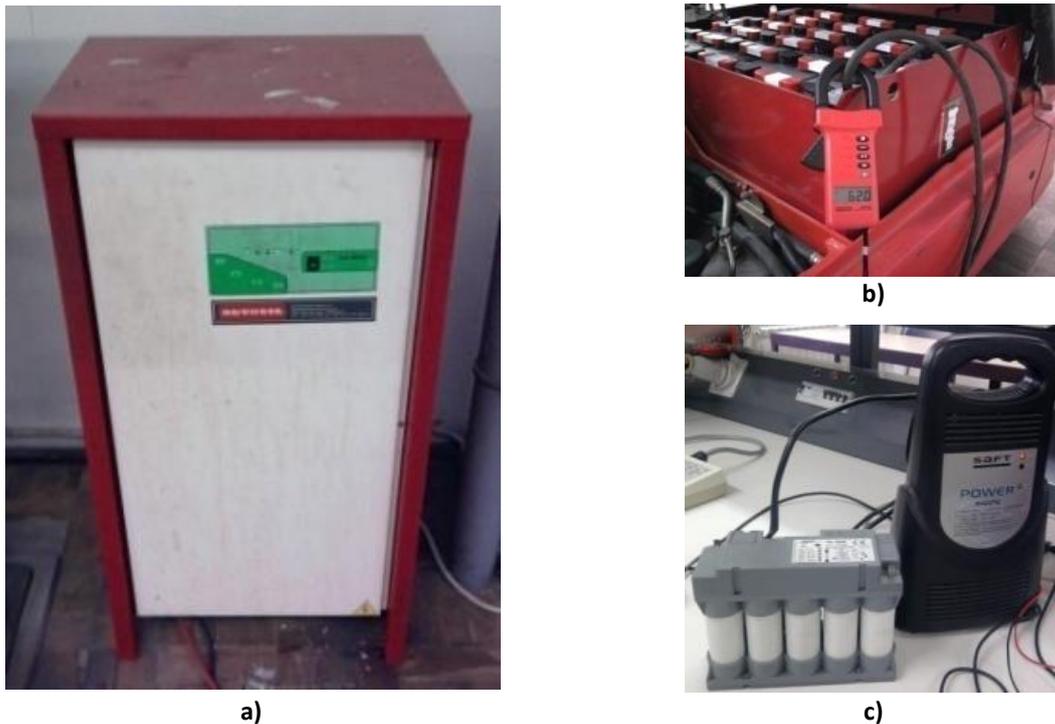


Figura 12: a) carregador trifásico para o empilhador; b) Pack de baterias de ácido-chumbo de 48V; c) carregador monofásico e módulo de baterias NiMH

3.3.1. Carregador Trifásico de Baterias Ácido-Chumbo

A monitorização de uma carga completa do banco de baterias ácido-chumbo foi realizada quando o sistema do VE recomendou a recarga das baterias. As baterias não se encontravam totalmente descarregadas, mas tinham um baixo nível de carga. A Figura 13 apresenta o algoritmo de carga seguido pelo carregador trifásico em análise. Este algoritmo representa a evolução do aumento de tensão do pacote de baterias de acordo com a energia armazenada durante o processo de carregamento. O algoritmo é dividido em quatro fases de carregamento, as quais são: “Low”, “Medium”, “Topping”, e “Trickle”, como podem ser visualizados na Figura 13.

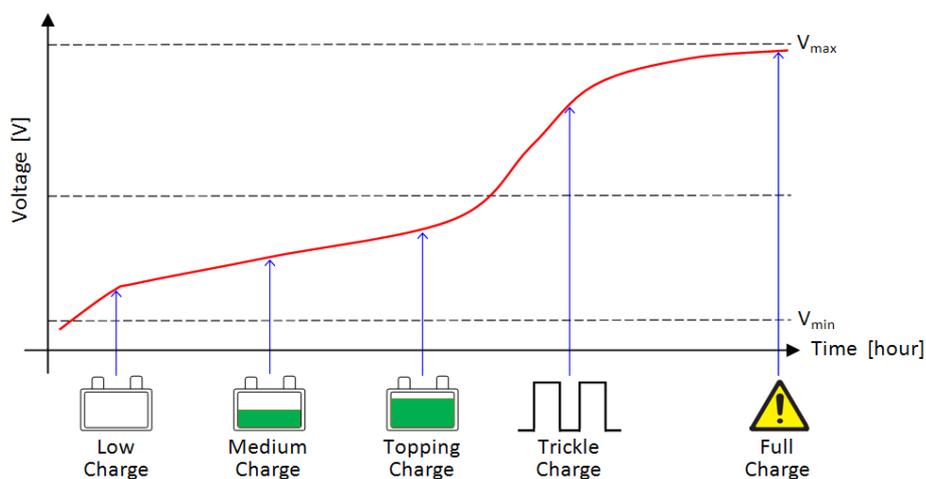


Figura 13: Algoritmo de carga das baterias ácido-chumbo usado pelo carregador trifásico [21]

Foi feito o registo dos valores durante 22h. A carga completa obteve-se em menos tempo, cerca de 8h a 9h, embora após esse tempo o analisador de energia continuou a registar os dados pretendidos, visto que as baterias ainda estavam ligadas ao carregador. Durante esta fase final o carregador, manteve-se em modo “*Trickle Charge*” a fim de manter o nível de energia do pacote de baterias no máximo. Assim, pode-se observar, na Figura 14, os registos da potência activa e reactiva obtidos durante o carregamento.

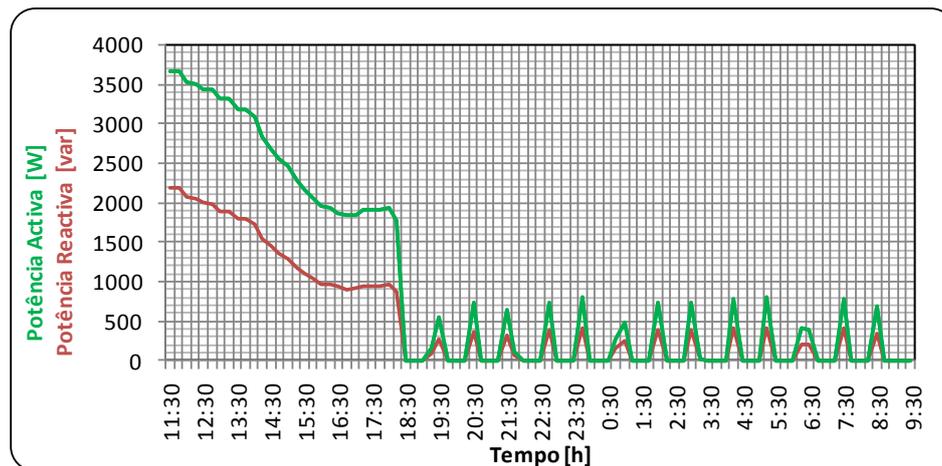


Figura 14: Potência activa e reactiva do carregador trifásico

A evolução da potência activa pode ser classificada em três fases distintas. A primeira com a potência activa elevada que decresce com a recarga das baterias correspondendo à zona de funcionamento “*Low Charge*” e “*Medium Charge*” do carregador. A segunda, aproximadamente das 16h30 às 18h30, onde se verifica uma potência constante, devida ao modo de funcionamento “*Topping Charge*” do carregador. Por último, a terceira fase que corresponde ao modo “*Trickle Charge*”, que se apresenta na curva da potência sob a forma de pequenos picos de potência intercalados com instantes onde a potência activa será aproximadamente nula. A evolução da potência reactiva é bastante similar à descrita anteriormente para a potência activa, mas com valores mais baixos.

A potência activa e reactiva originam um factor de potência situado entre os 85% e os 90% (Figura 15) quando o carregador se encontra a funcionar desde do modo de carregamento “*Low*” até ao “*Topping*”, o que se apresenta como um valor bastante bom para uma carga considerada não linear. No modo de funcionamento “*Trickle Charge*”, o factor de potência do carregador decresce até aos 60%.

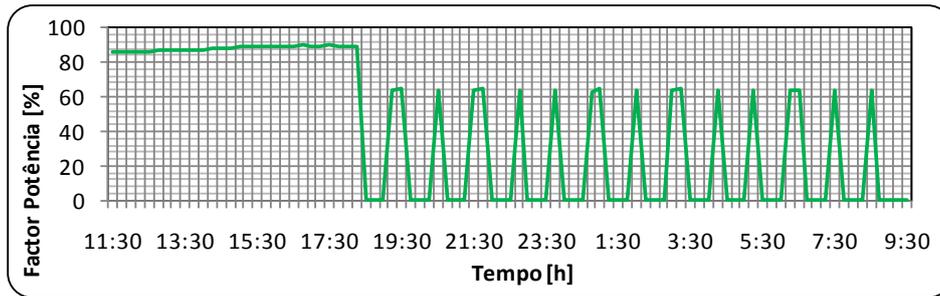


Figura 15: Factor potência do carregador trifásico

3.3.2. Carregador Monofásico de Baterias NiMH

O mesmo estudo foi feito para as baterias NiMH. A carga completa do banco de baterias NiMH do VEIL foi efectuada quando o sistema recomendou a sua recarga. Na Figura 16, é apresentado o algoritmo que o carregador monofásico segue para uma bateria durante o processo de carregamento. O algoritmo divide-se em três fases diferentes do carregamento, as quais são: “Fast”, “Topping” e “Trickle”. A comutação do modo de carregamento é efectuada de acordo com o nível de tensão do pacote das baterias e da temperatura das mesmas, durante o processo de carga.

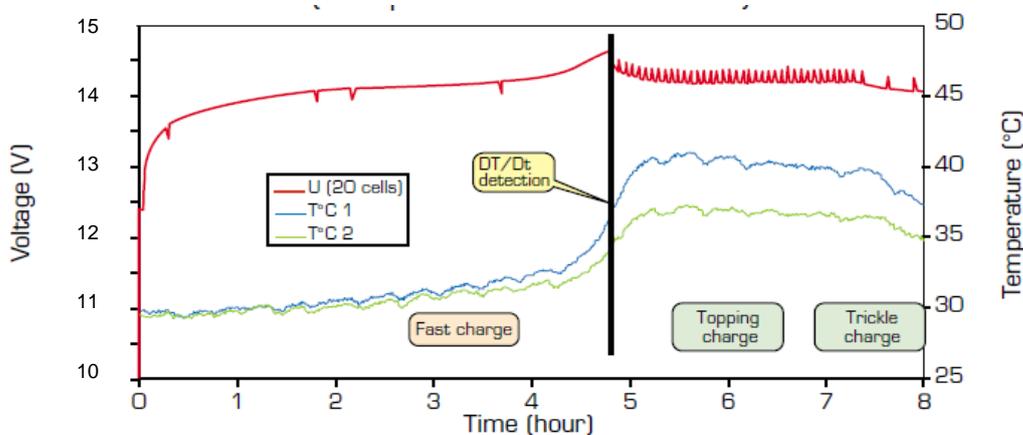


Figura 16: Algoritmo de carga das baterias usado pelo carregador monofásico [22].

O registo dos valores foi efectuada durante 15 horas. A carga completa foi obtida para 7 a 8 horas, mas após esse tempo, manteve-se o carregador ligado às baterias e o analisador a registar os dados, de forma a registar o efeito do modo de carregamento “Trickle”. As curvas da potência activa e reactivas obtidas podem ser observadas na Figura 17. A evolução da potência reactiva tem quatro fases distintas. A primeira com uma potência activa constante de cerca de 3kW durante 4 horas. De seguida o carregador opera com uma potência muito baixa durante uma hora seguindo-se um pico de potência, durante também uma hora. Finalmente a

última fase corresponde ao modo funcionamento do “*Trickle Charge*”, registando-se assim pequenos picos de potência intercalando com instantes onde a potência é praticamente nula. A evolução da potência reactiva é bastante similar à da activa, mas neste caso com valores mais elevados.

A potência activa e reactiva leva a um factor de potência situado entre os 40% e os 60%, o que é um valor baixo, mas está de acordo com os valores apresentados por estes tipos de cargas (Figura 18). O valor mais elevado apresenta-se no modo de funcionamento “*Fast*” e “*Topping*”. No modo “*Trickle Charge*” o factor de potência decresce para os 40%.

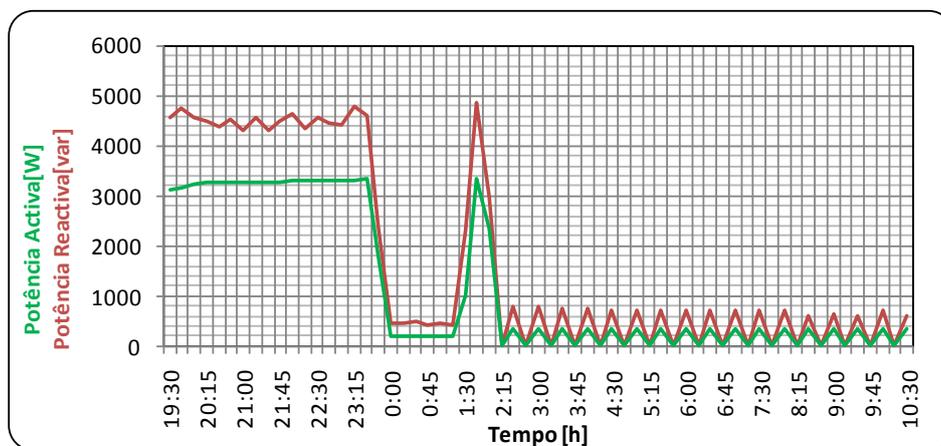


Figura 17: Potência activa e reactiva do carregador monofásico.

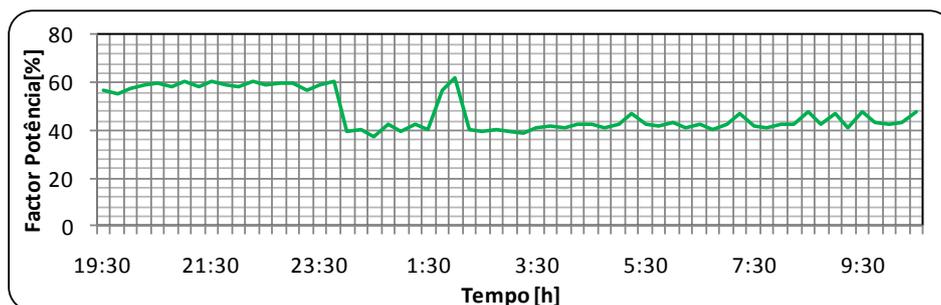


Figura 18: Factor potência do carregador monofásico.

4. Simulação de uma rede de distribuição com cargas não lineares

4.1. Introdução

Existem vários programas de simulação direccionados para análise de sistemas de energia eléctrica, estes são normalmente caracterizados por terem um aspecto visual apelativo e funcionarem bastante bem para sistemas eléctricos considerados típicos (*standard*) e também por trazerem bastantes parâmetros das redes mais comuns pré-definidos. Torna-se mais complicado utilizá-los quando se quer agregar outros tipos de parâmetros ou alterar algo ao nível estrutural, visto que a maior parte destes programas não têm essa flexibilidade ou quando permitido é bastante complicado a sua caracterização [23].

Entre os vários pacotes de programas para simulação e análise de sistemas de energia eléctrica salientam-se:

- O **PowerWord Simulator** que é um programa abrangente, tem um mecanismo de solução de fluxo de potência robusto capaz de resolver de forma eficiente, sistemas até 60000 barramentos. Basicamente, este programa de simulação foi especificamente desenvolvido para simular sistemas de alta tensão num período que poderá ir de alguns minutos a vários dias. Este programa é bastante “*user-friendly*” e muito interactivo, visto que inclui diagramas de fluxo a cores e com animações durante as simulações. Assim este programa é útil para simular e resolver questões relacionadas com problemáticas dos mercados de energia e na formação de técnicos ao nível da gestão e comando de sistemas de energia eléctrica [24].
- O **DigSILENT PowerFactory** é uma ferramenta de análise de sistemas de energia eléctrica que combina um sistema fiável e flexível com capacidade de adaptação dos algoritmos e a gestão de bases de dados unicamente orientada a objectos. Permite desenvolver modelos detalhados do sistema de energia num único banco de dados com uma ampla gama de estados estacionários, resolução no domínio da frequência e no domínio do tempo e ainda permite resolução de problemas relacionados com funcionamentos estocásticos dos sistemas eléctricos. Este programa permite a simulação e análise de sistemas com um número máximo de 100 barramentos em algumas configurações, noutras configurações até 250 barramentos, ou mesmo um número ilimitado de barramentos. O número máximo de barramentos é função do pacote adquirido e a ser utilizado, sendo os pacotes disponíveis o PowerFactory Distribution, PowerFactory Transmission, PowerFactory Industrial, e PowerFactory

Enterprise. O PowerFactory não se limita apenas à análise do fluxo de potência, mas também à produção e planeamento de energia [25].

- O **MATLAB**[®] é um pacote de software essencialmente vocacionado para o cálculo numérico através da modelação de sistemas em forma matricial. É complementado com uma ferramenta de extensão, o **SIMULINK**[®], que torna a sua utilização mais apelativa ao utilizador, visto que se baseia essencialmente numa programação gráfica através de blocos modelo pré-definidos. O **SIMULINK**[®] permite simular sistemas de energia eléctrica através de uma programação gráfica em ambiente multi-domínio. Tem poderosas capacidades para configurar e adaptar a problemas específicos e reais, desde da geração, transmissão até à distribuição de energia eléctrica, especialmente na concepção de sistemas de controlo associados ao sistema de energia eléctrica. Este programa contém mais de 130 blocos para componentes e dispositivos normalmente utilizados em redes de energia eléctrica, com base em equações electromagnéticas e electromecânicas e estão distribuídos em seis bibliotecas, incluindo fontes, máquinas eléctricas, componentes electrónicos, elementos de controlo e medições. O pacote pode ser usado para o uso geral, ou desenvolver os seus próprios blocos através de equações que definam o modelo a simular [26]. Têm sido desenvolvidas bibliotecas, blocos de modelos mais específicos alargando as áreas de aplicação disponíveis no programa **SIMULINK**[®].

Após uma breve análise dos programas existentes para a simulação de uma rede de distribuição adicionando-lhe cargas não lineares, como é o caso do presente estudo, e tendo em conta a aprendizagem académica durante o Mestrado Integrado no DEEC da Universidade de Coimbra, o **MATLAB**[®]/**SIMULINK**[®] mostrou-se ser o mais apropriado, visto apresentar um grau de flexibilidade e de adaptação compatível com este caso de estudo. Neste sentido, nos próximos tópicos descreve-se o modelo implementado em **MATLAB**[®]/**SIMULINK**[®] e respectiva utilização, para analisar o impacto do recarregamento massivo de VE numa rede de distribuição de baixa tensão.

4.2. Utilização do **SIMULINK[®]**

Antes de implementar um sistema físico em **SIMULINK**[®], é necessário pensar nas várias componentes que formam o sistema global e como traduzi-las num ambiente gráfico e efectuar as futuras simulações.

Assim, o início da construção da simulação passa por listar todas as variáveis em questão e todos os parâmetros necessários para a descrição da rede. De seguida procurou-se na biblioteca do **SIMULINK**[®] os blocos que melhor representariam os parâmetros e as variáveis da

simulação. A Figura 19 apresenta os principais blocos das bibliotecas disponíveis em SIMULINK® [27].

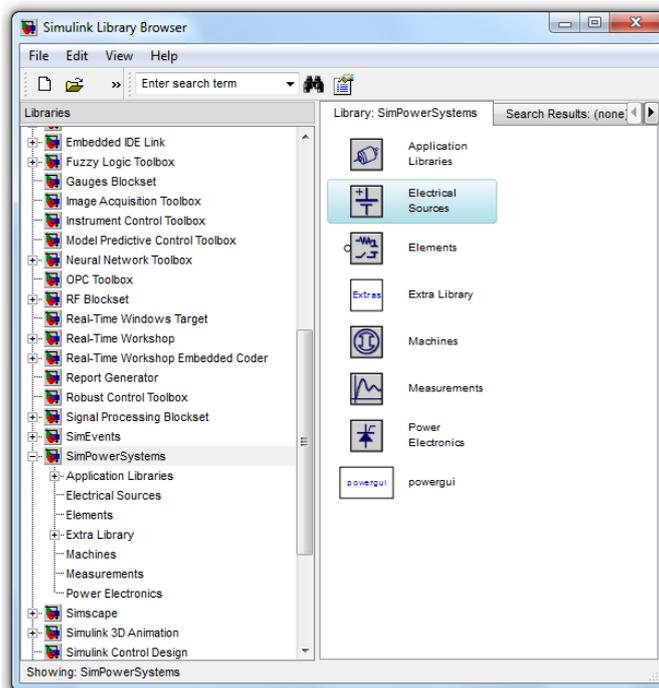


Figura 19: Biblioteca de blocos do SIMULINK®.

4.3. Blocos utilizados na Implementação do Modelo Global em SIMULINK®

Com o objectivo de simular uma rede de distribuição no domínio do tempo, com vista ao estudo do impacto de uma associação considerável de cargas não lineares, como são os carregadores das baterias dos VE, através do SIMULINK®, utilizando a *toolbox Power System Blockset*, nesta secção apresentam-se de forma sucinta os diversos blocos e teorias associados aos respectivos componentes (Fonte trifásica, Transformador de distribuição, Linhas de transporte e distribuição e Cargas lineares e não lineares, etc.), perfazendo assim um modelo global da rede.

4.3.1. Fonte Trifásica

Na implementação do modelo global é necessário efectuar-se algumas considerações e simplificações. Como o estudo é focado numa rede de distribuição de baixa tensão, a modelização da fonte trifásica pretende representar e modelizar o sistema de tensões disponível à saída da subestação que alimenta o Posto de Transformação local (PT). O modelo da fonte trifásica utilizada (Figura 20) é resultado da utilização do bloco prédefinido “*3-phase programmable source*”, que possibilita a geração de sinais representativos de um sistema directo e equilibrado de tensões RST podendo-se programar variações no tempo da amplitude,

do ângulo de fase ou da frequência fundamental. Apresenta-se ainda na Figura 20 a caixa de diálogo referente à parametrização deste bloco para uma modelização específica.

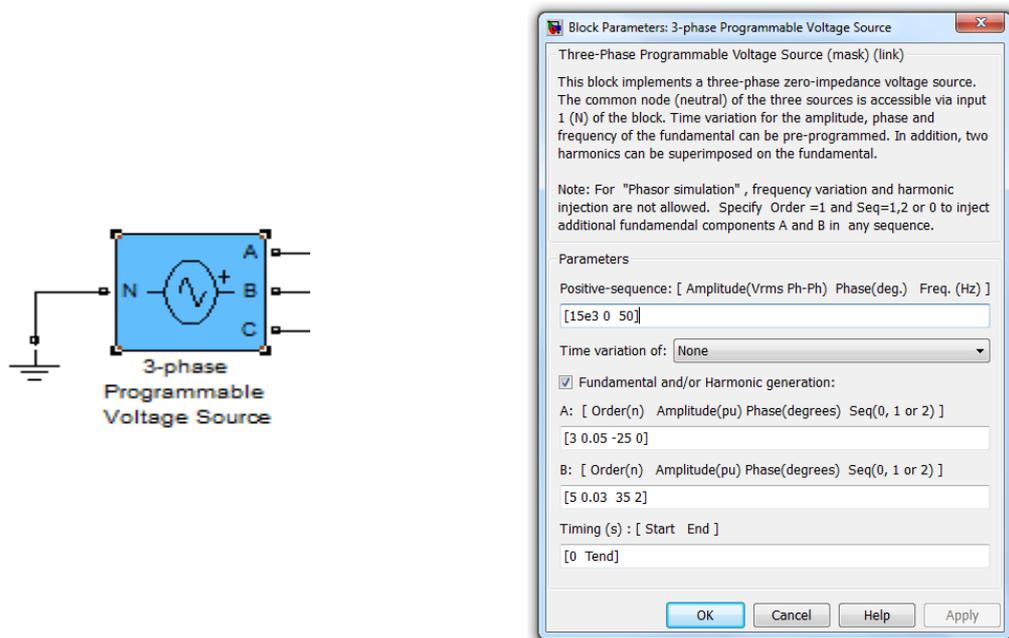


Figura 20: Bloco do SIMULINK® “3-phase programmable source” e respectiva caixa de diálogo

4.3.2. Linhas de Transmissão e Distribuição

A linha de distribuição de média tensão entre a subestação e o PT e a linha de distribuição de baixa tensão, foram modeladas com o recurso a impedâncias resultantes da associação em série de resistências com indutâncias, mediante o tipo de cabo e comprimento, utilizando os valores da resistência e indutância equivalente. O processo é idêntico ao da modelação da fonte, mas usando o bloco “3-phase RLC series element”. Na Figura 21 apresenta-se o bloco utilizado e a sua respectiva caixa de diálogo para edição e configuração dos parâmetros que visam modelizar as linhas de distribuição.

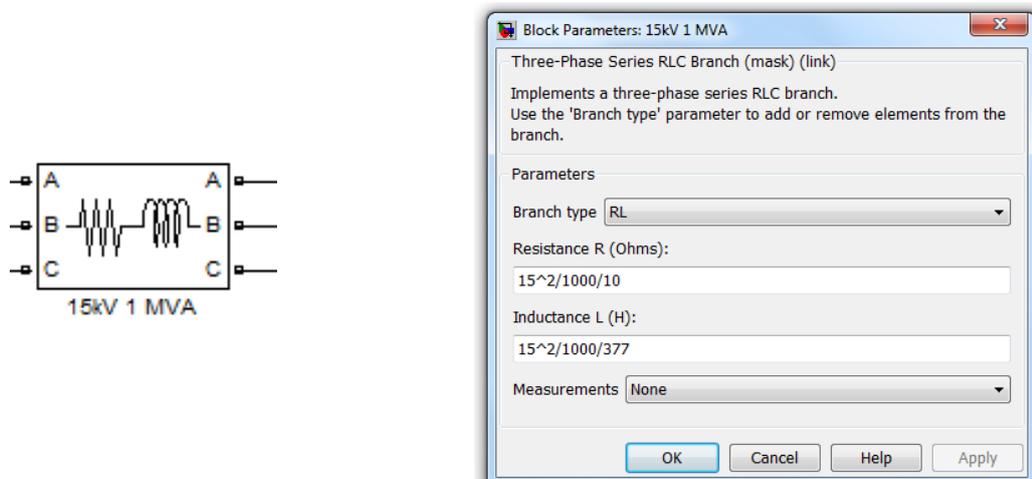


Figura 21: Bloco do SIMULINK® “3-phase RLC series element” e respectiva caixa de diálogo

4.3.3. Transformador

Para o transformador existem diversos modelos no SIMULINK. Atendendo à finalidade da simulação para o caso em estudo, foi escolhido um modelo que permite algumas variantes, nomeadamente, a configuração dos enrolamentos, diferentes índices horários e a possibilidade de se ter um ou dois secundários. O modelo escolhido implementa um transformador trifásico com base em três transformadores monofásicos equivalentes, com possibilidade de saturação do núcleo e escolha do tipo de ligação. Na Figura 22 encontra-se o bloco tipo do transformador da biblioteca “*Three-Phase Library*” e respectiva caixa de diálogo que possibilita a configuração dos respectivos parâmetros.

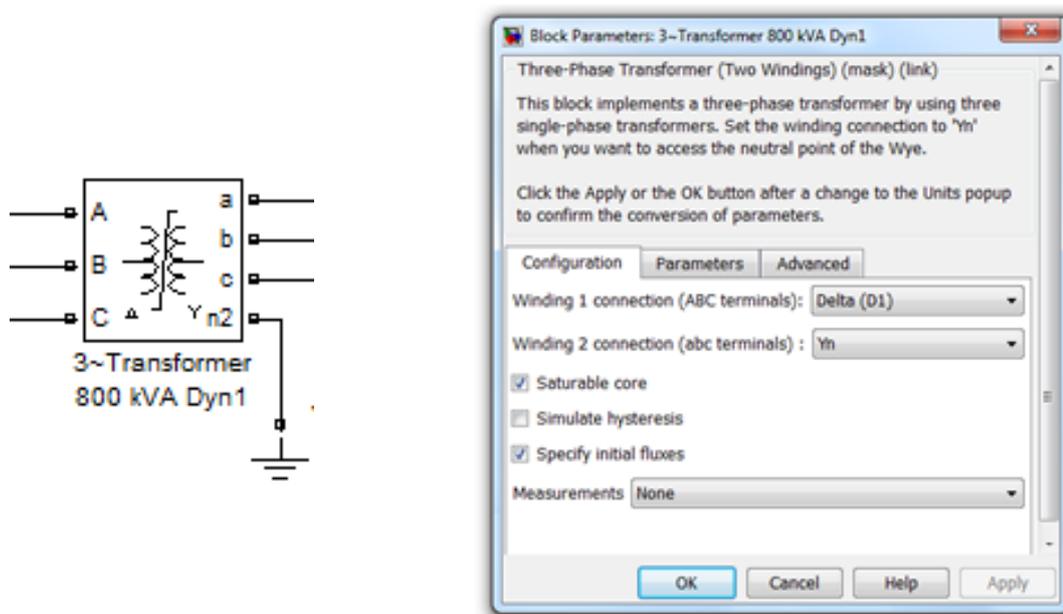


Figura 22: Bloco do SIMULINK® “3-Phase Saturable Tranformer” e respectiva caixa de diálogo

O modelo eléctrico utilizado para cada transformador monofásico corresponde à utilização dos parâmetros do esquema equivalente por fase, nomeadamente, a resistência dos enrolamentos (R_1 e R_2), indutância de fugas (L_1 e L_2), e as características magnéticas do núcleo que são modelizadas, através da resistência de magnetização (R_m) e da indutância saturável (L_{sat}), tal como apresenta a Figura 23.

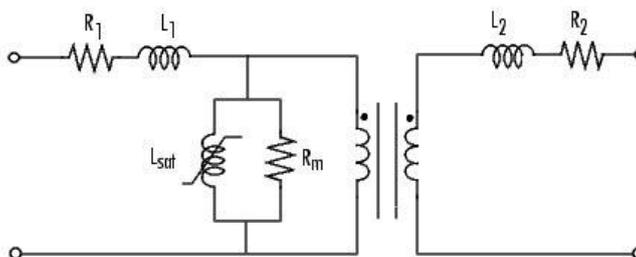


Figura 23: Esquema equivalente por fase do transformador trifásico

Com base nestes parâmetros de entrada no modelo do transformador monofásico e recorrendo às equações electromagnéticas desta máquina, obtém-se o modelo de uma máquina estática que transforma por indução electromagnética, um sistema de tensões alternadas num sistema de tensões da mesma frequência, mas de amplitudes diferentes. Sobrepondo três modelos anteriormente descritos (transformador monofásico), com reajuste dos devidos parâmetros em função das ligações dos enrolamentos, obtém-se um modelo mais abrangente para o transformador trifásico.

4.3.4. Carga Trifásica Programável

Com o intuito de tornar a simulação mais perto da realidade, as cargas escolhidas têm a particularidade de poderem ser programáveis em termos de potência activa e reactiva. Assim, optou-se por utilizar um bloco designado por “3-Phase Dynamic Load” que permite modelizar uma carga trifásica com variação temporal das potências activas e reactivas. A Figura 24, mostra o bloco utilizado e a sua respectiva caixa de diálogo que permite um controlo externo para a potência activa e reactiva, através do recurso a variáveis independentes do MATLAB®. Essas variáveis podem ser directamente carregadas de um qualquer ficheiro Excel para variáveis independentes do MATLAB®, com o comando do MATLAB® “XLsread”. Esta funcionalidade permite utilizar muito facilmente ficheiros de dados obtidos por auditorias, realizadas com analisadores de rede, como o apresentado no capítulo 3. Este bloco pode ser utilizado tanto para modelizar consumidores típicos trifásicos, a partir de diagramas de carga pré-registados, bem como carregadores trifásicos como aquele que foi monitorizado e cujo diagrama de carga foi apresentado no capítulo anterior.

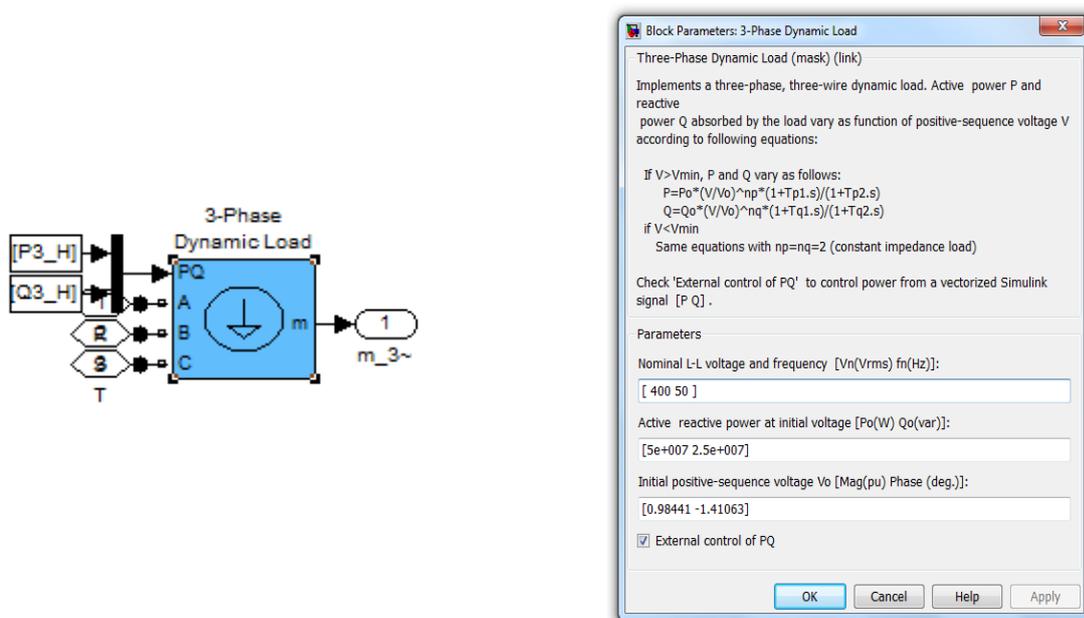


Figura 24: Bloco do SIMULINK® “3-Phase Dynamic Load” e respectiva caixa de diálogo

4.3.5. Carga Monofásica Programável

As cargas monofásicas são modelizadas com recurso ao bloco “*Single-phase Dynamic Load*”, sendo muito semelhante ao bloco utilizado para a modelização das cargas trifásicas, mas aqui na sua variante monofásica. A Figura 25, apresenta o bloco utilizado e a respectiva caixa de diálogo. Este bloco pode modelizar os consumidores monofásicos utilizando diagramas de carga registados anteriormente e ainda os carregadores monofásicos, como aquele apresentado no capítulo 3.

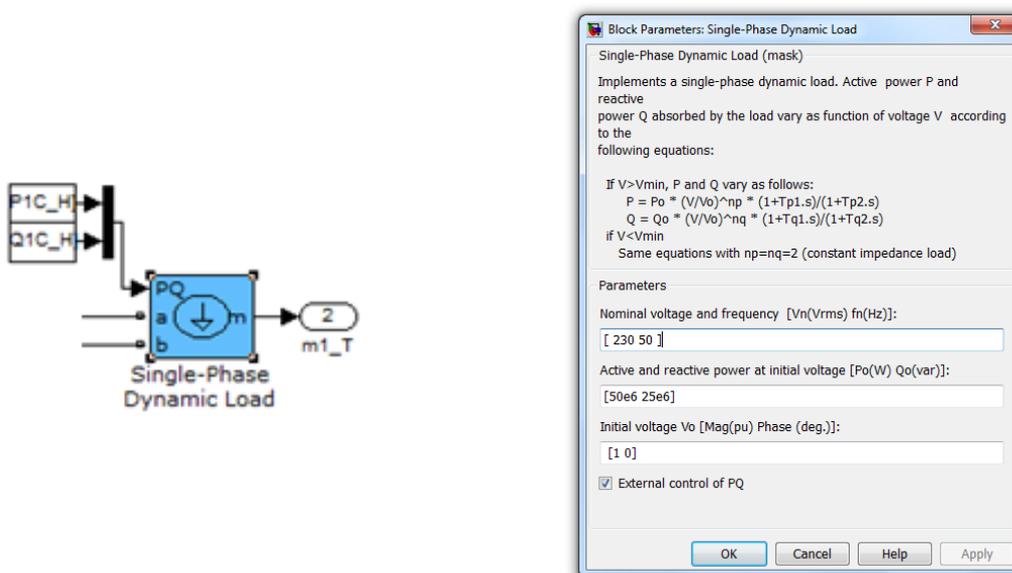


Figura 25: Bloco do SIMULINK® “*Single-Phase Dynamic Load*” e respectiva caixa de diálogo

4.3.6. Aparelhos de Medida e Registo dos Dados

Para registar os valores das grandezas pretendidas foi utilizado um bloco de medidas trifásico (Figura 26), “*Three-Phase VI Measurement*” retirado da biblioteca “*measurement*”, colocados na rede de distribuição nos pontos em que pretende efectuar uma monitorização e análise às variáveis medidas, nomeadamente, na BT do transformador, antes dos consumidores trifásicos e antes dos consumidores monofásicos. O bloco utilizado mede a tensão e a corrente instantâneas. Essas medidas serão utilizadas posteriormente num bloco extra que calcula a potência activa e reactiva, bem como noutro bloco extra que calcula o THD da tensão e da corrente. O registo do dados para posterior edição e criação dos gráficos em MATLAB® das variáveis que se pretendem analisar, foi efectuada pelo bloco “*Save to Workspace*” e armazenados numa variável do MATLAB®.

5. Estudo de casos

5.1. Introdução

Neste capítulo, pretende-se apresentar e analisar o impacto do carregamento massivo de veículos eléctricos numa rede de distribuição de baixa tensão representativa de uma área essencialmente residencial, contendo consumidores trifásicos e consumidores monofásicos. Apresenta-se ainda, os resultados obtidos para as metodologias de carregamento definidas no capítulo 2, acrescentando um novo cenário que corresponde a uma desagregação dos consumidores com ou sem tarifa bi-horária, denominado daqui em diante como carregamento misto. O estudo realizado, para além de analisar a evolução da procura na potência activa, também aqui, é analisado o impacto dos recarregamentos dos VE do ponto de vista do aumento do trânsito da energia reactiva.

5.2. Estudo por Simulação

5.2.1. Construção da Rede de BT

Na construção do modelo da rede de distribuição procurou-se tanto quanto possível retratar de forma fiel a realidade. A rede considerada alimenta em baixa tensão (400 / 230V) duzentos consumidores, com uma potência aparente máxima de 475kVA, divididos em consumidores trifásicos e consumidores monofásicos, sendo que estes não são uniformemente repartidos pelas três fases de forma a modelizar o desequilíbrio entre fases existente em redes de distribuição deste tipo. Não tendo tido acesso a todos os dados de uma rede de distribuição real, efectuou-se uma pesquisa para se obter os dados em falta dos elementos constituintes da rede de distribuição que se pretende modelizar. A rede de distribuição considerada é apresentada na Figura 28. O posto de transformação é alimentado por uma linha de média tensão de 15kV que vem directamente da subestação.

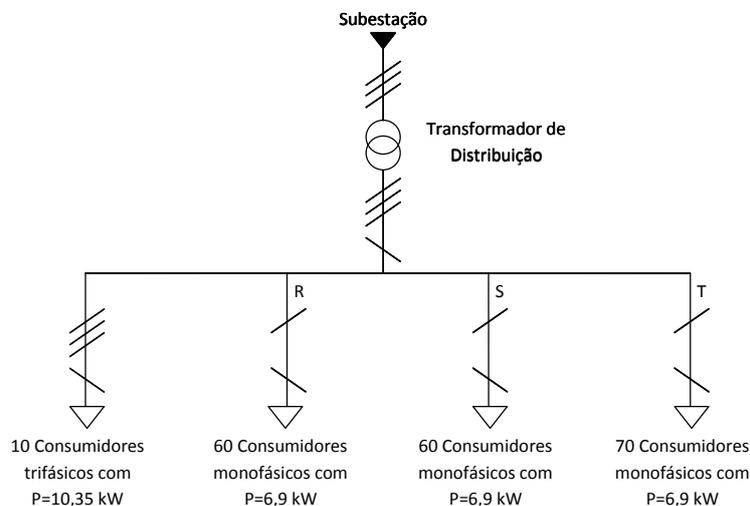


Figura 28: Vista global da implementação de uma rede de distribuição com Blocos do SIMULINK®

5.2.2. Transformador

Na modelização do transformador utilizou-se os dados de um transformador real de 800kVA, dimensionado para praticamente o dobro da potência aparente máxima a transferir para os duzentos consumidores. Do lado da alta tensão utiliza-se uma ligação em triângulo (D) e do lado da baixa tensão, uma ligação estrela com neutro, e um índice horário de 11 (desfasamento de 330°). Portanto, o transformador trifásico de distribuição modelizado tem as seguintes características:

- **Tensões, Ligações:** 15 / 0,4-0,232kV \pm %, Dyn11;
- **Perdas em vazio:** 1,950 kW;
- **Perdas no cobre:** 10,200 kW;
- **Corrente em vazio ($\% \times I_{1n}$):** 2,5;
- **Queda de tensão (%), $\cos \varphi$:** 3,85;
- **Tensão de curto-circuito (%):** 4,5.

Com os dados acima apresentados, calcularam-se os parâmetros do esquema equivalente por fase referido à alta e baixa tensão de forma a introduzi-los na janela de diálogo do bloco do transformador do SIMULINK[®], conforme apresentado na secção 4.3.3.

5.2.3. Consumidores

Cada consumidor foi modelizado com uma carga programável definida nas secções 4.3.4 e 4.3.5, consoante seja um consumidor trifásico ou monofásico. Cada carga implementada representa uma habitação. Num universo de duzentos consumidores, 5% dos consumidores são considerados trifásicos e 95% são consumidores monofásicos dividindo-se estes últimos pelas três fases, conforme se apresenta na Tabela 3. As cargas foram divididas em monofásica e em trifásica consoante o seu consumo, e considerado que as habitações monofásicas têm contratos até 6,9 kW e as trifásicas até 10,35kW [28].

Tabela 3: Desagregação dos consumidores de uma rede de baixa tensão

Consumidores	Monofásicos	Trifásicos
<i>Fase R</i>	60 Unidades	10 Unidades
<i>Fase S</i>	60 Unidades	
<i>Fase T</i>	70 Unidades	

O diagrama de carga das habitações foi efectuado a partir de trinta monitorizações de consumos domésticos em diferentes habitações, onde foram registados valores de potência activa e posteriormente calculada a potência reactiva, admitindo um factor de potência

constante de 85%. A partir destes dados escolheu-se aleatoriamente diagramas de carga até perfazer os conjuntos monofásicos seleccionados. Para construir o diagrama de carga do conjunto trifásico, escolheu-se os diagramas com a ponta máxima maior e somaram-se dois a dois. Depois de obter os consumos diários das habitações, construiu-se diferentes cenários com vários métodos de carregamento, mantendo a metodologia do capítulo 2, mas como neste caso foi realizada uma monitorização das baterias, não será necessário, simular diferentes necessidades energéticas das baterias. Foi então unicamente necessário implementar uma distribuição normal para simular a entrada dos VE na rede em função do tempo. Estes cenários foram elaborados a partir dos consumos diários das habitações, onde lhe foi incluído o consumo dos VE, utilizando os dados recolhidos na monitorização descrita no capítulo 3.

Assim, foram efectuadas simulações com os seguintes cenários: cenário sem VE, carregamento não controlado, carregamento com incentivos tarifários, cenário misto e nivelamento de carga. Para todos os cenários com carregamento, considerou-se duas situações de posse de VE, com 50% e 100% do conjunto das habitações.

5.3. Cenário sem Veículos Eléctricos

Apresenta-se a seguir os resultados de simulação diária dos duzentos consumidores sem necessidades de carregamento de VE, situação actual. Na simulação foi registada a evolução diária da potência activa e reactiva, valores RMS da tensão e da corrente e respectivo factor potência, para o lado BT do PT. A Figura 29, apresenta os valores medidos do lado de baixa tensão do transformador trifásico. É de salientar que as pontas máximas estão situadas perto dos 480kW e registam-se por volta das 9h30 e 20h00, correspondendo ao período da manhã com maior procura e ao período em que as pessoas normalmente regressam a casa, e que entre as 0h00 e as 7h30 ocorre um período de menor consumo. A potência reactiva tem um comportamento bastante uniforme não ultrapassando os 150kvar. A evolução da tensão nas três fases é bastante similar, obtendo-se um valor entre os 399 e os 400V. Observando o gráfico da corrente, é de notar que as três fases não apresentam a mesma evolução, sendo que a fase T regista valores superiores às fases R e S, devido ao desequilíbrio do número de consumidores monofásicos pelas três fases. O factor de potência obtido, através da razão entre a potência activa e a potência aparente, tem um valor praticamente constante situado nos 95%. É de salientar que se considerou um número de consumidores trifásicos muito menor do que os monofásicos (5% do valor total) e que as correntes absorvidas, por esses consumidores, estão equilibradas. Portanto, o comportamento dos consumidores monofásicos será dominante no secundário do transformador.

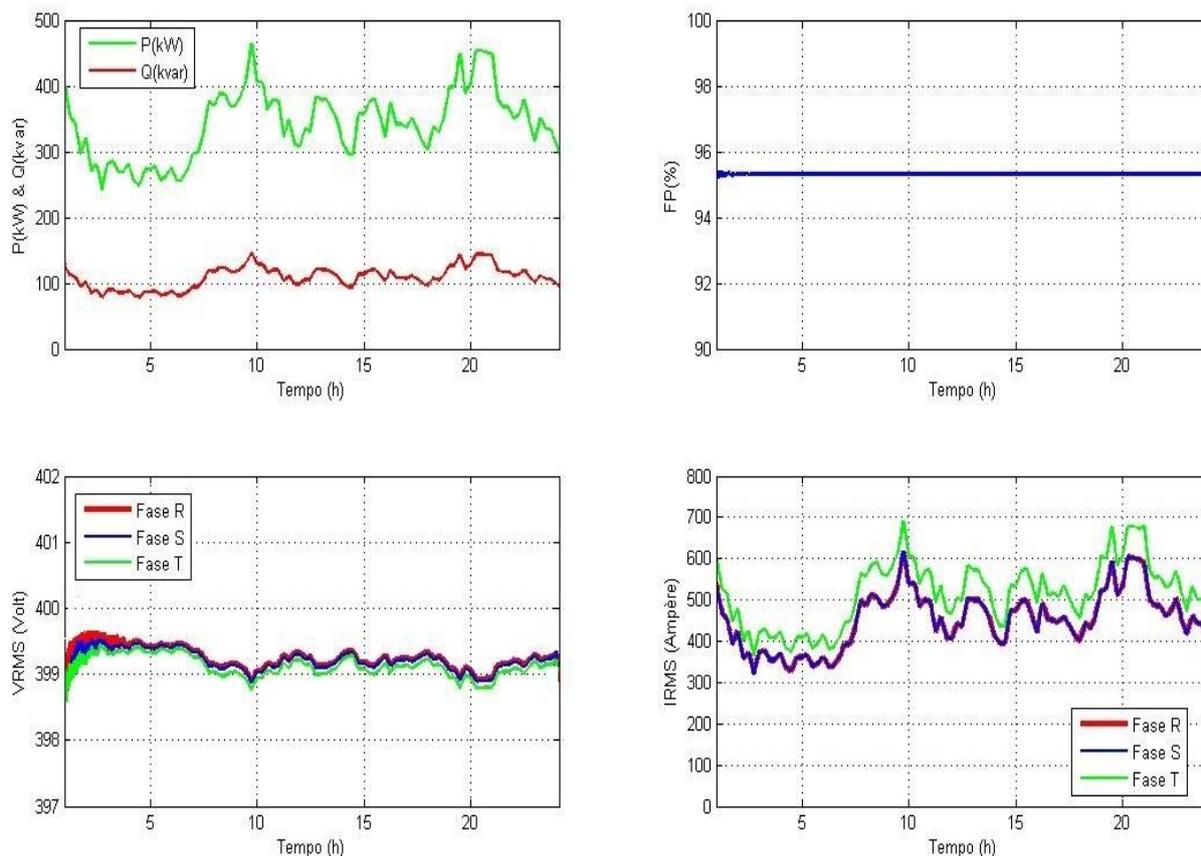


Figura 29: Monitorização da BT do transformador para o cenário sem VE

5.4. Carregamento Não Controlado

Partindo dos resultados anteriormente apresentados, caso inicial sem VE, segue-se agora a análise das diversas metodologias de carregamento, avaliando os seus efeitos nas grandezas em estudo. Começando com o carregamento não controlado e de carácter perfeitamente aleatório modelizado pela aplicação da distribuição normal, conforme descrito no capítulo 2.

No gráfico seguinte, apresenta-se os resultados para um carregamento não controlado considerando o acréscimo de consumo por parte das cargas adicionais, num cenário de 50% (linhas tracejadas) de VE, e num cenário de 100% (linhas traço-ponto) de VE.

Na Figura 30 e relativamente às curvas das potências, verifica-se que a introdução dos carregamentos dos VE aumenta o pico de potências já existente tanto na potência activa como na reactiva, como já verificado anteriormente no capítulo 2. No entanto, estas simulações permitem perceber o que acontece ao trânsito de energia reactiva, verifica-se que esta quase que triplica nos períodos de maiores carregamentos, o que leva a uma degradação substancial do factor de potência, tomando, nesses períodos, valores que chegam a ser de 0,55. Nessa

situação, a potência reactiva é de facto maior do que a potência activa, porque representa o momento em que existe grande número de VE a terminar o seu carregamento, grande número de carregadores na fase “*Topping Charge*”, sobretudo do tipo monofásico, onde a potência reactiva é muito maior do que a activa (Cfr. Figura 17) e outros em fase de carregamento no modo “*fast*”, o que, tudo junto, leva o factor de potência para valores muito baixos.

De registar, ainda, que a potência máxima solicitada com a introdução de 100% de VE apresenta um novo pico de potência que atinge os 1100kW, o que está acima das capacidades do transformador e demonstra a não viabilidade deste tipo de carregamento numa introdução massiva de VE. De referir, que só foi possível registar estes valores por se tratar de uma simulação e portanto ser possível matematicamente ultrapassar a capacidade máxima do transformador de distribuição, na realidade, o que aconteceria seria a actuação das protecções à saída do PT. Durante o período de pedido de maior potência adicional, verifica-se um aumento de corrente e uma diminuição de tensão tomando valores na ordem dos 396V. O factor de potência já não se mantém constante, registando-se, nesse período, um valor mínimo de 80% no lado BT do transformador.

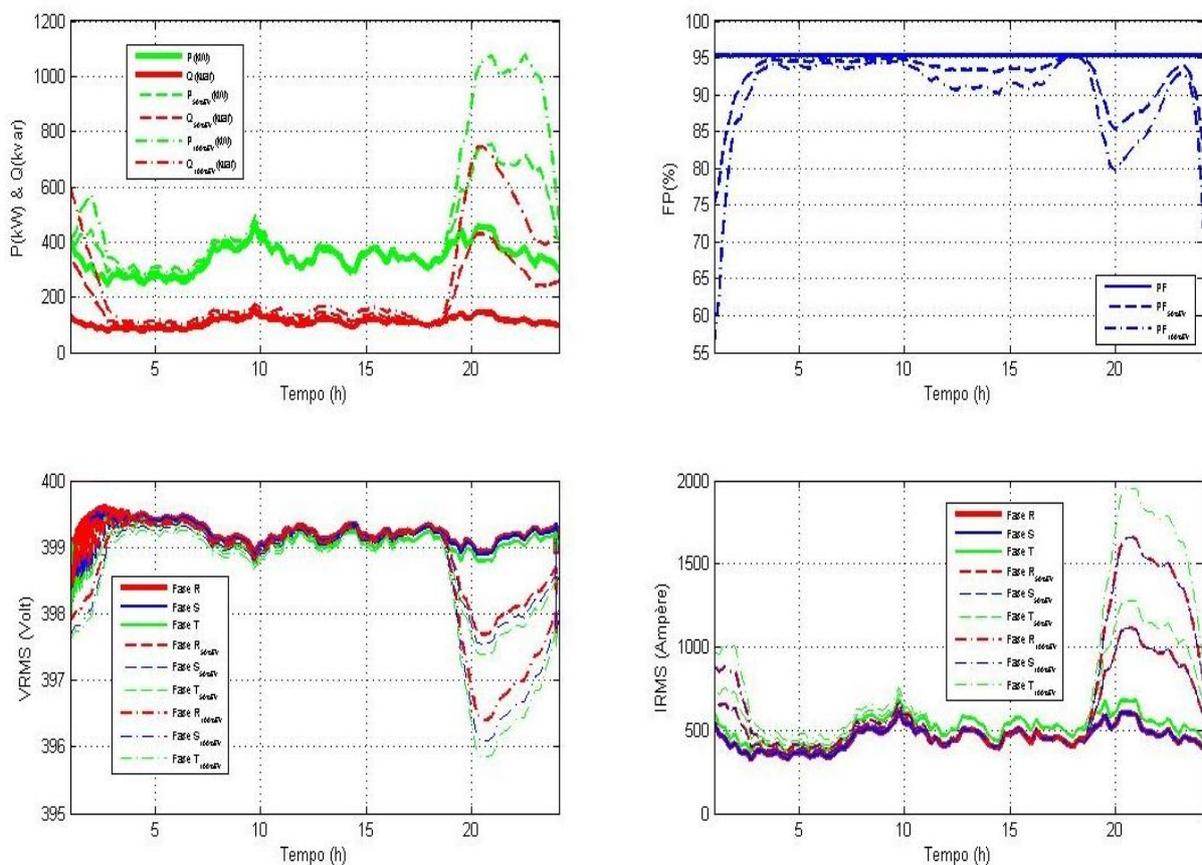


Figura 30: Monitorização da BT do transformador para o cenário não controlado

No período em que não há carregamento doméstico de VE, e portanto deveriam estar desligados da rede, era de esperar que os valores da potência activa e reactiva mantivessem a mesma evolução do que nas simulações sem VE, no entanto os gráficos não demonstram isso, evidenciado sobretudo pelo registo do factor de potência. Essa situação, deve-se ao facto de ter utilizado os ficheiros com as monitorizações de 24h dos carregamentos efectuadas e apresentadas no capítulo 3 (Figuras 14 e 17), o que leva a considerar que os VE se mantêm ligados à rede durante o dia (situação que pode modelizar um dia feriado ou fim-de-semana). Portanto, as simulações utilizaram o período de 24h monitorizadas e por conseguinte existe uma grande acumulação de carregamentos em final de carga, modo de carregamento “*Trickle Charge*”, onde a potência reactiva é muito maior do que a potência activa.

5.5. Carregamento com Incentivo Tarifário

Da mesma forma do que foi feito para o cenário anterior, neste ponto compara-se os valores obtidos nestas simulações com as duas anteriores, i.e., sem VE e com carregamento descontrolado de VE. Analisando a Figura 31, verifica-se que o carregamento com incentivo tarifário apenas desloca a ponta máxima adicionada devido ao carregamento dos VE para um horário mais tardio, no caso em estudo por volta das 22h, quando se inicia o incentivo tarifário correspondente ao período de vazio.

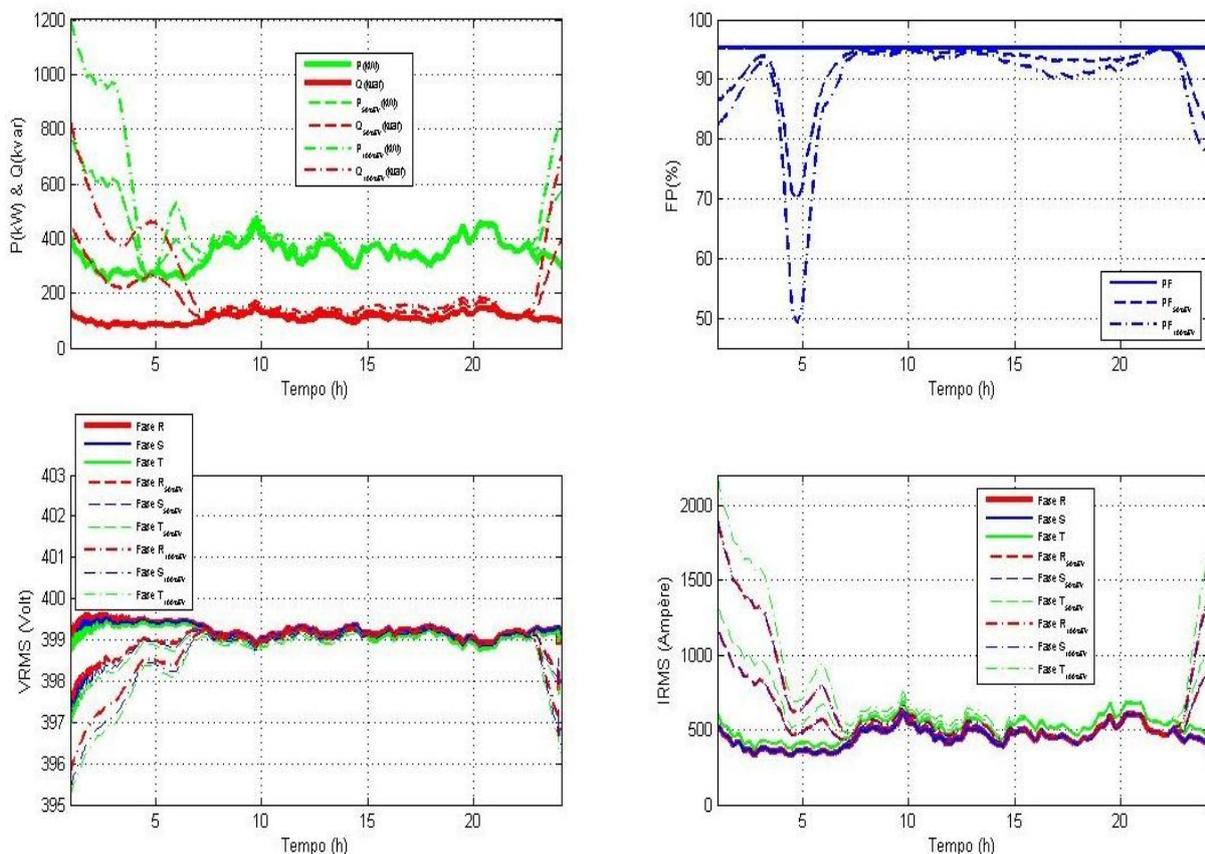


Figura 31: Monitorização da BT do transformador para o cenário com incentivo tarifário.

5.6. Cenário Misto

Este novo cenário, foi construído no pressuposto de que nem todos os consumidores têm o mesmo tarifário de energia, assim realizou-se uma conjugação dos dois cenários anteriores. Considerou-se que 80% dos consumidores monofásicos teriam a tarifa normal enquanto os restantes 20% optariam pela tarifa bi-horária. A mesma consideração foi feita para os consumidores trifásicos.

Assim, e mantendo a mesma abordagem anteriormente utilizada, avalia-se o impacto do carregamento dos VE com este cenário, comparando-o com os resultados anteriormente obtidos para as outras metodologias de carregamento.

Observando os gráficos da Figura 32, sobressai que o aumento da potência activa exigido pelos carregamentos dos VE é menor do que os registados anteriormente com as duas metodologias já estudadas, mas, por outro lado, regista-se um aumento da potência reactiva, que chega, em determinado momento (21h-22h), para a situação de 100% de VE, a ser superior à potência activa. Isto deve-se ao facto dos carregadores monofásicos absorverem mais potência reactiva do que potência activa, e sobretudo, como se está perante uma situação em que 80% dos consumidores fazem carregamentos descontrolados, que iniciaram antes do período do incentivo tarifário e quando os restantes VE iniciam os seus carregamentos, os anteriores já estão numa fase mais avançada, logo a necessitar de uma energia reactiva bastante superior à activa. A sobreposição destas causas leva aos resultados obtidos por simulação, presentes nos gráficos da Figura 32. Contudo, comparando os valores da potência reactiva com os cenários anteriores verifica-se que esta mantém-se sensivelmente no mesmo valor. É de salientar ainda, que a evolução atípica da potência reactiva não se verifica nos consumidores trifásicos, o que se justifica pelos carregadores deste tipo não necessitarem de uma potência reactiva superior à potência activa, como se viu no capítulo 3 (Figura 14). A tensão e a corrente têm comportamentos similares aos anteriores mas registando-se o valor mínimo de tensão agora de 397V e o valor máximo de corrente de 1350A. O factor de potência tem evolução não linear devido às grandes variações de potência activa e reactiva nos períodos de carregamento dos VE, sendo que com esta metodologia de carregamento, este atinge um valor mínimo de 47% por volta das 00h00.

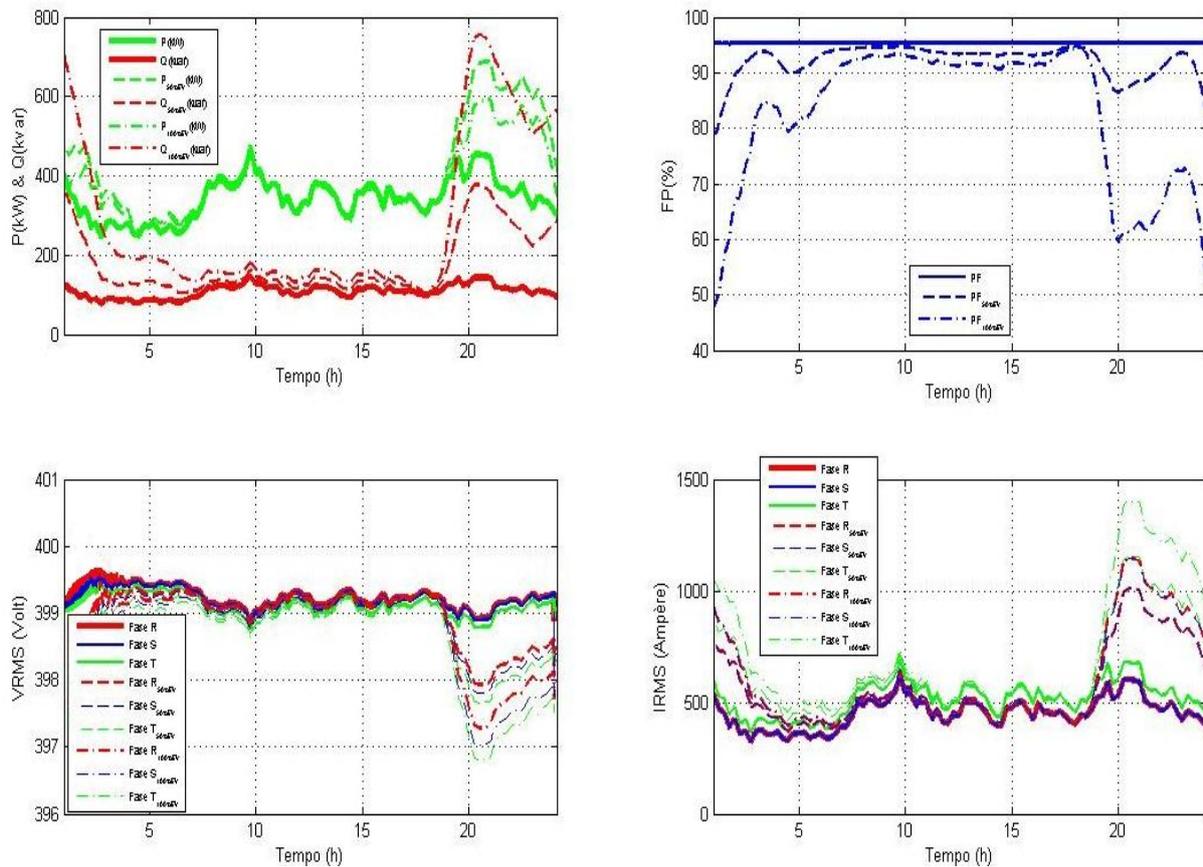


Figura 32: Monitorização da BT do transformador para o cenário misto

5.7. Nivelamento de Carga

Como analisado no capítulo 2, esta metodologia para carregamento pretende nivelar o diagrama de carga durante o período nocturno aproximadamente entre as 22h00 e as 7h00, permitindo todos os carregamentos solicitados e sem ultrapassar as pontas máximas, de potência activa e reactiva, já existentes no diagrama de carga sem carregamento de VE. Ao contrário do efectuado nos anteriores cenários, a implementação do algoritmo de nivelamento de carga implica que se desliguem todos os VE da rede às 7h00.

Neste cenário, pode-se observar na Figura 33 que o aumento da procura energética é feito de forma controlada, sem provocar um novo pico de consumo de energia, e utilizando o período de vazio para efectuar o carregamento de todos os VE que o solicitarem. Da mesma forma, nota-se que a diminuição de tensão provocada pelo pedido extra de energia é também ele controlado e não atinge valores mais baixos do que os ocorridos no cenário sem VE. Relativamente ao factor de potência ocorre uma diminuição do seu valor mas situando-se num valor fixo perto dos 60%.

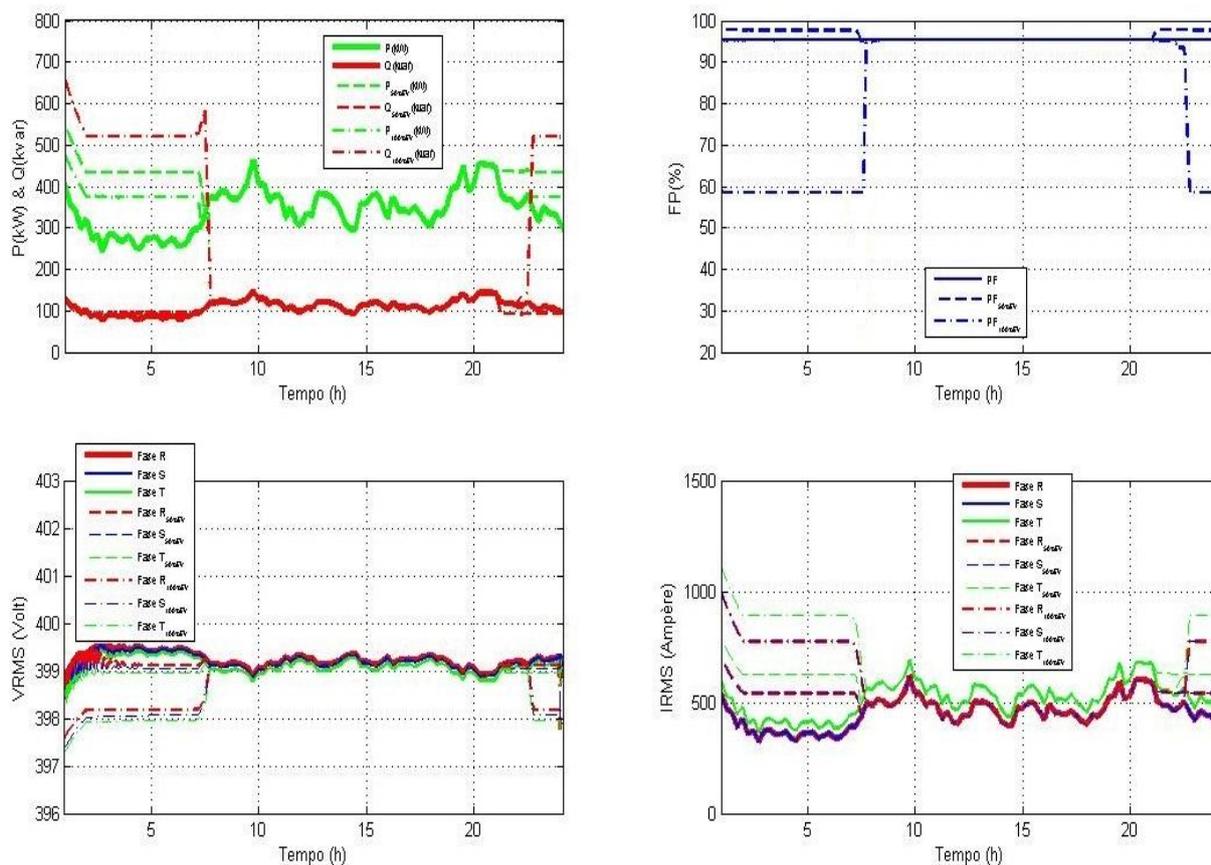


Figura 33: Monitorização da BT do transformador para o cenário de nivelamento de carga

Relativamente aos consumidores monofásicos e trifásicos, os gráficos apresentados em anexo (secção 9.), reforçam que o comportamento global da rede de distribuição é sobretudo influenciado pelos consumidores monofásicos, pelo seu número, deduzindo que para esses consumidores, a menos de um factor de escala, pode-se retirar as mesmas conclusões que na BT do transformador. Para os consumidores trifásicos (Anexo 9.2), verifica-se um comportamento mais equilibrado, sobressaindo apenas que no caso destes consumidores, durante o período de maior procura de carga, o factor de potência desce para valores mínimos compreendidos entre 85% e 91%.

6. Distorção harmónica

6.1. Introdução

A preocupação e o interesse pelos problemas ligados à Qualidade de Energia Eléctrica (QEE), e particularmente pela forma de onda da tensão, são cada vez maiores devido ao aumento da utilização de cargas não lineares. As quais, são particularmente responsáveis pela existência de distorção harmónica nas redes de distribuição de energia. Sabe-se que actualmente, esses tipos de cargas tomam um papel preponderante nos sistemas eléctricos, chegando a serem cerca de 50% a 60% do total das cargas eléctricas, com tendência a aumentar [29-30]. Na sua grande maioria, as cargas não lineares são conversores electrónicos de potência, que permitem adaptar a fonte (rede de alimentação, baterias, etc.) às necessidades da carga. Actualmente, os conversores electrónicos são utilizados essencialmente em equipamentos industriais ou domésticos: alimentação de computadores, controlo de motores eléctricos, regulação da intensidade luminosa de lâmpadas de halogéneo, regulação da potência dos fornos de indução, etc. Portanto, esses conversores electrónicos são fontes de harmónicos que podem fortemente perturbar os equipamentos sensíveis nas suas proximidades. [29-30]

Com o aparecimento dos VE e os Veículos Híbridos Plug-in e a sua interligação à rede eléctrica, surge um conjunto de preocupações com este novo tipo de carga. Os VE armazenam energia em baterias, esse armazenamento é feito através da rede eléctrica convertendo a corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). O processo de obtenção de corrente contínua baseia-se na rectificação da onda da tensão recorrendo a rectificadores monofásicos ou trifásicos. Futuramente, a interligação dos veículos eléctricos à rede eléctrica, trará outras valências, nomeadamente o V2G, onde existirá a necessidade da reversibilidade do conversor de electrónica de potência, funcionando como rectificador num sentido da Rede para o VE e inversor no sentido do VE para a Rede.

Inicialmente, o desafio principal será possibilitar o carregamento necessário aos VE sem que a rede de distribuição perca qualidade de serviço [31-32]. Os progressos no sentido da alternativa tecnológica dos veículos eléctricos geram a necessidade de auxiliar o desenvolvimento de certas tecnologias, sem a qual a evolução da tecnologia do VE permaneceria incompleta e insustentável. Os sistemas que interligam os veículos eléctricos com a rede não são excepção. Estes podem apresentar diversas configurações, valências e topologias. Por exemplo, os carregadores de bateria mais conhecidos são um dispositivo com uma grande componente não linear, devido à sua metodologia de operação e baseado na

comutação de semicondutores. Os harmônicos de corrente e tensão causados pela ligação do carregador de baterias à rede, podem ser bastante elevados e podem degradar a QEE, afectando os consumidores em geral [3, 33-34], conforme se apresenta na Figura 34.

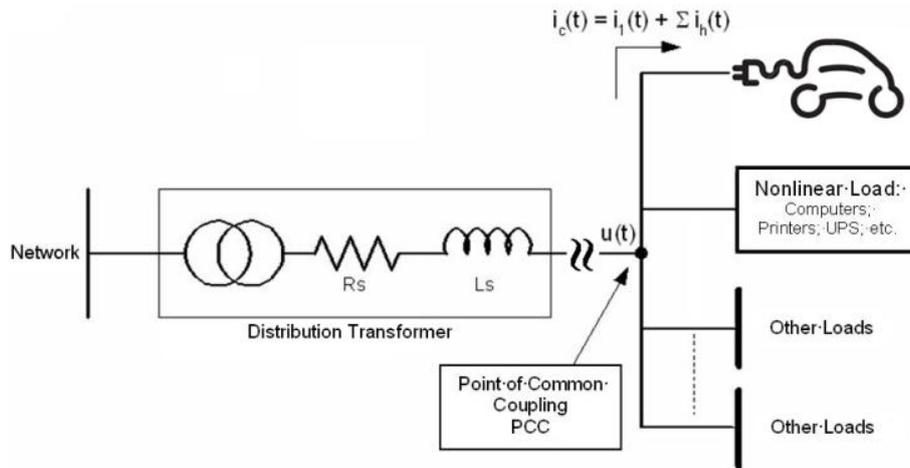


Figura 34: Representação de uma rede de distribuição e proliferação dos harmônicos resultantes de cargas não lineares.

6.2. Topologias Tradicionais de Carregadores

A estrutura dos carregadores depende do país onde os veículos foram produzidos e do país onde serão utilizados, mas basicamente, na sua topologia mais simples, consistem num rectificador monofásico (4 pulsos) ou trifásico (6 pulsos) que alimenta um conversor DC/DC controlado, que permite regular a carga das baterias do VE. Uma alternativa a estes rectificadores não controlados são os rectificadores que permitem controlar o nível de tensão de saída e assim dispensam outros sistemas de controlo a jusante, mantendo, embora mais baixo, um nível de controlo de carga das baterias [31].

Portanto, do ponto vista da rede, a corrente fornecida pela mesma é influenciada pela topologia do carregador em causa e por conseguinte a taxa de distorção harmónica [35]. Na maioria dos carregadores, o circuito de rectificação usado é simples e de baixo investimento, minimizando os filtros do lado DC. Contudo, estes circuitos têm a desvantagem de criar harmónicos de corrente de baixa ordem com uma amplitude alta que se repercutem para o sistema de energia eléctrica.

As topologias com base em interruptores controlados podem trazer algumas desvantagens, como a tensão diminuir devido às comutações, correntes absorvidas mais elevadas, correntes harmónicas com valores absolutos maiores do que as de um rectificador não controlado, e um factor de potência muito mais baixo.

6.3. Análise da distorção harmónica

Como visto anteriormente, um carregador de bateria é considerado uma carga não linear e principalmente baseado em retificador.

6.3.1. Harmónicos causados pelos rectificadores

A amplitude e a frequência das perturbações harmónicas dependem da estrutura do retificador e do seu índice de pulsação p . Se um retificador simétrico debita sobre uma fonte de corrente, os harmónicos presentes na corrente são da ordem [30]:

$$h = kp \pm 1, \quad (4)$$

com $k = 1, 2, 3 \dots$

E as amplitudes respectivas de cada harmónico são dadas pela equação seguinte:

$$I_{c_h} = \frac{I_{c_1}}{h} \quad (5)$$

Dependendo da sua topologia, estes sistemas podem produzir uma taxa de distorção harmónica diferenciada. Das diferentes topologias, destacam-se as montagens dodecafásicas que têm uma melhor prestação em termos de injeção de harmónicos na rede do que as suas congéneres hexafásicas, e que dentro destas, as pontes completas de tirístores têm menor taxa de distorção do que as pontes mistas. As perturbações harmónicas produzidas por estes sistemas variam em função da carga, podendo atingir valores muito mais elevados quando se trata de cargas predominantemente capacitivas.

Os valores eficazes das componentes harmónicas de ordem h da corrente absorvida, calculados pela expressão (5), são representados na Figura 35.

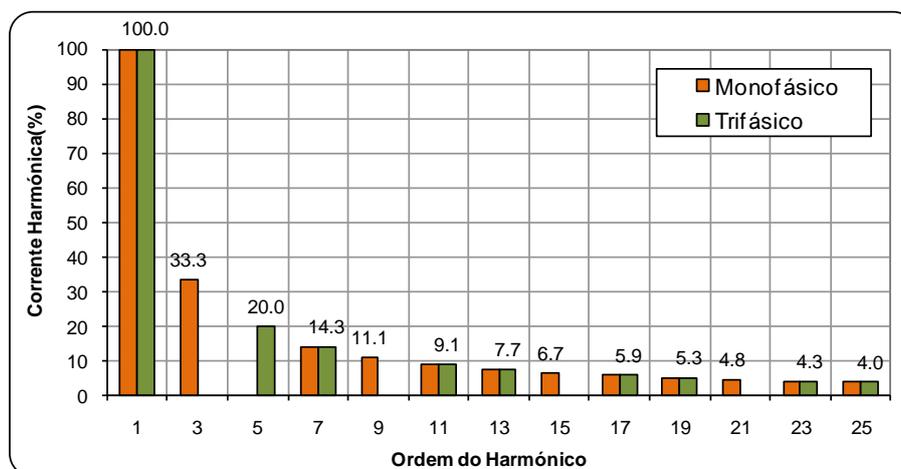


Figura 35: Espectro da distorção harmónica da corrente absorvida por um carregador monofásico e trifásico ($P = 4$ e $P = 6$)

6.3.2. Quantificação da distorção harmónica

A distorção harmónica é uma forma de poluição da rede eléctrica, que pode trazer problemas se os valores das correntes harmónicas forem maiores que o limite estipulado.

Os indicadores quantitativos usados para examinar a qualidade da onda são o valor da amplitude da decomposição da série trigonométrica de Fourier, ou seja, o valor do harmónico (X_k) de ordem k que é dado por:

$$\begin{aligned} X_k &= \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ a_k &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos k\omega t \, dt \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \sin k\omega t \, dt \end{aligned} \quad (6)$$

com $k = 0, 1, 2, \dots$, $\omega = 2\pi f$ e $f =$ à frequência do sistema. X_1 é o valor fundamental.

É comum caracterizar o nível da distorção harmónica num sistema através da Distorção Harmónica Total (*Total Harmonic Distortion - THD*), que quantifica o valor efectivo da distorção harmónica, e, segundo a norma norte-americana do IEEE¹, pode ser expressa da seguinte forma:

$$THD_x = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{X_k}{X_1}\right)^2} \quad (7)$$

onde X pode ser um valor de tensão (V) ou um valor de corrente (A) para um sinal eléctrico [29-30], [36-37].

O factor de potência pode ser genericamente definido pela razão entre a potência activa e potência aparente absorvida pela carga. Mas para um sinal não sinusoidal, a potência deve ser calculada com todas as componentes harmónicas do sinal (tensão e corrente), como é definido na equação (8).

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_{v_h} - \theta_{i_h})}{\sqrt{(V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2}} \quad (8)$$

com:

$$V_H = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} |V_h|^2} \quad e \quad I_H = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} |I_h|^2} \quad (9)$$

¹ segundo a norma internacional IEC, utilizada na União Europeia, o denominador do quociente da equação (7) é o valor eficaz total da grandeza. Dessa forma, segundo essa norma [36], o THD nunca excede os 100%,

Embora seja assumido que, para a maioria dos casos, a tensão de alimentação é um sinal sinusoidal ou com uma distorção harmónica muito baixa, é possível reescrever λ como uma função do factor de potência, devido ao desfasamento das componentes fundamentais (λ_θ) e do THD da corrente absorvida:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\cos(\theta_{v_1} - \theta_{i_1})}{\sqrt{1 + THD_i^2}} = \frac{\lambda_\theta}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (10)$$

Pelas expressões (8) e (10) demonstra-se claramente que, devido à relação entre λ e o THD, a eficiência no uso da energia eléctrica diminui com o aumento da distorção harmónica das tensões e das correntes.

6.4. Análise da Distorção harmónica dos Carregadores de Baterias

6.4.1. Carregador trifásico – Baterias de ácido-chumbo

As Figuras 36 e 37 mostram as curvas da tensão e da corrente absorvida pelo carregador trifásico durante o modo de carregamento “*medium*”. Por exemplo, a tensão está dentro dos limites de valor RMS e o valor THD_v , na linha de distribuição está cerca de 2% abaixo do valor máximo permitido pelos limites propostos pela maioria das normas internacionais [36]. Para a corrente, é registado um nível mais elevado de distorção harmónica, apesar de ser mais baixo do que o esperado teoricamente para um rectificador trifásico simples. Durante uma carga completa, o valor THD_i tem um primeiro valor constante de cerca de 20% e durante o modo de carregamento “*Trickle Charge*” aumenta para 90% quando a corrente absorvida atinge o pico, conforme se verifica nas Figuras 38 e 39. A onda de corrente na Figura 37 tem uma evolução semelhante a uma onda sinusoidal, o que significa uma baixa distorção, como pode ser visto durante os primeiros modos de carregamento, mas quando o carregador passa para o modo de carga “*Low*”, a distorção diminui significativamente, conforme apresentado na Figura 38.

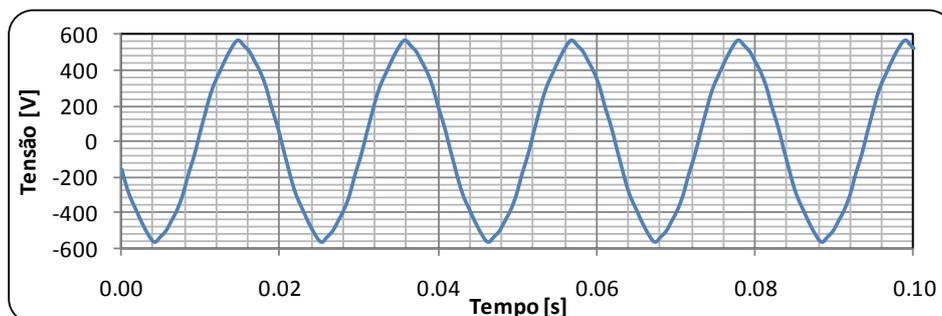


Figura 36: curva da tensão de um carregador trifásico.

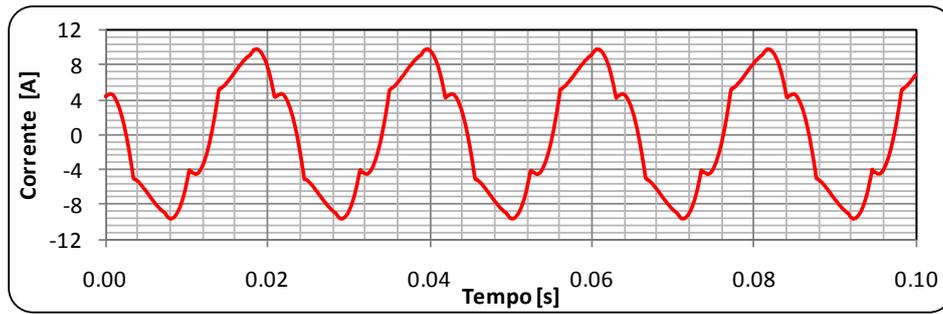


Figura 37: Curva da corrente de um carregador trifásico.

Durante o modo de carga “Low”, a degradação da qualidade da onda da corrente corresponde a um aumento no THD_i e leva a uma redução do factor de potência, como pode ser visto na Figura 38 e Figura 15 do capítulo 3. Esta degradação faz com que o aumento de perdas no circuito de alimentação do carregador introduza uma distorção maior no sistema de distribuição de energia. Além disso, fazendo uma avaliação global da carga completa, o carregador em estudo tem um bom desempenho em termos de distorção harmónica nos primeiros modos de carregamento. O uso desses equipamentos em larga escala não apresenta grandes preocupações com possíveis problemas associados ao aumento da distorção harmónica, ou seja, a degradação da qualidade da onda de tensão pode criar problemas de operação para cargas sensíveis e um aumento da potência aparente global no ponto de interligação e sobretudo para o transformador de distribuição.

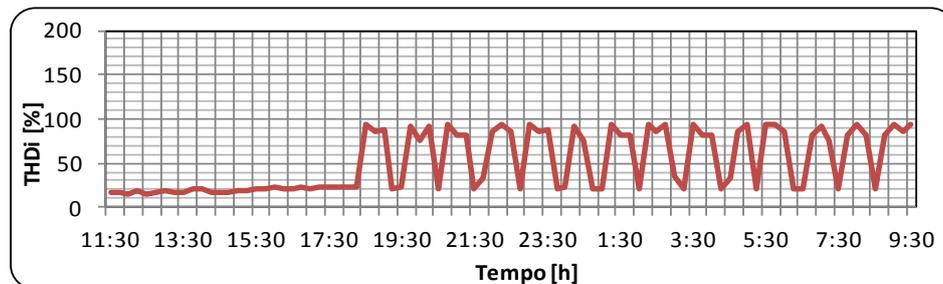


Figura 38: Carregador trifásico - evolução dos valores de THD_i para uma carga completa

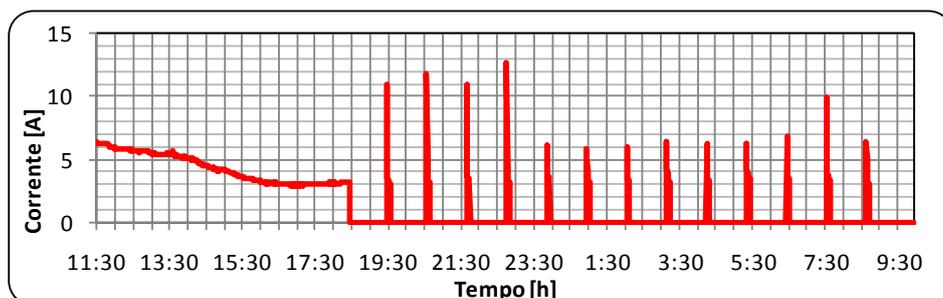


Figura 39: Carregador trifásico - evolução dos valores da corrente RMS para uma carga completa.

6.4.2. Carregador monofásico:

As curvas da tensão e das correntes absorvidas foram registadas durante o modo de carga “Fast” e são apresentadas nas Figuras 40 e 41. A curva da corrente absorvida é do tipo “high crest factor” e corresponde perfeitamente à curva da corrente de entrada de um retificador monofásico. A curva da tensão não mostra uma distorção muito visível, mas o THD_v é mais elevado do que o anteriormente analisado para o carregador trifásico, oscilando entre os 4% e os 6% durante a monitorização. A evolução do THD_v é representada na Figura 42. O valor do THD_v na linha de distribuição é em torno do valor máximo permitido pelo padrão do IEEE, com a presença de harmónicos de tensão de 3.^a, 5.^a e 7.^a ordem, com valores acima dos limites propostos pelas normas mais importantes [37].

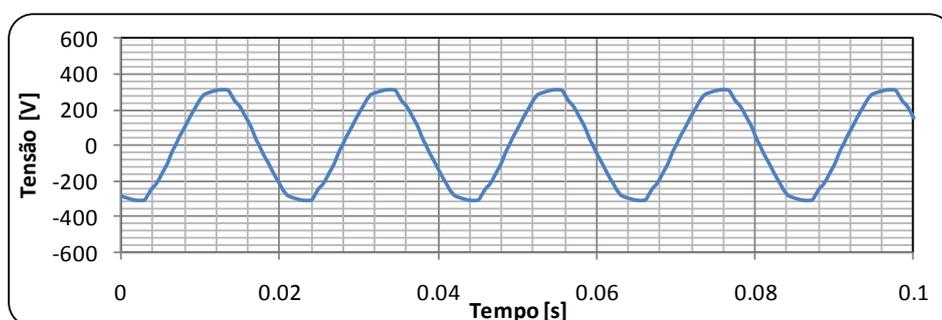


Figura 40: Curva da tensão para um carregador monofásico.

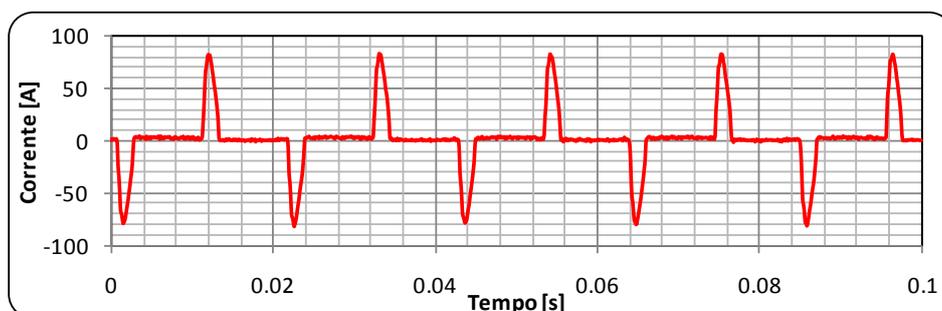


Figura 41: Curva da corrente para um carregador monofásico.

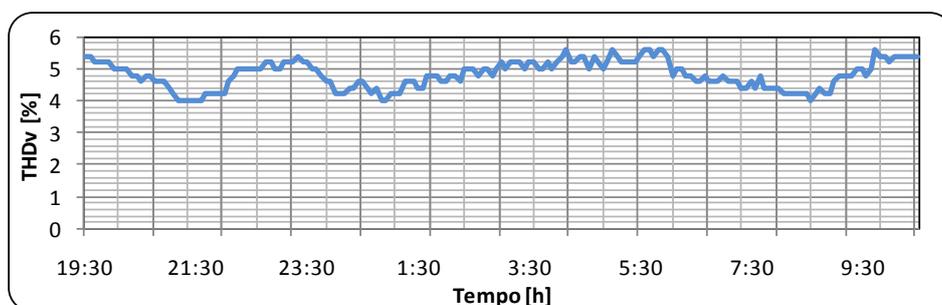


Figura 42: Registo do THD_v para uma carga completa de um carregador monofásico.

Para a corrente absorvida, regista-se um nível muito alto de THD_i , como se pode verificar na Figura 43. A sua evolução está directamente ligada à evolução da corrente eficaz, como pode ser observado na Figura 44. O valor do THD_i é praticamente constante (100%) durante o carregamento “Fast”, e durante o modo “Topping” e “Trickle”, este cresce para 150%.

Durante o modo de carregamento “Topping” e “Trickle”, a degradação da qualidade da corrente tem uma grande influência no THD_i e conduz a um factor de potência mais baixo, como foi verificado na Figura 18 do capítulo 3, esta degradação também causa um acréscimo das perdas no circuito eléctrico do carregador e introduz uma maior distorção no sistema de distribuição.

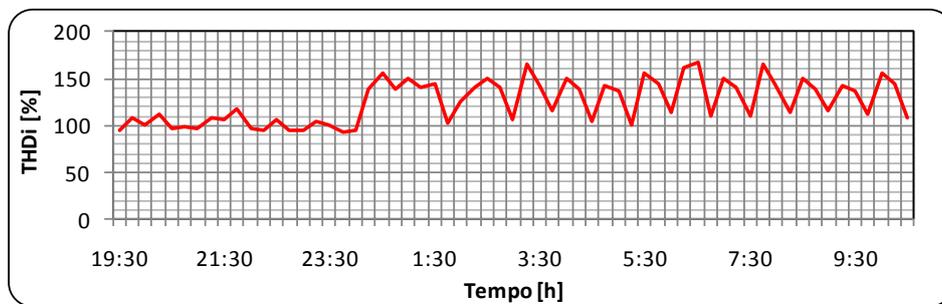


Figura 43: Carregador monofásico - evolução dos valores de THD_i para uma carga completa.

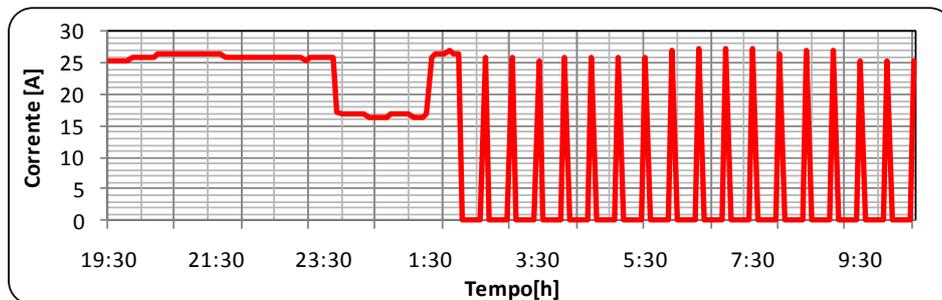


Figura 44: Carregador monofásico - evolução dos valores de corrente RMS para uma carga completa.

Para o carregador monofásico, o harmónico de 3ª ordem, é aquele que se manifesta com a mais elevada amplitude. Este harmónico torna-se bastante importante para os sistemas de distribuição de energia com ligação estrela com neutro, visto que a corrente pode fluir pelo neutro e levar a dois tipos de problemas: sobrecarga do neutro e interferências na linha telefónica.

6.5. Estudo do Aumento da Potência Aparente Não Fundamental

O *IEEE Working Group on Non-Sinusoidal Situation* sugere na publicação [38] um grupo de definições práticas para descrever, de forma simples, a potência de distorção em função das componentes: total, fundamental e não fundamental. Sabendo que a potência aparente S é por definição calculada pela equação (11):

$$S = V_{eficaz} \cdot I_{eficaz} \quad (11)$$

Os valores eficazes da tensão e da corrente, considerando estas grandezas com valor médio nulo, podem ser separados em dois termos, um reflectindo a componente fundamental e outro as restantes componentes, através das expressões 12 e 13:

$$V_{eficaz}^2 = V_1^2 + V_h^2 \quad \text{com} \quad V_h = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}, \quad (12)$$

e

$$I_{eficaz}^2 = I_1^2 + I_h^2 \quad \text{com} \quad I_h = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}, \quad (13)$$

Substituindo em (11), as expressões (12) e (13), então a primeira pode ser reescrita na seguinte forma:

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_h)^2 + (V_h I_1)^2 + (V_h I_h)^2, \quad (14)$$

ou reagrupando:

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2, \quad (15)$$

onde S_1 é a Potência Aparente Fundamental e S_N a Potência Aparente Não Fundamental, sendo estas dadas por:

$$S_1^2 = (V_1 I_1)^2 = V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \delta_1)^2 + V_1 I_1 \text{SIN}(\theta_1 - \delta_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2, \quad (16)$$

e portanto,

$$S_N^2 = (V_1 I_h)^2 + (V_h I_1)^2 + (V_h I_h)^2. \quad (17)$$

O termo $(V_1 I_h)$ é denominado por a Potência de Distorção da Corrente, $(V_h I_1)$ por Potência de Distorção da Tensão e $(V_h I_h)$ a Potência Aparente Harmónica, podendo esta última ser dividida em Potência Activa Harmónica e Potência Não Activa Harmónica, como exemplifica a expressão 18:

$$S_h^2 = (V_h I_h)^2 = P_h^2 + N_h^2. \quad (18)$$

Uma outra expressão pode ser obtida, quando se divide a expressão (17) pela expressão (16):

$$\left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2 = \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{S_H}{S_1}\right)^2, \quad (19)$$

dando origem à Potência de Distorção Não Fundamental Normalizada, podendo esta ser reescrita por:

$$\left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2 = (THD_i)^2 + (THD_v)^2 + (THD_v \cdot THD_i)^2. \quad (20)$$

Os três termos presentes na expressão (20) representam, respectivamente, a taxa de distorção harmónica da corrente, a taxa de distorção harmónica da tensão e o produto das duas anteriores [39].

Esta abordagem resulta em informações úteis, nomeadamente, a potência aparente fundamental e a potência reactiva fundamental indicam o valor dos condensadores para a correcção do FP fundamental. Esta potência reactiva pode ser corrigida por meio de condensadores estáticos usados na configuração de filtros passivos. A potência aparente não fundamental e a potência reactiva não fundamental, fornecem indicações da capacidade requerida para o compensador dinâmico quando usado sozinho, para a correcção da distorção não fundamental. A potência de distorção da corrente indica o nível da distorção da corrente e a potência de distorção da tensão apresenta a mesma informação relativa à distorção da tensão, as taxas de distorção harmónica podem ser obtidas a partir destes valores de potência [38, 40].

Com o objectivo de desagregar a potência aparente total, S_T , em potência aparente fundamental, S_1 , e aparente não fundamental, S_N , aplicou-se aos dados adquiridos da potência activa, reactiva, e evolução das taxas de distorção harmónica, nas auditorias efectuadas aos carregadores as equações (15) e (20), permitindo assim, obter-se a evolução da potência aparente fundamental e não fundamental durante o período de uma carga completa para os dois carregadores analisados. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 45 e 46. Analisando os dados desses gráficos, verifica-se que, no caso do carregador monofásico, a potência aparente não fundamental é praticamente igual à fundamental, ou contrário do carregador trifásico, que a não fundamental é bastante inferior à fundamental, excepto nos últimos modos de funcionamento do carregador, onde as duas potências se igualam.

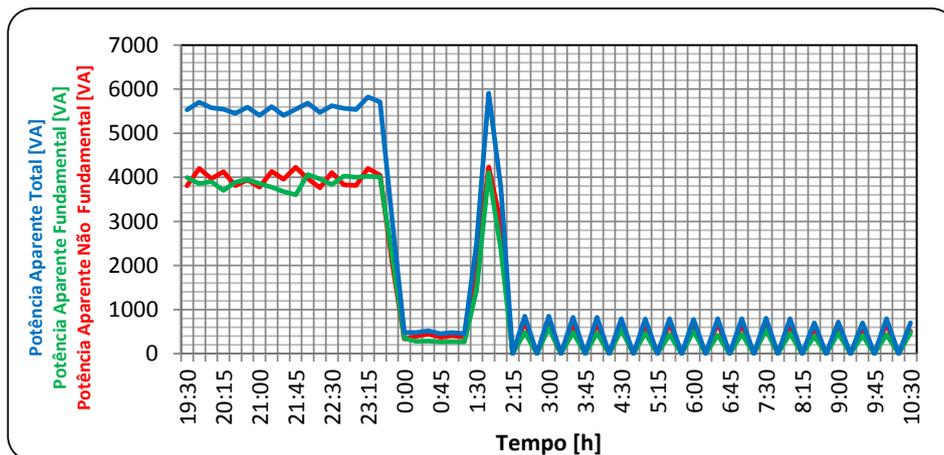


Figura 45: Desagregação da potência aparente total, em fundamental e não fundamental, para o carregador monofásico durante uma carga completa

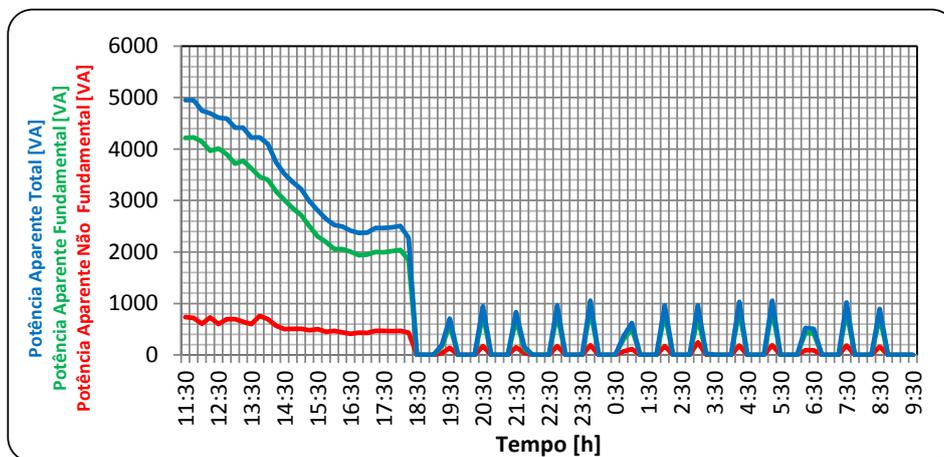


Figura 46: Desagregação da potência aparente total, em fundamental e não fundamental, para o carregador trifásico durante uma carga completa

Por outro lado, durante as simulações, registou-se a evolução das taxas de distorção harmónicas da tensão e da corrente à saída do transformador de baixa tensão durante um dia completo, sendo os resultados expressos na Figura 47. Os valores obtidos situam-se dentro do que era esperado para uma rede de distribuição residencial, apresentando uma taxa de distorção harmónica da tensão de cerca de 3% e um valor bastante similar para a corrente, situando-se, nos 3,5%. Este último valor indica uma presença reduzida de carga não lineares de potência relevante, o que leva a não distorcer a onda da corrente e por conseguinte não influencia a qualidade da forma de onda da tensão. O valor da distorção da tensão apenas se deve aos fenómenos electromagnéticos do transformador para o nível de carga que lhe é solicitado na situação em que nenhum VE é carregado com a rede modelizada anteriormente. Na Figura 48, apresenta-se a decomposição da potência aparente total em fundamental e não fundamental (canto superior esquerdo). Observando a evolução das potências aparente

(fundamental e não fundamental) verifica-se que a potência aparente fundamental é praticamente igual ao seu valor total, apresentando um valor de potência aparente não fundamental bastante baixa, indo de encontro aos valores obtidos para as taxas de distorção harmónica.

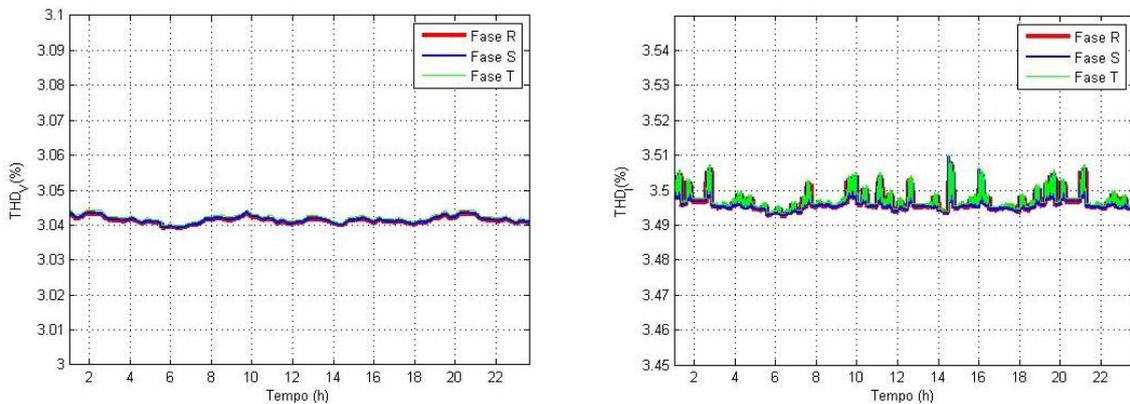


Figura 47: Evolução diária das taxas de distorção harmónica da tensão e da corrente na Baixa tensão do transformador de distribuição sem VEs.

No sentido de averiguar o efeito dos recarregamentos ao nível da distorção harmónica através da desagregação da potência aparente em fundamental e não fundamental, realizou-se um estudo para as metodologias de recarregamento apresentadas no capítulo 2 tendo em conta a teoria do cálculo de potência em ambientes com distorção harmónica apresentada pelo *IEEE Working Group on Non-Sinusoidal Situation*. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 48, onde para além da situação original, se representa a evolução das potências aparentes para as metodologias de carregamento sem controlo, com incentivo tarifário e misto, considerando 50% e 100% de VE a recarregar através da rede de distribuição.

No caso do carregamento não controlado, verifica-se, para além do aumento da ponta de potência estar fora da capacidade do transformador, que durante o período em que os VE vão iniciando os seu recarregamento, a potência aparente não fundamental passa a ter um valor praticamente igual ao da fundamental apresentando uma razão de S_N / S_1 praticamente igual à unidade. Esse facto resultará numa elevada presença de distorção harmónica, originalmente na corrente absorvida pelos carregadores, e que se propagará pelo sistema eléctrico de energia, o que levará a um aumento significativo do valor da distorção harmónica da tensão e assim prejudicará as cargas mais sensíveis alimentadas pela mesma rede. Esse fenómeno também se traduzirá num aumento substancial das perdas no transformador e na linha de baixa tensão, podendo levar a grandes perturbações no sistema de alimentação mesmo que se tivesse um transformador de potência compatível com a solicitada durante o período de maior

procura. Regista-se ainda, mesmo depois da finalização da carga completa dos VE, visto nem todos serem desligados da rede, um valor de potência aparente não fundamental ligeiramente superior à fundamental, indicando que os vários carregadores ainda ligados à rede estão no modo “*Trickle Charge*”. No restante período, a evolução das potências aparentes mantêm-se iguais às originais.

No cenário de carregamento com incentivo tarifário regista-se os mesmos fenómenos dos que no carregamento não controlado a menos de uma deslocação temporal, fazendo coincidir a ponta de procura de energia com o horário definido pela tarifa bi-horária.

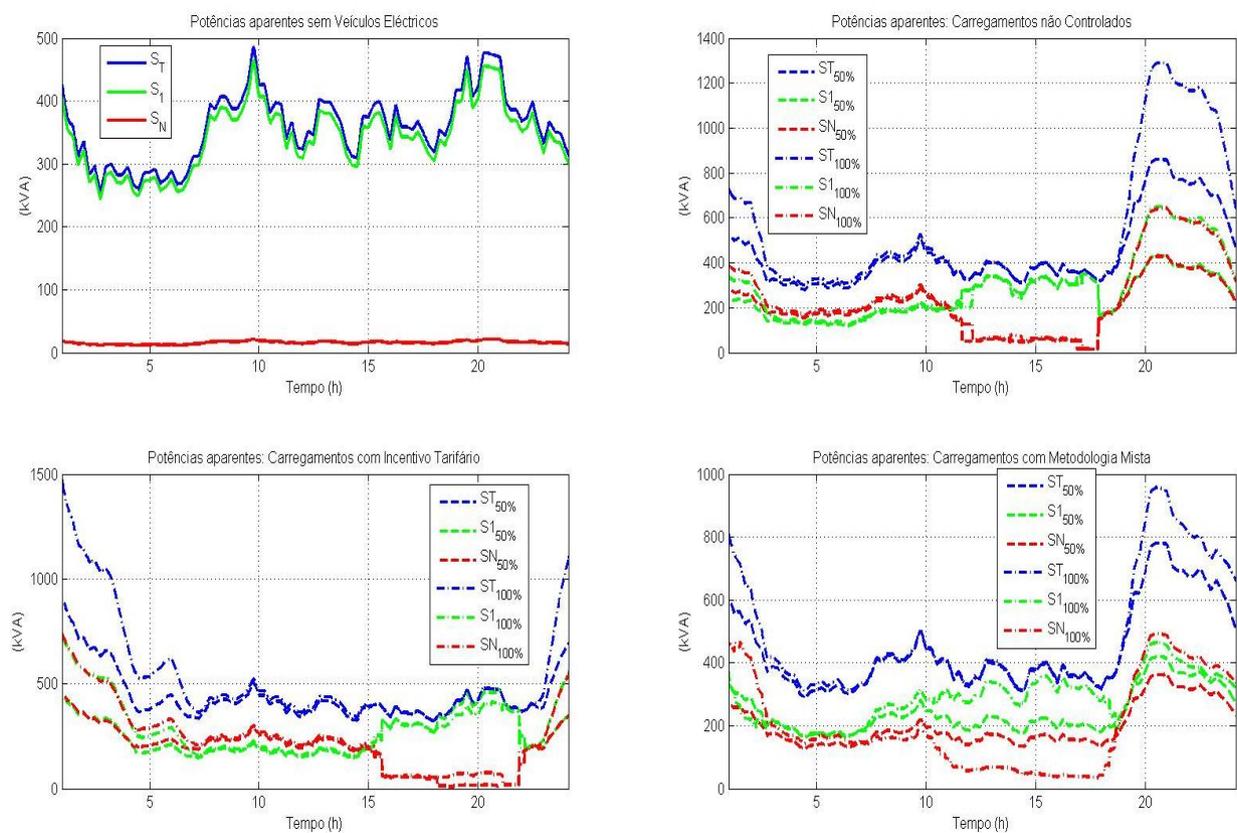


Figura 48: Desagregação da potência aparente total, em fundamental e não fundamental, na baixa tensão do transformador

Relativamente ao cenário com a metodologia mista de recarregamento (80% descontrolada e 20 % com incentivo tarifário), regista-se que a ponta de potência existe no mesmo período do cenário de carregamentos não controlados, mas com valor bastante mais baixo, passamos de 1300kVA para sensivelmente 950kVA. Para este caso, no período de recarregamento dos VE, as potências fundamentais e não fundamentais deixam de ter uma evolução semelhante na forma e no valor, para ter uma evolução diferente no valor, onde se regista que para o carregamento de 100% de VE a potência aparente não fundamental é

superior à fundamental. Esse facto deve-se essencialmente ao aumento do número de carregamentos feitos com recurso a carregadores monofásicos que apresentam uma potência aparente não fundamental superior à fundamental em determinadas fases do carregamento. Atendendo a metodologia usada, a mistura de carregamento não controlado e com incentivo tarifário, leva a que os valores se vão esbatendo nos restantes períodos, conduzindo a que esta estratégia permita uma melhor gestão da rede do ponto de vista do aumento da distorção harmónica e sua proliferação.

Finalmente, a estratégia de carregamento com controlo de carga, que se apresenta em termos da gestão da procura, como uma solução óptima e viabilizando as actuais estruturas do sistema eléctrico para efectuar o carregamento massivo de VE, como se apresenta na Figura 49, não permite na sua forma actual de implementação a separação da potência aparente total em fundamental e não fundamental. No entanto facilmente se poderá reforçar o actual algoritmo de controlo de carga, apenas baseado na energia disponível nas horas de menor procura, para que, em simultâneo, se consiga controlar um aumento acima do praticável da potência aparente não fundamental, pelas actuais redes de distribuição. Esse aumento é representativo de uma distorção harmónica excessiva acarretando problemas de diversa ordem ao sistema eléctrico.

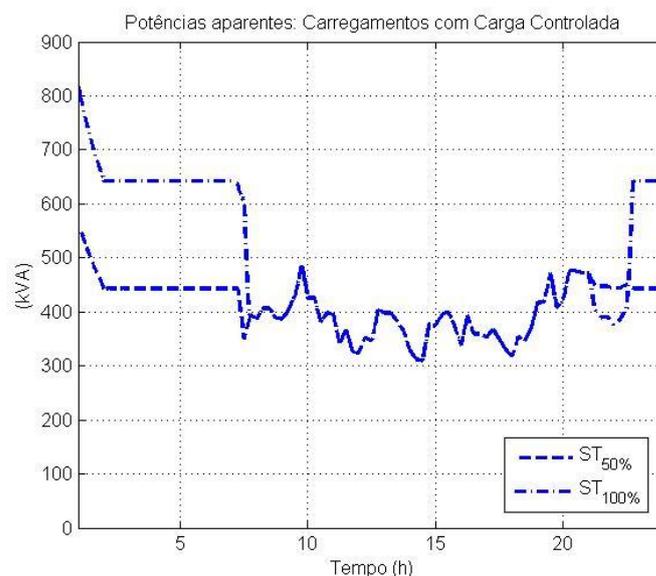


Figura 49: Evolução da potência aparente total na baixa tensão do transformador para a estratégia de carregamento baseada no controlo de carga

6.6. Minimização de Problemas Relacionados com Poluição Harmónica

Existem uma série de métodos e técnicas para atenuar a amplitude dos harmónicos. Todos apresentam vantagens e desvantagens e implicam um investimento em material e / ou alterações no sistema de alimentação. Do ponto de vista da rede de distribuição, em resposta a um aumento considerável de carregamentos de VE, o aumento descontrolado da potência e da poluição harmónica pode levar ao colapso de parte do sistema. Portanto, baseado no estudo apresentado anteriormente, o aumento de distorção harmónica, em especial no sector doméstico, onde o uso dos carregadores será maioritariamente monofásico, deve ser tido em conta para um possível reforço ou reestruturação do sistema de distribuição de energia eléctrica.

A melhor solução deve ser obtida tendo em consideração a carga total do sistema, ou seja deve-se ter em atenção todos os factores. Sendo eles, o possível aumento do número de ligação à rede dos carregadores dos VE; a instalação e o nível de distorção harmónico autorizado pelo distribuidor de energia e referido nas normas internacionais.

Perante as opções disponíveis para reduzir o impacto deste tipo de cargas na qualidade das formas de onda da alimentação, importa referir que os métodos que se prendem com a alteração da estrutura da alimentação são de certa forma complicados e implicam um grande investimento. A alteração passa sempre pelo redimensionamento do transformador que é sem dúvida um dos equipamentos com maior peso no investimento global da rede de alimentação. A resolução de problemas ligados a um aumento descontrolado da distorção harmónica nem sempre é fácil, tanto a nível técnico como económico. Assim, pode-se afirmar que existem inúmeros impactos associados à entrada em massa dos veículos eléctricos na rede de distribuição, mas que poderão ser minimizados se se efectuar algumas alterações de forma planeada.

Do ponto de vista de possíveis alterações estruturais da rede, sabe-se que o aumento da potência de curto-circuito diminui o THD da tensão provocado pelas cargas não lineares no ponto de interligação. Essa diminuição é obtida com a redução da impedância total a montante dessas mesmas cargas. Contudo não existe nenhuma atenuação ao nível das correntes harmónicas [41].

Uma outra estratégia alternativa para minimizar os impactos dos carregadores dos VE na rede de distribuição e no sistema de alimentação é a estratégia de controlo de carga. [42] Este controlo irá gerir o aumento de procura de energia, que por um lado actuando

directamente no carregamento das baterias irá indirectamente controlar o aumento de potência aparente total, provocado pela alta distorção harmónica (devido ao carregamento dos VE como demonstrado no estudo), com vista a não aumentar o pico de potência já existente e assim não causar problemas no sistema eléctrico. No entanto, como visto na secção anterior, o actual algoritmo de controlo de carga com as devidas alteração poderá ainda controlar o aumento da potência aparente não fundamental mantendo-a dentro de valores que não prejudiquem o bom funcionamento do sistema de energia eléctrica durante os períodos de maior procura por parte dos VE.

Assim, discutiu-se neste ponto, para além da exposição das causas e efeitos, algumas formas de minimização do impacto da distorção harmónica resultante da utilização massiva de carregadores de VE, no sentido de possibilitar a sua rápida e eficaz integração nas actuais redes de distribuição de baixa tensão.

7. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

Numa tentativa de antecipação à expectável massificação da utilização do Veículo Eléctrico como meio de transporte alternativo ao tradicional veículo de combustão interna, tendo este como principal finalidade a melhoria ambiental no sector dos transportes, bem como a minimização da dependência energética relativa aos combustíveis fósseis, este trabalho apresenta a problemática da entrada em massa dos veículos eléctricos e da sua necessidade diária de carregamentos. O conhecimento desta nova carga doméstica, os seus efeitos sobre a rede de distribuição em baixa tensão em função dos possíveis cenários de carregamento utilizados e possíveis soluções de minimização que permitam manter um correcto fornecimento de energia a todos os consumidores, com as actuais redes.

Neste último capítulo, existe a necessidade de fazer uma síntese do trabalho realizado e de tecer algumas conclusões a respeito do mesmo. Como tal, salientam-se as conclusões ao trabalho desenvolvido e apresentam-se algumas ideias para trabalhos futuros.

7.2. Conclusões ao Trabalho Desenvolvido

Fundamentalmente, o trabalho desenvolvido, divide-se em quatro partes:

- Apresentação de uma abordagem metodológica à problemática em estudo, definindo-se os cenários estudados e modelização matemática da entrada dos carregamentos na rede;
- Monitorização de carregamentos completos a dois tipos de baterias utilizadas em veículos eléctricos autónomos;
- Estudo por simulação do impacto do carregamento dos VE numa rede de distribuição em baixa tensão;
- Análise do impacto da distorção harmónica no aumento da potência aparente.

A pesquisa bibliográfica efectuada para este trabalho, permitiu o estabelecimento de um conjunto de referências que permitiram alcançar o objectivo final proposto. Verificou-se que a maior parte dos estudos consideram apenas um diagrama de carga constante e finito no tempo para a carga completa de baterias de VE, não fazendo qualquer referência à evolução da potência reactiva. Na maioria da literatura encontrada, a distorção harmónica é estudada, como um caso à parte e baseada essencialmente na evolução dos THD da tensão e da corrente, não relacionando o aumento da distorção harmónica com o aumento da potência aparente não

fundamental, o que permitiria uma melhor percepção do impacto desta problemática nas redes de baixa tensão.

Partindo desses pressupostos, este trabalho apresenta e modeliza de uma forma clara e objectiva, com recurso a distribuições normais, os principais cenários possíveis para o carregamento em massa de VE, a saber, carregamento não controlado, com incentivo tarifário, misto e com carga controlada. De forma a aproximar da realidade o modelo de simulação implementado em MATLAB/SIMULINK[®], foram realizadas monitorizações de carregamentos completos a dois tipos de baterias, ácido-chumbo e NiMH, registando, potência activa, reactiva, factor de potência, valor eficaz da corrente, THD da tensão e da corrente. A evolução das diversas grandezas registadas foi relacionada com os modos de carregamento dos respectivos carregadores. O modelo de simulação recorre ainda a perfis reais de carga de consumidores de baixa tensão. As simulações realizadas demonstram que, para além do já esperado aumento da procura de energia, este não se situa somente na sua componente de potência activa, mas sim também numa forte potência reactiva que advém sobretudo de um aumento de distorção harmónica que deriva, essencialmente, dos carregadores serem cargas não lineares. Os resultados demonstram que o carácter aleatório dos números de carregamentos em simultâneo pode levar a dificuldades acrescidas na gestão futura das redes de distribuição de energia, por ocorrem fenómenos decorrentes da sobreposição de fases de carregamentos diferentes o que resulta em comportamentos atípicos de consumos. De todos os cenários estudados, o aumento de procura energética apenas poderá ser regulado pelo carregamento com controlo de carga, bem como suavizar fenómenos relacionados com o aparecimento de uma potência aparente não fundamental muito acima dos valores actualmente conhecidos em redes de distribuição de baixa tensão. Perante, uma nova realidade, que é a utilização do VE, o correcto fornecimento de energia, com as infra-estruturas actualmente existentes, está dependente de sistemas que possam em tempo real, monitorizar a procura, não só na vertente potência activa, mas também fazer uma gestão optimizada do fornecimento de energia a todos os consumidores da rede eléctrica.

Comprovou-se que, sem um sistema capaz de efectuar o controlo da carga tal como o proposto nivelamento da procura, os cenários de carregamento não controlado ou usando estímulo tarifário do tipo tarifa bi-horária levarão a um colapso do sistema de fornecimento de energia em baixa tensão. O VE transformar-se-á num problema, ao contrário da sua pretensão natural em ajudar e flexibilizar a nossa dependência energética de recursos não renováveis.

7.3. Trabalhos Futuros

Como em qualquer trabalho, existem pontos a melhorar, tendo em vista a possibilidade de realização de um estudo com maior profundidade nesta área, e considerar outros aspectos a desenvolver e/ou analisar, designadamente:

- Melhorar o modelo de simulação, ajustando-o ainda mais à realidade, com o número efectivo de consumidores e considerar os desequilíbrios da corrente absorvida em cada fase;
- Incluir no modelo de simulação, estações públicas de carregamento, onde se efectuassem carregamentos durante o dia;
- Melhorar o modelo matemático que modeliza a ligação à rede dos VE, no sentido de também termos uma distribuição normal a definir o instante em que cada utilizador decide desligar o seu VE da rede, pois nem todos têm a mesma rotina diária;
- Acrescentar ao algoritmo de controlo de carga a possibilidade de controlar também o aumento da potência não fundamental no sistema, fazendo também uma gestão do número de VE a carregar simultaneamente em função dessa variável, no sentido de diminuir a proliferação de problemas inerentes ao aumento da poluição harmónica;
- Efectuar a monitorização do carregamento completo de baterias de íon de lítio, actualmente apresentadas como sendo as que equiparão os VE da próxima geração, para ser contemplado no modelo de simulação e efectuar um novo estudo com este tipo de baterias.

8. Referências Bibliográficas

- [1] <http://www.dgge.pt/>, [Online]
- [2] Chan, C.C., "The State of the Art of Electric and Hibrid Vehicles." Proceedings of the IEEE. Issue 4, Feb. 2, 2002, Vol. 90, pp. pp.247-275.
- [3] E.W.C.Lo, D.Sustanto, C.C. Fok., "Harmonic Load Flow Study for Electric Vehicle Chargers." Hong Kong : IEEE, 1999. pp. 495-500.
- [4] Berisha, S.H.; Karady, G.G.; Ahmad, R.; Hobbs, R.; Karner, D.; , "Current harmonics generated by electric vehicle battery chargers ," Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996., Proceedings of the 1996 International Conference on , vol.1, no., pp.584-589 vol.1, 8-11 Jan 1996.
- [5] Foley, A.M, Winning, I.J and Ó Gallachoir, B.P., "State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure." Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE.
- [6] Jorge, H.; Antunes, C.H.; Martins, A.G.; , "A multiple objective decision support model for the selection of remote load control strategies," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp.865-872, May 2000.
- [7] Fumiko Koyanagi, Yoshihisa Uriu., "Modeling Power Consumption by Electric Vehicles and Its Impact on Power Demand." Electrical Engineering in Japan Journal. Issue 4, 1997, Vol. 120.
- [8] Ross, Sheldon M., "Introduction to Probability Models", Academic Press; 6 edition, February 17, 1997.
- [9] Montgomery, Douglas c. and Runger, George C., "Apllied statistics and probability for engineers", John Wiley & Sons, Inc., USA, 2002.
- [10] Csaba Farkas, et al., "Impact Assessment of electric Vehicle Charging on a LV Distribution System", 3rd International Youth Conference on Energetics 2011, Leiria, Portugal, 7-9 Jul. 2011.
- [11] Johnston, D.; Bentley, E.; Narayana, M.; Tianxiang Jiang; Suwanapingkarl, P.; Putrus, G.; "Electric vehicles as storage devices for Supply-Demand management," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1-6, 1-3 Sept. 2010

- [12] Clement-Nyns, K.; Haesen, E.; Driesen, J.;, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.25, no.1, pp.371-380, Feb. 2010
- [13] Putrus, G.A.; Suwanapingkarl, P.; Johnston, D.; Bentley, E.C.; Narayana, M.; , "Impact of electric vehicles on power distribution networks," Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE , vol., no., pp.827-831, 7-10 Sept. 2009
- [14] Trovão, J.P., Pereirinha, P. and Jorge, H., "Design Methodology of Energy Storage Systems for small Electric Vehicle." World Electric Vehicle Journal. 2003, Vol. Vol. 3.
- [15] <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/horarios/Pages/HorariosBTN.aspx>.
[Online]
- [16] Dyke, K.J.; Schofield, N.; Barnes, M., "The Impact of Transport Electrification on Electrical Networks," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.57, no.12, pp.3917-3926, Dec. 2010
- [17] Pillai, J.R.; Bak-Jensen, B.; , "Impacts of electric vehicle loads on power distribution systems," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1-6, 1-3 Sept. 2010
- [18] Hioki E.E. Corporation, "Manual of Power Quality Analyzer 3197", Japan, 2006
- [19] João P. Trovão, Paulo G. Pereirinha, L. Trovão, Humberto M. Jorge, "Electric Vehicles Chargers Characterization: Load Demand and Harmonic Distortion", 11th International Conference on Electrical Power Quality And Utilization (EPQU'11), Lisbon, Portugal, 17-19 October 2011 (accepted to publication).
- [20] Paulo G. Pereirinha; João P. Trovão; L. Marques, M. Silva; J. Silvestre; F. Santos; "Advances in the Electric Vehicle Project-VEIL Used as a Modular Platform for Research and Education", in Proc. EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Norway, 13-16 May 2009.
- [21] Autosil, "Manual de baterias de tracção".
- [22] Saft Rechargeable Battery Systems, "Manual of Super High Energy Ni-MH Battery Module", France.
- [23] Bam, L.; Jewell, W.; , "Review: power system analysis software tools," Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE , vol., no., pp. 139- 144 Vol. 1, 12-16 June 2005
- [24] DIgSILENT GmbH, www.digsilent.com/Software/PowerFactory_Features/
- [25] PowerWorld Corporation, www.powerworld.com/features.html

- [26] The MathWorks, Inc., www.mathworks.com/products/simpower/, TransÉnergie Technologies, www.transenergiotech.com/en/produits/simpowersystem.html
- [27] Karris, Steven T., "Introduction to Simulink with Engineering Applications", Orchard Publications; 1 edition, May 26, 2006.
- [28] <http://www.edpsu.pt/pt/negocios/contratos/novasLigacoes/Novas%20ligaes%20Docs/DIT-C14-100N.pdf>
- [29] Trovao, J.P.; Santos, F.M.; Silva, M.J.; Jorge, H.M.; , "A web-based monitoring approach for power systems in industrial plants," Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on , vol., no., pp.1769-1774, June 30 2008-July 2 2008
- [30] J. P. Trovão; P. Pereirinha; H. Jorge; "Analysis of Harmonic Distortion in Building Electrical Installation with Computer Devices", Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07), Sevilla, Spain, March 28-30, 2007.
- [31] Balcells, J.; Garcia, J.; , "Impact of plug-in electric vehicles on the supply grid," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1-4, 1-3 Sept. 2010
- [32] Xiaohu Zhou; Lukic, S.; Huang, A.; , "A comparison of converter topologies for vehicle-to-grid applications: Three-leg converter versus H-bridge converter," Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE , vol., no., pp.3711-3716, 3-5 Nov. 2009
- [33] Lu Yanxia; Jiang Jiuchun; , "Harmonic-study of electric vehicle chargers," Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on , vol.3, no., pp. 2404- 2407 Vol. 3, 27-29 Sept. 2005
- [34] S.H. Berisha; G.G. Karady; R. Ahmad; R. Hobbs; D. Karner, "Current harmonics generated by electric vehicle battery chargers", Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, vol.1, pp.584-589, 8-11 Jan 1996
- [35] E.C. Bentley; P. Suwanapingkarl; S. Weerasinghe; T. Jiang; G.A. Putrus; D. Johnston, "The interactive effects of multiple EV chargers within a distribution network", 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp.1-6, 1-3 Sept. 2010.
- [36] IEEE STD 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," IEEE Std 519-1992 , vol., no., pp.0_1, 1993

- [37] IEEE PES HARMONIC WORKING GROUP, "Characteristics and modeling of harmonic sources-power electronic devices," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.16, no.4, pp.791-800, Oct 2001
- [38] IEEE, Working Group on Nonsinusoidal Situations, "Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.11, no.1, pp.79-101, Jan 1996
- [39] J. P. Trovão; H. Jorge, F.j.t.e. Ferreira, P. Pereirinha; "A Systematic Approach to Analyse the Harmonic Distortion in Industry", 11th International Conference on Electrical Power Quality And Utilization (EPQU'11), Lisbon, Portugal, 17-19 October 2011 (accepted to publication).
- [40] Pretorius, J.H.C.; Van Wyk, J.D.; Swart, P.H.; , "An evaluation of some alternative methods of power resolution in a large industrial plant," Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference on , vol.1, no., pp.99-106 vol.1, 14-18 Oct 1998
- [41] J.Trovão, F.Ferreira., "Distorção Harmónica no Sector Industrial - Causas, Efeitos e Soluções." s.l. : Revista de manutenção, Nº 88, 1º Trimestre, Janeiro - Março de 2006.
- [42] Leonor Trovão, Humberto M. Jorge, "Power Demand Impacts of the Charging of Electric Vehicles on the Power Distribution Network in a Residential Area", 3rd International Youth Conference on Energetics 2011, Leiria, Portugal, 7-9 Jul. 2011.

9. Anexos

9.1. Consumidores Monofásicos – Resultados de Simulação

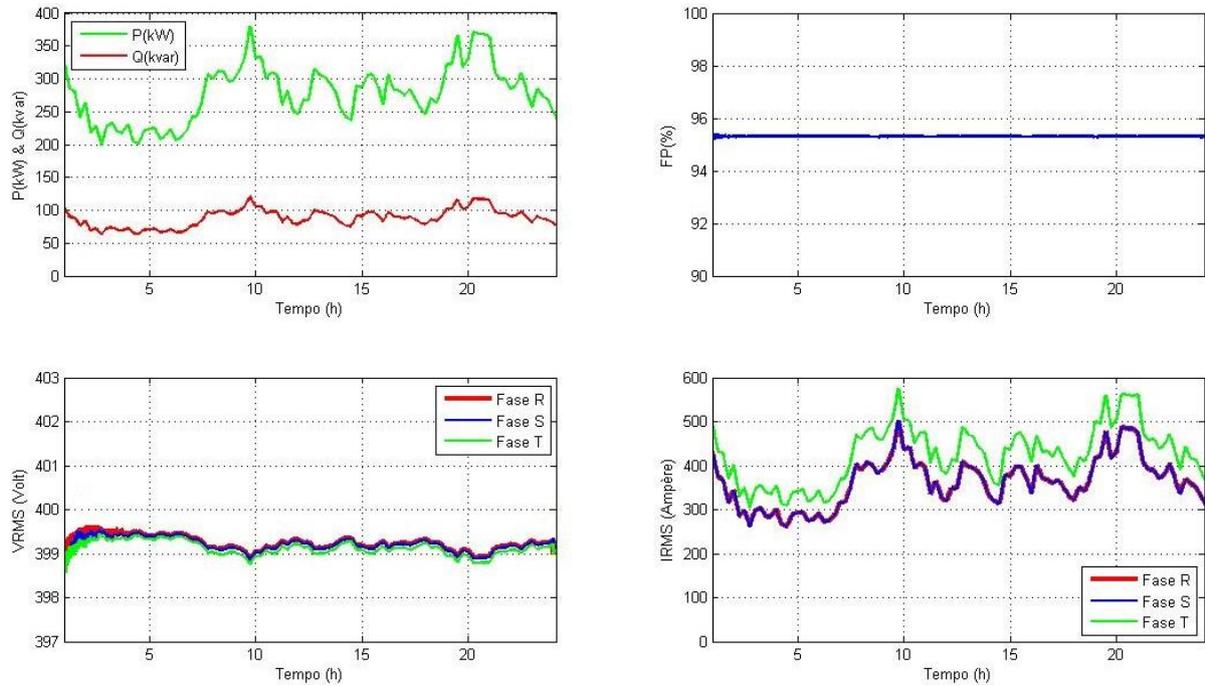


Figura 50: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário sem VE

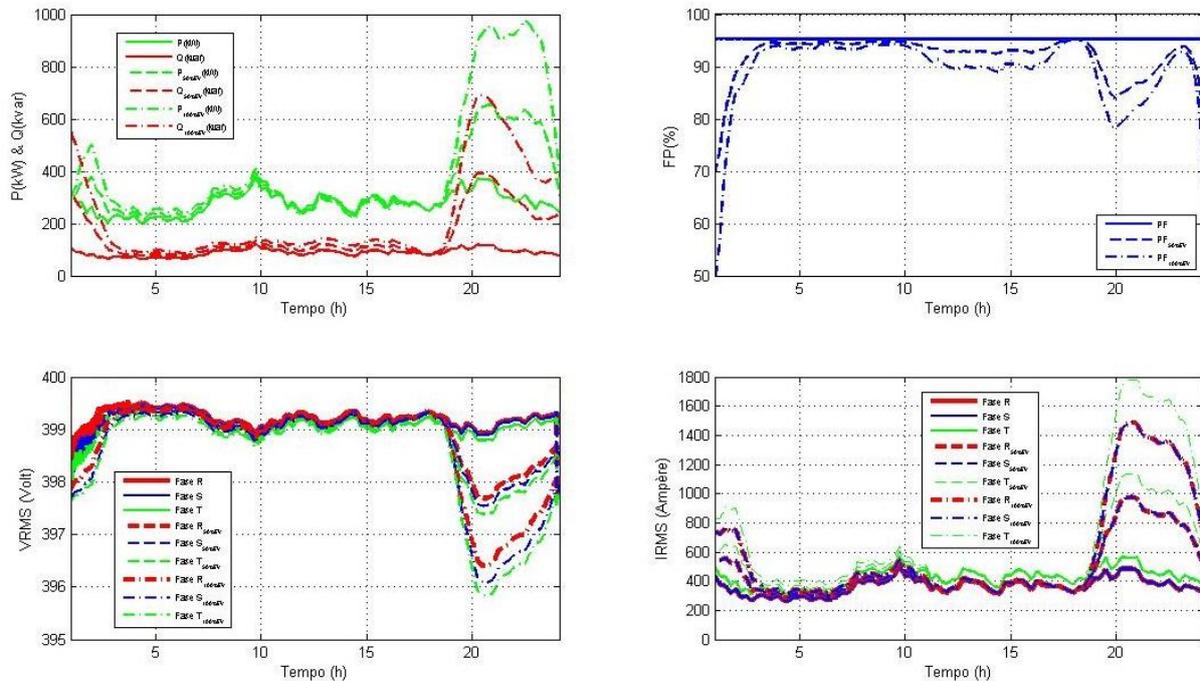


Figura 51: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário não controlado.

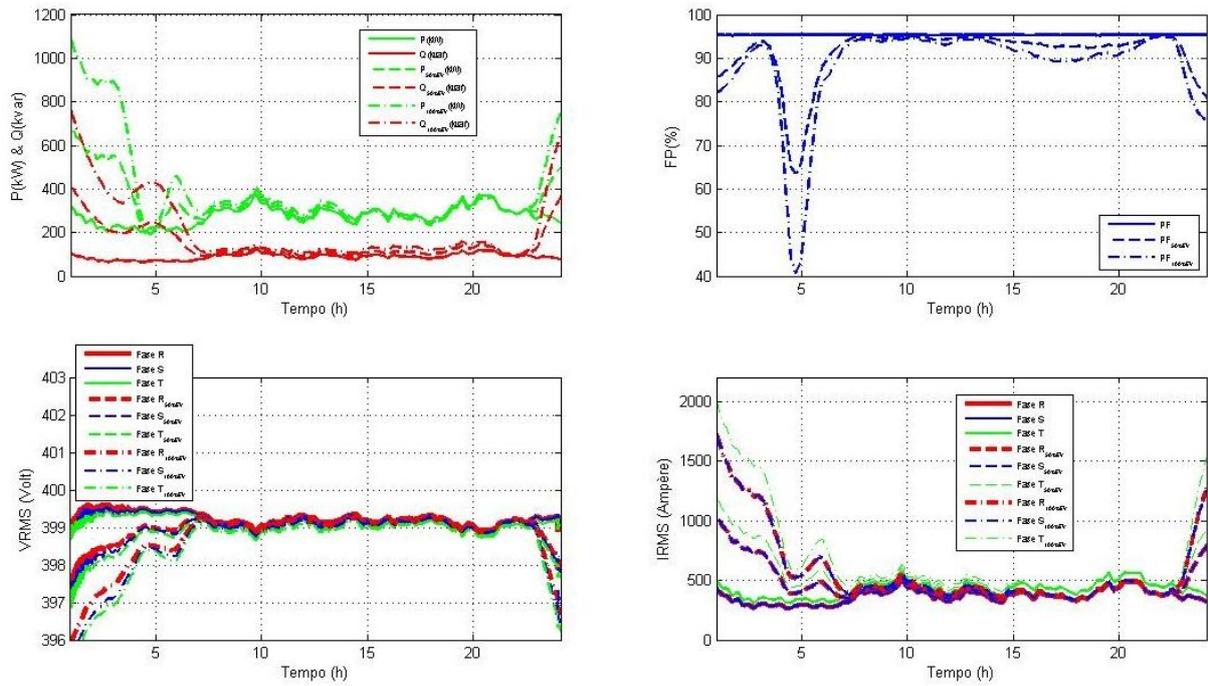


Figura 52: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário com incentivo tarifário.

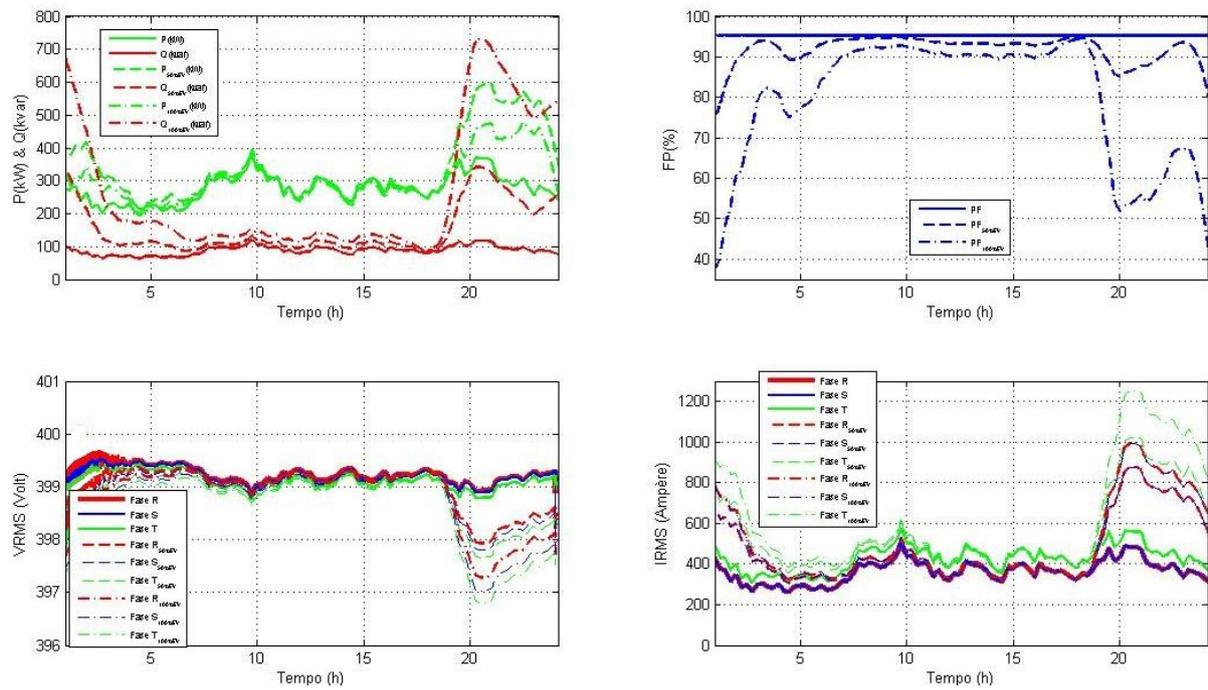


Figura 53: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário misto

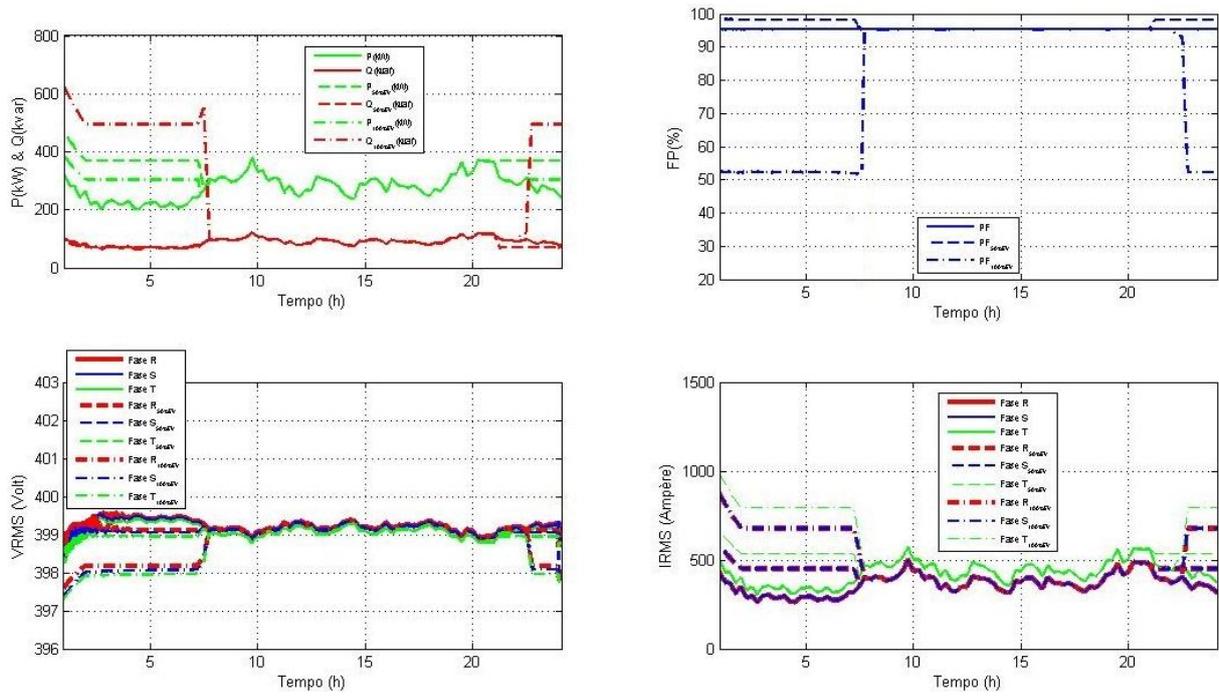


Figura 54: Registo dos consumidores monofásicos para o cenário de nivelamento de carga

9.2. Consumidores Trifásicos - Resultados de Simulação

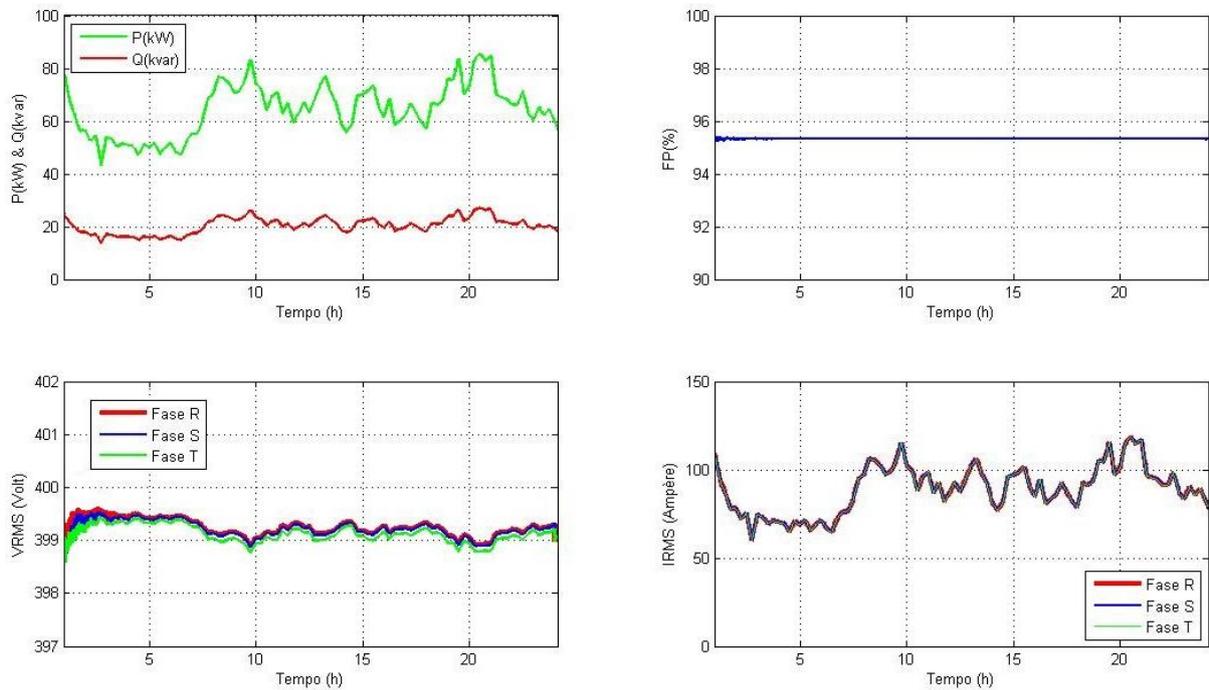


Figura 55: Resultados para os consumidores trifásicos para o cenário sem VE

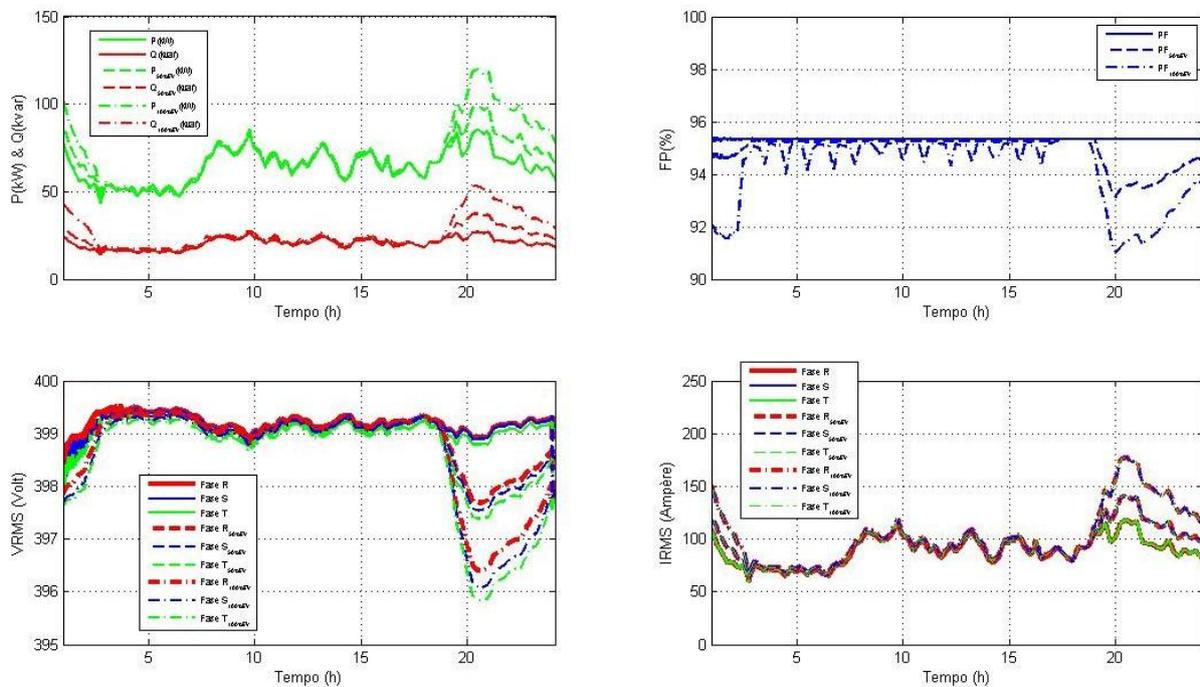


Figura 56: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário não controlado.

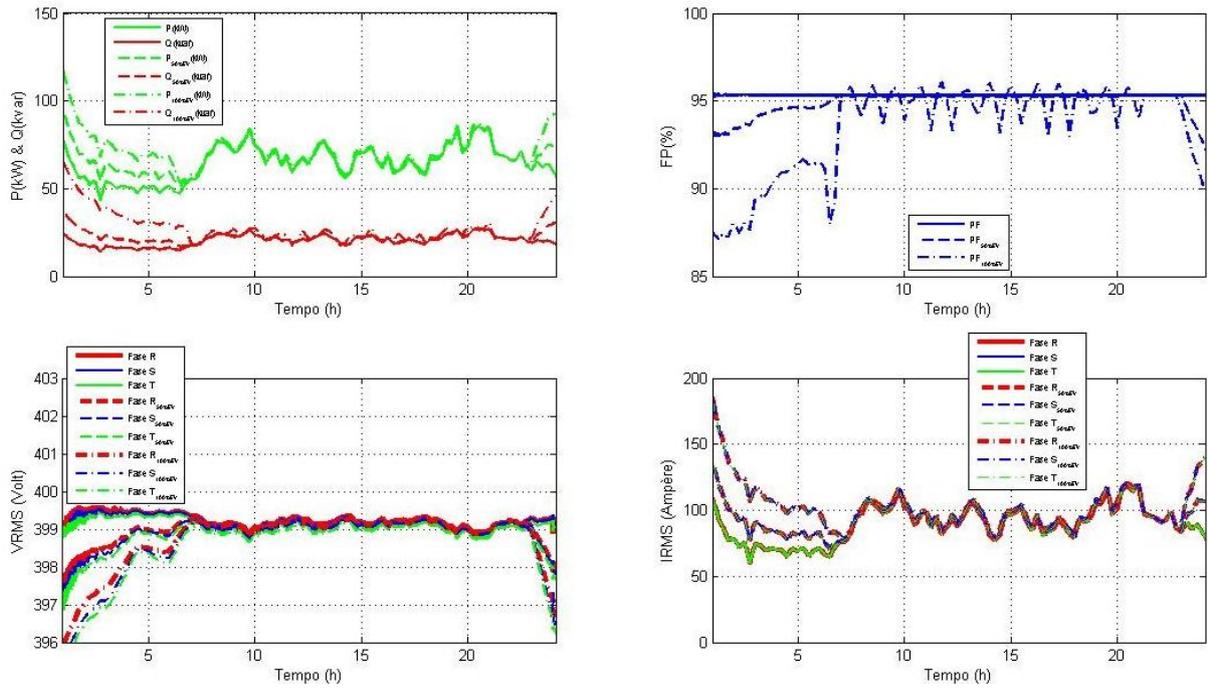


Figura 57: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário com incentivo tarifário

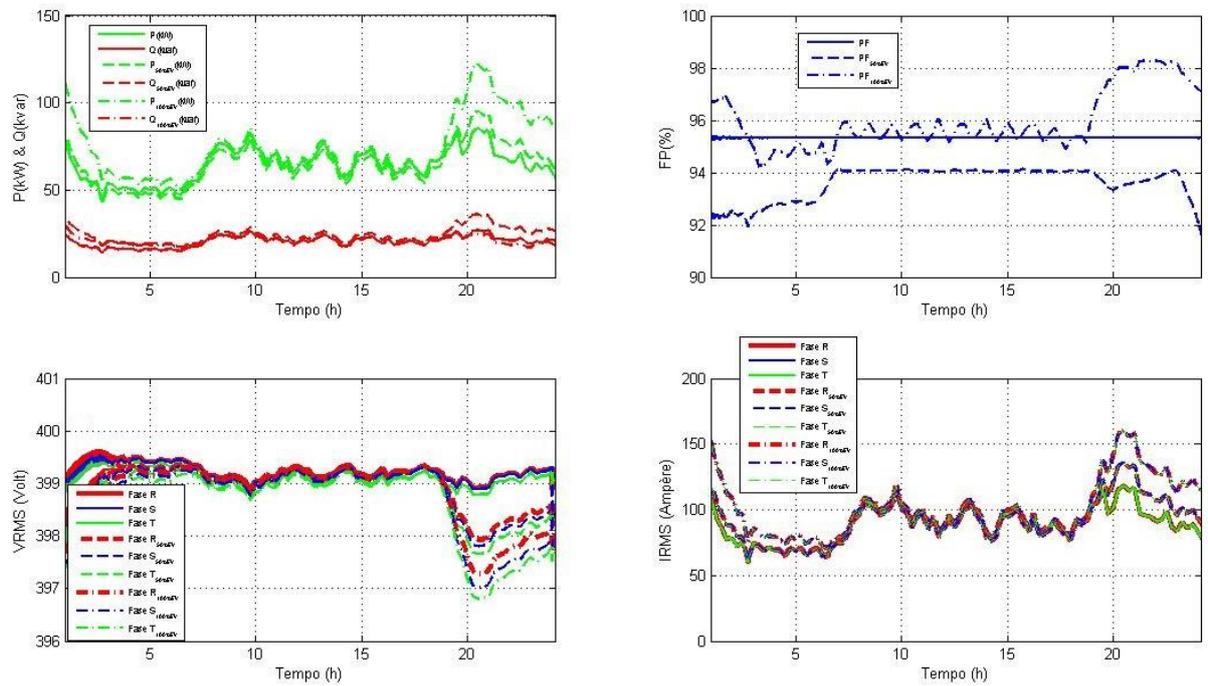


Figura 58: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário misto

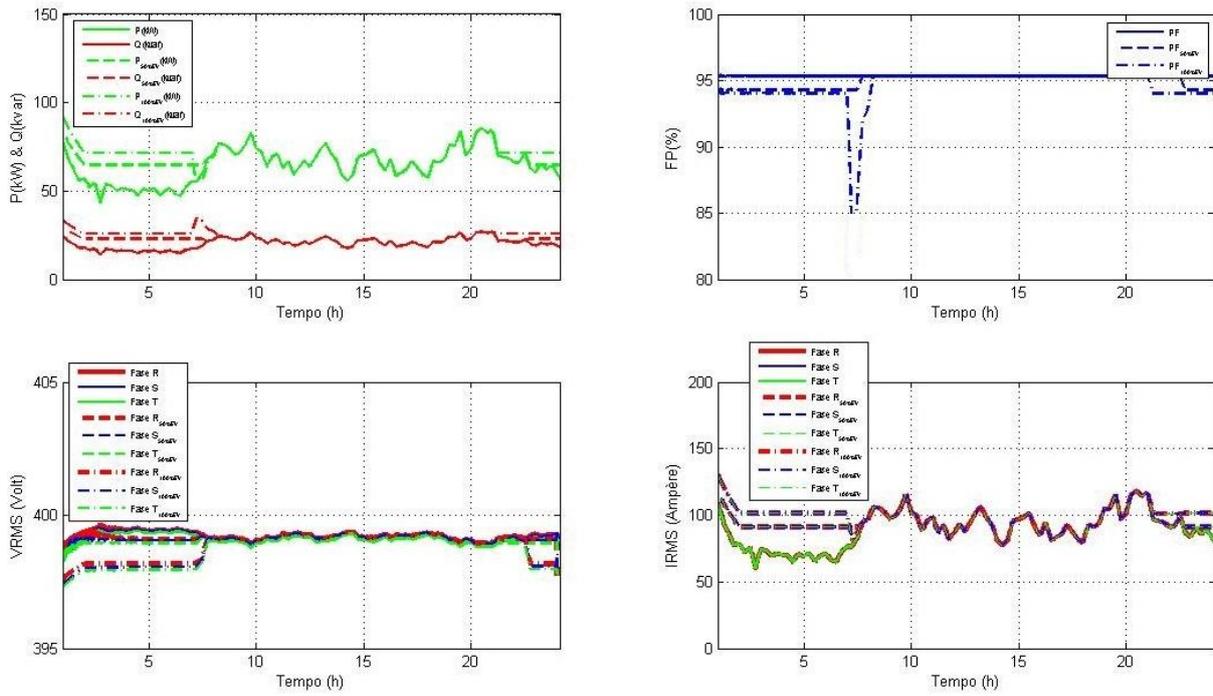


Figura 59: Resultados dos consumidores trifásicos para o cenário de nivelamento de carga