



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Gestão da eficiência energética e análise da qualidade de energia em postos de carregamento de bicicletas elétricas

ANALCÍSIO ANTÓNIO RODINO

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof.^a Doutora Maria do Rosário Alves Calado

Covilhã, Junho de 2018

Dedicatória

A meus pais, os quais devo tudo o que sou hoje.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela vida concedida para a realização desta dissertação.

Venho de igual modo, agradecer a todos que contribuíram direta ou indiretamente para tornar esta dissertação uma realidade, em especial:

- Ao Ministério do Ensino Superior de Angola, pela atribuição da bolsa de estudo que permitiu este feito;
- A orientadora, Professora Doutora Maria do Rosário Alves Calado, pelo empenho, motivação, amizade, pela compreensão de frequentes interrupções em sua sala para esclarecimento de dúvidas, pelo conhecimento partilhado (com a sua reconhecida experiência) e pela generosa paciência no desenvolvimento da dissertação;
- Aos professores do curso de Mestrado de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (época 2016/2018), que incansavelmente transmitiram os conhecimentos necessários para alcançar este nível em que encontro;
- Aos colegas do laboratório de Eletrotécnica, pelo carinho e apoio prestados;
- Ao Engenheiro José Pombo que amigavelmente e incansavelmente apoiou-me com seus conhecimentos na solução de problemas relacionado a dissertação;
- A Rita Pinto pelo apoio nos esclarecimentos de assuntos relacionados a dissertação.
- Aos colegas Bruno Silva e Arlindo Gole pela ajuda na tradução do resumo.

Tenho ainda de agradecer aos meus colegas da Universidade, por todo auxílio prestado.

A todos, o meu muito obrigado.

Resumo

A crescente mobilidade levou diretamente à deterioração das condições de tráfego, ao consumo extra de combustível, ao aumento das emissões de gases de escape dos automóveis, à poluição do ar e à redução da qualidade de vida. Além de ser um modo de transporte limpo, barato e ótimo para viagens de curta distância, o ciclismo pode oferecer soluções para o problema da mobilidade urbana. O sistema de partilha de bicicletas elétricas é considerado como uma implementação de tecnologia limpa, uma vez que tem a possibilidade de utilizar a energia solar fotovoltaica, sendo esta, a chave de desenvolvimento deste sistema.

Com a introdução das bicicletas elétricas na mobilidade nacional e, conseqüentemente, a necessidade de carregamento da bateria regularmente, é de esperar que estas possam estimular algum impacto nas redes elétricas. Por esta razão, o presente trabalho visa analisar o possível impacto que este meio de transporte pode causar na qualidade de energia elétrica distribuída. O estudo foi conduzido por meio de método analítico, que inclui a análise dos ensaios de carregamento. Para tal, recorreu-se aos ensaios feitos no posto de carregamento rápido de veículo elétrico localizado na FCS, de forma a obter uma análise do impacto desta tecnologia na rede de distribuição elétrica. Para os dados recolhidos (tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, conteúdo harmónico e equilíbrio de fases), foram apenas analisados os valores médios de cada grandeza, com exceção do conteúdo harmónico em cada ordem, para os quais foram analisados os valores máximos. O registo dos dados foi feito de forma contínua durante todo o intervalo de carregamento, com períodos de amostragem de 1 segundo.

Palavras-chave

Bicicleta elétrica, Posto de Carregamento, Qualidade de Energia.

Abstract

The increased mobility has led directly to deteriorating traffic conditions, extra fuel consumption, increased exhaust emissions from cars, air pollution and reduced quality of life. In addition to being a clean, cheap and great mode of transport for short trips, cycling can offer solutions to the problem of urban mobility. The system of sharing electric bicycles is considered as an implementation of clean technology, since it has the possibility of using photovoltaic solar energy, which is the key to the development of this system.

With the introduction of electric bicycles into national mobility and, consequently, the need to charge the battery regularly, it is to be expected that they may stimulate some impact in the electric networks. For this reason, the present work aims to analyze the possible impact that this means of transport can cause in the quality of distributed electric energy. The study was conducted using an analytical method, which included analysis of the loading assays. For this, we used the tests carried out at the electric vehicle rapid charging station located at FCS, in order to obtain an analysis of the impact of this technology on the electric distribution network. For the collected data (voltage, current, active power, reactive power, harmonic content and phase equilibrium), only the average values of each magnitude were analyzed, except for the harmonic content in each order, for which the maximum values were analyzed. The data was recorded continuously throughout the loading interval, with a sampling periods of 1 second.

Keywords

Electric Bicycle, Charging Station, Energy Quality.

Índice

Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2	5
2. Estado da Arte	5
2.1. Bicicleta Elétrica	5
2.1.1. Breve História da Bicicleta Elétrica	5
2.1.2. O Mercado das Bicicletas Elétricas	7
2.1.3. Bicicletas Elétricas no Mercado	8
2.2. Motores Elétricos	10
2.2.1. Motor de Corrente Contínua	11
2.2.2. Motor de Indução	11
2.2.3. Motor de Relutância Variável.....	12
2.2.4. Motor Síncrono de Ímanes Permanentes.....	12
2.2.5. Comparação de Motores Elétricos Aplicados a Bicicletas Elétricas	14
2.3. Baterias.....	15
2.3.1. Baterias de Chumbo-Ácido	16
2.3.2. Baterias de Íão-Lítio	16
2.3.3. Baterias de Níquel-Cádmio.....	17
2.3.4. Baterias de Níquel-Hidreto Metálico	17
2.3.5. Comparação de baterias	18
2.4. Sistemas de Carregamento de bicicletas elétricas existentes no mercado	18
2.4.1. Carregamento Condutivo.....	19
2.4.2. Carregamento Indutivo	21
2.4.3. Métodos de Carregamento	23
2.5. Propostas inovadoras em fase de investigação	26
2.6. Conclusão	27
Capítulo 3	29
3. Energia Solar Fotovoltaica	29
3.1. Introdução	29
3.2. Potencial solar e sua avaliação	30
3.2.1. Comparação entre dados de irradiação solar de diversas fontes	35
3.3. Balanço energético	36
3.3.1. Levantamento da demanda de energia elétrica	36

3.3.2.	Capacidade de energia do sistema fotovoltaico (SF)	36
3.3.3.	Energia extraída do painel fotovoltaico	38
3.4.	Viabilidade económica do sistema de geração	39
3.4.1.	Custo de Geração.....	40
3.4.2.	Comparação de viabilidade com outras fontes de energia.....	40
3.4.3.	Potencial de redução de custos.....	41
3.5.	Conclusão	43
Capítulo 4		45
4.	Análise dos Perfis de Carregamento e da Qualidade de Energia Gerada	45
4.1.	Introdução	45
4.2.	Instalação Experimental.....	45
4.2.1.	Veículo Elétrico	45
4.2.2.	Posto de Carregamento	46
4.2.3.	Analizador Fluke	47
4.3.	Parâmetros de Qualidade de Energia	48
4.3.1.	Harmónicas	48
4.3.2.	Desequilíbrio de tensão	50
4.3.3.	Queda de tensão.....	51
4.3.4.	Flutuação de tensão	52
4.4.	Metodologias de ensaio	53
4.5.	Conclusão	53
Capítulo 5		55
5.	Apresentação e Análise dos Resultados	55
5.1.	Introdução	55
5.2.	Caso 1 - Carregamento 1	56
5.2.1.	Diagrama de Carga	56
5.2.2.	Evolução da Tensão	60
5.2.3.	Equilíbrio do Sistema	60
5.3.	Caso 2 - Carregamento 3	61
5.3.1.	Diagrama de Carga	62
5.3.2.	Evolução da Tensão	65
5.3.3.	Equilíbrio do Sistema	65
5.4.	Caso 3 - Carregamento 4	66
5.4.1.	Diagrama de Carga	67
5.4.2.	Evolução da Tensão	70
5.4.3.	Equilíbrio do Sistema	70
5.5.	Conclusão	71
Capítulo 6		73
6.	Conclusões.....	73

6.1. Limitações	75
6.2. Trabalhos Futuros	75
Referências Bibliográficas.....	77
Anexos.....	1
Anexo A: Gráficos para cada grandeza do Caso 1 - Carregamento 1	1
Anexo B: Gráficos para cada grandeza do Caso 2 - Carregamento 2	6
Anexo C: Gráficos para cada grandeza do Caso 3 - Carregamento 3	11

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Primeira bicicleta elétrica patenteada [6].....	6
Figura 2.2 - Bicicleta elétrica com motor no cubo da pedaleira [7].....	6
Figura 2.3 - Bicicleta elétrica com motor sob a roda traseira [8].....	7
Figura 2.4 - Bicicleta elétrica SENSE EASY [12].....	9
Figura 2.5 - Bicicleta elétrica da BMW [13].	9
Figura 2.6 - Bicicleta elétrica Minimalist [15].	10
Figura 2.7 - Motor elétrico de corrente contínua para bicicletas elétricas [9].	11
Figura 2.8 - Motor de relutância variável [9].	12
Figura 2.9 - Motor BLDC trifásico aplicado a bicicletas elétricas [9].	13
Figura 2.10 - Tomadas utilizadas no Modo 1: (a) Tomada industrial IEC 60309 monofásica; (b) Tomada doméstica monofásica schuko [26].....	19
Figura 2.11 - Diagrama de blocos de carregador de baterias [28].	20
Figura 2.12 - Posto de Carregamento MCC10 em CA [29].....	21
Figura 2.13 - Posto de Carregamento de bicicletas em CC [30].	21
Figura 2.14 - Bicicletas elétricas instaladas em Lagoa, Portugal [33].....	22
Figura 2.15 - Bicicleta elétrica Gira [34].	23
Figura 2.16 - Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante [37].....	24
Figura 2.17 - Método de carregamento Multistage [37].....	24
Figura 2.18 - Método de carregamento Pulsado: a) VFPC; b) VDPC [37].....	25
Figura 2.19 - Diagrama comparativo dos vários métodos de carregamento [37].	26
Figura 2.20 - Bicicleta elétrica solar (Solar Bike) [43].	26
Figura 2.21 - Bicicleta elétrica UOU bike [45].	27
Figura 3.1 - Interface da ferramenta Global Solar Altas [Global Solar Altas].	30
Figura 3.2 - Valores de radiação solar mensal [METEORNORM].....	33
Figura 3.3 - Duração do brilho do sol (valores médios mensais) [METEORNORM].	34
Figura 3.4 - Comparação de médias mensais da radiação solar na Covilhã.	35
Figura 3.5 - Evolução do custo dos módulos fotovoltaicos no mundo (\$/W) [67].	42
Figura 4.1 - Protótipo ilustrativo de estação de carregamento de bicicleta elétrica com recurso a energia solar [68].....	46
Figura 4.2 - Protótipo de Estação de Carregamento Rápido de Veículos Elétricos a Energia Solar [69].	47
Figura 4.3 - Analisador de Qualidade de Energia [69].	48
Figura 4.4 - Harmónica de tensão. a) Onda Fundamental (50 Hz). b) 5ª Harmónica (300 Hz). c) Onda distorcida [73].....	49

Figura 4.5 - Ilustração de queda de tensão num barramento trifásico [79].	52
Figura 4.6 - Sinal com flutuação de tensão [83].	52
Figura 5.1 - Caso 1: Estado de Carga da Bateria.	56
Figura 5.2 - Caso 1: Potência Ativa nas Fases e Potência Ativa Total.	57
Figura 5.3 - Caso 1: Potência Reativa nas Fases e Potência Reativa Total.	57
Figura 5.4 - Caso 1: Taxa de Distorção Harmónica em Tensão.	58
Figura 5.5 - Caso 1: Harmónicas de Tensão.	58
Figura 5.6 - Caso 1: Taxa de Distorção Harmónica em Corrente.	59
Figura 5.7 - Caso 1: Harmónicas de Corrente.	59
Figura 5.8 - Caso 1: Tensão nas Fases.	60
Figura 5.9 - Caso 1: Diagrama Vetorial.	61
Figura 5.10 - Caso 2: Estado de Carga da Bateria.	61
Figura 5.11 - Caso 2: Potência Ativa nas Fases e Potência Ativa Total.	62
Figura 5.12 - Caso 2: Potência Reativa nas Fases e Potência Reativa Total.	62
Figura 5.13 - Caso 2: Taxa de Distorção Harmónica em Tensão.	63
Figura 5.14 - Caso 2: Harmónicas de Tensão.	63
Figura 5.15 - Caso 2: Taxa de Distorção Harmónica em Corrente.	64
Figura 5.16 - Caso 2: Harmónicas de Corrente.	64
Figura 5.17 - Caso 2: Tensão nas Fases.	65
Figura 5.18 - Caso 2: Diagrama Vetorial.	66
Figura 5.19 - Caso 3: Estado de Carga da bateria.	66
Figura 5.20 - Caso 3: Potência Ativa nas Fases e Potência Ativa Total.	67
Figura 5.21 - Caso 3: Potência Reativa nas Fases e Potência Reativa Total.	67
Figura 5.22 - Caso 3: Taxa de Distorção Harmónica de Tensão.	68
Figura 5.23 - Caso 3: Harmónicas de Tensão.	68
Figura 5.24 - Caso 3: Taxa de Distorção Harmónica de Corrente.	69
Figura 5.25 - Caso 3: Harmónicas de Corrente.	69
Figura 5.26 - Caso 3: Tensão nas Fases.	70
Figura 5.27 - Caso 3: Diagrama Vetorial.	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Comparação entre o motor BLDC e o motor CC com escova [9].	14
Tabela 2.2 - Comparação entre motor BLDC e o Motor de Indução [9].	15
Tabela 2.3 - Comparação entre as tecnologias de baterias mais utilizadas em BE [23].	18
Tabela 2.4 - Relação entre os modos de carregamento e tipos de carregamento [26], [27].	19
Tabela 3.1 - Dados de irradiação solar anual na Covilhã [51].	32
Tabela 3.2 - Dados mensais de irradiação solar na Covilhã [52].	32
Tabela 3.3 - Dados mensais de radiação solar na Covilhã obtidos através do software METEORNORM 7.2.	33
Tabela 3.4 - Dados mensais de irradiação solar na Covilhã obtido do aplicativo web PVGIS [53].	34
Tabela 3.5 - Cálculo de consumo diário de energia.	36
Tabela 3.6 - Parâmetros do painel fotovoltaico TSM-195DC01A.	38
Tabela 3.7 - Comparação de custos de geração [61].	41
Tabela 4.1 - Classificação das harmónicas.	49
Tabela 4.2 - Valores de referência para o DHT e DHI estabelecidos pela norma IEEE STD 519-2014 [75].	50
Tabela 4.3 - Valores de referência para o DTD estabelecido pela norma IEEE STD 519-2014 [75].	50

Lista de Acrónimos

AGM	Absorbed Glass Mat
BE	Bicicleta Elétrica
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
BoS	Balance of Systems
BUGA	Bicicletas de Utilização Gratuita de Aveiro
CA	Corrente Alternada
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Corrente Contínua
CEIIA	Centro de Excelência para a Inovação da Indústria Automóvel
E-Bike	Electric Bike
EC	Estado da Carga
ER	Energia Renovável
FCS	Faculdade de Ciências da Saúde
FE	Faculdade de Engenharia
FER	Fontes de Energia Renováveis
GRP	Gabinete de Relações Públicas
I&D	Investigação e Desenvolvimento
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFC	International Finance Corporation
LCD	Liquid Crystal Display
LCOE	Levelized Cost of Energy
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OPEX	Operations and Maintenance Costs
PAB	Power Assisted Bicycles
PAS	Pedal Assist Sensor
PB	Powered Bicycles
PC	Posto de Carregamento
PCC	Point of Common Coupling
PV	Photovoltaic
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
SF	Sistema Fotovoltaico
SFLR	Sistema Fotovoltaico Ligado à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
STC	Standard Test Conditions
UBI	Universidade da Beira Interior
UE	União Europeia
UPS	Uninterruptible Power Supply
VE	Veículo Elétrico
VUF	Voltage Unbalance Factor

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Nos últimos anos, têm vindo a crescer os problemas de mobilidade urbana. E uma das possíveis soluções para estes problemas poderá ser a adoção da mobilidade elétrica com bicicletas. Esta alternativa de mobilidade nas cidades oferece uma opção de transporte rápido, barato e eficiente para viagens de curta distância, com menor emissão de carbono quando comparada com um veículo de combustão interna. Para obter esses benefícios, muitas cidades promovem o ciclismo usando diferentes políticas, particularmente através da implementação de projetos de partilha de bicicletas (bike sharing) [1]. O esquema de partilha de bicicletas como um sistema de transporte alternativo tem vindo a crescer rapidamente em todo o mundo. Cidades em diferentes partes do mundo investem em sistemas de partilha de bicicletas para melhorar a sua mobilidade e promover a redução da dependência do automóvel [2]. As bicicletas elétricas não são apenas adequadas para condução em grandes cidades, mas também particularmente útil para pessoas que vivem em áreas montanhosas ou ventosas (por exemplo, Covilhã) onde andar de bicicleta convencional gastaria mais energia física para superar a resistência do vento ou subidas [3].

Na Europa, a implantação e expansão dos esquemas de partilha de bicicletas elétricas nos últimos anos ocorreram rapidamente [1]. Porém, o foco deste desafio tem sido colocado a respeito do consumo de energia elétrica que esta tecnologia pode proporcionar. Sabe-se que, a discussão a respeito de consumo de energia elétrica tem atraído a atenção de vários setores da sociedade, sendo o principal agente motivador de tais discussões o aumento do preço das tarifas de energia elétrica. No entanto, esse cenário fortalece e incentiva o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que sejam energeticamente mais eficientes. Entretanto, essa área de estudo abrange a idealização de novas tecnologias e o desenvolvimento de técnicas e soluções que proporcionem economia de energia. Razão pela qual, atualmente, foi introduzido um novo sistema de partilha de bicicletas, que utiliza bicicletas elétricas e tira partido da adoção das tecnologias limpas para produção de energia elétrica.

Portugal, apesar de em termos energéticos ser um país caracterizado por uma elevada dependência externa, atualmente aposta bastante na forte implementação de energias renováveis, promovendo a utilização de fontes de energia endógenas. Estas apostas em

exploração de recursos endógenos justifica a introdução das tecnologias de bicicletas elétricas no quotidiano português.

Portanto, com a introdução das bicicletas elétricas na mobilidade nacional e, conseqüentemente, a sua necessidade do carregamento regular da sua bateria, é de esperar que estas possam estimular algum impacto nas redes elétricas. Por esta razão, surge assim a necessidade de analisar o possível impacto que este meio de transporte possa provocar na qualidade da energia elétrica na rede.

1.2. Motivação

Uma mobilidade sustentável é cada vez mais um desígnio de quem gere as nossas cidades, sendo necessário encontrar formas atrativas de a promover. As obrigações legais ao nível da redução de consumo de energia, emissões de gases com efeito de estufa e poluentes atmosféricos e a necessidade da diminuição do congestionamento das cidades, fazem com que se equacionem novas formas de atrair a população para modos mais sustentáveis e simultaneamente melhorando a qualidade de vida dos cidadãos. Assim sendo, como contributo à mobilidade sustentável do país, foi desenvolvido o Projeto Urban Air, projeto europeu enquadrado no programa Interreg Espanha-Portugal (POCTEP), que tem como objetivo a implementação de um inovador sistema de gestão da mobilidade por meio de bicicletas elétricas destinadas a membros da comunidade universitária, nas cidades de Valladolid e Covilhã. No caso da Universidade da Beira Interior, na Covilhã, estabelecer-se-á um sistema de empréstimo de bicicletas elétricas que aposta num sistema de recarga fotovoltaica com o objetivo de incentivar a mobilidade sustentável, uma vez que a cidade apresenta uma orografia complexa para a mobilidade em bicicleta convencional.

A motivação pessoal prende-se na contribuição técnica para tornar este projeto (Urban Air), especificamente na Covilhã, uma realidade.

1.3. Objetivos

A atual clara aposta na introdução de veículos elétricos, do tipo totalmente elétrico e PHEV (*plug-in hybrid electric vehicle*), no sistema de mobilidade, reforça a importância da investigação e desenvolvimento de sistemas de carregamento de baterias cada vez mais eficientes. Para além das preocupações na definição estratégica da localização da rede de postos de carregamento, da colaboração com a rede elétrica para aproveitamento das melhores tarifas e exploração máxima da contribuição de energias renováveis, surge a necessidade de desenvolver sistemas privados ou públicos para carregamento de veículos. Esta preocupação

estende-se aos sistemas de carregamento de bicicletas elétricas, que são hoje ainda praticamente inexistentes, já que abordagem atual é o carregamento diretamente a partir da rede elétrica.

É objetivo principal deste trabalho a análise da eficiência energética e da qualidade da energia em postos de carregamento de bicicletas elétricas com recurso a energia fotovoltaica.

Pretende-se obter as potencialidades de produção de energia a partir de fontes renováveis, e com base na análise e otimização do consumo energético das bicicletas, propor estratégias de consumo mais eficientes.

Pretende-se ainda analisar a qualidade da energia gerada, bem como dos perfis de carregamento das bicicletas.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. De seguida será feita uma breve descrição do conteúdo dos mesmos.

No capítulo 1 é feita uma introdução geral sobre a temática em estudo, isto é, a identificação e enquadramento do problema que se pretende mitigar. São também apresentados os objetivos pretendidos neste trabalho, bem como a motivação do autor.

No capítulo 2 é abordado o estado da arte da tecnologia das bicicletas elétricas, no qual são descritos os elementos principais de uma bicicleta elétrica, os sistemas de carregamento existentes no mercado, bem como as propostas inovadoras em fase de investigação.

O capítulo 3 aborda a energia solar fotovoltaica como auxílio no fornecimento de energia elétrica ao posto de carregamento. É analisado o potencial solar, a potencialidade de geração, bem como sua viabilidade económica.

No capítulo 4 é feita a análise dos perfis de carregamento do veículo elétrico com objetivo de verificar o impacto do posto no ponto de ligação à rede, bem como analisar a qualidade de energia gerada no posto.

No capítulo 5 é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos dos ensaios de carregamento do veículo elétrico.

Finalmente o capítulo 6 apresenta as conclusões retiradas da abordagem a esta temática, após a análise dos capítulos anteriores.

Capítulo 2

2. Estado da Arte

2.1. Bicicleta Elétrica

De acordo com a legislação portuguesa presente no Decreto-Lei n.º 44/2005, de 23/02, as bicicletas elétricas são velocípedes equipados com motor elétrico auxiliar de potência máxima contínua de 0,25 kW, cuja alimentação é reduzida progressivamente com o aumento da velocidade e é interrompida se esta atingir uma velocidade de 25 km/h, ou se o condutor deixar de pedalar. O mesmo decreto alerta também que, o uso de capacete durante a condução deve ser devidamente ajustado e apertado. Finalmente, o decreto termina salientando que, é obrigatório que a bicicleta de propulsão elétrica arranque usando somente a força humana [4].

As bicicletas elétricas (BE ou E-bikes) são divididas em duas categorias principais; as e-bikes de tipo "acelerador" ou bicicletas motorizadas (PB) e as e-bikes "pedelec" ou bicicletas assistidas por energia (PAB). O primeiro tipo está equipado com um interruptor no volante que permite ao usuário ligar/desligar o motor e/ou variar a sua energia, enquanto na alternativa 'pedelec' o motor funciona apenas em resposta ao pedal do usuário. Em muitos países é exigido por lei que o usuário tenha que pedalar para que o motor funcione. Na Europa, as e-bikes são classificadas como bicicletas regulares somente quando estão equipadas com um motor elétrico que possui uma potência nominal máxima de 250 W e com uma velocidade máxima de 25 km/h [5], de acordo ao decreto mencionado anteriormente.

Os componentes de uma e-bike podem ser categorizados em quatro grupos principais: motor, controlador, bateria e peças da bicicleta. Neste estudo, focamos principalmente a bateria e o motor sendo os dois componentes que determinam o consumo de energia e as necessidades energéticas de uma e-bike.

2.1.1. Breve História da Bicicleta Elétrica

Por meio de um pequeno levantamento das patentes sobre bicicletas elétricas, fez-se uma breve história da bicicleta elétrica. A primeira bicicleta elétrica patenteada remonta ao ano de 1895, nos Estados Unidos da América, por *Ogden Bolton Jr.*, como mostra a Figura 2.1. Esta bicicleta elétrica apresentava um motor CC de seis pólos no interior do cubo da roda traseira e uma bateria de 10 V [6].

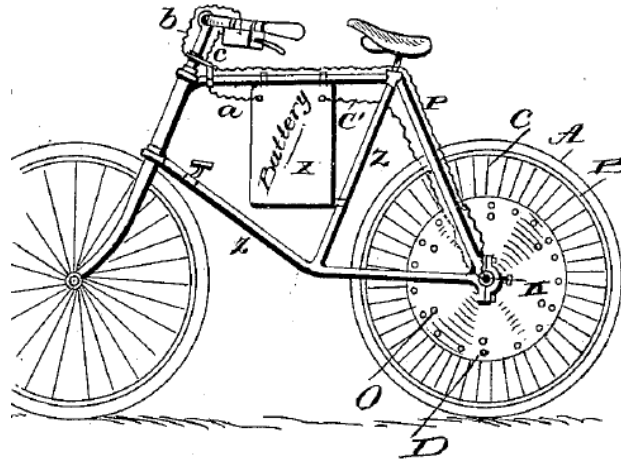


Figura 2.1 - Primeira bicicleta elétrica patenteada [6].

Dois anos mais tarde, em 1897 Hosea W. Libbey idealizou uma bicicleta elétrica cujo motor era incorporado no eixo da pedaleira, como mostra a Figura 2.2. Este modelo foi posteriormente imitado pela marca *Lafree* no final de 1990¹ no Reino Unido.

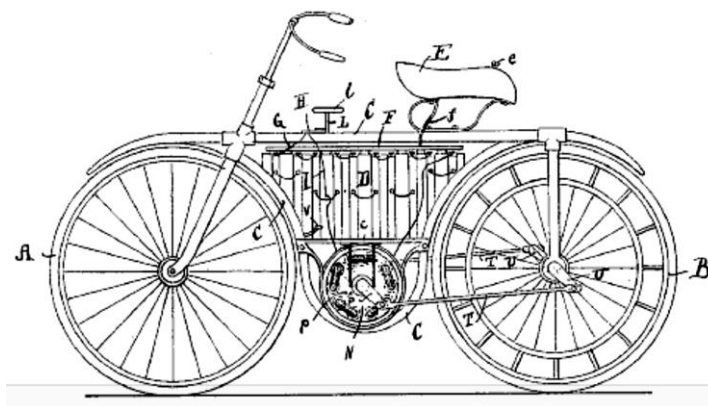


Figura 2.2 - Bicicleta elétrica com motor no cubo da pedaleira [7].

Em 1899 John Schnepf projetou uma bicicleta elétrica, onde o motor era colocado sob a roda traseira, friccionando-a, como ilustra a Figura 2.3. Esta patente não especifica o tipo de motor, nem as baterias utilizadas [8].

Com o decorrer dos anos foram surgindo novas patentes para bicicletas elétricas, porém a maior evolução deu-se na década de 90, devido ao avanço tecnológico da eletrônica de potência na área dos controladores de motores e sensores, bem como das baterias [9]. A evolução das baterias garantiu uma maior capacidade de armazenamento de energia, maior fiabilidade,

¹ Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_bicycle#History. Consultado: 27-02-2018.

maior robustez e principalmente um menor custo na sua aquisição, permitindo a utilização destas em bicicletas elétricas [10].

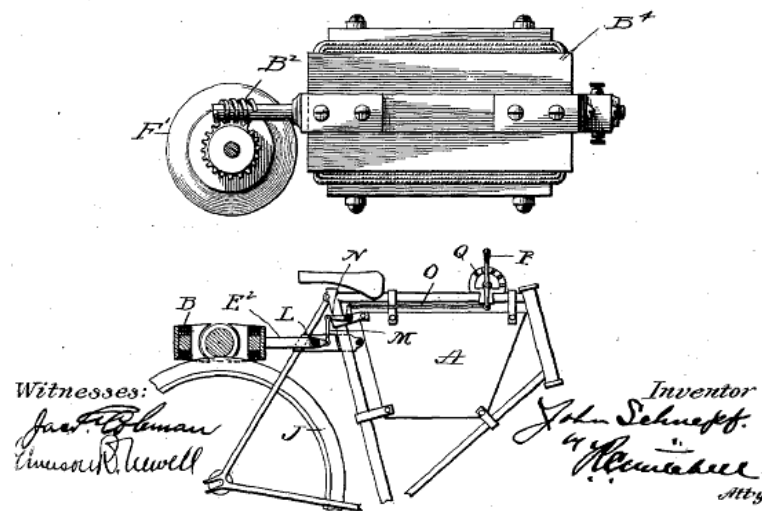


Figura 2.3 - Bicicleta elétrica com motor sob a roda traseira [8].

O Japão foi o primeiro país a desenvolver controladores para motores elétricos aplicados a bicicletas elétricas, tendo sido desenvolvido o primeiro motor e respetivo controlador no início da década de 90 pelo fabricante Zike, rapidamente seguido pelas marcas Yamaha, Honda e Panasonic que fabricavam também unidades motorizadas para bicicletas elétricas. Estas unidades não eram baratas, contudo deram início à comercialização de bicicletas elétricas [9].

A comercialização das primeiras bicicletas elétricas despertou de tal forma o interesse da população a nível mundial, que os fabricantes chineses começaram a produzir em larga escala motores embutidos no cubo da roda da bicicleta. Com o aumento na procura de motores elétricos para bicicletas elétricas, passou-se de uma única marca comercial, para cerca de cinquenta no final da década de 90 [9].

2.1.2. O Mercado das Bicicletas Elétricas

Nos últimos anos, a distribuição de bicicletas elétricas (e-bikes) tem aumentado continuamente. Especialmente na China, o número de e-bikes aumentou substancialmente. Segundo alguns analistas, estima-se que há atualmente entre 150 milhões a 200 milhões de e-bikes nas estradas chinesas². Uma tendência semelhante pode ser observada nos EUA e na

² Ivana Kottasová, "China accused of flooding Europe with cheap e-bikes", 2017. Disponível em: <http://money.cnn.com/2017/10/02/technology/china-e-bikes-europe/index.html> . Consultado: 28-02-2018.

Europa. Na Alemanha, cerca de 1,6 milhões de bicicletas elétricas estão atualmente na estrada, e espera-se que esse número aumente ainda mais [11].

Em termos percentuais, a Holanda é a maior utilizadora de bicicletas na Europa, com cerca de 40% de todo o seu tráfego sendo que, dos 40%, 10% são bicicletas elétricas [9]. Em 2016, cerca de 32,8 milhões de bicicletas elétricas foram vendidas na região da Ásia-Pacífico. Esta região específica continua a ser o mercado mais importante para bicicletas elétricas em todo o mundo.

O uso, bem como o fabrico de bicicletas elétricas em Portugal, tem vindo a desenvolver de forma bastante positiva. Como um bom exemplo temos o projeto BUGA na cidade de Aveiro, que fornece bicicletas de propulsão elétrica gratuitamente durante um determinado período de tempo, mediante a apresentação de um documento de identificação. Este mesmo projeto usa um sistema de bicicletas elétricas partilhadas (Bike sharing). Outro exemplo, é o Projeto U-Bike Portugal | Promoção de Bicicletas Elétricas e Convencionais nas Comunidades Académicas, que se baseia na aquisição de bicicletas elétricas e convencionais por parte das instituições públicas de ensino superior, com vista à sua utilização pelas comunidades académicas (com especial enfoque nos alunos, mas também com possibilidade de extensão aos docentes e colaboradores).

A nível nacional existem poucos fabricantes de bicicletas elétricas, como: a empresa Orbita, a empresa Kit e-Bike, CEIIA (Centro de Excelência para a Inovação da Indústria Automóvel) e a recente empresa UOU mobility; o que indica a existência de espaço de mercado para outras empresas, tornando aliciante o investimento.

2.1.3. Bicicletas Elétricas no Mercado

Após a breve história das bicicletas elétricas e análise do mercado das mesmas, são apresentados de seguida quatro novos modelos de bicicletas elétricas existentes no mercado.

Na sua coleção de 2018, a marca brasileira *Sense Bike* lançou três novos modelos de bicicletas elétricas, das quais apresentamos uma: bicicleta elétrica SENSE EASY, Figura 2.4.

Equipada com um novo sistema elétrico, alimentado por uma bateria de lítio de 36V/10Ah, autonomia de até 40km, tempo de recarga de 6hs. O motor de 250w da Easy é silencioso e totalmente comandado por um novo display de LCD com 5 níveis de assistência, velocímetro e indicador de carga de bateria, que pode ser manuseado com muita facilidade. A Easy é uma e-bike dobrável de aro 20”, uma solução para os problemas da mobilidade urbana, na medida em que propõe a redução da dependência do uso do veículo automóvel convencional e, conseqüentemente, ganhos na qualidade de vida do ciclista e do meio ambiente [12].



Figura 2.4 - Bicicleta elétrica SENSE EASY [12].

A gama de bicicletas da *BMW* continua a expandir-se, e agora com um novo modelo que apresenta um desenho inovador, em que a marca destaca a bateria integrada no quadro e as novas formas do selim que proporciona “conforto, segurança e um eletrizante prazer de condução”, Figura 2.5 [13].



Figura 2.5 - Bicicleta elétrica da BMW [13].

Esta bicicleta tem ainda iluminação LED integrada na retaguarda do quadro para maior segurança. Para facilitar a tarefa dos ciclistas, a nova bicicleta conta com um motor de 250 W e 90 Nm, para maior dinamismo e facilidade de rolamento, enquanto a bateria de 504 Wh amovível oferece uma autonomia superior a 100 km. No pequeno ecrã embutido na *BMW Active Hybrid e-Bike* será possível optar entre quatro modos de condução ajustáveis, para escolher o nível de assistência ao pedal, que pode variar desde o ECO (+50%) até ao TURBO (+275%). Este apoio pode ser alterado a velocidades até 25 km/h [13].

O modelo Haibike sDuro HardSeven 1.0 2018³ faz parte da gama de bicicletas elétricas Haibike 2018, com tecnologia Bosch e Yamaha adequado para aqueles que “desejam sair a cavalo sem

³ Disponível em: <https://www.e-bikeshop.co.uk/Haibike-Electric-Bikes/Haibike-sDuro-HardSeven-1.0-2018> . Consultado em: 28-02-2018.

quebrar o banco” [14]. Adequado para estrada e trilhos. Equipada com um motor Yamaha PW 250 W, uma bateria Yamaha 400 Wh de 36 V e com autonomia de 48 - 128 km.

A empresa Portuguesa de veículos elétricos *Kit e-Bike*, presente no mercado da mobilidade elétrica há mais de 8 anos, lançou recentemente a sua nova marca própria de bicicletas elétricas. A Minimalist, com uma linha de 9 modelos, entre bicicletas urbanas, de montanha e dobráveis. A Figura 2.6 apresenta um de seus novos modelos, nomeadamente SAND. Este modelo está equipado com um motor traseiro BLDC, de 500 W, uma bateria de lítio Samsung 48 V / 14,5 AH instalada no quadro, uma autonomia de 45 km com throttle e 75 km com utilização de PAS, com peso de 32 kg e suporta uma carga máxima de 130 kg. Permite a inserção de mudanças mecânicas e eletrônicas [15].



Figura 2.6 - Bicicleta elétrica Minimalist [15].

Portanto é importante salientar que, além das bicicletas elétricas serem compradas para uso particular (e-bike), elas podem ser públicas ou de uso partilhado (bike sharing).

2.2. Motores Elétricos

O motor elétrico é uma máquina destinada a converter a energia elétrica em energia mecânica.

Um motor elétrico pode ser utilizado em distintas aplicações, por isso a seleção do mesmo constitui um assunto complexo, que envolve a análise dos diversos parâmetros do sistema, tais como: potência máxima e densidade de binário, alta eficiência, volume e peso baixos, ampla gama de velocidade, capacidade de sobrecarga, capacidade de controlo, baixa vibração e ruído, alta fiabilidade [16], etc. Os parâmetros mais comuns a ter em conta na seleção de um motor, são: tipo de ligação do motor; a exploração económica do sistema de acionamento e o controlo do motor, de forma a satisfazer as necessidades físicas da carga.

Atualmente com o desenvolvimento da eletrónica, é possível alimentar os motores eléctricos através de conversores electrónicos, ajustando também o controlo do motor de forma a respeitar as características nominais deste, em função da carga que este vai acionar [9].

O universo tecnológico dos motores eléctricos é muito vasto, porém, dos diferentes tipos de motores eléctricos, os mais utilizados em bicicletas eléctricas, são os motores de CC, de indução, de relutância e de ímanes permanentes, por apresentarem um melhor desempenho para este tipo de aplicação [9], [17].

2.2.1. Motor de Corrente Contínua

Os motores de corrente contínua destacam-se por apresentarem uma curva binário/velocidade adequada às aplicações de tração. O controlo do mesmo é simples, sendo que para alterar a velocidade de funcionamento do motor, apenas é necessário controlar a tensão aplicada ao motor, Figura 2.7.



Figura 2.7 - Motor eléctrico de corrente contínua para bicicletas eléctricas [9].

Entretanto, estes são de construção volumosa e exigem uma maior necessidade de manutenção (devido aos anéis comutadores e as escovas). Além disso, a velocidade máxima com que estes motores podem operar é limitada pelo facto de existir atrito entre os anéis comutadores e as escovas, e o facto de possuírem enrolamentos no rotor [9].

2.2.2. Motor de Indução

O motor de indução é também conhecido como motor assíncrono. O termo assíncrono, é utilizado pelo facto da velocidade de rotação do rotor não ser igual à velocidade de rotação do campo girante criado pelo estator. O termo indução, é utilizado devido o movimento de rotação do rotor ser originado pelo resultado do aparecimento de forças eletromotrizes induzidas no rotor. Dos diversos tipos de motores eléctricos existentes, o motor de indução, é a máquina que sobressai relativamente às restantes. Isto ocorre pelo facto de ter uma construção robusta, um princípio de funcionamento simples, baixo custo, não requerer manutenção periódica, suportar facilmente sobrecargas, permitir inverter o sentido de marcha de forma simples, ter um comportamento estável e fiável em ambientes severos, dado que não tem contatos deslizantes na parte do rotor, e quando comparado com motores de corrente contínua ser menos volumoso e pesado para a mesma potência. [9], [17].

2.2.3. Motor de Relutância Variável

Um motor de relutância variável, como ilustrado na Figura 2.8, é um motor elétrico no qual o conjugado é produzido pela tendência da sua parte móvel se deslocar para a posição onde a indutância do enrolamento excitado é maximizada, ou seja, quando energizamos uma fase qualquer do motor, os pólos da parte móvel tendem a se alinhar com os pólos da parte fixa mais próximos, para produzir o conjugado. O seu rotor é constituído por materiais laminados de boa permeabilidade magnética, sem enrolamentos, ímanes ou anéis comutadores com escovas [9]. É assim chamado porque ele usa a relutância magnética para gerar binário.



Figura 2.8 - Motor de relutância variável [9].

Entre suas vantagens, estão: uma construção simples e robusta, bem como uma excelente relação binário/velocidade, o que permite um elevado binário a baixas velocidades e numa ampla gama de velocidades. Apesar da simplicidade na sua construção, apresenta alguns problemas nomeadamente, ruído acústico, *ripple* no binário, e controlo complexo, implicando a necessidade de sensores de posição [9], [17].

2.2.4. Motor Síncrono de Ímanes Permanentes

Diz-se motor síncrono de ímanes permanentes a máquina onde o campo magnético do rotor e o próprio rotor giram em sincronismo com o campo magnético produzido pelo estator, ou seja, todos rodam à mesma frequência.

O motor síncrono de ímanes permanentes chega a ser mais eficiente que o motor de indução, uma vez que não existem perdas associadas à existência de corrente no rotor. Devido à utilização de ímanes permanentes, o custo deste motor acaba sendo relativamente superior aos outros tipos de motores apresentados anteriormente [9].

Os motores síncronos de ímanes permanentes são classificados em dois grupos distintos, sendo essa distinção referente à disposição dos ímanes permanentes no rotor. Assim, se os ímanes permanentes estiverem colocados na periferia do rotor são denominados por PMSM (*Permanent Mount Surface Magnet*), permitindo uma maior densidade de fluxo, mas por sua vez tendo

menor robustez e menor integridade estrutural. No caso dos ímanes permanentes estarem colocados no interior do rotor, são denominados por IPM (*Interior Permanent Magnet*), esta configuração confere maior robustez ao motor e por isso, é apropriada para aplicações com velocidades elevadas, todavia, a conceção desta configuração é relativamente mais complexa, aumentando assim o custo final do motor [9].

A subclasse PMSM também é classificada quanto ao modo de colocação dos enrolamentos no estator, como: enrolamentos concentrados e distribuídos. Por conseguinte, esta classificação está diretamente relacionada com as forças contraelectromotrizes geradas. Deste modo, se o motor PMSM tiver os enrolamentos concentrados, a forma de onda gerada da força contraelectromotriz é trapezoidal, por outro lado se os enrolamentos forem distribuídos, a forma de onda da força contraelectromotriz é sinusoidal [18]. Os motores de enrolamentos concentrados são denominados por BLDC (*Brushless Direct Current*) (Figura 2.9) enquanto que, os motores de ímanes permanentes de enrolamentos distribuídos são denominados por PMAC (*Permanent Magnet Alternating Current*) ou BLAC (*Brushless Alternating Current*).

Os motores BLAC, dependendo da aplicação, os ímanes permanentes podem ser construídos com materiais magnéticos fortes, nomeadamente samário de cobalto e neodímio de ferro e boro, obtendo assim um alto desempenho dinâmico, robustez, alta eficiência e alto binário, ideais para aplicações de desempenho elevado, contudo, são relativamente caros [9].

Os motores BLAC podem ainda ser fabricados com materiais mais acessíveis, como por exemplo a ferrite, diminuindo deste modo o preço de fabrico, contribuindo para a sua utilização em aplicações de baixo custo. Dentre os motores da subclasse PMSM (BLDC e BLAC), o mais utilizado é o BLDC, por possibilitar a aplicação de algoritmos de controlo simples.

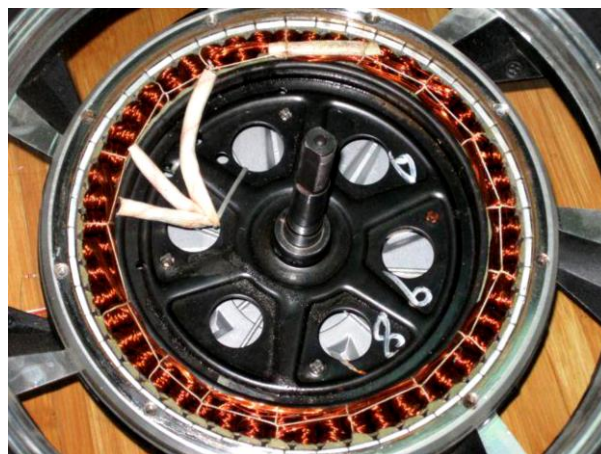


Figura 2.9 - Motor BLDC trifásico aplicado a bicicletas elétricas [9].

2.2.5. Comparação de Motores Elétricos Aplicados a Bicicletas Elétricas

Neste item, é apresentado uma comparação entre os principais motores elétricos aplicados em bicicletas elétricas. Esta comparação, permite associar facilmente quer as vantagens quer as desvantagens relativas a cada motor, bem como as suas características. Na Tabela 2.1 é apresentada uma comparação entre o motor BLDC e o motor CC (com escovas), em que se destaca o comportamento de cada motor para determinadas características.

Tabela 2.1 - Comparação entre o motor BLDC e o motor CC com escova [9].

Características	Motor BLDC	Motor CC com escova
Comutações	Comutações eletrónicas baseadas nos sensores <i>Hall</i> .	Comutação das escovas.
Manutenção	Baixa manutenção devido a ausência de escovas.	Manutenção periódica.
Durabilidade	Alta.	Baixa.
Velocidade/Binário	Permite a operação linear em todas as velocidades com carga nominal.	Em velocidades altas o atrito das escovas prejudica o binário.
Eficiência	Alta, pois não tem queda de tensão.	Moderada.
Potência de saída/Tamanho do motor	Alta. Redução do tamanho devido as características térmicas, pois como estes motores têm os enrolamentos no estator, a dissipação é superior.	Moderada/Baixa. O calor produzido pela armadura é dissipado no entreferro, aumentando a temperatura.
Inércia do Rotor	Baixa, pois tem ímanes permanentes no rotor, o que melhora a resposta dinâmica.	Alta inércia do rotor, o que limita a característica dinâmica.
Gama de Velocidade	Alta, pois não contém limitações mecânicas impostas pelas escovas.	Baixa, pois contém limitações mecânicas das escovas.
Ruído Elétrico	Baixo.	Alto, devido à geração do arco elétrico nas escovas.
Custo de Fabrico	Alto, devido a existência dos ímanes permanentes de terras raras.	Baixo.
Controlo	Complexo.	Simples.
Requisitos de Controlo	O controlo é indispensável para o funcionamento do motor.	O controlo só é necessário para variar a velocidade.

A Tabela 2.2 apresenta a comparação entre o motor BLDC e o motor de Indução, que destaca o comportamento de cada motor para determinadas características.

Tabela 2.2 - Comparação entre motor BLDC e o Motor de Indução [9].

Características	Motor BLDC	Motor de Indução
Velocidade/Binário	Linear, permitindo a operação em todas as velocidades com carga nominal.	Baixo binário quando funciona a baixas velocidades.
Potência de saída/Tamanho do motor	Alta devido à utilização de ímãs permanentes.	Moderado devido à existência de enrolamentos quer no estator quer no rotor.
Inércia do Rotor	Baixa, pois apresenta melhores características dinâmicas.	Alta, pois apresenta poucas características dinâmicas.
Corrente Inicial	Não necessita de nenhum circuito de controlo de corrente no arranque.	Necessita de um circuito de controlo de corrente no arranque.
Requisitos de Controlo	O controlo é indispensável para o funcionamento do motor, sendo que o mesmo controlador pode ser usado para variar a velocidade.	O controlo só é necessário para variar a velocidade.
Escorregamento	Não existe escorregamento entre o rotor e o estator.	O rotor gira a uma frequência inferior do que a do estator, existindo assim escorregamento.

2.3. Baterias

O ato de carregar uma bateria não é um processo simples, devido a vários fatores como segurança, eficiência e tempo. Em termos de segurança, quando se projeta um sistema de carregamento é necessário ter em conta a bateria a que se destina, de forma a evitar a ocorrência de fenómenos como sobrecarga ou subcarga [19].

As baterias são dispositivos que armazenam energia elétrica através das reações eletroquímicas que se processam no seu interior. Concisamente, as baterias podem ser vistas como dispositivos que armazenam energia durante um determinado tempo, e fornecem essa mesma energia quando necessário. Assim, considera-se que as baterias apenas trocam energia entre sistemas, ou seja, recebem energia elétrica, armazenam-na sob a forma química, e posteriormente devolvem essa mesma energia novamente como energia elétrica. A capacidade de energia de uma bateria é uma quantidade finita que é limitada pelas propriedades de reação química que ocorrem dentro da bateria [20], [21].

Para bicicletas elétricas, os tipos de baterias mais usados são: baterias de chumbo-ácido, baterias de lítio, baterias de níquel-cádmio e as baterias de níquel hidreto-metálico.

Existem outros tipos de baterias menos utilizadas, como exemplo podem referir-se outras topologias baseadas em níquel como as de Níquel-Ferro (NiFe), baterias de Sodium-Nickel

Chloride (Zebra), baterias de Zinco-Halogéneo (ZnBr), ou outras baterias de elevada temperatura como as de Sódio-Enxofre (NaS). Estas não serão consideradas para este estudo, pois não são amplamente utilizadas.

2.3.1. Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido (Pb-ácido) são as mais antigas baterias recarregáveis e a principal opção para as mais diversas aplicações, onde são indispensáveis o custo e a robustez. Entre outras aplicações, estas baterias são muito utilizadas na mobilidade elétrica, designadamente em veículos elétricos (como fonte de energia alternativa aos veículos de combustão interna), motocicletas, barcos de pequeno porte, e mais recentemente em bicicletas elétricas [9].

Nas baterias de chumbo existem três tipos de tecnologias distintas, nomeadamente as líquidas, as AGM (*Absorbed Glass Mat*) e as de gel.

Quanto a sua construção, as baterias de chumbo-ácido são projetadas para terem taxas de descarregamento relativamente altas, mas essas taxas podem afetar a vida útil das mesmas. Por exemplo, as baterias de arranque dos automóveis fornecem uma corrente elevada num curto intervalo de tempo e não devem ser muito descarregadas. Por outro lado, as baterias de uma UPS, normalmente, estão projetadas para fornecer pouca corrente durante longos períodos de tempo e, geralmente permitem descarregamentos mais profundos. Apesar das baterias de chumbo comuns serem limitadas quanto à profundidade de descarrega (no máximo 50 % de DoD) [22], existem as denominadas Deep-Cycle, que permitem descarregamentos mais profundos que as tradicionais devido à adição do o eletrodo à base de carbono. Esta tecnologia avançada pode melhorar drasticamente o desempenho, durabilidade das baterias de chumbo, bem como diminuir as reações laterais de eletrólise, e atenuar a corrosão e dessecação do eletrodo positivo [23].

2.3.2. Baterias de Ião-Lítio

As baterias de ião-lítio (Li) são o tipo de baterias mais utilizadas em bicicletas elétricas, por apresentarem maior densidade de energia por volume [24]. São mais leves e possibilitam longos ciclos de vida quando corretamente utilizadas. Contrariamente às baterias à base de níquel, as baterias lítio não apresentam efeito de memória, ou seja, não necessitam de serem descarregadas totalmente antes de serem recarregadas. Tipicamente, o processo de descarregamento destas baterias não deve ser excessivamente rápido para não provocar um sobreaquecimento indevido, ruturas ou mesmo explosões [9].

A literatura [9] afirma que, as baterias de ião-lítio dispõem da mais recente tecnologia, sendo esta bastante diferente das outras tecnologias de baterias. Apesar do lítio (Li) ser o mais leve de todos os elementos químicos utilizados em baterias, e tendo o maior potencial

eletroquímico, apresentam um custo de aquisição relativamente alto, que influencia no valor da bateria.

Com objetivo de obter o melhor desempenho desta tecnologia, têm surgido novas topologias, tais como Lítio-polímero (LiPol), Lítio-fosfato-ferro (LiFePO), Lítio-magnésio-oxigênio (LiMnO₂) e Lítio-titânio (LiTi).

A vida útil das baterias de lítio é bastante influenciada pelos processos de carregamento e descarregamento, devendo ser inteiramente respeitadas as características especificadas pelos fabricantes, nomeadamente os níveis de tensão, de corrente e de temperatura [9].

2.3.3. Baterias de Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd), são largamente utilizadas em eletrónica portátil, no entanto, devido à grande expansão das baterias de lítio nos últimos tempos, as baterias de níquel-cádmio vão perdendo competitividade. Neste tipo de tecnologia as baterias devem ser descarregadas por completo, para evitar o efeito memória, ou seja, quando uma bateria não é descarregada totalmente, a bateria guarda a tensão que tem aos seus terminais como sendo a tensão mínima, logo quando voltar a ser descarregada a bateria em vez de ter a tensão mínima nominal vai ter uma tensão mínima que corresponde ao valor de tensão guardado [9].

As baterias NiCd estão cada vez mais em desuso, pois além do efeito memória, bem como de terem menor capacidade e menor tempo de vida útil, esse tipo de bateria é muito poluente, já que o cádmio é um elemento químico altamente tóxico e prejudicial ao meio ambiente.

2.3.4. Baterias de Níquel-Hidreto Metálico

As baterias de níquel-hidreto-metálico (Ni-MH) têm a mais recente tecnologia de baterias à base níquel e apresentam-se como uma nova alternativa para aplicações portáteis. Basicamente, estas baterias vêm para substituir as baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) e fazer concorrência às de lítio. A bateria Ni-MH possui maior potência/densidade de energia, é menos propensa a sofrer efeito de memória (quando carregadas e descarregadas corretamente). No entanto, sofre de várias desvantagens técnicas, como alta taxa de auto descarga, vida útil reduzida e eficiência baixa (cerca de 65%). Além disso, sua capacidade de tolerar carga rápida e sobrecarga é muito baixa. Particularmente durante o carregamento rápido, podem ser geradas quantidades maciças de calor, e a acumulação de hidrogénio pode causar a rutura celular, levando a uma decadência de capacidade considerável. Portanto, as suas estratégias de carregamento devem ser cuidadosamente projetadas [9].

Do ponto de vista químico e elétrico, este tipo de bateria consiste de um elétrodo positivo baseado em níquel-oxihidróxido, um elétrodo negativo à base de cádmio metálico e um eletrólito alcalino (geralmente hidróxido de potássio) [23].

2.3.5. Comparação de baterias

Para auxiliar a comparação, é apresentado na Tabela 2.3 algumas características a considerar na seleção da melhor tecnologia de bateria. Nesta tabela, identifica-se a bateria de íões de lítio como sendo a que apresenta uma maior densidade de energia, bem como uma maior densidade de potência. Quanto ao seu preço, é compensado pela quantidade de energia armazenada. Portanto, em comparação com outros tipos de baterias, as baterias de íões de lítio possuem as vantagens de alta densidade de energia, alta eficiência, vida útil longa e simpatia ambiental.

Tabela 2.3 - Comparação entre as tecnologias de baterias mais utilizadas em BE [23].

Características	Tecnologia da Bateria			
	Chumbo-Ácido	NiCd ⁴	NiMH	Íões de Lítio
Densidade de Energia (Wh/kg)	25 - 50	30	60 - 120	75 - 200
Densidade de Potência (W/kg)	75 - 300	150 - 200	250 - 1000	500 - 2000
Ciclo de vida (100% de profundidade de descarga)	200 - 1000	1000-3500	180 - 2000	1000 - 10000
Custo de capital (US\$/kWh)	100 - 300	600-1500	900 - 3500	300 - 2500
Eficiência (%)	75 - 85	60 - 70	~65	85 - 97
Auto Descarga	Baixa	Baixa	Alta	Média

2.4. Sistemas de Carregamento de bicicletas elétricas existentes no mercado

O carregamento da bicicleta elétrica é feito mediante a ligação da mesma a uma fonte de energia, podendo esta ser proveniente da rede (plug-in) ou de fontes de energia renováveis (sistemas autónomos). O sistema de carregamento de bicicletas elétricas (e-bikes) existentes no mercado podem ser agrupados da seguinte forma:

- Consoante a ligação de carregamento: ligação condutiva e indutiva.
- Consoante o método ou algoritmo de carregamento: corrente constante / tensão constante, multistage e pulsado.

⁴ Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_commercial_battery_types . Acessado: 26-02-2018.

2.4.1. Carregamento Condutivo

O modo de carregamento com ligação condutiva do VE resume-se ao contacto direto entre a fonte de alimentação exterior ao veículo (posto de carregamento) e o próprio veículo, através de um cabo elétrico. O carregamento do veículo elétrico efetua-se em tomadas elétricas apropriadas, onde a ligação é materializada através de cabos elétricos [25].

A norma europeia/portuguesa EN/NP61851 - Sistema de carga condutiva para veículos elétricos (2003), revista em Dezembro de 2010, define como deve ser feito o carregamento de um veículo elétrico e em que condições. Para esse efeito estabelece 4 modos de carregamento [23], que se resume na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Relação entre os modos de carregamento e tipos de carregamento [26], [27].

Modo de Carregamento	Corrente [A]	Tensão (FN) [V]	Potência [kVA]	Conexão	Tipo de Carregamento
Modo 1 Modo 2	< 16	230	< 3,7	1-Fase	Potência Normal
Modo 2 Modo 3	16 - 32	230	3,7 - 22	1 ou 3-Fases	Média Potência
Modo 2 Modo 3	63	230	43,5	3-Fases	Elevada Potência
Modo 4	> 32	-	50	DC	Elevada Potência

Sabendo que as bicicletas têm uma potência de carregamento inferior a 3,7 kVA, é aplicável o Modo 1.

2.4.1.1. Modo 1

No carregamento em Modo 1, na ligação do VE à rede de alimentação utilizam-se tomadas normalizadas de corrente até 16A, no lado da rede de alimentação, monofásica ou trifásica, com condutores de fase (s), de neutro e de terra de proteção, ou seja, tomadas domésticas do tipo schuko ou industriais da norma EN60309 (como ilustra a Figura 2.10). A utilização do Modo 1 de carga depende da presença de um dispositivo de corrente residual (RCD), também chamado disjuntor diferencial, no lado da rede de alimentação [26].



Figura 2.10 - Tomadas utilizadas no Modo 1: (a) Tomada industrial IEC 60309 monofásica; (b) Tomada doméstica monofásica schuko [26].

Por este mesmo modo, o fornecimento de energia pode ser em corrente alternada (casas e postos públicos) e em corrente contínua (posto de carregamento específico).

2.4.1.2. Fornecimento controlado em corrente alternada (AC)

Neste tipo de fornecimento, o carregamento da bateria da BE consiste basicamente numa fonte de energia (carregador) que fornece à bateria uma corrente elétrica contínua, como ilustrado na Figura 2.11. Para a estação de carregamento, à semelhança do carregamento com tomada elétrica residencial, apenas se fornece a energia necessária ao processo, já que o BMS (Battery Management System) encarregar-se-á de todas as operações de controlo e monitorização do fornecimento de energia à bateria.

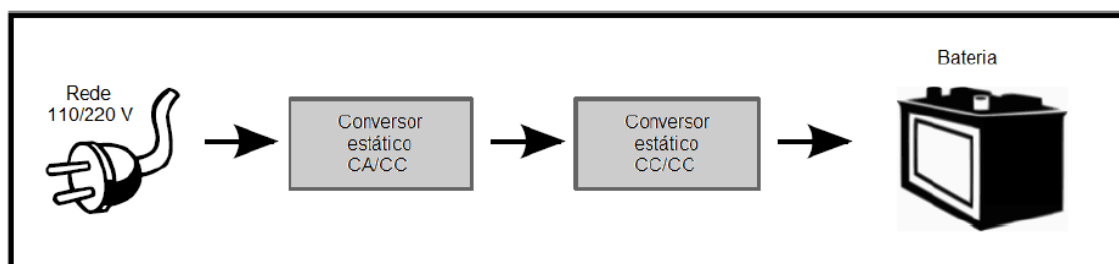


Figura 2.11 - Diagrama de blocos de carregador de baterias [28].

2.4.1.3. Fornecimento controlado em corrente contínua (DC)

À semelhança da anterior, esta solução compreende também a existência de um BMS. A principal diferença destas duas situações reside no facto de que no processo antecedente a alimentação é efetuada em corrente alternada (AC) sendo agora em corrente contínua. Devido a este facto, convém assinalar algumas outras diferenças.

Neste fornecimento, o retificador AC/DC está incorporado no posto de carregamento. Logo o consumidor possui um sistema onde o terminal de carga da estação é diretamente acoplado à bateria, não existindo nenhum sistema de controlo no próprio veículo ou exterior. Portanto, é necessário que a tensão e corrente máxima que o BMS da bicicleta exige estejam dentro dos limites admissíveis pelo retificador existente na estação de carregamento.

2.4.1.4. Sistema de carga condutiva no mercado

Neste item são apresentados alguns sistemas de carregamento que se encontram no mercado, baseados na ligação condutiva.

A ZEEV - *energy in motion* é uma empresa especialista na oferta de soluções e serviços de mobilidade elétrica para empresas e particulares. Ela disponibiliza uma gama completa de soluções de mobilidade que incluem o veículo, infraestrutura de carregamento, painéis fotovoltaicos e energia elétrica para carregamento. Dos postos de carregamento de veículos

elétricos que a mesma empresa dispõe no mercado, o tipo MCC10 (ver Figura 2.12) é específico para veículos de duas rodas.



Figura 2.12 - Posto de Carregamento MCC10 em CA [29].

A empresa *Giulio Barbieri - Outdoor Solutions* é especialista no fabrico de postos de carregamento de bicicletas e não só. Ela disponibiliza no mercado postos de carregamento de bicicletas por ligação condutiva e ligação indutiva, Figura 2.13.



Figura 2.13 - Posto de Carregamento de bicicletas em CC [30].

2.4.2. Carregamento Indutivo

Os carregadores com ligação indutiva caracterizam-se por fornecerem energia ao VE através de um campo eletromagnético sem ligação direta. Ou seja, os cabos elétricos utilizados no método com ligação condutiva são dispensáveis. O princípio para transferir energia é o mesmo de um transformador, ou seja, a energia elétrica é transferida através da indução de campos magnéticos entre duas bobinas separadas. Aplica-se uma tensão alternada à bobina do primário

que origina um fluxo de corrente variável, que por sua vez cria um campo magnético que irá induzir uma tensão alternada na bobina secundária. Por sua vez, a bobina secundária presente no veículo está ligada ao carregador interno das baterias que retifica a CA para CC, para ser armazenada nas baterias [31], [32]. O processo de carregamento dos VEs acontece quando ele está imobilizado numa doca do posto de carregamento. A frequência de operação e o mecanismo de acoplamento são os fatores mais importantes que afetam o design e o desempenho do sistema de carregamento. Contudo, os sistemas para carregar os VEs devem utilizar alta frequência para diminuir o tamanho e peso do sistema de carregamento [25].

2.4.2.1. Sistema de carga indutiva no mercado

Cada vez mais, estão a surgir ideias e empresas prontas a apostar em postos de carregamento por indução. De várias soluções existentes no mundo, convém salientar alguns exemplos, para se ter em consideração o panorama atual neste assunto.

A empresa canadiana *Bewegen Technologies Inc* é a responsável pelo fabrico das bicicletas elétricas, bem como as estações e docas instaladas no concelho de Lagoa, Portugal. O mesmo projeto utiliza docas de carregamento automático (baseado na ligação indutiva) das baterias das bicicletas, Figura 2.14. Toda a tecnologia por trás deste sistema foi criada por uma empresa portuguesa, a *Bikeemotion*, enquanto as operações do dia-a-dia do sistema são também asseguradas por uma empresa nacional, a *Wegoshare* [33].



Figura 2.14 - Bicicletas elétricas instaladas em Lagoa, Portugal [33].

A empresa *EMEL* em parceria com a *Órbita*, desenvolveram um projeto com bicicletas elétricas com carregamento automático. O seu projeto (*Gira. Bicicletas de Lisboa*) foi instalado na cidade de Lisboa, Figura 2.15.



Figura 2.15 - Bicicleta elétrica Gira [34].

2.4.3. Métodos de Carregamento

Existem diversas recomendações apresentadas pelos fabricantes no momento de realizar o carregamento das baterias para VE, as quais dependem principalmente do tipo de bateria, da capacidade do banco de bateria e do tempo de carga. Embora a técnica consista na manipulação de duas variáveis, que são a tensão e a corrente através da bateria em três ou quatro etapas diferenciadas [9], em algumas situações deve-se controlar a temperatura para evitar que se ultrapasse o limite de risco, o qual pode danificar a bateria ou produzir acidentes.

Podemos encontrar na literatura diversos métodos de carregamento, com diferentes tipos de abordagens. Assim podem-se dividir os métodos de carregamento em três grandes grupos [35], [36], uma vez que todas as variantes apresentadas na literatura derivam destes:

- Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante;
- Método de carregamento *Multistage*;
- Método de carregamento Corrente Pulsada.

2.4.3.1. Método de Carregamento Corrente Constante/Tensão Constante

O algoritmo de carregamento CC/CV é amplamente referenciado na literatura devido à sua facilidade de implementação. Este método é caracterizado por três estágios de implementação, como ilustra a Figura 2.16. O primeiro estágio, denominada como *trickle charge* (TC), corresponde a uma tensão da célula abaixo do valor crítico de $V_{trickle}$. Nesta situação a célula deve ser carregada com uma corrente reduzida, com um valor típico de 0.1 C, em que C representa a capacidade nominal da célula [35]. Assim que o valor da tensão ultrapasse o $V_{trickle}$, o algoritmo comuta para o segundo estágio de carregamento. Neste segundo estágio a célula é sujeita a um período de carregamento a corrente constante, com um valor fixo e predeterminado, variando entre 0.5 C e 3.2 C, dependendo das suas especificações. Quando o

valor da tensão atinge o valor V_{charge} (tipicamente 4.2 V), o algoritmo comuta para o terceiro estágio de carregamento. Neste estágio a célula é sujeita a tensão constante (CV) e a corrente decresce gradualmente. Este estágio termina quando a corrente de carregamento atinge um valor pré-definido, tipicamente 0.1 C, ou quando o tempo máximo de carregamento é excedido [35], [37].

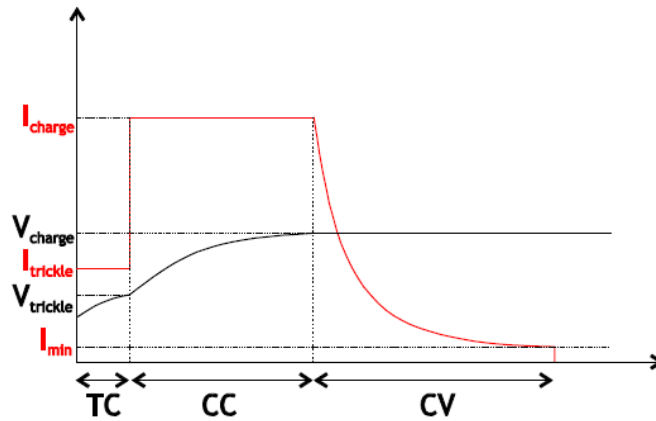


Figura 2.16 - Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante [37].

2.4.3.2. Método de Carregamento *Multistage*

O método de carregamento *Multistage*, consiste no carregamento por múltiplos estágios com diferentes níveis de corrente, como ilustrado na Figura 2.17. Este método estabelece diferentes níveis de corrente e as condições para a mudança de estágio. O critério mais utilizado para alternar entre estágios (critério de cruzamento de limite) é um limite de tensão da célula definido, reduzindo a corrente e tornando as leituras de tensão mais realistas, porque a queda de tensão através da resistência interna da célula é menor. Alguns autores escolhem algoritmos de otimização para encontrar os estágios ótimos baseados em abordagens diferentes, como o algoritmo PSO e os controladores fuzzy [38]. No entanto, apesar do uso de algoritmos de otimização, o critério de cruzamento do limite continua a centrar-se no limite de tensão da célula [37], [39].

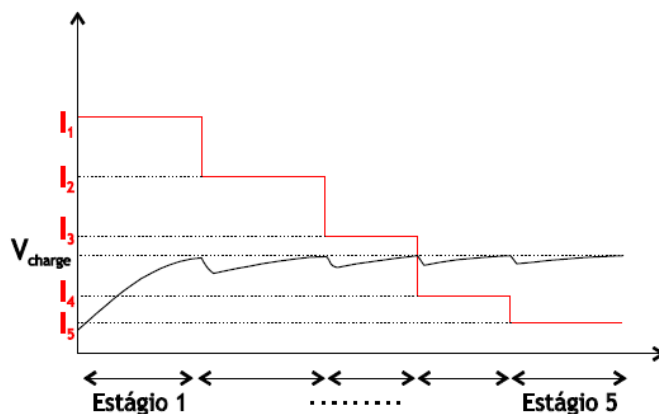


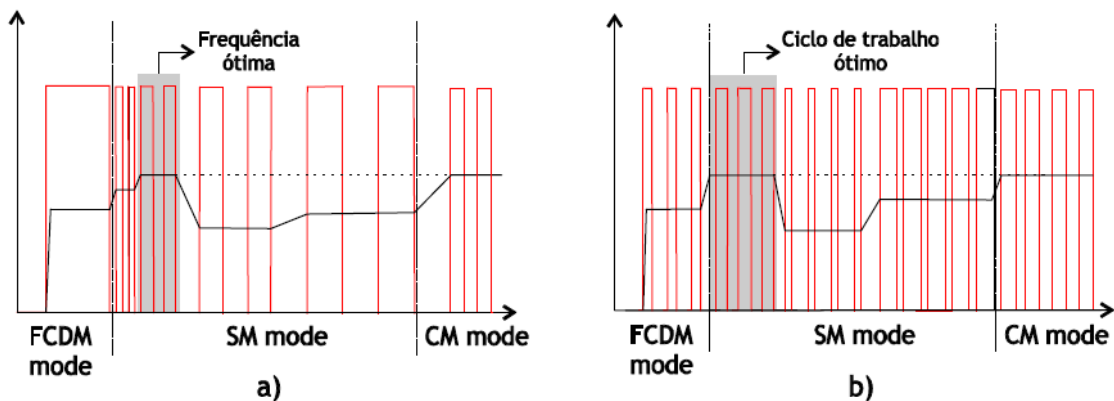
Figura 2.17 - Método de carregamento Multistage [37].

2.4.3.3. Método de Carregamento Corrente Pulsada

O método de carregamento a corrente pulsada, é caracterizado pelo uso de uma corrente pulsada e pode ser subdividido em duas metodologias: *Variable Frequency Pulse Charge* (VFPC) e *Variable Duty Pulse Current* (VDPC) [37], [40]. O VFPC otimiza a frequência do pulso de corrente, minimizando a impedância da célula e consequentemente, maximizar a transferência de energia. Esta maximização da transferência de energia pode ser alcançada de duas formas diferentes: definindo a amplitude do pulso e variando a largura de pulso, ou vice-versa (metodologia VDPC) [37].

Em [41] é proposto um método de carregamento VFPC composto por três modos de operação, tais como: *Full Charge Detect Mode* (FCDM), *Search Mode* (SM) e *Charge Mode* (CM), ilustrado na Figura 2.18 a). Resumidamente, o algoritmo inicia a sua operação no modo FCDM detetando o estado da célula, para tal é aplicada à célula uma tensão constante para monitorizar a corrente de carregamento. Concluída esta fase, o algoritmo comuta para o modo de operação SM. Nesta, o algoritmo irá descobrir qual a frequência ótima, ou seja, a frequência para a qual a impedância interna da célula é mínima e por isso a corrente de carregamento é máxima. Assim que a frequência ótima é encontrada, o algoritmo entra no modo de operação CM, carregando a célula com a corrente de carregamento obtida. Este processo é repetido até que a célula se encontre totalmente carregada [37].

Em [42] o autor propõe um método semelhante ao anterior, mas baseado na metodologia VDPC, ilustrado na Figura 2.18 b).



2.4.3.4. Comparação dos Métodos de Carregamento

A comparação entre os métodos de carregamento abordados é ilustrada na Figura 2.19. Pela figura é possível comprovar que o método *Multistage* apresenta melhor relação entre eficiência, simplicidade de controlo e implementação, ciclos de vida das baterias e tempo de carregamento.

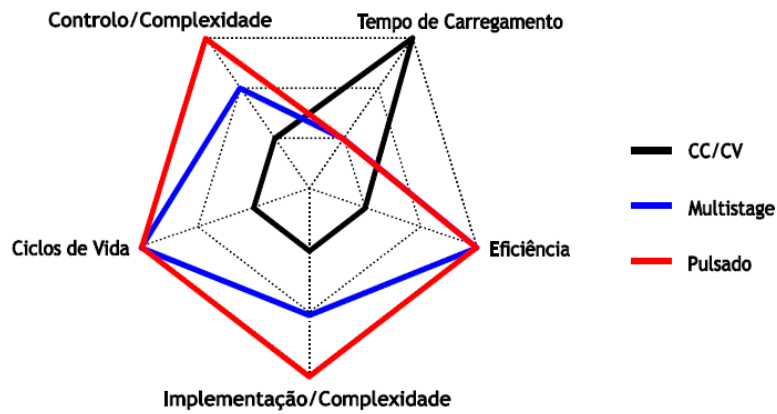


Figura 2.19 - Diagrama comparativo dos vários métodos de carregamento [37].

2.5. Propostas inovadoras em fase de investigação

Muitas são as propostas inovadoras das bicicletas elétricas, especialmente no sistema de carregamento. A realidade das bicicletas elétricas é que dependem da bateria que precisa ser recarregada. Porém, há projetos de carregamento regenerativo em investigação, tal como abordado a seguir.

O dinamarquês Jesper Frausing apresentou um novo modelo de bicicleta elétrica (Solar Bike) que não precisa de ser ligada à tomada para recarregar, Figura 2.20. O modelo é equipado com placas fotovoltaicas, baterias e um motor elétrico, que pretendem facilitar a vida de qualquer ciclista urbano. De acordo com o criador, a velocidade média da bicicleta é de 25 km/h, podendo chegar até a 50 km/h. Quando a bateria está totalmente carregada, ela disponibiliza energia suficiente para prover 70 quilômetros de autonomia [43].



Figura 2.20 - Bicicleta elétrica solar (Solar Bike) [43].

Ainda no campo de investigações inovadoras, a empresa UOU Mobility tem em desenvolvimento uma bicicleta elétrica (UOU bike) ao serviço dos Correios de Portugal (CTT) na cidade de Aveiro, Figura 2.21. Esta mesma e-bike tem inovações que a tornam um veículo mais abrangente e integrado nas redes de partilha das grandes cidades. Destaca-se por ter um sensor que lhe permite não só analisar a qualidade do ar (em termos de CO₂) mas também monitorizar a saúde do utilizador enquanto pedala, além de dispor de uma aplicação no smartphone que lhe oferece outras funcionalidades [44].



Figura 2.21 - Bicicleta elétrica UOU bike [45].

2.6. Conclusão

As bicicletas elétricas têm vindo a ganhar cada vez mais destaque como parte de uma solução integrada de mobilidade urbana e não só.

Neste capítulo fez-se uma abordagem sobre as bicicletas elétricas, no que diz respeito à sua origem, bem como à sua expansão no mercado. De igual modo, focou-se também os elementos principais da bicicleta elétrica, especificamente o motor e a bateria, onde foram apresentadas e analisadas as topologias que oferecem um melhor comportamento em bicicletas elétricas, sendo que para os motores, o tipo mais utilizado é o BLDC, e para as baterias, são as de lítio. E finalmente, fez-se uma abordagem do sistema de carregamento de bicicletas elétricas disponíveis no mercado, evidenciando pontos como os tipos de ligação de carregamento e os algoritmos/métodos de carregamento. Na comparação dos algoritmos de carregamento, o mais adequado é o *Multistage* por apresentar melhor relação entre eficiência, simplicidade de controlo e implementação, ciclos de vida das baterias e tempo de carregamento.

Capítulo 3

3. Energia Solar Fotovoltaica

3.1. Introdução

Diz-se que uma fonte de energia é renovável quando não é possível estabelecer um fim temporal para a sua utilização. É o caso do calor emitido pelo sol, da existência do vento, das marés ou dos cursos de água. As energias renováveis são virtualmente inesgotáveis, mas limitadas em termos da quantidade de energia que é possível extrair em cada momento [46].

Portugal é, a nível europeu, um dos países que tem mais horas de sol por ano: entre 2200 a 3000. Perante este cenário, seria natural que fosse, também, um dos maiores consumidores de energia solar. No entanto, existem cerca de 220000 m² de painéis fotovoltaicos instalados no país, o que é muito pouco comparativamente com a Grécia, que tem 2,6 milhões m², e à mesma exposição solar [46].

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz do sol em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão [47]. A taxa de geração de coletores elétricos depende do fluxo de luz incidente e da capacidade de absorção do semicondutor [48].

A corrente elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos é contínua. Para que possa ser utilizada, um inversor converte-a em corrente alternada. Nalguns casos, o inversor já vem incorporado no módulo fotovoltaico. Geralmente são utilizados três tipos de sistemas fotovoltaicos, nomeadamente, sistema fotovoltaico autónomo, sistema fotovoltaico híbrido e sistema fotovoltaico ligado à rede [49]. Os sistemas fotovoltaicos autónomos, nos quais é necessário armazenar eletricidade, possuem ainda dois outros componentes: baterias, que guardam a energia produzida, e controladores de carga, que monitorizam e protegem a bateria de sobrecargas ou descargas totais. Os dois componentes são colocados entre os painéis e o inversor. No caso dos sistemas ligados à rede, é ainda preciso fazer a ligação através de um PT (posto transformador) e um contador bidirecional.

Outros acessórios, tais como o hardware de montagem, cablagem, caixas de junção, equipamento de solo, proteção contra sobrecargas, completam o sistema fotovoltaico. Ao conjunto dos elementos que compõem o sistema fotovoltaico, excluindo o painel, é dado o nome de sistemas de equilíbrio (BoS).

Portanto, neste capítulo são analisadas as potencialidades locais de produção de energia, bem como as possibilidades de fornecimento de energia a partir de fonte renovável, especificamente a energia solar, disponível na localidade de Covilhã, para o carregamento das bicicletas elétricas. E finalmente será analisada a viabilidade económica desta fonte de energia.

3.2. Potencial solar e sua avaliação

Existem dois instrumentos comumente utilizados para a medição da irradiação solar: o piranómetro e o pireliómetro, o primeiro para obter medidas da irradiação global e o segundo para obter medidas da irradiação direta. Além destes instrumentos, existe ainda os dados de satélites para medição da irradiação solar. As estimativas de irradiação solar obtidas através de dados de satélites podem apresentar boa exatidão quando relatadas em médias mensais. Apesar de ser possível obter dados em intervalos curtos de tempo, essas estimativas contêm muitas incertezas, devido aos modelos matemáticos utilizados [47].

Os dados de radiação solar podem estar especificados em termos de valores instantâneos do fluxo de potência ou valores de energia por unidade de área (com diversos períodos de integração), conhecidos como irradiância e irradiação, respetivamente [47].

Para caracterizar o potencial de energia solar local (Covilhã), utilizou-se os dados obtidos de satélites. Para a obtenção de dados anuais, utilizou-se a ferramenta online gratuita “Global Solar Atlas” disponível em <http://globalsolaratlas.info/>, criada pelo Banco Mundial e a IFC, Figura 3.1.

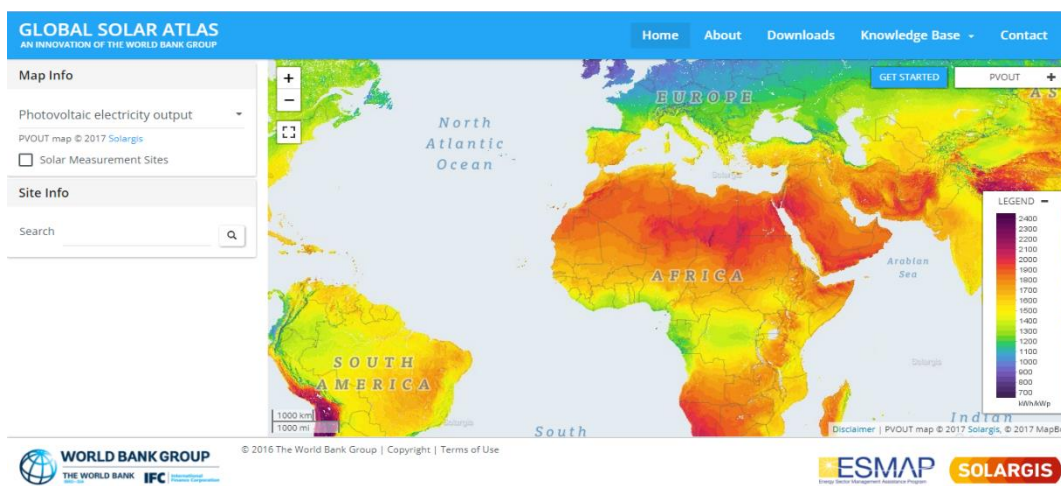


Figura 3.1 - Interface da ferramenta Global Solar Atlas [Global Solar Atlas⁵].

⁵ Disponível em: <http://globalsolaratlas.info/> . Consultado: 17-01-2018

Este Atlas fornece valores de potencial solar e recursos de potência solar a longo prazo, descritos alternativamente como resumos anuais e diários. A temperatura do ar é representada como uma média anual de longo prazo [50]. As variáveis de saída são:

- **GHI (Irradiação Horizontal Global):** Soma dos componentes diretos e difusos da radiação solar [kWh/m²]. É considerado como uma referência climática, pois permite comparar sites ou regiões individuais.
- **DNI (Irradiação Normal Direta):** Componente de radiação solar que atinge diretamente a superfície [kWh/m²]. É relevante para a concentração de instalações de energia solar térmica (CSP) e tecnologias de concentração fotovoltaica (CPV).
- **DIF (Irradiação Horizontal Difusa):** componente de radiação solar que é espalhado pela atmosfera [kWh/m²].
- **GTI (Irradiação Global Inclinada):** Soma de radiação solar direta e difusa incidindo sobre uma superfície inclinada de módulos fotovoltaicos fixos montados [kWh/m²]. Comparado com a superfície horizontal, a superfície inclinada também recebe uma pequena quantidade de radiação solar refletida pelo solo.
- **PVOUT (Saída de eletricidade PV):** Quantidade de energia, convertida por um sistema fotovoltaico em eletricidade [kWh / kWp], que se espera que seja gerado de acordo com as condições geográficas de um determinado local e com uma determinada configuração do sistema fotovoltaico.
- **OPTA (Ângulo Ótimo):** Inclinação ideal [°] dos módulos fotovoltaicos inclinados e fixos para um azimute específico (orientação), para os quais os módulos fotovoltaicos recebem a maior quantidade de radiação solar por ano. Como valores azimutais padrão para o Equador, isto é, Sul (180 °) para o hemisfério Norte e Norte (0 °) para o hemisfério sul.
- **TEMP (Temperatura do ar a 2 metros acima do solo):** A temperatura do ar [°C ou °F] determina a temperatura das células e módulos fotovoltaicos e tem um impacto direto sobre a eficiência da conversão de energia fotovoltaica e as perdas de energia resultantes. A temperatura do ar, e também alguns outros parâmetros meteorológicos, são uma parte importante de cada avaliação do projeto de energia solar, pois determinam as condições de operação e eficiência operacional da instalação de produção de energia solar.
- **ELE (Elevação):** Representa a elevação do terreno (altitude) em relação ao nível do mar [m ou ft]. Somente são mostrados dados para a área da terra. As áreas de condições orográficas mais complexas (terreno) geralmente são menos povoadas e na maioria das vezes não são adequadas para a implementação de sistemas de produção de energia solar em larga escala.

A Tabela 3.1 apresenta os dados de irradiação solar anual na Covilhã obtidos da ferramenta Global Solar Atlas.

Tabela 3.1 - Dados de irradiação solar anual na Covilhã [51].

VARIÁVEIS MEDIDAS	RESULTADOS POR ANO	RESULTADOS POR DIA
Energia PV de Saída (PVOUT)	1571 kWh/kWp	4,345 kWh/kWp
Irradiação Horizontal Global (GHI)	1685 kWh/m ²	4,66 kWh/m ²
Irradiação Normal Direta (DNI)	1949 kWh/m ²	5,438 kWh/m ²
Irradiação Horizontal Difusa (DIF)	520 kWh/m ²	1,447 kWh/m ²
Irradiação Global Inclinada (GTI)	1951 kWh/m ²	5,411 kWh/m ²
Ângulo Ótimo (OPTA)	33 ° / 180 °	33 ° / 180 °
Temperatura do ar (TEMP)	12.4 °C	12.4 °C
Elevação (ELE)	722 m	722 m

Obs.: as siglas derivam das palavras em inglês.

Para se ter uma visão geral dos dados climatéricos mensais no local, recorreu-se à base de dados do satélite “Meteosat” de segunda geração, disponível na ferramenta online “Arquivo HELIOCLIM-3”, pelo facto da ferramenta Global Solar Atlas não fornecer dados mensais.

A Tabela 3.2 apresenta os dados mensais obtidos da ferramenta Arquivo Helioclim-3 durante o ano de 2005 na localidade da Covilhã.

Tabela 3.2 - Dados mensais de irradiação solar na Covilhã [52].

Meses	Irradiação Horizontal Global [Wh/m ²]	Irradiação solar a céu aberto [Wh/m ²]
Janeiro	79337	94696
Fevereiro	102074	120533
Março	136200	178016
Abril	176698	220190
Maio	209715	259214
Junho	230358	257601
Julho	238710	262187
Agosto	213129	230964
Setembro	169008	187521
Outubro	95921	141584
Novembro	69969	97383
Dezembro	63878	82562
Anual	1784997	2132451

Para comparação dos dados mensais, utilizou-se o programa METEORNORM 7.2, que é um software desenvolvido pela METEOTEST (Suíça), que possui uma base de dados climatológicos para vários locais no mundo e de uso em aplicações para aproveitamento energético. O

programa também oferece facilidades de cálculo da radiação incidente sobre planos inclinados e também incorpora um mecanismo de sintetização de séries de dados.

A Tabela 3.3 ilustra os dados mensais de radiação solar na Covilhã obtidas através do software METEORNORM 7.2, com a incerteza de valor anual de $G_h = 4\%$.

Tabela 3.3 - Dados mensais de radiação solar na Covilhã obtidos através do software METEORNORM 7.2.

Mês	G_h (kWh/m ²)	D_h (kWh/m ²)
Janeiro	71	25
Fevereiro	81	33
Março	140	43
Abril	168	61
Maio	211	70
Junho	223	66
Julho	253	49
Agosto	224	45
Setembro	160	43
Outubro	107	40
Novembro	76	28
Dezembro	63	23
Anual	1773	526

G_h : Irradiação Horizontal Global;

D_h : Irradiação Horizontal Difusa.

Nas Figura 3.2 e Figura 3.3 apresentam-se os resultados obtidos pelo software METEORNORM 7.2, ilustrando a radiação solar mensal, bem como as horas de sol por mês.

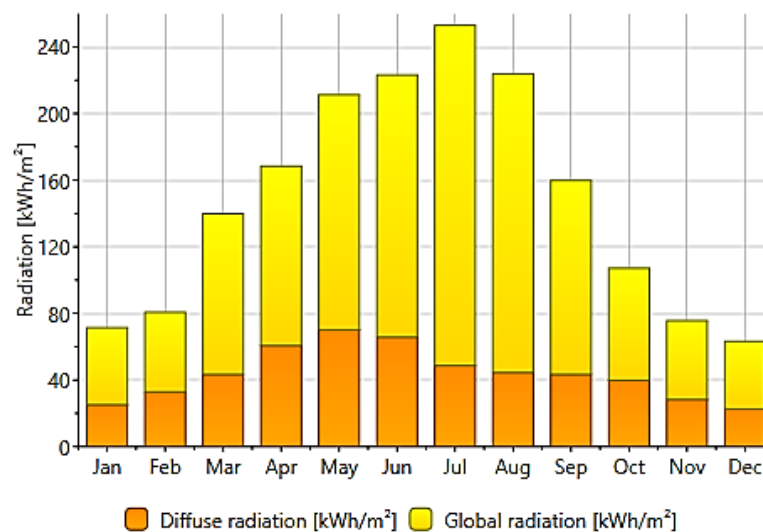


Figura 3.2 - Valores de radiação solar mensal [METEORNORM].

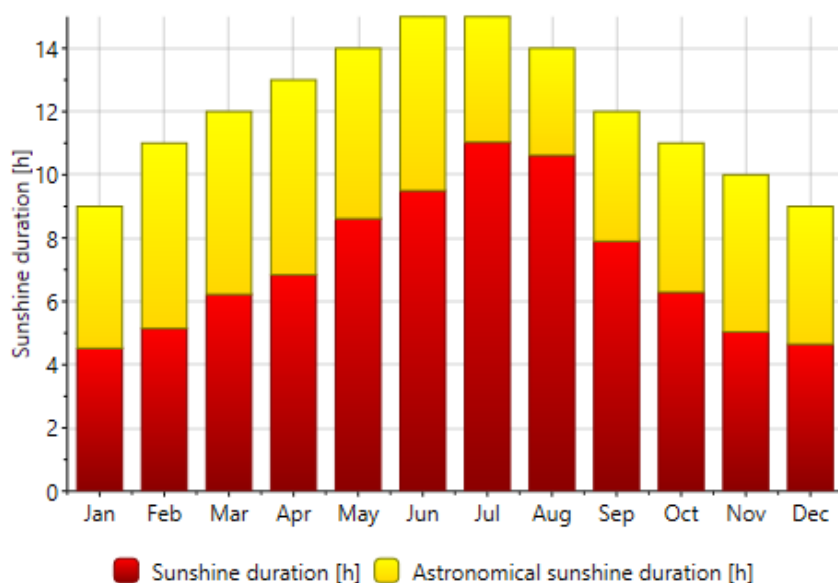


Figura 3.3 - Duração do brilho do sol (valores médios mensais) [METEORNORM].

Ainda, para obter mais valores comparativos de irradiância solar local, recorreu-se ao aplicativo web PVGIS online, desenvolvido há mais de 10 anos no Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia, em Ispra, Itália. Os valores médios mensais obtidos são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados mensais de irradiação solar na Covilhã obtido do aplicativo web PVGIS [53].

Mês	H_h (Wh/m ² /dia)	H_{opt} (Wh/m ² /dia)	H (90°) (Wh/m ² /dia)
Janeiro	1610	2270	2120
Fevereiro	2880	4080	3680
Março	4500	5550	4120
Abril	5440	5950	3360
Maio	6570	6540	2810
Junho	7730	7340	2520
Julho	8050	7820	2760
Agosto	7030	7480	3590
Setembro	5260	6380	4300
Outubro	3360	4530	3810
Novembro	2010	2900	2730
Dezembro	1190	1600	1440
Anual	4640	5210	3100

H_h : Irradiação no plano horizontal (Wh/m²/dia);

H_{opt} : Irradiação em plano inclinado otimamente (Wh/m²/dia);

H (90°): Irradiação no plano no ângulo 90° (Wh/m²/dia).

3.2.1. Comparação entre dados de irradiação solar de diversas fontes

Os dados de radiação solar disponíveis para a Covilhã, nas diversas fontes citadas, podem apresentar diferenças apreciáveis. A título de exemplo, a Figura 3.4 apresenta as médias mensais de radiação horizontal global do local com diferentes fontes de pesquisa e informação.

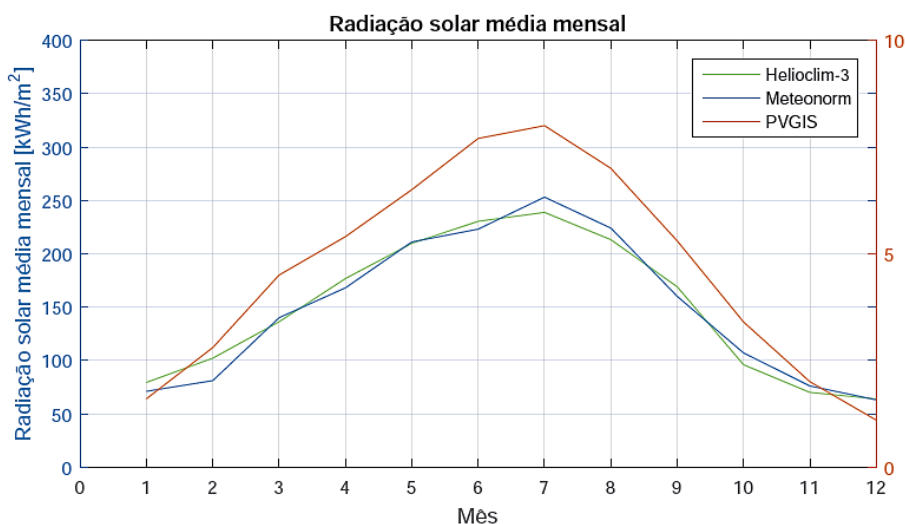


Figura 3.4 - Comparação de médias mensais da radiação solar na Covilhã.

Pela Figura 3.4, podemos observar que nos meses de Maio a Agosto haverá maior radiação solar na região, sendo que Julho é o mês com mais radiação solar, garantindo assim um potencial solar elevado durante o ano.

Antes de prosseguir, é necessário fazer uma separação entre sistemas fotovoltaicos isolados da rede (SFI) e sistemas fotovoltaicos ligados à rede (SFCR). No primeiro caso, o sistema gerador visa atender a um determinado consumo de energia elétrica, e é fundamental estimar esta demanda energética com precisão para que o sistema projetado produza a energia necessária. Já no segundo caso, o consumo de energia elétrica é menos importante, pois pode ser complementado com energia extraída da rede de distribuição [46]. Apesar do projeto do sistema de carregamento das bicicletas elétricas ser destinado a funcionar como um sistema fotovoltaico ligado à rede, far-se-á a análise como um sistema isolado para melhor caracterização do fornecimento de energia disponível.

Contudo, é importante salientar que, o dimensionamento de sistemas isolados (autónomos), sem recurso a Software que integre um grande número de variáveis, torna-se mais ou menos impreciso, e só pode ser calculado com alguma margem de aproximação.

3.3. Balanço energético

3.3.1. Levantamento da demanda de energia elétrica

A base do dimensionamento no caso de SFI é entender que o sistema deve gerar mais eletricidade do que o limite estabelecido para o consumo. A maneira mais tradicional para determinar a demanda de uma unidade consumidora é somar as energias consumidas por cada equipamento. A Tabela 3.5 apresenta o caso prático de cálculo do projeto em estudo, em que se considera a utilização de 4 bicicletas elétricas de 500 W simultaneamente ligadas no posto de carregamento.

O consumo diário de um equipamento é dado pela equação (3.1) [54]:

$$C_d = \frac{Qtd \times HU \times P \times DUS}{7} \quad (3.1)$$

Onde:

C_d (Wh/d) - consumo diário;

Qtd - quantidade de unidades a consumir;

HU (h) - horas de uso;

P (W) - potência;

DUS - dias de utilização por semana.

Tabela 3.5 - Cálculo de consumo diário de energia.

Equipamentos	Quantidade	Potência [W]	Consumo diário [Wh/d]
Bicicleta Elétrica	4	500	2000

É importante salientar que no cálculo do consumo diário para este tipo de carga, as horas de uso não são consideradas, uma vez que completado o estado de carga o consumo de energia termina.

3.3.2. Capacidade de energia do sistema fotovoltaico (SF)

A capacidade de produção do SF tem de alimentar as cargas, bem como as perdas inerentes ao sistema. Entre estas temos as perdas na cablagem, no inversor e na bateria [54].

Consideremos os seguintes valores das perdas:

- Perdas nas cablagens: $P_{cabo} = 2 \%$
- Perdas de conversão: $P_{conv} = 10 \%$
- Perdas da bateria: $P_{bat} = 2 \%$

Assim sendo, os fatores das perdas do sistema serão:

- Fator de perdas das cablagens: $K_{cabo} = 1 - P_{cabo} = 1 - 0,02 = 0,98$
- Fator de perdas da conversão: $K_{conv} = \eta_{conv} = 0,90$
- Fator de perdas da bateria: $K_{bat} = \eta_{bat} = 0,98$

Logo, o primeiro fator de correção, K_1 . E é dado pela equação (3.2) [54]:

$$K_1 = K_{cabo} \times K_{conv} \times K_{bat} = 0,98 \times 0,90 \times 0,98 = 0,86 \quad (3.2)$$

Além deste fator, existem outros fatores a interferir no cálculo do sistema. Como sabemos, a radiação é muito variável ao longo do ano. Assim sendo, determina-se um novo fator, K_2 , relativo ao número de horas equivalentes à radiação padrão de 1000 W/m^2 para integrar no cálculo. Como já foi ilustrado anteriormente o potencial solar da localidade, obtidos por várias fontes de informação, neste cálculo considerar-se-á os dados do site da UE (Tabela 3.4).

O novo fator de correção relativo ao número de horas equivalentes à radiação padrão (1000 W/m^2), é dado pela equação (3.3):

$$K_2 = \frac{H_{opt} [kWh/m^2]}{1 [kW/m^2]} \quad (3.3)$$

Para a seleção da radiação no local com ângulo azimutal ótimo (Hopt), recorreu-se ao método do mês crítico, que consiste na realização do dimensionamento do SFI considerando um balanço de energia durante o período do ano no qual ocorrem as condições médias mais desfavoráveis para o sistema. Supõe-se que se o sistema funcionar adequadamente nesse mês, isso ocorrerá também nos demais meses do ano; assim sendo, o sistema produzirá mais energia nos outros meses, onde as condições forem mais favoráveis. Este método, tal como outros métodos simplificados, tem a desvantagem de não otimizar energeticamente a instalação, já que não faz um seguimento contínuo dos parâmetros envolvidos [47].

Observando a Tabela 3.4, é fácil notar que Dezembro é o mês mais desfavorável, tendo uma radiação média de 1600 Wh/m^2 por dia.

Substituindo os dados na equação (3.3), temos:

$$K_2 = \frac{1,6 [kWh/m^2] / dia}{1 [kW/m^2]} = 1,6 \text{ h/dia}$$

E finalmente a potência nominal instalada do sistema fotovoltaico, é dada por [49], [54]:

$$P_{PV} = \frac{C_d}{K_1 \times K_2} \quad (3.4)$$

Substituindo os resultados obtidos da equação (3.1), (3.2) e (3.3), obtemos o seguinte resultado:

$$P_{PV} = \frac{2000}{0,86 \times 1,6} = 1453,48 \text{ Wp}$$

Em função do potencial disponível local, e tendo em conta a demanda de energia durante o carregamento simultâneo de 4 bicicletas elétricas com características técnicas idênticas, é necessário que o sistema fotovoltaico tenha uma potência instalada de $1,453 \text{ kWp}$.

3.3.3. Energia extraída do painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico pode ser visto como gerador elétrico, cuja a potência máxima depende da temperatura da célula e da radiação solar. Como o objetivo de garantir máxima eficiência, para as condições da luz do sol e da temperatura, os painéis fotovoltaicos são associados a um conversor de potência controlado com um algoritmo de rastreamento do ponto máximo de potência (MPPT) [55]. Assim, considerando o painel fotovoltaico com seu conversor de potência, a estimativa da potência máxima elétrica P_{pv} produzida na superfície fotovoltaica S_{pv} é usualmente obtida pelo seguinte modelo matemático [56]:

$$P_{pv}(T_a, G_{tot}) = \eta_{pv}(T_c, G_{tot}) \times S_{pv} \times G_{tot} \quad (3.5)$$

Onde T_a é a temperatura ambiente, T_c é a temperatura da célula, G_{tot} é a radiação solar total recebida pelo painel e η_{pv} é a eficiência do painel fotovoltaico em condições STC.

Para as condições de funcionamento em que a temperatura e a radiação solar incidente são diferentes das condições STC, a eficiência do painel fotovoltaico é obtido através da equação 3.6.

$$\eta_{pv} = \eta_{STC}[1 - 0,005 \times (T - 25^\circ\text{C})] = \eta_{STC} \times K_T \quad (3.6)$$

onde T é a temperatura do módulo, η_{STC} é a eficiência do módulo em condições STC e K_T é o fator de correção de temperatura.

Consideremos que queremos explorar a energia fornecida pelo painel especificado na Tabela 3.6, no mês crítico do ano baseado na Tabela 3.4.

Tabela 3.6 - Parâmetros do painel fotovoltaico TSM-195DC01A.

PARÂMETROS	VALOR
Potência de pico (W)	195
Área do painel (m ²)	1,279
Eficiência do módulo (%)	15,2
Tensão à máxima potência (V)	37,4
Corrente à máxima potência (A)	5,22
Tensão de circuito aberto (V)	45,6
Corrente de curto-circuito (A)	5,56
Temperatura da célula em operação nominal (%)	46 °C (±2 °C)
Temperatura Operacional	-40 °C ~ +85 °C
Coeficiente de Temperatura de P_{MPP} (%/°C)	-0.45
Coeficiente de Temperatura de V_{OC} (%/°C)	-0.35
Coeficiente de Temperatura de I_{SC} (%/°C)	0.05

Uma vez que neste mês a temperatura e a radiação solar incidente são diferentes das condições STC, a equação a utilizar baseia-se na substituição da equação 3.6 na equação 3.5:

$$P_{pv} = \eta_{STC} \times K_T \times S_{pv} \times G_{tot}$$

$$P_{pv} = 0,152 \times 1,09 \times 1,279 \times 1600 = 339 \text{ Wh}$$

Portanto, a energia média diária extraída em 1 (um) painel com as especificações técnicas acima referidas, no mês crítico (Dezembro), é de 339 Wh. Para um sistema com mais módulos, a energia extraída será, o produto da potência extraída em num painel pelo número de painéis. Lembrar que os valores obtidos não foram avaliados tendo em conta todos os parâmetros para o dimensionamento de um projeto completo. Porém, foram adotados modelos matemáticos mais simplificados.

Atualmente, há muitos programas (software) disponíveis para a análise de dados meteorológicos com objetivo de dimensionar sistemas fotovoltaicos, tal como [49], [57], [58]:

- HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável, EUA;
- IHOGA (Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms) desenvolvido pela Universidade de Zaragoza, Espanha;
- TRNSYS (Transient Systems Simulation Program) desenvolvido pela Universidade de Wisconsin, EUA;
- RETScreen desenvolvido pelo Ministério de Recursos Naturais, Canada;
- PV.MY desenvolvido pelo Grupo de Investigação de Sistema de Potência, Universidade Kabangsaan Malásia, Malásia.

3.4. Viabilidade económica do sistema de geração

A tecnologia solar fotovoltaica provou nos últimos anos que, com adequada implementação, pode ser um dos principais contribuintes para atingir o objetivo da UE de 20% de fontes de energia renováveis (FER) até 2020 [59], [60]. As melhorias tecnológicas e as economias de escala estimularam uma redução constante dos custos, que continuará nos próximos anos, tornando assim a indústria fotovoltaica competitiva face à produção de energia com fontes de energia convencionais.

Atualmente, a eletricidade de SF é mais barata do que em tempos passados. Nos próximos anos, a tecnologia tornar-se-á ainda mais rentável e competitiva, qualificando-se, portanto, como parte vital do futuro energético da Europa. Sob a política e as condições de mercado corretas, a competitividade do SF face à energia disponibilizada pela rede pode ser alcançada nalguns mercados, podendo depois propagar-se para outros segmentos de mercado na Europa, até 2020 [60].

3.4.1. Custo de Geração

O custo de geração refere-se ao preço de uma única unidade de eletricidade - normalmente expressa em moeda/kilowatt-hora (moeda/kWh). O custo nivelado de eletricidade (LCOE) é o custo real da eletricidade produzida, a qual permite aos analistas terem a perceção de quanto custaria, ao proprietário das instalações, a produção de uma unidade de energia. O conceito de Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) permite calcular o custo real da eletricidade fotovoltaica e compará-lo com o custo de outras fontes de eletricidade, expresso pela equação (3.6) [60]:

$$LCOE = \frac{CAPEX + VAL \text{ do OPEX total}}{VAL \text{ da PE total}} \quad (3.6)$$

onde:

CAPEX (*Capital Expenditure*): Custo de investimento;

VAL: Valor atual líquido;

OPEX (*Operations and Maintenance costs*): Custos operacionais e de manutenção;

PE: Produção de eletricidade (kWh).

O LCOE representa o custo por kWh e cobre todos os custos de investimento e operação ao longo da vida útil do sistema, incluindo os combustíveis consumidos e a substituição de equipamentos. Usar o LCOE permite comparar uma instalação fotovoltaica com qualquer tipo de central produtora de energia.

Para cada sistema, o cálculo do LCOE leva em consideração:

- A vida útil da instalação
- Custos de investimento (CAPEX)
- Custos operacionais e de manutenção (OPEX)
- O fator de desconto (expresso como custo médio ponderado de capital ou CMPC)
- A localização da instalação, que para o SF é essencial para considerar a diferença na exposição solar.

3.4.2. Comparação de viabilidade com outras fontes de energia

No presente item, apresentam-se as fontes energéticas mais importantes atualmente. Uma análise sucinta e comparativa de cada uma permitirá analisar a viabilidade económica da tecnologia fotovoltaica. Como parâmetro de comparação, usar-se-á o custo nivelado de eletricidade (LCOE), que é uma medida que tenta comparar diferentes métodos de geração de eletricidade a partir de diferentes fontes de energia.

A Tabela 3.7 resume valores de custo de geração nivelado (LCOE) específico de cada uma das tecnologias, especificamente, nuclear, carvão, gás natural, eólica e fotovoltaica, obtido do relatório *LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS*, versão 11, publicado em 2 de novembro de 2017, pelo Banco de Investimentos *Lazard*.

Tabela 3.7 - Comparação de custos de geração [61].

Tecnologia de Geração	Custo de Geração
	Cts/kWh
Nuclear	0,112 - 0,183
Carvão	0,060 - 0,143
Gás	0,068 - 0,210
Eólico onshore	0,030 - 0,060
Fotovoltaico	0,043 - 0,319

Como ilustrado na Tabela 3.7, a tecnologia de geração a gás, apresenta custos de geração elevados do que outras tecnologias convencionais, devidos a um custo elevado do combustível. Devido ao reduzido impacto ambiental, a implementação desta tecnologia tem sido crescente.

A tecnologia eólica, especialmente a eólica onshore, tem vindo a apresentar uma redução nos custos de geração, devido aos elevados investimentos que lhe têm sido dirigidos em Portugal, e no mundo. A evolução tecnológica e o crescimento do mercado permitiram que os custos reduzissem dos 3 a 7 cts/kWh em 2006 para 0,03 a 0,06 cts/kWh em 2017 [61].

A tecnologia de geração fotovoltaica embora apresente custos de geração elevados, é uma aposta para o futuro, com potencial para alcançar níveis de custo competitivos com outras fontes energéticas utilizadas [62]. Assim como na tecnologia eólica, a crescente implementação desta tecnologia, faz com que o custo nivelado de eletricidade (LCOE) decresça ao longo dos anos.

Uma forte concorrente do sistema fotovoltaico é a tecnologia hídrica baseado em barragens de albufeira. Embora não especificado na Tabela 3.7, esta tecnologia apresentou no ano de 2017 uma média do LCOE na Europa de 0,12 USD/kWh [63]. É uma tecnologia concorrente por apresentar em média um custo de geração reduzido (considerando que o custo varia fortemente em função da queda disponível e da potência instalada), bem como ter a capacidade de suprir as demandas na hora de pico.

3.4.3. Potencial de redução de custos

A tecnologia fotovoltaica em comparação às outras formas de produção energética estudadas no item anterior, é muito mais cara. Porém o crescimento de produção desta tecnologia, faz com que o custo marginal decresça ao longo dos anos.

Mediante o estudo estatístico das evoluções tecnológicas, deduz-se que, tecnologias caras e de desenvolvimento recente são as que têm o maior potencial de redução de custos, isto é, tendem a ter uma redução de custos de cerca de 20 % por cada duplicação do volume produzido, a que

corresponde um rácio de progresso de 80 % [62]. Nesta categoria inserem-se as tecnologias solares, que têm apresentado uma redução considerável nos custos de geração, como verificado nos anos de 2008 a 2016, em que os preços dos sistemas fotovoltaicos residenciais caíram mais de 80% na maioria dos mercados competitivos [64], [65].

Na Figura 3.5 é apresentado o histórico do custo dos módulos fotovoltaicos em USD \$/Wp, confirmando a forte descida dos custos que tem se verificado no mercado fotovoltaico, com o desenvolvimento e aplicação da tecnologia em grande escala.

Os preços dos sistemas fotovoltaicos estão mudando rapidamente, não só na Europa, o que abre novas oportunidades para o SF em um número crescente de países, tornando-se um dos principais fornecedores de eletricidade no futuro próximo [64]. É importante salientar que, apesar de existir um mercado global para os componentes de hardware de um sistema fotovoltaico, isto é, módulos, inversores, cabos, etc., e que esses preços são muito similares em todo o mundo, os preços dos sistemas fotovoltaicos instalados ainda variam significativamente [66].

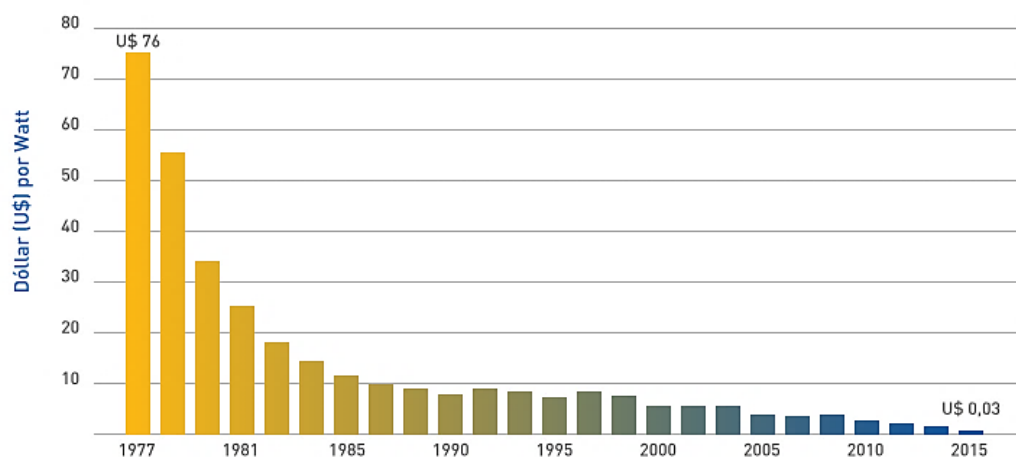


Figura 3.5 - Evolução do custo dos módulos fotovoltaicos no mundo (\$/W) [67].

É interessante notar que quase todas as fontes de energia atuais assentam na geração de eletricidade pelo movimento de turbinas. Uma das exceções é a energia fotovoltaica. Esta singularidade faz com que a I&D seja nestes casos muito mais determinante para o futuro do mercado [62].

Segundo o relatório da EPIA [60], baseado no estudo feito no mercado europeu, especificamente em 5 países (França, Alemanha, Itália, Espanha e Inglaterra), deduz que há uma ampla gama para o custo de geração do SF na Europa, bem como um enorme potencial de redução de custos: cerca de 50 % até 2020.

3.5. Conclusão

Mediante as análises feitas neste capítulo, foi possível verificar que:

- a localidade em estudo (Covilhã) apresenta um potencial de energia solar aceitável, o que justifica a necessidade de exploração desta, para auxiliar no sistema de carregamento das bicicletas elétricas, bem como o sistema energético nacional, de modo a reduzir a necessidade de importação, ou seja, atenuar a dependência energética relativamente aos países produtores de petróleo e gás natural.
- em contraste com as fontes de energia convencionais, as energias renováveis apresentam uma perspectiva de redução de custos, ao invés de aumento. Frente estas análises, uma boa e eficaz escolha na geração de eletricidade, está em apostar em fonte de energias renováveis.
- a produção de eletricidade a partir de sistemas solares fotovoltaicos pode ser mais barato do que os preços ao consumidor residenciais numa ampla gama de países.

Capítulo 4

4. Análise dos Perfis de Carregamento e da Qualidade de Energia Gerada

4.1. Introdução

O aumento no número de veículos elétricos deve ser, obviamente, acompanhado por um desenvolvimento da mobilidade elétrica, ou seja, uma melhoria na infraestrutura para carregamento. Atualmente, devido a crescente implementação dos pontos de carregamento para veículos elétricos, levantam-se questões quanto ao impacto da massificação de utilização dessas tecnologias na rede elétrica.

Para o projeto em estudo, uma vez que ainda não se têm disponíveis as e-bikes para analisar o impacto no ponto de ligação à rede do posto de carregamento, utilizou-se os ensaios feitos pelas duas entidades: UBI e a ENFORCE. Estas mesmas entidades, realizaram ensaios ao comportamento do posto de carregamento rápido de um veículo elétrico, por meio de carregamentos parciais e um carregamento completo no referido posto, de forma a obter uma primeira análise do impacto desta tecnologia na rede de distribuição elétrica.

O objetivo dos ensaios é verificar o impacto no ponto de ligação à rede do posto de carregamento de veículos elétricos (incluindo bicicletas elétricas), através da análise de grandezas elétricas, como a variação de tensão, corrente, potência ativa e potência reativa, conteúdo harmónico e equilíbrio de fases.

4.2. Instalação Experimental

4.2.1. Veículo Elétrico

O veículo utilizado nos ensaios (da UBI e ENFORCE) foi o *Renault ZOE*. Este veículo apresenta as seguintes características: uma tara em ordem de marcha de 1468 kg, velocidade máxima 135 km/h (por especificação do fabricante, no entanto pode atingir valores mais elevados), um motor com potência de 65 kW, capacidade de carga útil da bateria de 22 kW que confere ao veículo uma autonomia compreendida entre 100 e 150 km.

4.2.2. Posto de Carregamento

Atualmente, ainda não há posto de carregamento de bicicletas elétricas instalado no local. Porém, o protótipo está sendo desenvolvido pela UBI. O mesmo posto estará localizado na FE, da universidade, do qual se poder ter uma ideia mediante a ilustração da Figura 4.1.



Figura 4.1 - Protótipo ilustrativo de estação de carregamento de bicicleta elétrica com recurso a energia solar [68].

A tensão no posto de carregamento (no ponto de ligação) não pode ultrapassar os 230 V (para fornecimento em CA) e a frequência deve ser de 50 Hz \pm 1 %.

O posto de carregamento utilizado nos ensaios a analisar foi o protótipo desenvolvido pela cooperação entre a UBI, com localização na FCS, e a ENFORCE, o qual é possível ver na Figura 4.2. A estação responde às exigências das normas EN NP 61851. A tensão no posto não ultrapassa os 690 V e a frequência é de 50 Hz \pm 1 %. O posto suporta diferenças de temperatura entre os 30 °C negativos e os 50 °C positivos e uma humidade relativa entre os 5 % e os 95 %. A altura da tomada encontra-se a 1 m do chão. No que diz respeito à segurança, o índice de proteção é de IP44, possui regime de neutro TT e ponto de ligação do VE com DR de 30 mA. O posto tem capacidade para operar em Modo 3 de carregamento, no entanto, os testes foram realizados em Modo 2 [69].



Figura 4.2 - Protótipo de Estação de Carregamento Rápido de Veículos Elétricos a Energia Solar [69].

4.2.3. Analisador Fluke

O Fluke 434 Série II, Figura 4.3, é o analisador de energia utilizado nos ensaios realizados. É uma ferramenta útil para o registo energético. Este dispositivo disponibiliza quatro sondas de corrente flexíveis e finas, sendo capaz de medir correntes até 600 A, por fase, e tensões até 1000 V entre a fase e neutro. Indica dados como o valor do fator de potência e valores de energia como a potência ativa e potência reativa. É, ainda, capaz de medir os valores de distorção harmónica e harmónicas individuais até à quinquagésima ordem. Quanto às condições ambientais, o analisador pode operar entre os 0 °C e os 50 °C, com bateria, até 95 % de humidade relativa e até aos 2000 m de altitude. O software de análise do aparelho permite visualizar gráficos e efetuar relatórios, no entanto, os dados foram exportados para o computador, afim de realizar outros estudos dos parâmetros, através da saída ótica do dispositivo e interface USB. Este equipamento permite recolher dados de até 600 variáveis e a sua autonomia depende do número destas. É de fácil montagem, devido ao código de cores implantados nos cabos, e de fácil utilização, uma vez que o seu software se apresenta muito intuitivo [69], [70].



Figura 4.3 - Analisador de Qualidade de Energia [69].

4.3. Parâmetros de Qualidade de Energia

Classicamente, o objetivo do sistema de energia elétrica é gerar energia elétrica e entregar essa energia para o equipamento do usuário final com uma tensão aceitável. Os valores associados aos parâmetros que caracterizam um sinal de tensão ou corrente numa instalação elétrica podem ser alterados em função de variados fatores (arranque de motores, equipamentos constituídos por eletrônica de potência, iluminação por lâmpadas de descargas, etc.), e nesses casos, diz-se que a qualidade de energia do sinal foi afetada. Desta forma, podem ser produzidos vários tipos de perturbações elétricas, podendo referir-se os quatro tipos de problemas mais significativos: harmônicas, assimetria ou desequilíbrio de tensão, queda de tensão e flutuação de tensão [71].

4.3.1. Harmônicas

As correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares ligadas à rede, ou seja, quando a relação da tensão de carga e da corrente é não linear, o circuito produzirá harmônicas [72]. A circulação das correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e conseqüentemente uma deformação da tensão de alimentação.

Observando a Figura 4.4, verifica-se que o sinal deformado não é mais que a soma, ponto a ponto, do sinal fundamental com o sinal de amplitude e frequência diferente - harmônica, que neste caso é de 5ª ordem.

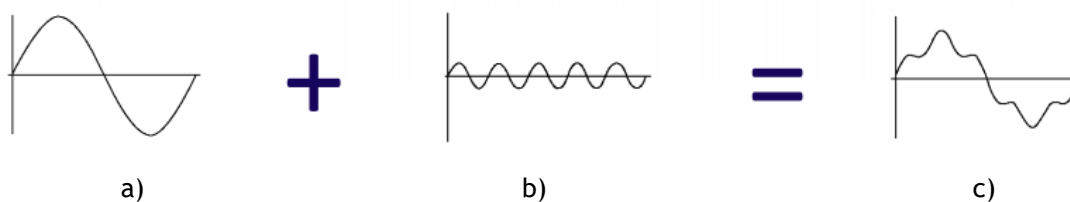


Figura 4.4 - Harmônica de tensão. a) Onda Fundamental (50 Hz). b) 5ª Harmônica (300 Hz). c) Onda distorcida [73].

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência, como apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classificação das harmônicas.

Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	...
Frequência (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	...
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0	...

Da análise da Tabela 4.1 constata-se que existem harmônicas de ordens ímpar e par, onde as ímpares são de origem de corrente alternada e as pares de corrente contínua. As harmônicas de ordem ímpar são frequentes nas instalações elétricas em geral e as de ordem par existem nos casos de haver assimetrias do sinal devido à presença da componente contínua. É possível ainda observar que, as harmônicas têm uma sequência podendo esta ser positiva, negativa ou nula (zero). Os efeitos para cada sequência são:

- Sequência positiva: Sobreaquecimentos;
- Sequência negativa: Sobreaquecimentos e menor rendimento;
- Sequência nula: Correntes harmônicas nas fases somam-se no condutor de neutro.

Existem três principais índices utilizados para mensurar as harmônicas de uma forma de onda, usados inclusive por órgãos reguladores e recomendações como critérios para se determinar os índices de qualidade de energia elétrica de determinado ponto da rede, bem como verificar se tais níveis são aceitáveis. Estes indicadores são: o DHT (Distorção Harmônica Total), DTD (Distorção Total da Demanda) e DHI (Distorção Harmônica Individual) [74], [75].

$$DHT_v [\%] = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (4.1)$$

$$DTD_I [\%] = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (4.2)$$

$$DHI_v [\%] = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (4.3)$$

As Tabela 4.2 e Tabela 4.3 apresentam os valores padronizados dos indicadores de distorção harmônica, para um determinado ponto de ligação à rede (PCC).

Tabela 4.2 - Valores de referência para o DHT e DHI estabelecidos pela norma IEEE STD 519-2014 [75].

Tensão no barramento (V) do PCC	Distorção Harmônica Individual (DHI) [%]	Distorção Harmônica Total (DHT) [%]
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Tabela 4.3 - Valores de referência para o DTD estabelecido pela norma IEEE STD 519-2014 [75].

Corrente Máxima de Distorção Harmônica (%) de I_L						
I_{SC}/I_L	Ordem Individual das Harmônicas (Harmônicas Ímpares)					DTD [%]
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

I_{SC} = corrente máxima de curto-circuito no PCC;

I_L = corrente da demanda máxima de carga (componente da frequência fundamental) no PCC sob condições normais de operação de carga.

4.3.2. Desequilíbrio de tensão

Os desequilíbrios nos sistemas trifásicos podem ser na tensão e na corrente, sendo o mais significativo na tensão. O desequilíbrio de tensão ocorre quando existem diferenças significativas entre os valores eficazes das tensões presentes na instalação.

Segundo a literatura, a definição de desequilíbrio de tensão é apresentada como a razão entre o componente de tensão de sequência negativa pelo componente de tensão de sequência positiva [71]. O percentual de fator de desequilíbrio de tensão (% VUF), é dado por:

$$VUF [\%] = \frac{V^-}{V^+} \times 100 \quad (4.4)$$

Para um conjunto de tensões não balanceadas, V_a , V_b e V_c as tensões de sequência positiva e de sequência negativa (V^+ e V^-) são dadas por:

$$V^+ = \frac{V_a + aV_b + a^2V_c}{3} \quad (4.5)$$

$$V^- = \frac{V_a + a^2V_b + aV_c}{3} \quad (4.6)$$

onde $a = -0,5 + j0,866$ e $a^2 = -0,5 - j0,866$.

Com o objetivo de localizar a fonte de assimetria num sistema de energia, o sinal da potência ativa de sequência negativa medido no PCC é um indicador importante. Se o sinal de potência ativa do componente de sequência negativa (para harmónica fundamental) for positivo, ele indica que a fonte dominante de assimetria está localizada no lado do fornecedor, se o sinal é negativo indica que a fonte de assimetria dominante está no final do consumidor [71].

O desequilíbrio das tensões de fase influencia no desequilíbrio das correntes. Por exemplo, um desequilíbrio de 1% das tensões provoca um desequilíbrio das correntes de plena carga na faixa de 7,5 a 8,5 % e de 12,5 a 15 % em vazio [76]. Portanto, a tensão da rede deve ser regularmente monitorizada e um desequilíbrio maior que 1% deve ser corrigido.

4.3.3. Queda de tensão

De acordo com a norma NP EN 50160, uma queda de tensão é definida como uma redução súbita do nível de tensão para um valor entre 90 % e 10 % do valor nominal, seguido de recuperação de tensão após um curto período de tempo. Normalmente, a duração da queda de tensão é de 10 ms a 1 minuto [77], [78].

Uma queda de tensão é caracterizada pela sua profundidade e pela sua duração [79]. Com base na duração, a queda de tensão pode ser separada em três classes largas. Essas classes são instantâneas, momentâneas e temporárias [80].

As quedas de tensão geralmente são causadas por falhas (por exemplo, curtos-circuitos) ou grandes mudanças de carga na rede. As quedas de tensão não estão localizadas apenas no local da falha, elas propagam-se através da rede, afetando os barramentos mais ou menos próximos da localização da falha. Dependendo do tipo de falha, os valores de tensão podem afetar uma, duas ou todas as três fases da rede [79].

Para ilustração da queda de tensão, a Figura 4.5 mostra as formas de onda de tensão num barramento, antes, durante e após uma falha trifásica de curto-circuito na linha adjacente.

Portanto, a norma NP EN 50160⁶ que descreve as características principais, no ponto de entrega ao cliente, da tensão de alimentação numa rede de distribuição pública em BT ou MT, em

⁶ Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~ee86007/pagina_norma_np_en_50160-2001.htm . Consultado: 04-04-2018.

condições de exploração normais, exige que a profundidade máxima de tensão, em baixa tensão, seja de -15% da tensão nominal (U_n) e para alimentação em média tensão, -10% da U_n .

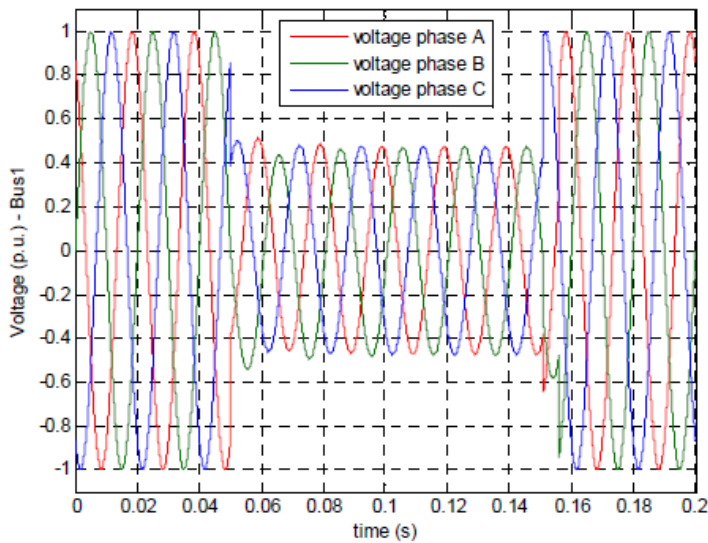


Figura 4.5 - Ilustração de queda de tensão num barramento trifásico [79].

4.3.4. Flutuação de tensão

A flutuação da tensão é uma série de mudanças relativamente rápidas (aleatórias) ou contínuas no valor de uma tensão [81], Figura 4.6. Se as variações são largas o suficiente numa certa faixa de frequência crítica, pode afetar o desempenho do equipamento.

Segundo a literatura [82], a flutuação de tensão causa um fenómeno de cintilação, também conhecida na terminologia internacional (IEC) como *flicker*, que é percebido pelo ser humano como variação das intensidades do fluxo luminoso produzido pela lâmpada. Segundo a literatura [80], o nível de perturbação e sensação visual desagradável dependem do tipo de lâmpada e características (amplitude, frequência e duração) do flicker. A cintilação de tensão pode ser caracterizada com variações cíclicas na amplitude da tensão de $\pm 10\%$ do valor nominal.

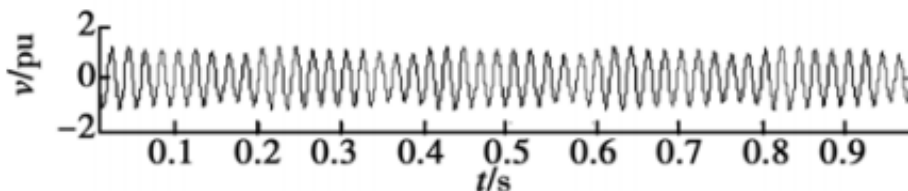


Figura 4.6 - Sinal com flutuação de tensão [83].

4.4. Metodologias de ensaio

O procedimento de realização dos ensaios foi efetuado como indicam os pontos abaixo.

- Carregamento completo da bateria do *Renault ZOE* através do carregamento rápido:
 - De 63 % a 100 %.
- Carregamentos parciais da bateria do *Renault ZOE* através do carregamento rápido:
 - De 11 % a 72 % - o carregamento do veículo foi interrompido aos 72 % da capacidade de carga da sua bateria.
 - De 67 % a 98 % - o carregamento do veículo foi interrompido aos 98 % da capacidade de carga da sua bateria.

O primeiro carregamento do veículo teve início com a bateria a 67% do estado de carga (EC) máximo e terminou, por ação do utilizador quando o EC atingiu os 98 %. O segundo teve início a 11 % do EC e terminou, por ação do veículo quando a sua bateria atingiu os 72 %. No terceiro, e último ensaio, o carregamento da bateria do veículo foi iniciado a 63 % e terminou, por ação do veículo, quando este atingiu a totalidade da capacidade de carga da bateria (100 %), sendo este o carregamento completo.

Durante o decorrer dos ensaios foi monitorizado o perfil de carregamento do próprio veículo. A monitorização, teve como principal função descrever o comportamento do estado de carga em função do tempo. O equipamento Fluke, corretamente colocado no circuito de alimentação da estação, foi ligado instantes antes da inicialização do carregamento e desligado momentos depois. Para a recolha dos dados, foi selecionada uma amostragem ao segundo. Foram obtidas as seguintes grandezas: potência ativa, tensão, corrente, os valores de $\cos(\varphi)$ e conteúdos harmónicos. O posto é alimentado da rede elétrica por três fases a 230 V, fase-neutro.

4.5. Conclusão

A análise dos perfis de carregamento do VE tem como objetivo averiguar o impacto dos VEs na rede de distribuição devido ao elevado número de carregamentos em simultâneo. No entanto, compreendendo o comportamento da energia durante o carregamento de um veículo, pode constituir-se como um primeiro caminho para se compreender o seu impacto a larga escala, por extrapolação. Mediante os conteúdos abordados neste capítulo, com relação à qualidade de energia, será realizada uma análise dos dados recolhidos, por forma a conseguir informação sobre as alterações dos parâmetros de qualidade de energia fornecida pelo posto de carregamento.

Capítulo 5

5. Apresentação e Análise dos Resultados

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos dados recolhidos do equipamento utilizado (Fluke 434 Série II). Este equipamento permite a aquisição de uma enorme quantidade de dados, incluindo os valores de tensão em cada fase, indicando valores máximos, mínimos e médios, os valores de corrente com as mesmas opções, os valores de potências ativa, reativa, fator de potência, os conteúdos harmônicos e a distorção harmônica e, ainda, os valores para os ângulos de defasamento entre a corrente e a tensão em cada fase.

Os dados que serão apresentados no presente capítulo compreendem os diagramas de carga para a potência ativa, potência reativa e conteúdo harmônico, a evolução da tensão e os diagramas de fase para as tensões e correntes. Para os dados recolhidos (tensão, corrente, potência ativa e potência reativa), foram apenas analisados os valores médios de cada grandeza. No caso das harmônicas, foram considerados os valores máximos registados para cada ordem durante o período de carregamento. Para todas as grandezas registaram-se leituras com períodos de amostragem de 1 segundo.

O sistema de carregamento analisado é trifásico e, por isso, obtiveram-se dados para cada uma das fases. Estas, medidas individualmente, são identificadas como:

- L1, que representa a fase 1;
- L2, que representa a fase 2;
- L3, que representa a fase 3.

Para o diagrama de fases, afim de comparar o comportamento do ângulo de defasamento das correntes em relação à tensão, na respetiva fase, foram considerados dois valores para o ângulo φ : considerou-se o valor do ângulo no primeiro patamar da curva de $\cos(\varphi)$, sendo este o valor do ângulo no início do carregamento, e o valor do último patamar, sendo este o valor correspondente à interrupção do carregamento. No caso das correntes, o processo foi idêntico, sendo que o valores de corrente de fase considerados foi o do primeiro e último patamar. O defasamento entre as tensões foi considerado uniforme, ou seja, o ângulo entre L1, L2 e L3 permanece o mesmo, 120° .

Todos os ensaios foram realizados em condições atmosféricas ótimas, numa gama de temperaturas pequena (22 - 29 °C), sem situações de nevoeiro intenso ou chuvas e, por isso, com muito pouca humidade.

5.2. Caso 1 - Carregamento 1

O ensaio teve uma duração de 38 minutos e 49 segundos, durante o qual foram carregados 32 pontos percentuais da bateria do veículo em 34 minutos, com temperatura ambiente exterior de 29 °C. Na Figura 5.1 é apresentada a curva do estado de carga em função do tempo. Durante o intervalo de carregamento foram consumidos 7.04 kWh.

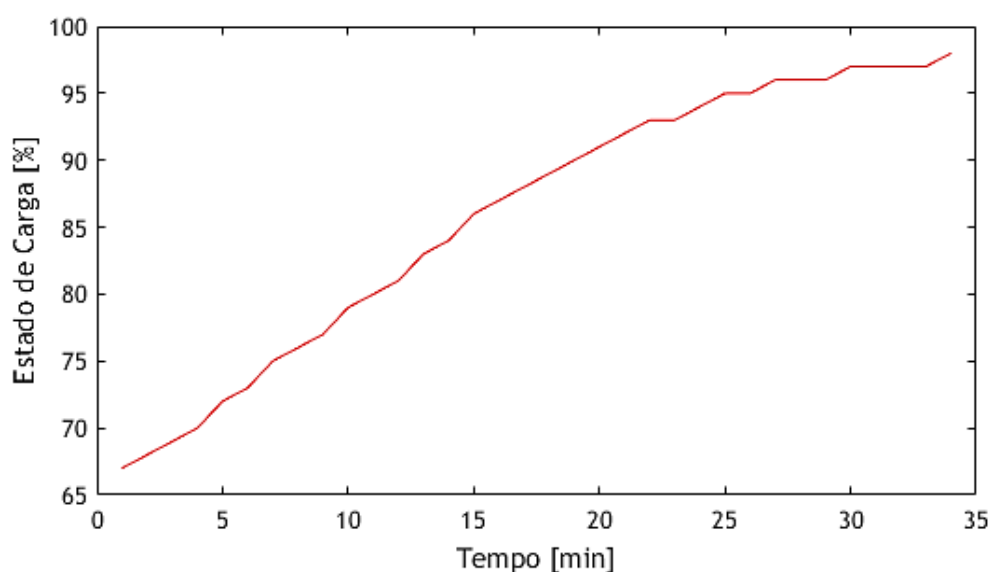


Figura 5.1 - Caso 1: Estado de Carga da Bateria.

5.2.1. Diagrama de Carga

Na Figura 5.2 apresenta-se a evolução da potência ativa fornecida pelo PC. Nela podem ser observadas as potências nas três fases do sistema e a potência total, que resulta da soma das anteriores. O carregamento inicia-se com uma potência total perto da potência máxima, no entanto, o veículo interrompe o carregamento, liga as ventoinhas, e cerca de meio minuto depois, volta a permitir o carregamento, daí o primeiro pico visível no gráfico. Estes episódios podem ocorrer com outros veículos, e devido a esse facto, a estação deve permitir o ressurgimento do carregamento da bateria. Quando o carregamento se estabeleceu, a potência total chegou à potência máxima da capacidade do veículo, 22 kW. A diminuição do seu valor é gradual à medida que o EC da bateria vai aumentando. É de salientar também que, a potência média fornecida a cada uma das fases é aproximadamente igual.

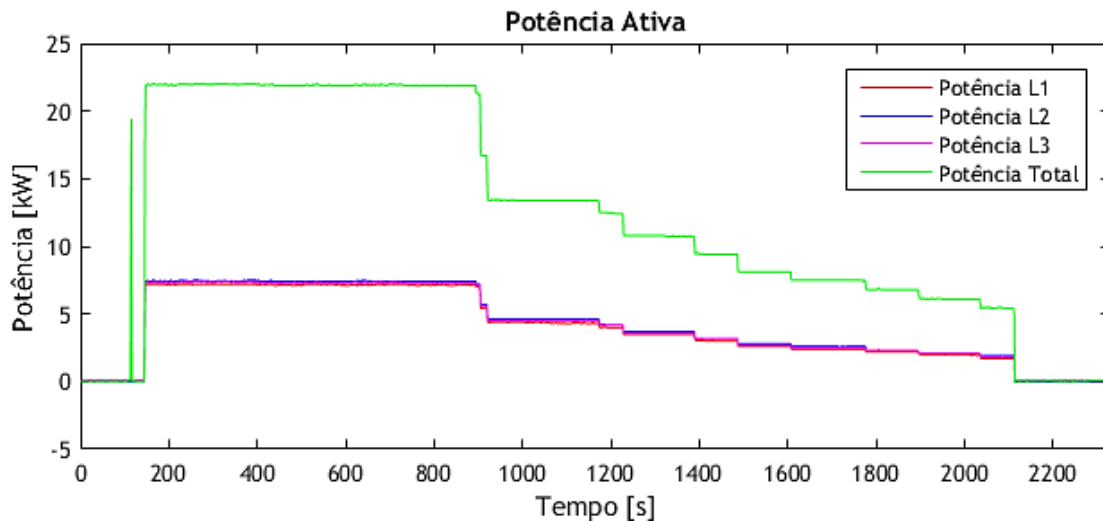


Figura 5.2 - Caso 1: Potência Ativa nas Fases e Potência Ativa Total.

Na Figura 5.3 apresenta-se o comportamento da potência reativa. No início do carregamento verifica-se uma oscilação bastante acentuada, em todas as fases. Este comportamento coincide com o intervalo de tempo em que o veículo iniciou o carregamento e, por sua própria ação o interrompeu. Após ter acionado as ventoinhas, o carregamento foi reestabelecido. É neste ponto que a potência reativa no sistema desce para valores negativos. À medida que o EC aumenta, a potência reativa aumenta com valores negativos. Este facto vai provocar uma diminuição do fator de potência (ver anexo A). Pode verificar-se, pela figura, que o trânsito de potência reativa se faz do posto de carregamento para a rede, e não em sentido contrário.

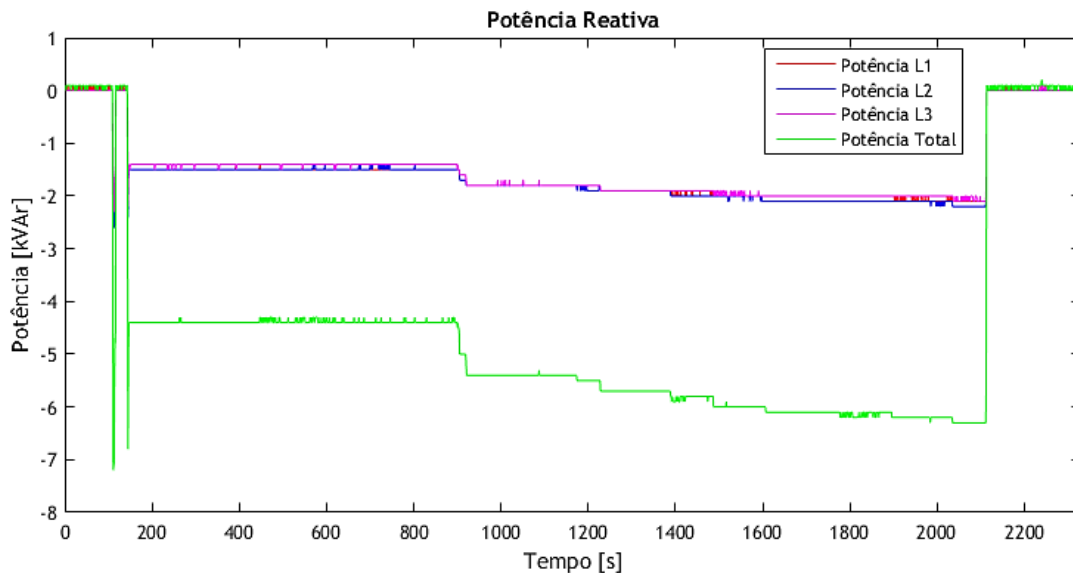


Figura 5.3 - Caso 1: Potência Reativa nas Fases e Potência Reativa Total.

Na Figura 5.4 apresenta-se a evolução da Taxa de Distorção Harmónica (TDH) na tensão ao longo do período de carregamento. Considerando o limite imposto para a distorção harmónica total, sendo de 8 % para níveis de tensão inferior a 1 kV, baseado na norma NP EN 50160 e a

norma IEEE STD 519-2014, verifica-se que, para a situação analisada, a distorção harmónica é substancialmente inferior ao limite, apresentando um valor máximo inferior a 3 %.

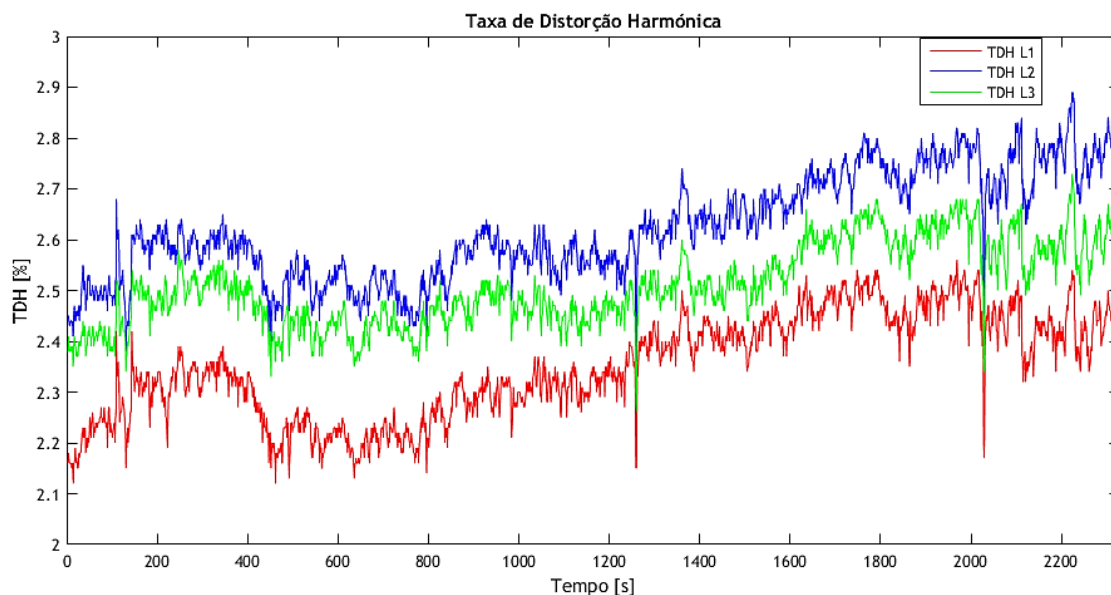


Figura 5.4 - Caso 1: Taxa de Distorção Harmónica em Tensão.

A Figura 5.5 apresenta o valor máximo das harmónicas de tensão no período de tempo do carregamento do veículo. Apenas foram registados valores de harmónicas até à nona ordem, sendo que os valores mais altos pertencem à harmónica de ordem 5. É de salientar que não foram consideradas as harmónicas de ordem par, pelo facto de não se utilizarem corrente nem tensões contínuas no posto.

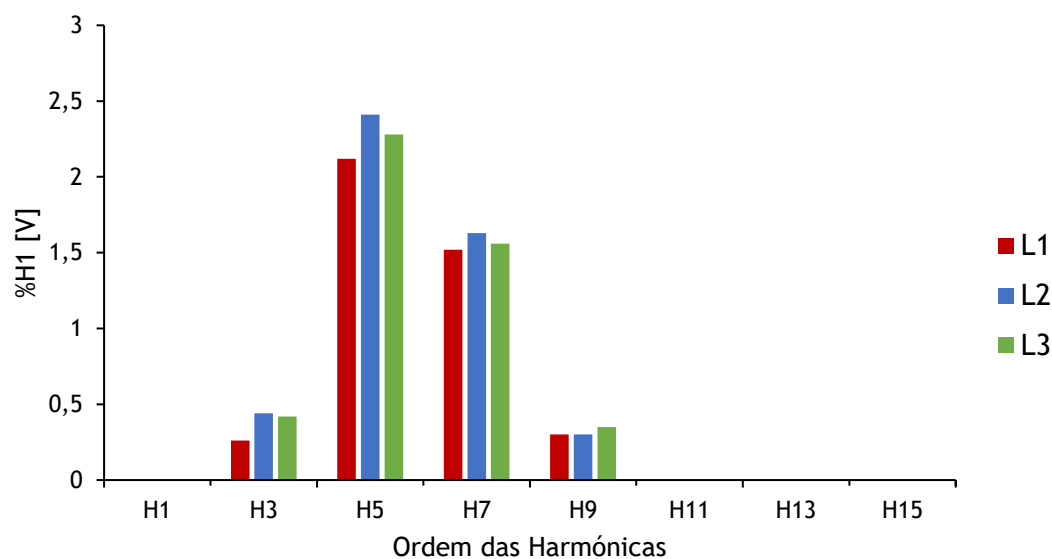


Figura 5.5 - Caso 1: Harmónicas de Tensão.

Na Figura 5.6 apresenta-se a evolução da Taxa de Distorção Harmónica na corrente (TDHi) ao longo do período de carregamento. Segundo a literatura [84], um valor da TDHi superior a 50%, revela uma poluição harmônica considerável. Considerando este limite, é possível observar que no início (L2 e L3) e no fim (L1, L2, L3) do carregamento, o limite é ultrapassado. Porém, durante a maior parte do tempo de carregamento, os níveis não são ultrapassados, confirmando assim a estabilidade do sistema. Este comportamento (no início e no fim), deve-se a conexão e desconexão da carga.

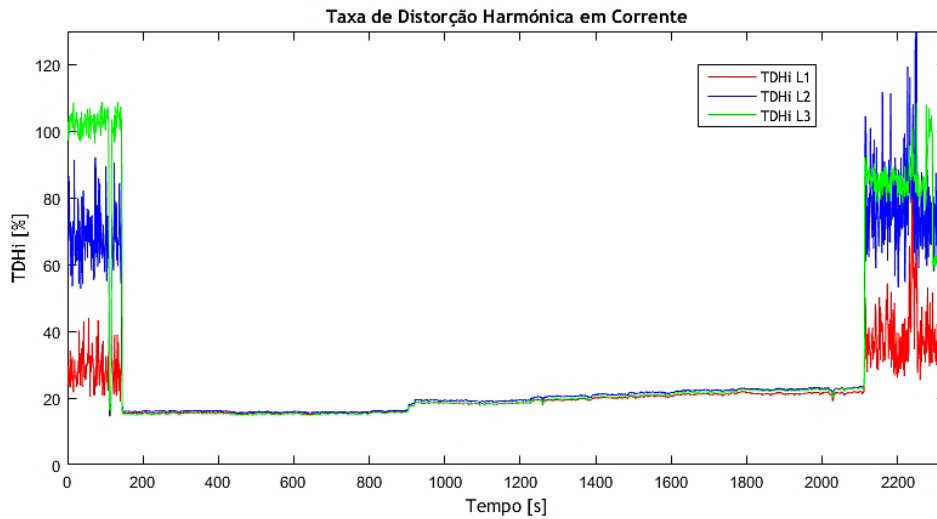


Figura 5.6 - Caso 1: Taxa de Distorção Harmónica em Corrente.

A Figura 5.7 apresenta o valor máximo das harmónicas de corrente no período de tempo do carregamento do veículo. Apenas foram registados valores de harmónicas até à nona ordem, sendo que os valores mais altos pertencem à harmónica de ordem 3. É de salientar que não foram consideradas as harmónicas de ordem par, pelo mesmo facto apresentando anteriormente.

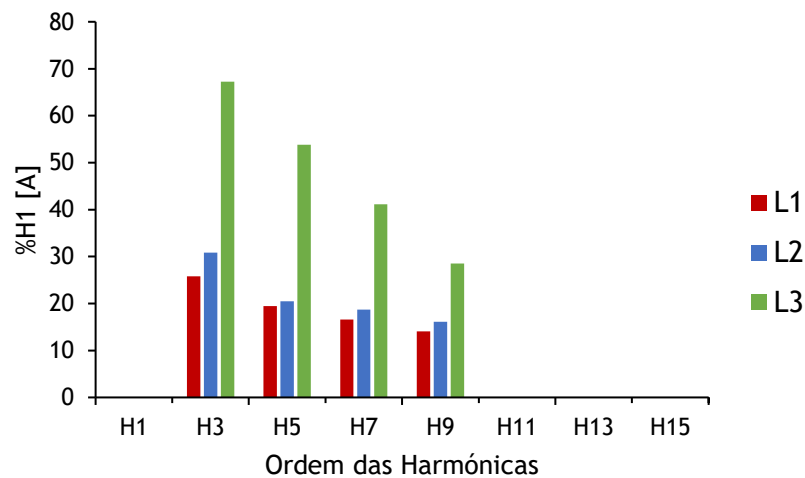


Figura 5.7 - Caso 1: Harmónicas de Corrente.

5.2.2. Evolução da Tensão

A Figura 5.8 apresenta o comportamento do valor eficaz da tensão do posto de carregamento rápido, em cada uma das fases. Com o início do carregamento verifica-se uma diminuição do seu valor, que vai atenuando à medida que a potência fornecida ao veículo vai diminuindo. Segundo a norma NP EN 50160, o valor médio da tensão num período de 10 minutos deve estar compreendido numa gama de valores entre 195.5 e 253 V, relativos à Tensão Nominal (U_n), ou seja, entre $U_n - 15\%$ e $U_n + 10\%$. Como se pode observar na figura, os valores de tensão estão sempre compreendidos entre os valores normativos. Finalmente, não se verifica uma flutuação de tensão considerável, como se pode constatar pelo indicador de severidade de curta duração (Pst) no Anexo A.

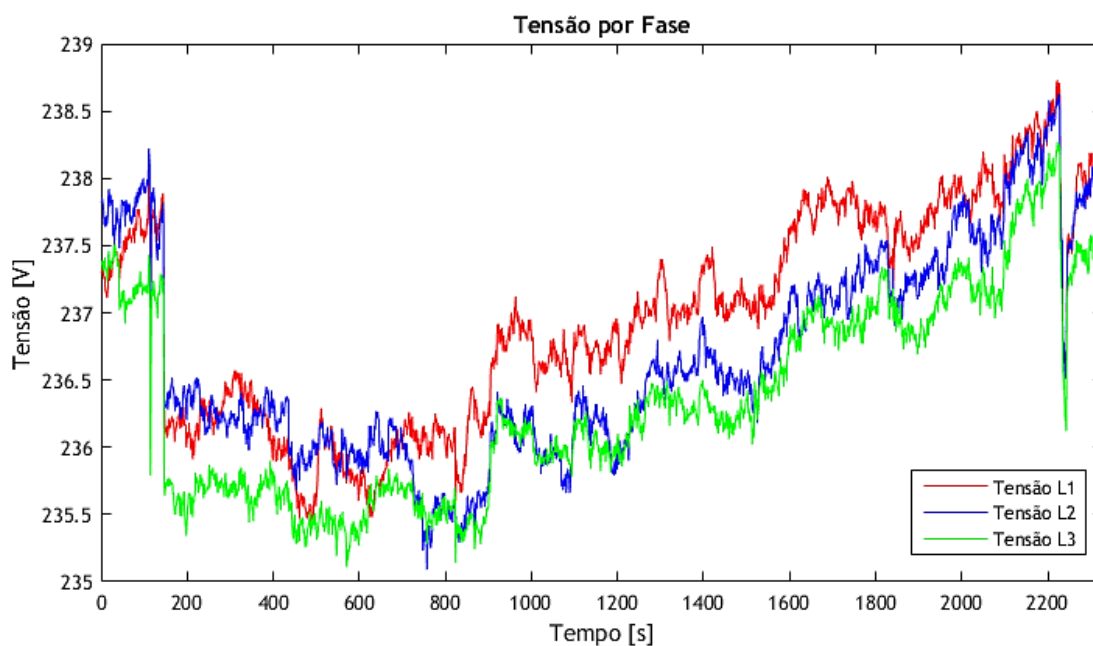


Figura 5.8 - Caso 1: Tensão nas Fases.

5.2.3. Equilíbrio do Sistema

A Figura 5.9 ilustra o diagrama das tensões de fase com as respetivas correntes desfasadas de um ângulo φ para cada uma delas. Como se pode verificar, durante o carregamento o desfasamento da corrente em relação à respetiva tensão de fase sofre uma ligeira alteração, uma vez que o valor do ângulo aumenta devido o aumento da potência reativa. Na figura, as cores mais claras representam as tensões, as tonalidades intermédias representam o desfasamento das correntes em relação à tensão, nas respetivas fases, e as mais escuras apresentam este cenário no final do carregamento. O valor das correntes do início foi multiplicado por um fator igual a 5 e o das correntes no final foi multiplicado por um fator igual a 10, por questões de escala de visualização.

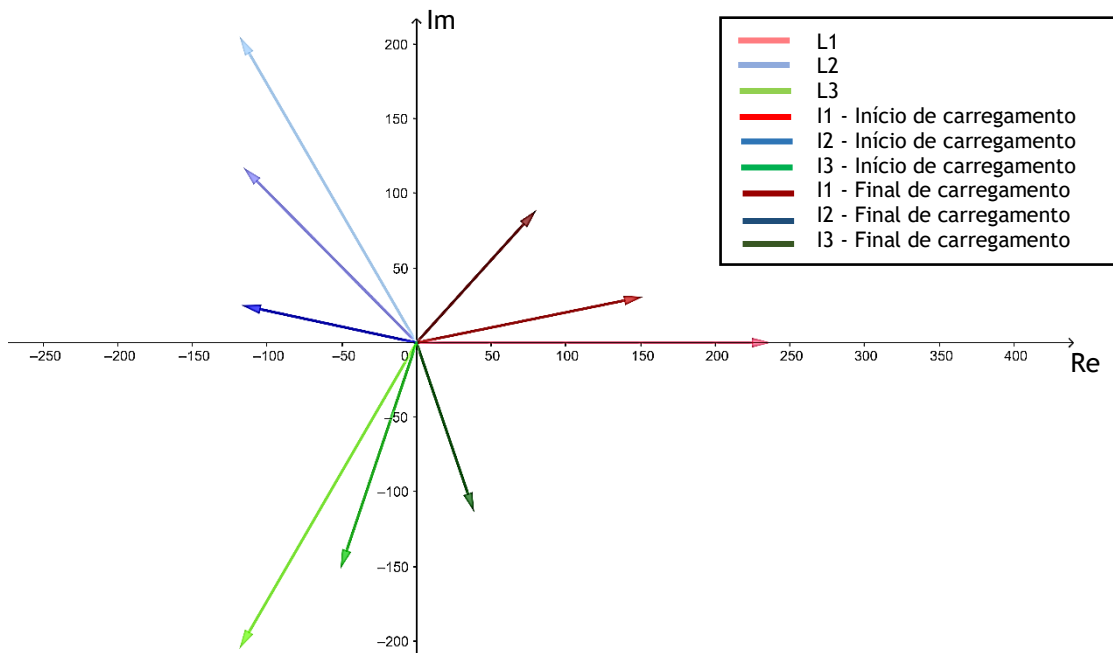


Figura 5.9 - Caso 1: Diagrama Vetorial.

5.3. Caso 2 - Carregamento 2

O carregamento 2 teve uma duração aproximada de 43 minutos, durante o qual foram carregados 62 pontos percentuais da bateria, com temperatura ambiente exterior de 22 °C. A curva do EC em função do tempo é apresentada na Figura 5.10. Durante o intervalo de carregamento foram consumidos cerca de 13.6 kWh.

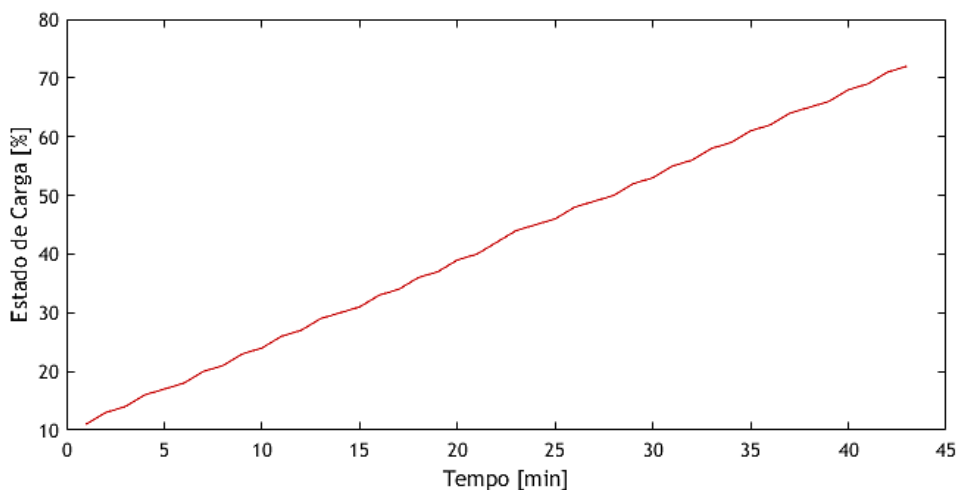


Figura 5.10 - Caso 2: Estado de Carga da Bateria.

5.3.1. Diagrama de Carga

Na Figura 5.11 é apresentada a evolução da potência ativa fornecida pelo PC. Nela podem ser observadas as potências nas três fases do sistema e a potência total, que resulta da soma das potências em cada fase. O carregamento inicia-se com uma potência total junto da potência máxima, 22 kW. Não se verifica diminuição do seu valor à medida que o EC da bateria vai aumentando, pois assim que este atingiu 72 %, o carregamento foi interrompido, por ação do próprio veículo. Este comportamento verifica-se também na corrente e no valor de $\cos(\varphi)$, que podem ser consultados no Anexo B. O veículo interrompeu o carregamento mesmo antes da possibilidade de observar alguma alteração dos valores de potência.

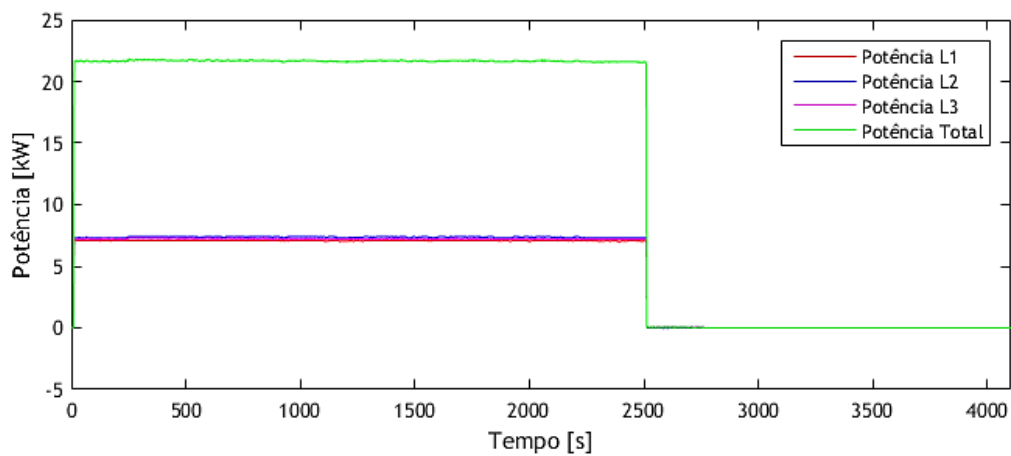


Figura 5.11 - Caso 2: Potência Ativa nas Fases e Potência Ativa Total.

A Figura 5.12 apresenta o comportamento da potência reativa. Durante todo o carregamento, verifica-se que o valor da potência reativa permanece, aproximadamente, constante.

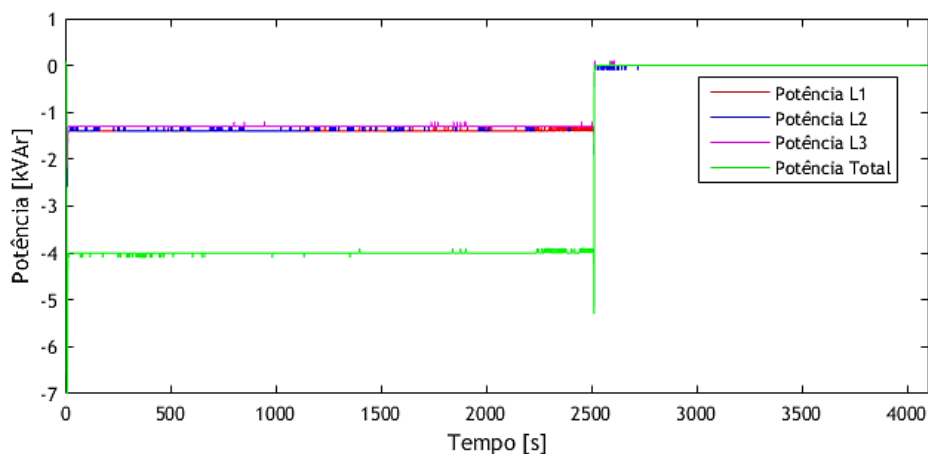


Figura 5.12 - Caso 2: Potência Reativa nas Fases e Potência Reativa Total.

À medida que o EC aumenta, a potência reativa mantém-se, sensivelmente, constante e segue o mesmo comportamento da potência ativa. Este facto vai fazer com que o fator de potência se mantenha igualmente constante (ver anexo B). Pode verificar-se, pela figura, que todas as fases que alimentam o posto de carregamento se encontram a fornecer energia reativa à rede e que não existe potência reativa a ser fornecida ao posto.

Na Figura 5.13 apresenta-se a evolução da Taxa de Distorção Harmónica (TDH) ao longo do período de carregamento. Considerando o limite imposto para a distorção harmónica total, sendo de 8 % para níveis de tensão inferior a 1 kV, baseado na norma NP EN 50160 e a norma IEEE STD 519-2014, verifica-se que, para a situação analisada, a distorção harmónica é substancialmente inferior ao limite, apresentando um valor máximo inferior a 2.2 %.

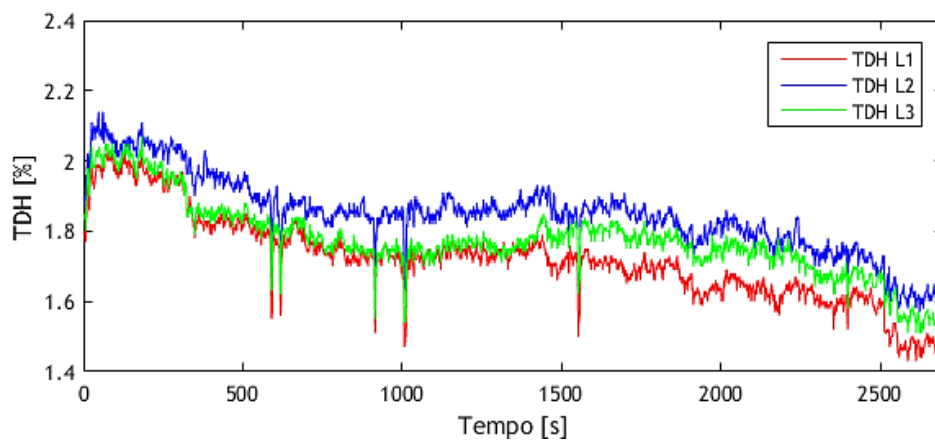


Figura 5.13 - Caso 2: Taxa de Distorção Harmónica em Tensão.

A Figura 5.14 apresenta o valor máximo das harmónicas de tensão no período de tempo do carregamento do veículo. Apenas foram registados valores de harmónicas até à nona ordem, sendo que os valores mais altos pertencem à harmónica de ordem 9, com exceção da L3 que tem o seu valor mais alto de harmónica na ordem 7.

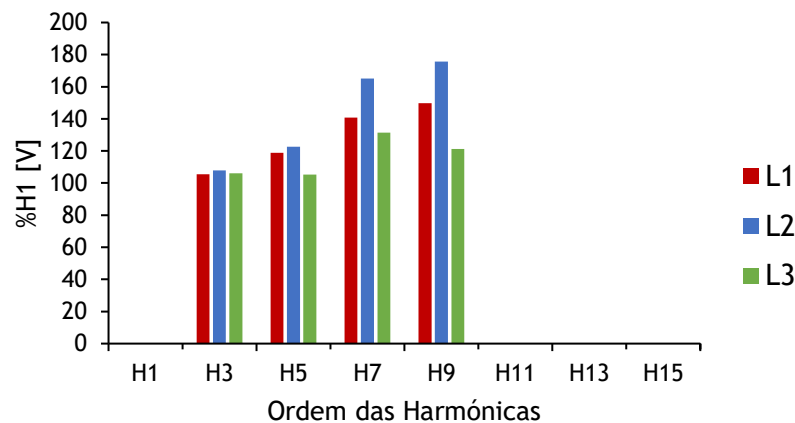


Figura 5.14 - Caso 2: Harmónicas de Tensão.

Na Figura 5.15 apresenta-se a evolução da Taxa de Distorção Harmónica na corrente (TDHi) ao longo do período de carregamento. Nota-se que no início do carregamento, a TDHi atinge valores elevados em curto espaço de tempo, seguido de um estágio em que se mantém estável em torno de 12 % até que o estado de carga é interrompido.

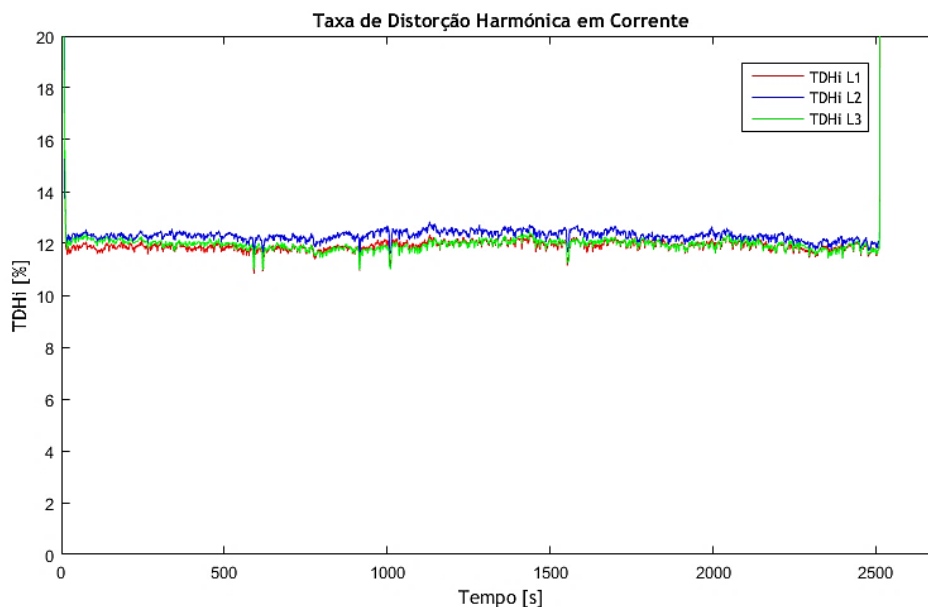


Figura 5.15 - Caso 2: Taxa de Distorção Harmónica em Corrente.

A Figura 5.16 apresenta o valor máximo das harmónicas de corrente no período de tempo do carregamento do veículo. Apenas foram registados valores de harmónicas até à nona ordem, sendo que os valores mais altos pertencem à harmónica de ordem 3.

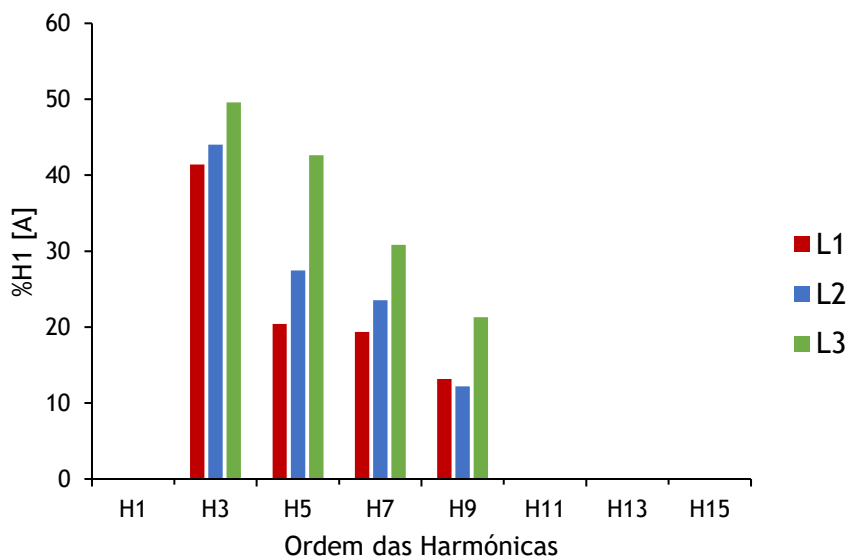


Figura 5.16 - Caso 2: Harmónicas de Corrente.

5.3.2. Evolução da Tensão

A Figura 5.17 apresenta a evolução do valor eficaz da tensão do posto de carregamento rápido, em cada uma das fases. Com o início do carregamento verifica-se uma diminuição do seu valor, que vai atenuando à medida que o EC vai aumentando. A partir da segunda subida nos valores de tensão, esta permanece, relativamente, constante, não se verificando o aumento gradual que acontecera no carregamento 1. É possível ainda observar a interrupção do carregamento, quando este atinge os 72 % de carga, fazendo o valor da tensão em cada fase ir a zero. Segundo a norma NP EN 50160, o valor médio da tensão num período de 10 minutos, deve estar compreendido numa gama de valores entre 195.5 e 253 V. Como se pode constatar ainda na mesma figura, os valores de tensão estão sempre localizados entre os valores normativos. Portanto, não se verifica uma flutuação de tensão considerável, como se pode constatar pelo indicador de severidade de curta duração (Pst) no Anexo B.

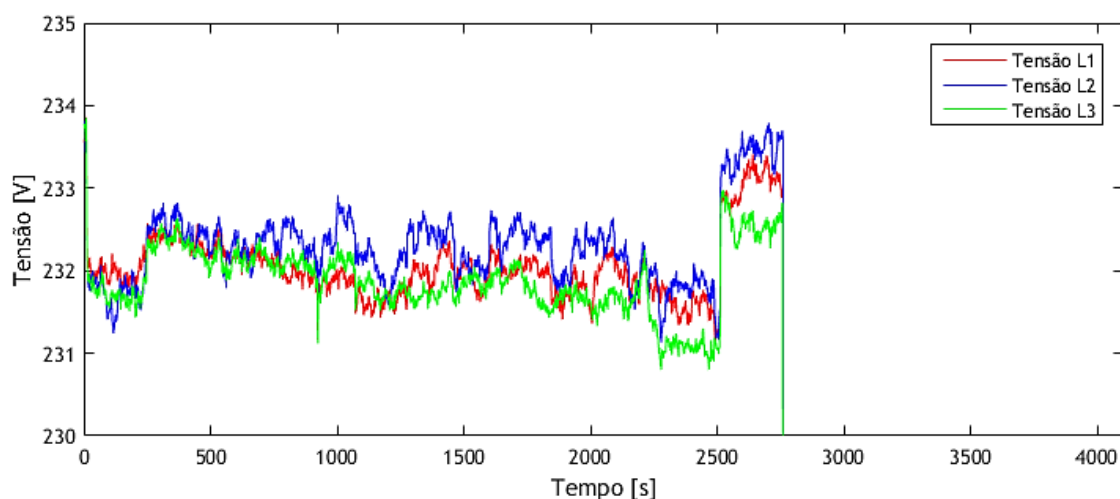


Figura 5.17 - Caso 2: Tensão nas Fases.

5.3.3. Equilíbrio do Sistema

A Figura 5.18 representa o diagrama das tensões de fase com as respetivas correntes desfasadas de um ângulo φ para cada fase. Como se pode observar, durante o carregamento o desfasamento da corrente em relação à respetiva tensão de fase não sofre alteração, uma vez que o valor do ângulo não aumenta. Como o carregamento foi interrompido antes do primeiro decréscimo do valor da potência e corrente, o valor do ângulo também não se alterou e, por isso, entre o início e o final do carregamento, o desfasamento entre a corrente e a tensão permanece igual a zero. Na figura, as cores mais claras representam as tensões, as tonalidades intermédias representam o desfasamento das correntes em relação à tensão, nas respetivas fases, no início e fim do carregamento. O valor das correntes do início e do final foi multiplicado por um fator igual a 5, por questões de escala de visualização.

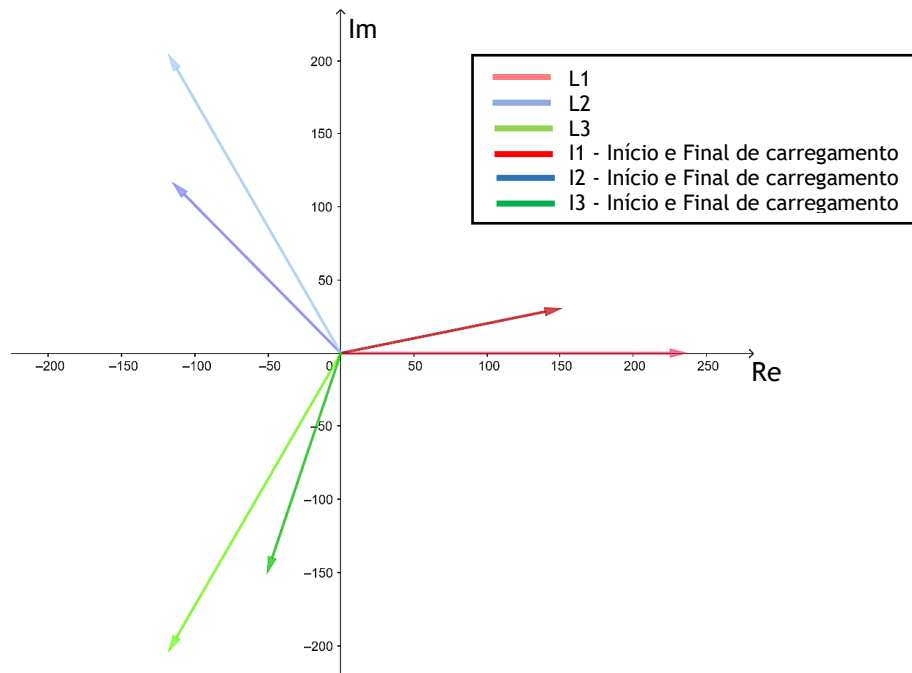


Figura 5.18 - Caso 2: Diagrama Vetorial.

5.4. Caso 3 - Carregamento 3

O ensaio para este último caso teve a duração de 72 minutos e 50 segundos, durante o qual foram carregados 71 pontos percentuais da bateria em 71 minutos, com temperatura ambiente exterior de 25 °C. A curva do EC em função do tempo é apresentada na Figura 5.19. O estado de carga ao longo do tempo não se comportou de forma tão linear durante o intervalo de tempo monitorizado, como nos carregamentos anteriores. É possível observar a redução de velocidade de carregamento à medida que a bateria aumenta a sua percentagem de EC, principalmente a partir dos 98 %. Durante o carregamento foram consumidos cerca de 15.6 kWh.

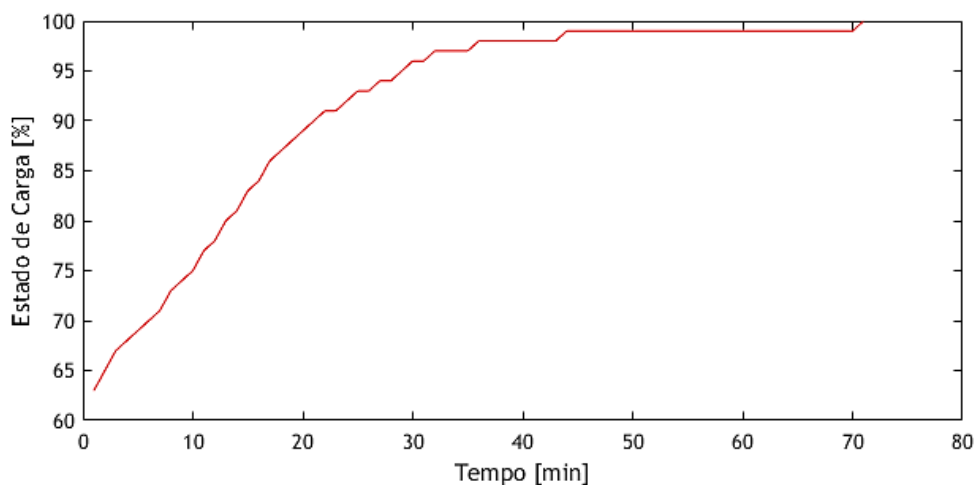


Figura 5.19 - Caso 3: Estado de Carga da bateria.

5.4.1. Diagrama de Carga

Na Figura 5.20 é apresentada a evolução da potência ativa fornecida pelo posto. Nela podem ser observadas as potências nas três fases do sistema e a potência total, que resulta da soma das anteriores. O carregamento inicia-se com uma potência total junto da potência máxima, 22 kW. Verifica-se redução do seu valor à medida que o EC da bateria vai aumentando até ao momento da interrupção do carregamento. Este comportamento verifica-se também na corrente e no valor de $\cos(\varphi)$, que podem ser consultados no Anexo C.

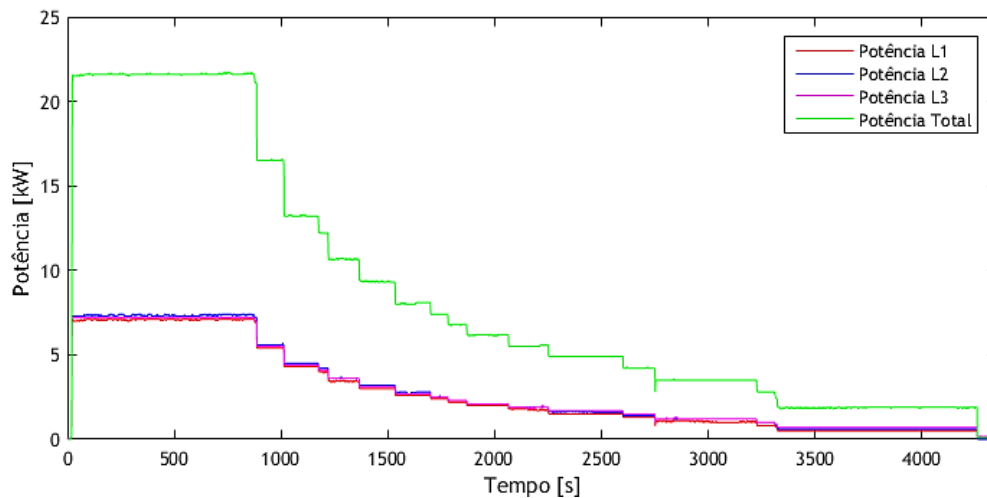


Figura 5.20 - Caso 3: Potência Ativa nas Fases e Potência Ativa Total.

A Figura 5.21 apresenta o comportamento da potência reativa, o qual se assemelha ao comportamento desta grandeza no Carregamento 1, embora sem oscilações tão significativas dos valores iniciais. À medida que o EC aumenta, a potência reativa aumenta com valores negativos. Este facto vai provocar uma diminuição do fator de potência (ver anexo C). Pode verificar-se, pela figura, que todas as fases que alimentam o posto de carregamento se encontram a fornecer energia reativa à rede e que não existe potência reativa a ser fornecida ao posto.

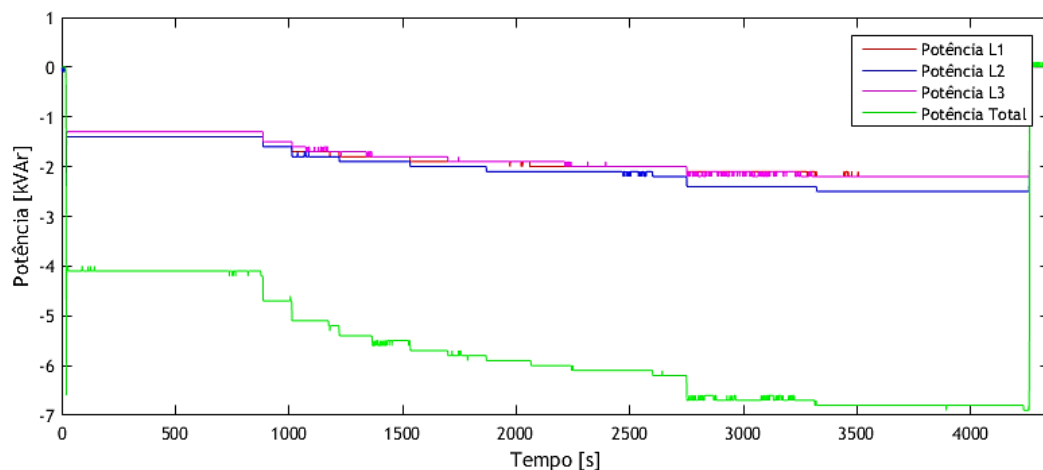


Figura 5.21 - Caso 3: Potência Reativa nas Fases e Potência Reativa Total.

Na Figura 5.22 apresenta-se a evolução da TDH ao longo do período de carregamento. Considerando o limite imposto para a distorção harmónica total, sendo de 8 % para níveis de tensão inferior a 1 kV, baseado na norma NP EN 50160 e a norma IEEE STD 519-2014, verifica-se que, para a situação analisada, a distorção harmónica é basicamente inferior ao limite, apresentando um valor máximo inferior a 2.2 %, apesar de apresentar um pico que se verifica em todas as fases (2.7 % para L1, 2.3 % para L2 e 2.2 % para L3), mas que ocorre isoladamente.

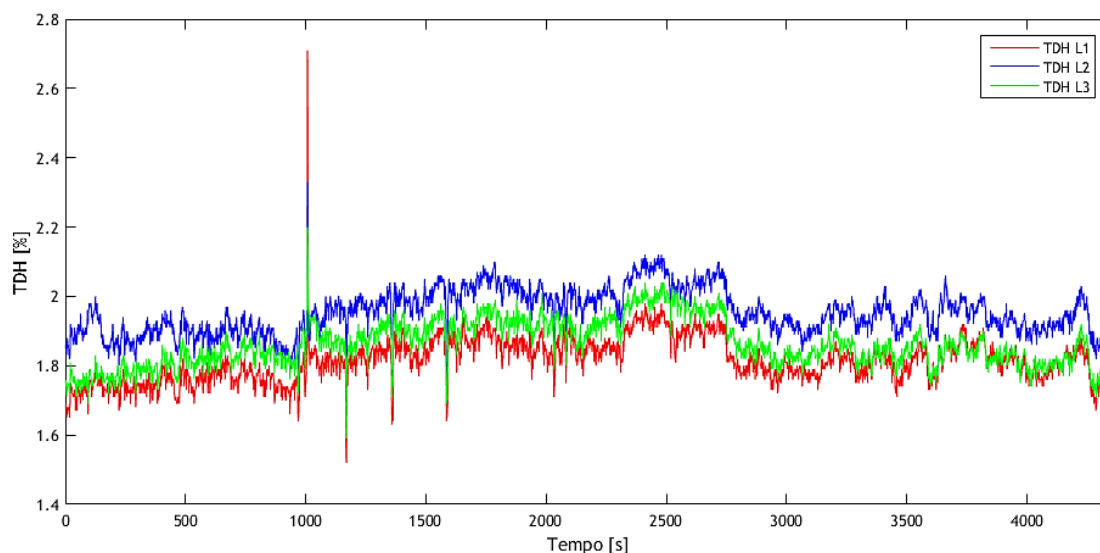


Figura 5.22 - Caso 3: Taxa de Distorção Harmónica de Tensão.

A Figura 5.23 apresenta o valor máximo das harmónicas de tensão no período de tempo do carregamento do veículo. Apenas foram registados valores de harmónicas até à nona ordem, sendo que os valores mais altos pertencem à harmónica de ordem 7.

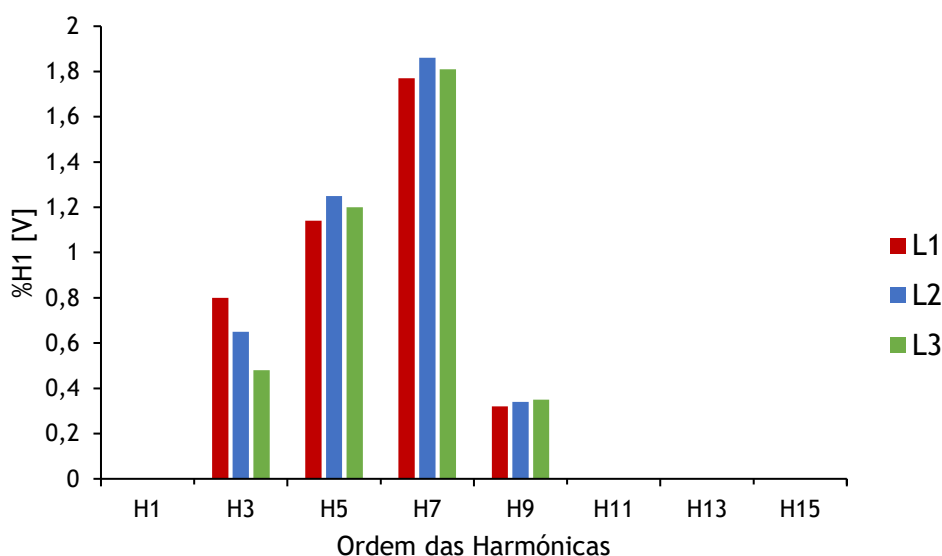


Figura 5.23 - Caso 3: Harmónicas de Tensão.

Na Figura 5.24 apresenta-se a evolução da Taxa de Distorção Harmónica na corrente (TDHi) ao longo do período de carregamento. O comportamento gráfico neste ensaio assemelha-se ao carregamento 2, onde no início do carregamento a TDHi atinge valores elevados em curto espaço de tempo, seguido de um estágio em que se mantém estável. Durante o ensaio, isto é, 16 minutos e meio (cerca de 1000 s) passados desde o início do carregamento, observa-se um crescimento no valor da TDHi, em que o mesmo termina aos 2750 segundos, voltando a estabilizar-se em torno de 13 % até que o estado de carga é completado.

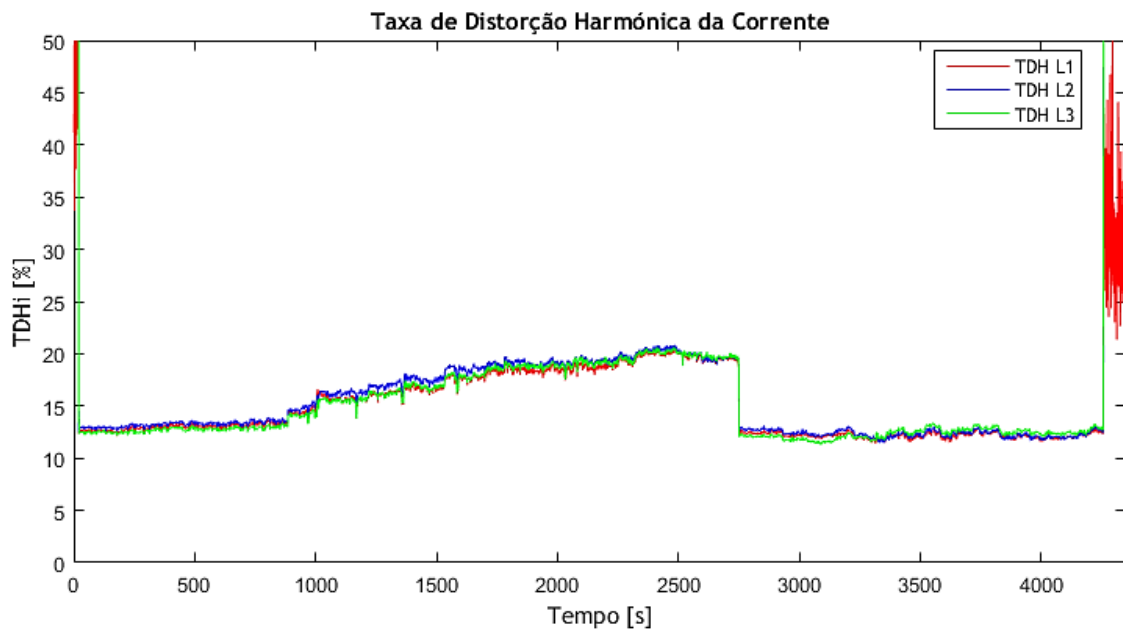


Figura 5.24 - Caso 3: Taxa de Distorção Harmónica de Corrente.

A Figura 5.25 Figura 5.5 apresenta o valor máximo das harmónicas de corrente no período de tempo do carregamento do veículo. Apenas foram registados valores de harmónicas até à nona ordem, sendo que os valores mais altos pertencem à harmónica de ordem 3.

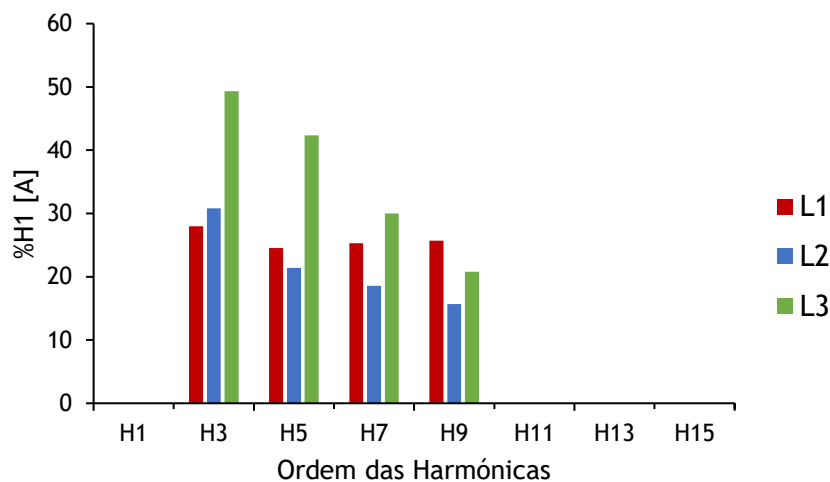


Figura 5.25 - Caso 3: Harmónicas de Corrente.

5.4.2. Evolução da Tensão

A Figura 5.26 representa a evolução do valor eficaz da tensão no ponto de carregamento da estação de carregamento rápido, em cada uma das fases. No início do carregamento verifica-se uma diminuição do seu valor, que vai atenuando à medida que a potência fornecida ao veículo vai diminuindo. Durante o ensaio, isto é, 16 minutos e meio (cerca de 1000 s) passados desde o início do carregamento, observa-se uma descida instantânea do valor da tensão. Este comportamento registou-se nas três fases, mas verifica-se que é pontual e que coincide com o pico verificado na TDH. Segundo a norma NP EN 50160, o valor médio da tensão num período de 10 minutos deve estar compreendido numa gama de valores entre 195.5 e 253 V. Como se pode verificar ainda na figura, os valores de tensão estão sempre compreendidos entre os valores normativos e, conseqüentemente, os valores médios de 10 minutos também estarão. Finalmente, não se verifica uma flutuação de tensão considerável, como se pode constatar pelo indicador de severidade de curta duração (Pst) no Anexo C.

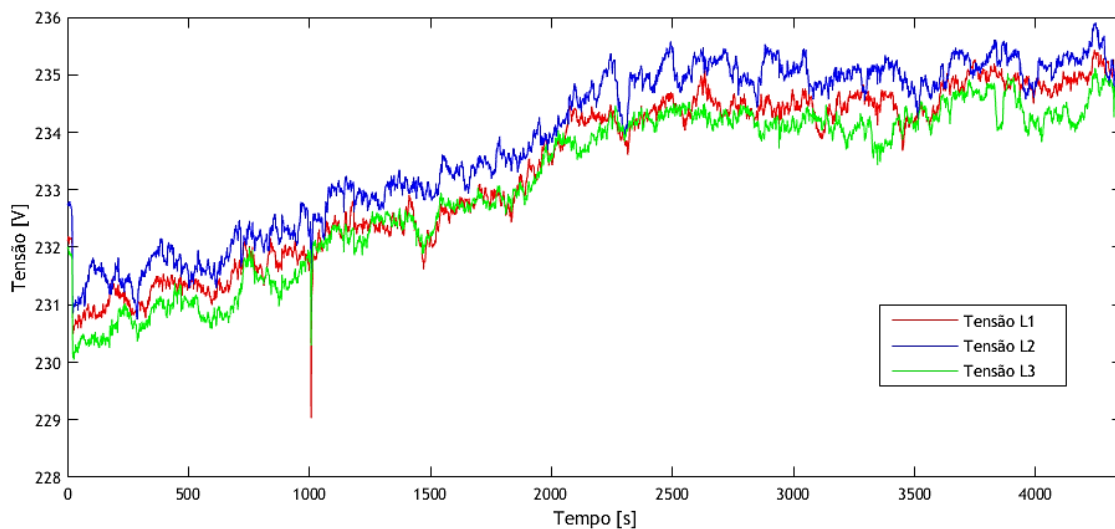


Figura 5.26 - Caso 3: Tensão nas Fases.

5.4.3. Equilíbrio do Sistema

A Figura 5.27 representa o diagrama das tensões de fase com as respetivas correntes desfasadas de um ângulo φ para cada fase. Como se pode verificar, durante o carregamento o desfasamento da corrente em relação à respetiva tensão de fase sofre uma ligeira alteração, uma vez que o valor do ângulo aumenta, devido o aumento da potência reativa fornecida à rede. Na figura, as cores mais claras representam as tensões, as tonalidades intermédias representam o desfasamento das correntes em relação à tensão no início, nas respetivas fases, e as mais escuras apresentam este cenário no final do carregamento. O valor das correntes do início foi multiplicado por um fator igual a 5 e o das correntes no final foi multiplicado por um fator igual a 10, por questões de escala de visualização.

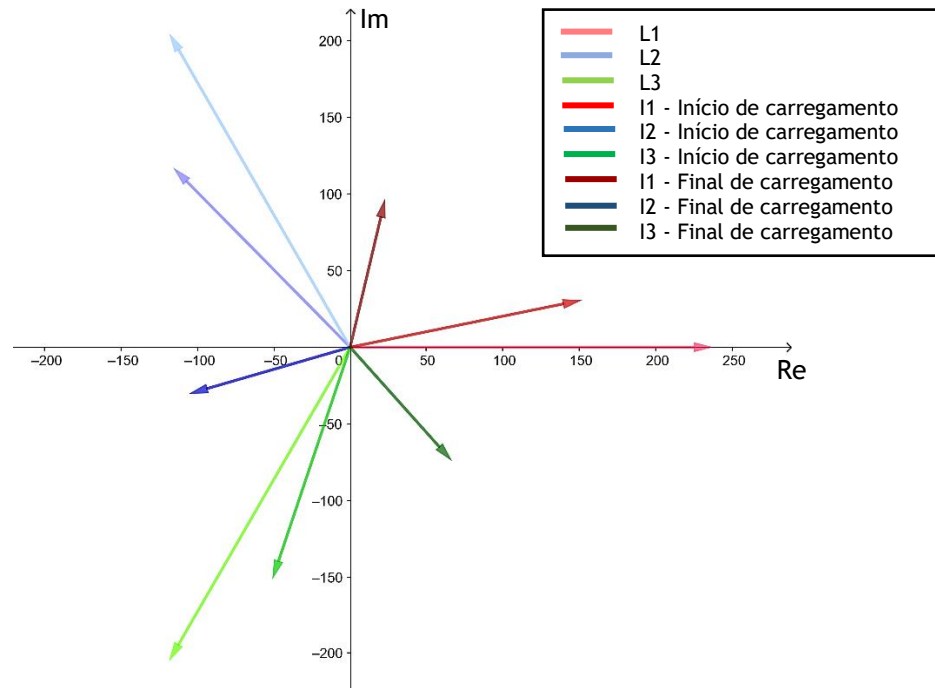


Figura 5.27 - Caso 3: Diagrama Vetorial.

5.5. Conclusão

Neste capítulo foi possível analisar alguns parâmetros de qualidade de energia, mediante os resultados obtidos dos ensaios de carregamentos. A partir dos resultados obtidos e por meio de ferramentas apropriadas, foi possível a geração de modelos gráficos, de forma a facilitar a visualização e compreensão dos mesmos.

De forma geral, os resultados obtidos dos ensaios estão dentro dos valores normativos dos parâmetros de qualidade de energia, apesar de alguns itens que não devemos deixar de salientar, tais como:

- No carregamento 2, o carregamento foi interrompido por ação do próprio veículo (sistema de proteção);
- No carregamento 3, verificou-se um aumento brusco e instantâneo do valor da taxa de distorção harmónica em todas as fases, o que influenciou no valor da tensão, reduzindo-a no mesmo instante de tempo.

Portanto para uma apreciação mais cuidada dos dados gráficos apresentados neste capítulo, podem ser consultadas nos anexos as representações gráficas dos mesmos, de forma individual (por fase).

Capítulo 6

6. Conclusões

Esta dissertação teve como objetivos principais analisar a eficiência energética e a qualidade da energia gerada em postos de carregamento de bicicletas elétricas, mediante a análise de perfis de carregamento de VE.

Do ponto de vista de estratégias eficientes no consumo de energia pelo posto, as bicicletas elétricas devem estar equipadas de baterias de íões de lítio, pois têm níveis de eficiência mais altos quando comparadas com outras tecnologias, bem como a utilização de sistema fotovoltaico no fornecimento auxiliar de energia ao posto, pois pelo estudo apresentado no capítulo 3, a localidade em estudo apresenta um potencial aceitável; além de mais, a exploração desta fonte de energia atenua a dependência energética da rede, proporcionando uma redução no preço da energia consumida pelo posto.

Em relação à ligação à rede do posto de carregamento de VE, esta não teve impactos significativos, pois os resultados obtidos dos ensaios de carregamentos confirmam que há qualidade de energia do sistema. Esta qualidade pode ser confirmada analisando cada grandeza referida no capítulo 5, nomeadamente:

- **Potência:** Durante os carregamentos (com exceção do carregamento 2), verifica-se a redução de potência ativa fornecida ao veículo que origina a redução de velocidade de carregamento do veículo, de forma a minimizar a deterioração da capacidade de armazenamento de energia da sua bateria. À medida que o nível de carga aumenta, ficando próximo de EC totais, verifica-se uma grande variação dos valores da potência reativa, tornando a carga mais capacitiva e o fator de potência mais baixo, o que resultará no fornecimento de energia reativa à rede. Em instalações industriais com consumo de grandes potências reativas indutivas, estas estações podem servir de um bom compensador de fator de potência;
- **Harmónicas:** As tensões dos sinais analisados contêm harmónicas, e somente de ordem par pelo facto de se utilizarem correntes e tensões alternas no posto. Todos os ensaios registaram valores inferiores a 3 %, verificando-se que está dentro dos limites normalizados, pois o valor máximo de TDH permitido pela norma é de 8 %.
- **Tensão:** Em todos ensaios as tensões comportam-se sempre da mesma forma, isto é, com o início do carregamento observa-se uma descida no seu valor, mas o mesmo vai aumentando e estabilizando à medida que o carregamento prossegue. Os resultados

obtidos, máximos e mínimos, dos valores de tensão em cada fase do sistema, estão contidos no intervalo imposto pela norma NP EN 50160 (Un-15 %; Un+10 %). Isto permite concluir que a utilização do posto por parte do veículo durante o carregamento não causa distúrbios significativos dos valores desta grandeza, pois os valores legais não são ultrapassados.

- **Corrente:** No início de cada ensaio a corrente é constante, ou seja, as três fases iniciam o carregamento com o valor de corrente entre 31 a 33 A (ver anexos), o que é um valor aceitável para fornecer uma potência de 22 kW a uma tensão nominal estabelecida pela NP EN 50160. A corrente segue o mesmo comportamento da potência ativa, isto é, vai diminuindo à medida que o EC da bateria vai alcançando seu limite, exceto para o carregamento 2, onde o veículo demonstrou ser eficiente na gestão do fluxo de corrente durante o carregamento quando ocorrem erros, isto é, interrompendo o carregamento.
- **Desfasamento de Tensão e Corrente:** Pelos resultados obtidos dos ensaios realizados, verifica-se que o ângulo de desfasamento entre a corrente e a tensão em cada fase no início do carregamento é mínimo ($\varphi = 11,47^\circ$), como se pode verificar no Anexo A. À medida que o EC aumenta, o ângulo acompanha esse aumento, que por sua vez faz acompanhar o desfasamento das correntes na mesma proporção, fazendo com que o ângulo de desfasamento no final do carregamento seja sempre maior que o do início, exceto para o carregamento 2, por razões que já foram referidas anteriormente. Este aumento do ângulo resulta da variação da impedância durante o carregamento, afastando a natureza da carga cada vez mais do comportamento perto do resistivo. Portanto, uma vez que o sistema se apresenta equilibrado, podemos afirmar que a qualidade da energia não está comprometida, neste aspeto.

Portanto, a partir da análise dos perfis de carregamento de VE e o seu impacto na rede pode-se deduzir o comportamento do carregamento de BE, apesar das suas diferenças técnicas. Assim sendo, quanto ao impacto na rede, o carregamento de BE terá menor impacto porque a potência de demanda é muito menor com relação à potência do VE. Para além disto, no carregamento de BE a potência reativa devolvida à rede será menor devido à simplicidade dos componentes eletrónicos de conversão de energia. E quanto ao conteúdo harmónico, em ambos os casos haverá a existência de harmónicos ímpares pelo facto de se utilizarem correntes e tensões alternas nos postos. A taxa de distorção harmónica individual (uma e-bike) será inferior ao valor limite legal, tal como na situação analisada, devido à simplicidade do sistema de conversão de energia. Porém, se houver um carregamento simultâneo de mais do que uma e-bike, estes valores são suscetíveis de se alterarem, o que possivelmente poderá vir a provocar algumas implicações em termos de qualidade de energia. Finalmente, só com resultados medidos é possível analisar de forma eficaz a qualidade de energia em postos de carregamentos de bicicletas elétricas.

6.1. Limitações

A realização do estudo experimental para obtenção dos resultados, foi limitada pelo facto de não haver ainda instalações da estação de carregamento para bicicletas e muito menos o sistema de geração fotovoltaica para auxiliar o posto, o que fez com que recorrêssemos aos resultados dos ensaios de carregamentos feito no posto de carregamento de veículo elétrico instalado na FCS.

6.2. Trabalhos Futuros

Um trabalho desta natureza dificilmente se pode considerar como finalizado, uma vez que novas questões e desafios vão surgindo, o que motivam a continuação da investigação neste domínio científico.

Como trabalho futuro, seria interessante a construção de um protótipo experimental, que cumpra com as propostas de eficiência apresentadas neste trabalho, e que permita analisar os perfis de carregamento de bicicleta elétrica, de forma unitária e em simultâneo, para comparar os resultados experimentais com as análises abordadas neste trabalho.

Não se abordou muito o sistema de regeneração da energia consumida durante os percursos, porém seria interessante desenvolver projetos de regeneração de energia, como a implementação de dínamo na roda traseira, para manter cada vez mais eficiente a bicicleta.

Referências Bibliográficas

- [1] S. Adhisuwignjo, I. Siradjuddin, M. Rifa'i, and R. I. Putri, "Development of a solar-powered electric bicycle in bike sharing transportation system," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 70, no. 1, 2017.
- [2] P. Baptista *et al.*, "From on-road trial evaluation of electric and conventional bicycles to comparison with other urban transport modes: Case study in the city of Lisbon, Portugal," *Energy Convers. Manag.*, vol. 92, pp. 10-18, 2015.
- [3] N. B. Hung, J. Sung, K. Kim, and O. Lim, "A Simulation and Experimental Study of Operating Characteristics of an Electric Bicycle," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2512-2517, 2017.
- [4] D. da República, "Decreto-Lei nº 44/2005, Diário da República - I Série-A Nº 38 - 23 de Fevereiro de 2005," in *Diário da República*, 2018th ed., Lisboa, 2005, pp. 1554-1625.
- [5] D. Thomas, V. Klonari, F. Vallee, and C. S. Ioakimidis, "Implementation of an e-bike sharing system: The effect on low voltage network using pv and smart charging stations," *2015 Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2015*, vol. 5, pp. 572-577, 2015.
- [6] J. Ogden Bolton, "Electrical Bicycle," 563,002, 1895.
- [7] H. W. Libbey, "Electric Bicycle," 569,272, 1897.
- [8] J. Schnepf, "Automobile," 627,006, 1899.
- [9] R. J. F. Araújo, "Desenvolvimento de uma Bicicleta Elétrica," Universidade do Minho, 2012.
- [10] Y. Kim, S.-H. Rhyu, and I.-S. Jung, "Parameter determination of the BLDC motor considering the dynamic equation of vehicle," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, 2010.
- [11] K. Schleinitz, T. Petzoldt, L. Franke-Bartholdt, J. Krems, and T. Gehlert, "The German Naturalistic Cycling Study - Comparing cycling speed of riders of different e-bikes and conventional bicycles," *Saf. Sci.*, vol. 92, pp. 290-297, 2017.
- [12] SENSE BIKE, "Sense Easy Bicicleta Elétrica Dobrável," 2018. [Online]. Available: <http://sensebike.com.br/bikes/bikes-eletricas/easy/>. [Accessed: 28-Feb-2018].
- [13] N. Fatela, "BMW apresenta nova bicicleta elétrica," *Turbo*, 2017. [Online]. Available: <http://www.turbo.pt/bmw-apresenta-nova-bicicleta-eletrica/>. [Accessed: 28-Feb-

2018].

- [14] E-bikeshop, “Haibike sDuro HardSeven 1.0 2018 Yamaha.” [Online]. Available: <https://www.e-bikeshop.co.uk/Haibike-Electric-Bikes/Haibike-sDuro-HardSeven-1.0-2018>. [Accessed: 28-Feb-2018].
- [15] Minimalist e-bike, “Sand.” [Online]. Available: <http://minimalistbike.com/sand.html>. [Accessed: 23-Apr-2018].
- [16] E. Sokolov, “Comparative Study of Electric Car Traction Motors,” in *15-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2017, pp. 348-353.
- [17] K. T. Chau and W. Li, “Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 64, Jan. 2014.
- [18] F. Dumitrache, M. C. Carp, and G. Pana, “E - bike electronic control unit,” *22nd Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag.*, pp. 248-251, 2016.
- [19] D. Tavares, “Soluções técnicas para sistemas de carga de veículos eléctricos,” Universidade do Porto, 2009.
- [20] L. Zheng, J. Zhu, G. Wang, D. D. C. Lu, and T. He, “Lithium-ion battery instantaneous available power prediction using surface lithium concentration of solid particles in a simplified electrochemical model,” *IEEE Trans. Power Electron.*, pp. 1-10, 2018.
- [21] A. A. Hussein, “A neural network based method for instantaneous power estimation in electric vehicles’ Li-ion batteries,” *2017 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 3122-3126, 2017.
- [22] B. D. Olaszi and J. Ladanyi, “Comparison of different discharge strategies of grid-connected residential PV systems with energy storage in perspective of optimal battery energy storage system sizing,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. November 2016, pp. 710-718, 2017.
- [23] X. Hu, C. Zou, and Y. Li, “Technological Developments in Batteries,” pp. 42-44, 2017.
- [24] E. A. Thomson, “Re-engineered battery material could lead to rapid recharging of many devices,” *MIT Tech Talk*, vol. 53, no. 19, p. 7, 2009.
- [25] B. J. R. da Silva, “Desenvolvimento de um Posto de Carregamento Lento com BMS e Interface com o Cockpit para o CEPIUM,” Universidade do Minho, 2013.
- [26] SGORME (Sociedade Gestora de Operações da Rede de Mobilidade ELétrica), “Formas de

- Carregamento de Veículos Eléctricos em Portugal,” Portugal, pp. 3-21, 19-Aug-2011.
- [27] EURELECTRIC, “European electricity industry views on charging Electric Vehicles,” Bruxelas, Bélgica, p. 17, Apr-2011.
- [28] V. P. Gonzales, “Projeto de uma Bicicleta Elétrica,” Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2014.
- [29] ZEEV, “Posto de Carregamento MCC10.” [Online]. Available: <http://www.zeev.pt/servicos/postos-de-carregamento/mcc10/>. [Accessed: 29-Oct-2017].
- [30] EVO-BIKE, “Electric bikes charging station.” [Online]. Available: https://www.giuliobarbieri.it/en/outdoor-products/e-mobility-and-carports/bike-charger-e-bike-charging-station_evo-bike/#energy-supplier. [Accessed: 29-Oct-2017].
- [31] A. Neves, D. M. Sousa, A. Roque, and J. M. Terras, “Analysis of an inductive charging system for a commercial electric vehicle,” in *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)*, 2011, pp. 1-10.
- [32] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. Sealy, P. Israelsen, and J. Muhs, “A review on inductive charging for electric vehicles,” *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, pp. 143-147, 2011.
- [33] E. Rodrigues, “Rede pioneira de bicicletas elétricas põe lagoenses e turistas a mexer a partir de Janeiro,” *Sul Informação*, 2016. [Online]. Available: <http://www.sulinformacao.pt/2016/11/rede-pioneira-de-bicicletas-eletricas-poe-lagoenses-e-turistas-a-mexer-a-partir-de-janeiro/>. [Accessed: 20-Oct-2017].
- [34] EMEL, “Bicicleta Elétrica - GIRA - Bicicletas de Lisboa.” [Online]. Available: <https://www.gira-bicicletasdelisboa.pt/bicicleta-eletrica/>. [Accessed: 30-Oct-2017].
- [35] W. Shen, T. T. Vo, and A. Kapoor, “Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview,” in *Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Singapore, 2012.
- [36] W. Shen, T. T. Vo, and A. Kapoor, “Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview,” *Proc. 2012 7th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2012*, pp. 1567-1572, 2012.
- [37] R. Velho, M. Beirão, M. Do Rosário Calado, J. Pombo, J. Fermeiro, and S. Mariano, “Management system for large li-ion battery packs with a new adaptive multistage charging method,” *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017.

- [38] S. C. Wang and Y. H. Liu, "A PSO-based fuzzy-controlled searching for the optimal charge pattern of li-ion batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 62, pp. 2983-2993, 2015.
- [39] C. L. Liu, S. C. Wang, S. S. Chiang, Y. H. Liu, and C. H. Ho, "PSO-based fuzzy logic optimization of dual performance characteristic indices for fast charging of Lithium-ion batteries," *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Kitakyushu, Japan, pp. 474-479, 2013.
- [40] M. Di Yin, J. Cho, and D. Park, "Pulse-based fast battery IoT charger using dynamic frequency and duty control techniques based on multi-sensing of polarization curve," *Energies*, vol. 9, no. 209, 2016.
- [41] L. Chen, "A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Variied Technique," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 54, pp. 398-405, 2007.
- [42] L. R. Chen, "Design of duty-varied voltage pulse charger for improving Li-ion battery-charging response," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 56, pp. 480-487, 2009.
- [43] N. Naville, "Conheça a bicicleta elétrica que funciona com energia solar," 2015. [Online]. Available: <http://misturaurbana.com/2015/05/conheca-bicicleta-eletrica-que-funciona-com-energia-solar/>. [Accessed: 30-Oct-2017].
- [44] C. Aguiar, "UOU Mobility avança para bicicleta elétrica," *Jornal de Notícias*, 2018. [Online]. Available: <https://www.dinheirovivo.pt/fazedores/uou-mobility-avanca-para-bicicleta-eletrica/>. [Accessed: 23-Apr-2018].
- [45] U. MOBILITY, "UOU BIKE MOBILITY CATALOG." Aveiro, pp. 1-9, 2018.
- [46] AGENEAL-Angência Municipal de Energia de Almada, "Energias Renováveis." [Online]. Available: <http://www.ageneal.pt/content01.asp?BTreelD=00/01&treelD=00/01&newsID=8>. [Accessed: 24-Nov-2017].
- [47] J. T. Pinho and M. A. Galdino, *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*, Revisada e. Rio de Janeiro, 2014.
- [48] M. Villalva, J. Gazoli, and E. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, 2009.
- [49] T. Khatib, I. A. Ibrahim, and A. Mohamed, "A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 430-448, 2016.

- [50] Global Solar Atlas, "Global Solar Atlas - Data Description." [Online]. Available: <http://globalsolaratlas.info/knowledge-base/data-description?c=40.265904,-7.576447,11&s=40.276,-7.513>. [Accessed: 23-Nov-2017].
- [51] Global Solar Atlas, "Global Solar Atlas." [Online]. Available: <http://globalsolaratlas.info/?c=40.265904,-7.576447,11&s=40.276,-7.513>. [Accessed: 25-Nov-2017].
- [52] SODA-Solar Radiation Data, "HelioClim-3 Archives for Free." [Online]. Available: <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>. [Accessed: 25-Nov-2017].
- [53] PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps), "PV potential estimation utility." [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>. [Accessed: 15-Jan-2018].
- [54] J. L. Morais, "Sistemas Fotovoltaicos da Teoria à Prática." pp. 1-125, 2009.
- [55] O. Saadeh, R. Rabady, and M. Bani Melhem, "New effective PV battery charging algorithms," *Sol. Energy*, vol. 166, no. March, pp. 509-518, 2018.
- [56] A. Bouabdallah, J. C. Olivier, S. Bourguet, M. Machmoum, and E. Schaeffer, "Safe sizing methodology applied to a standalone photovoltaic system," *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 266-274, 2015.
- [57] S. Sinha and S. S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 192-205, 2014.
- [58] T. Khatib, A. Mohamed, and K. Sopian, "A Software Tool for Optimal Sizing of PV Systems in Malaysia," *Model. Simul. Eng.*, pp. 1-11, 2012.
- [59] F. Dragomir, O. E. Dragomir, A. Oprea, L. Olteanu, N. Olariu, and V. Ursu, "Simulation of lithium-ion batteries from a electric vehicle perspective," *Electric Vehicles International Conference & Show*, no. 13, București, România, pp. 1-5, 2017.
- [60] EPIA, "Solar photovoltaics competing in the energy sector - On the road to competitiveness," Bruxelles, 2011.
- [61] Lazard, "Lazard's Levelised Cost of Energy Analysis (version 11.0)," 2017.
- [62] E. D. R. B. Proença, "A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL - Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento," Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- [63] IRENA, "Renewable Power Generation Costs in 2017," 2018.

- [64] A. Jäger-waldau, “PV Status Report 2016,” Luxemburgo, 2016.
- [65] D. Khetarpal, “World Energy Resources: Solar 2016,” 2016.
- [66] IEA PVPS (International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme), “Trends 2016 in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015,” 2016.
- [67] Bloomberg, “Evolução dos Custos Específicos dos Módulo Fotovoltaico no mundo,” *Energia Solar Fotovoltaica*. [Online]. Available: <http://pneergiasolar.com.br/geracao-de-energia-solar/>. [Accessed: 11-Jun-2018].
- [68] Gregory, “Nouvelle génération de station de recharge solaire pour vélos électriques,” *BLOG NEWS SUNPOD CYCLO*, 2015. [Online]. Available: <http://www.advansolar.com/blog/nouvelle-generation-de-station-de-recharge-solaire-pour-velos-electriques/>. [Accessed: 23-Apr-2018].
- [69] R. J. C. Pinto, “Análise dos Perfis de Carregamento de Veículos Elétricos numa Estação de Carregamento,” Universidade da Beira Interior, 2014.
- [70] Fluke, “Analisador de energia Fluke 434 Série II.” [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/ptpt/Ferramentas-de-Qualidade-de-Energia/Corrente-trifasica/Fluke-434-Series-II-Energy-Analyzer.htm?PID=73937>. [Accessed: 08-Mar-2018].
- [71] M. H. Shawon, S. Barcentewicz, and J. Kowalski, “Identification of asymmetry in power system: Different case studies,” *10th Int. Conf. - 2016 Electr. Power Qual. Supply Reliab. PQ 2016, Proc.*, pp. 37-40, 2016.
- [72] Z. Gao, H. Zhao, X. Zhou, and Y. Ma, “Summary of power system harmonics,” *Proc. 29th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2017*, no. 50877053, pp. 2287-2291, 2017.
- [73] W. Walcott, “Harmonics and Their Impact on Power Quality,” 2017.
- [74] R. F. Costa, “Estudo de Qualidade da Energia Elétrica e Viabilidade Econômica Visando o Uso de Lâmpadas LED em Iluminação Pública,” Universidade de São Paulo, 2015.
- [75] J. Cheng, CEng, CEM, CEA, and CMVP, “IEEE Standard 519-2014,” *Schneider Electr.*, p. 50, 2014.
- [76] P. Henrique, O. Rezende, and M. I. Samesima, “Efeitos Do Desequilíbrio De Tensões De Suprimentos Nos Motores De Indução Trifásico,” pp. 1-30, 2013.
- [77] A. Eslami and M. E. H. Golshan, “Index - based voltage dip consideration in optimal planning of SDGs by applying a modified Monte Carlo simulation method,” *Wiley*, pp. 1-

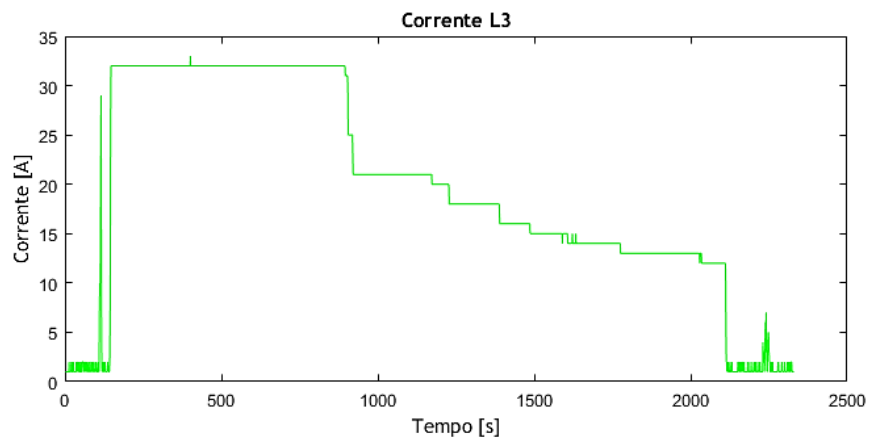
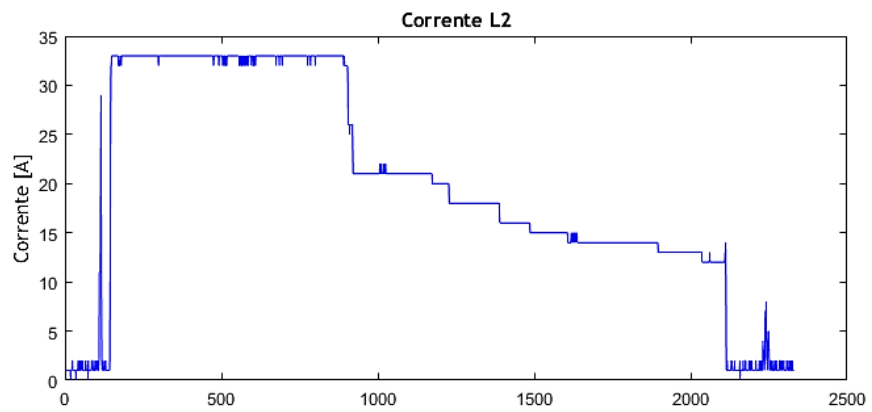
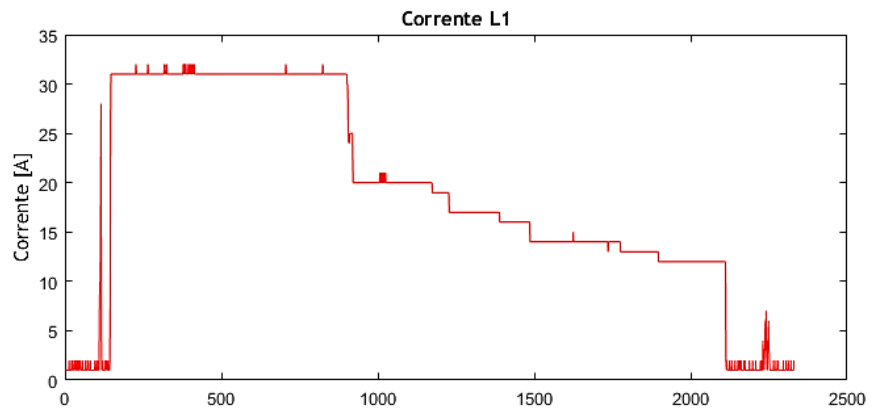
17, 2018.

- [78] M. S. Priya and Dr.T.Venkatesan, "A Dynamic Voltage Restorer with Voltage Sag PI Control Scheme," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 7544-7552, 2014.
- [79] C. Nemes, F. Munteanu, D. Astanei, M. Larion, and M. Adochitei, "Voltage dips analysis for grid connections of dispatchable photovoltaic systems," *Proc. - 2017 Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM 2017 2017 Intl Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron. ACEMP 2017*, pp. 783-788, 2017.
- [80] R. Kapoor, R. Gupta, L. H. Son, S. Jha, and R. Kumar, "Detection of Power Quality Event using Histogram of Oriented Gradients and Support Vector Machine," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 120, no. September 2017, pp. 52-75, 2018.
- [81] L. Ruihua *et al.*, "Review of Comprehensive Evaluation Methods for Power Quality and Its Trend in New Generation Energy System Review of Comprehensive Evaluation Methods for Power Quality and Its Trend in New Generation Energy System," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 113, 2018.
- [82] S. Alshareef and W. Morsi, "Impact of Fast Charging Stations on the Voltage Flicker in the Electric Power Distribution Systems," in *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2017.
- [83] T. Cao, "A New Method of Voltage Flicker Detection for Hilbert Vibration Decomposition," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 43-51, 2017.
- [84] M. Gerin, "Qualidade de energia - Harmônicas," *Work. Instal. Eléctricas Baixa Tensão. Schneider Electr.*, pp. 1-19, 2013.

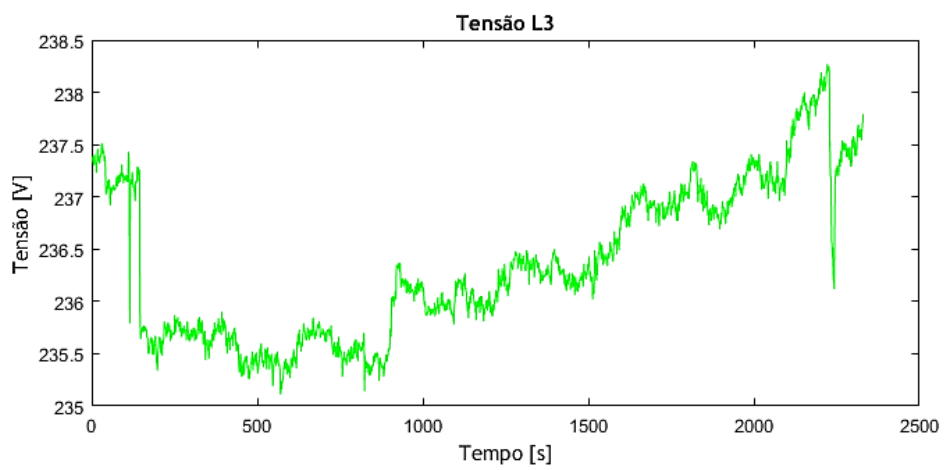
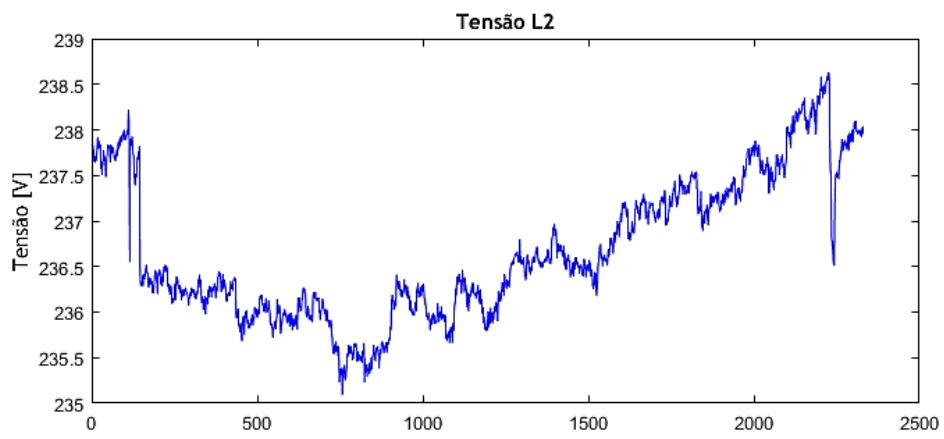
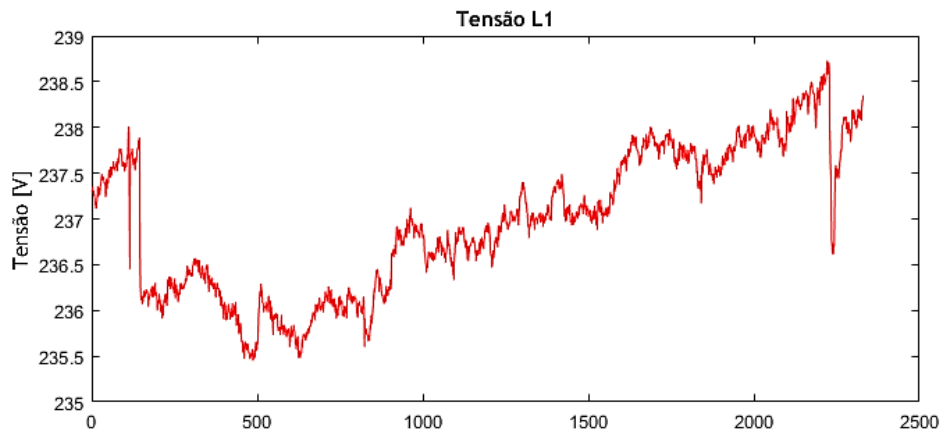
Anexos

Anexo A: Gráficos para cada grandeza do Caso 1 - Carregamento 1

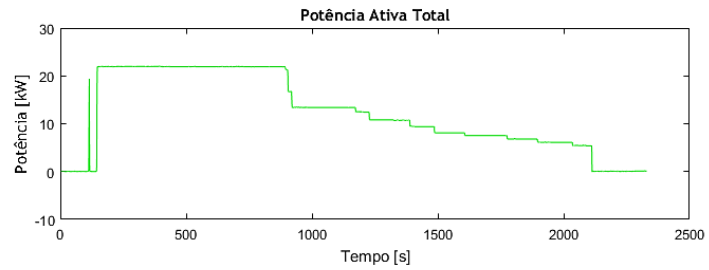
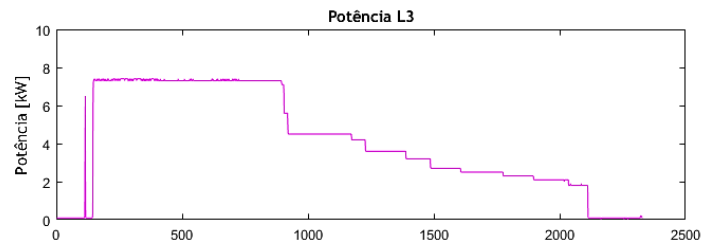
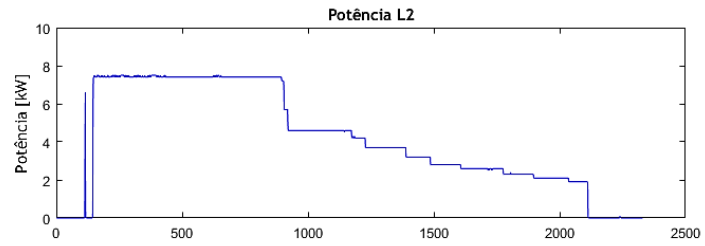
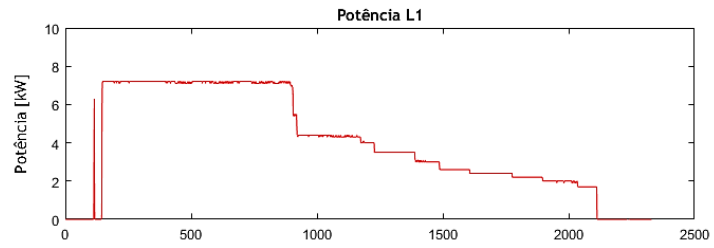
- Corrente



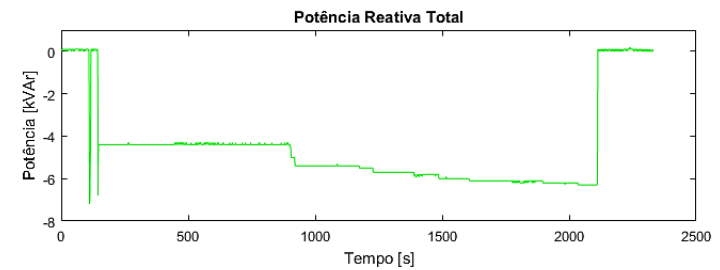
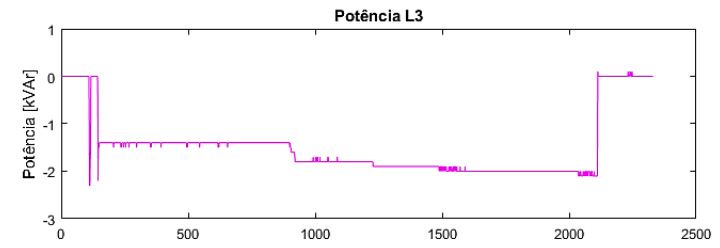
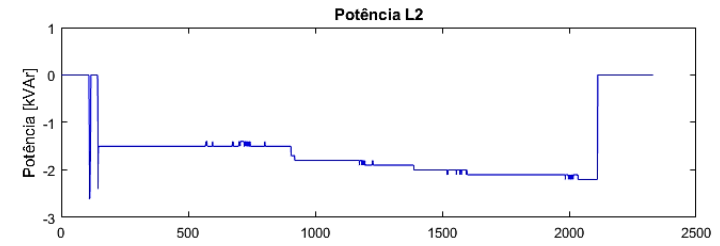
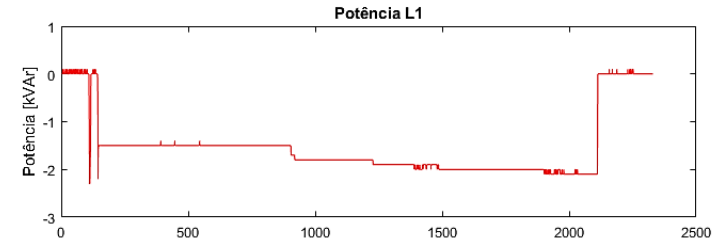
- Tensão



- **Potência Ativa**

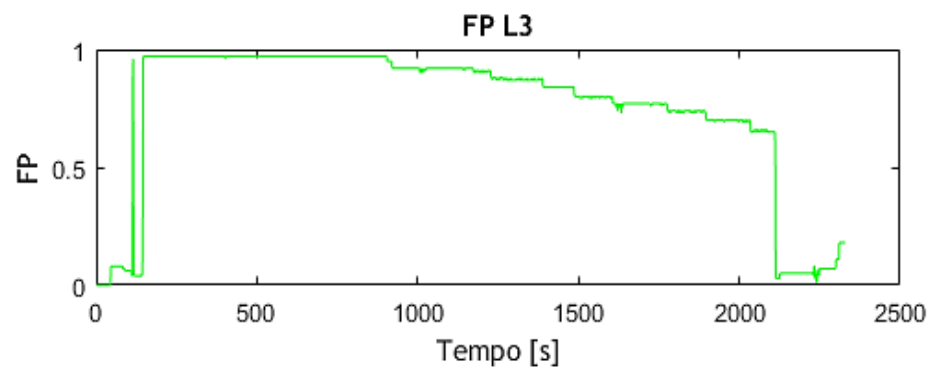
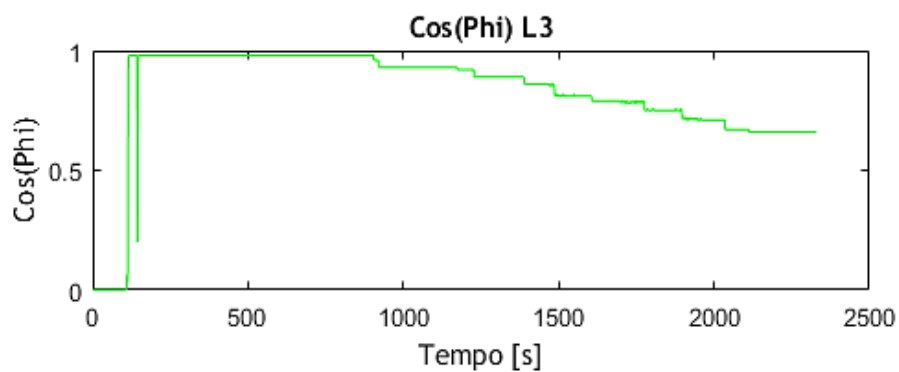
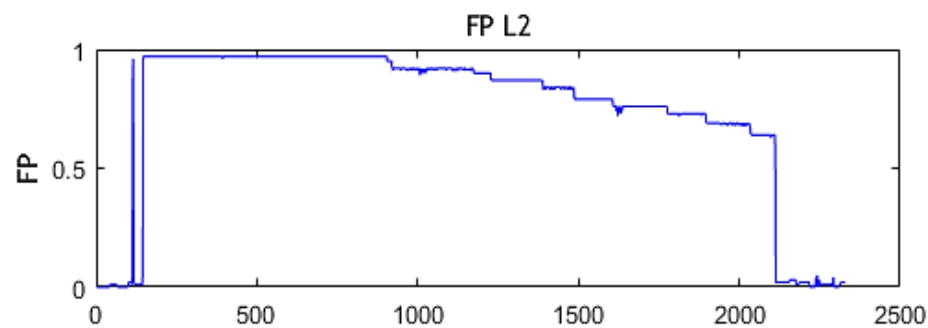
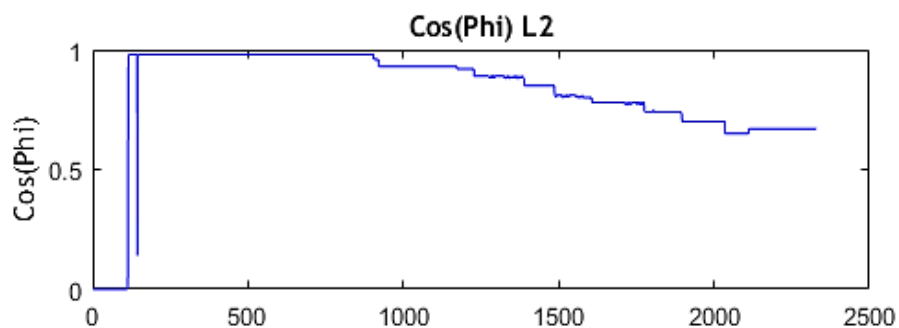
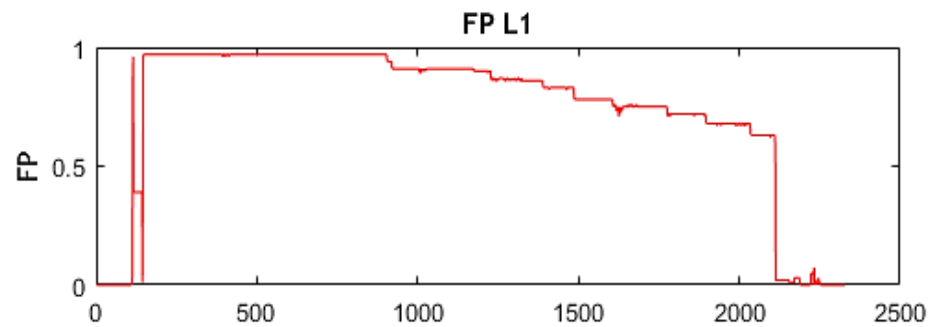
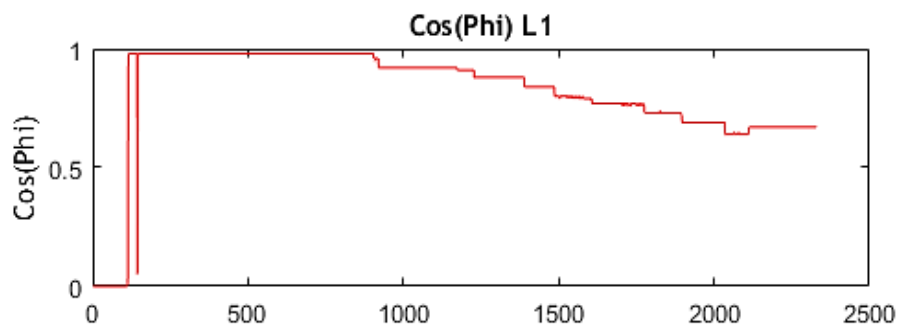


- **Potência Reativa**



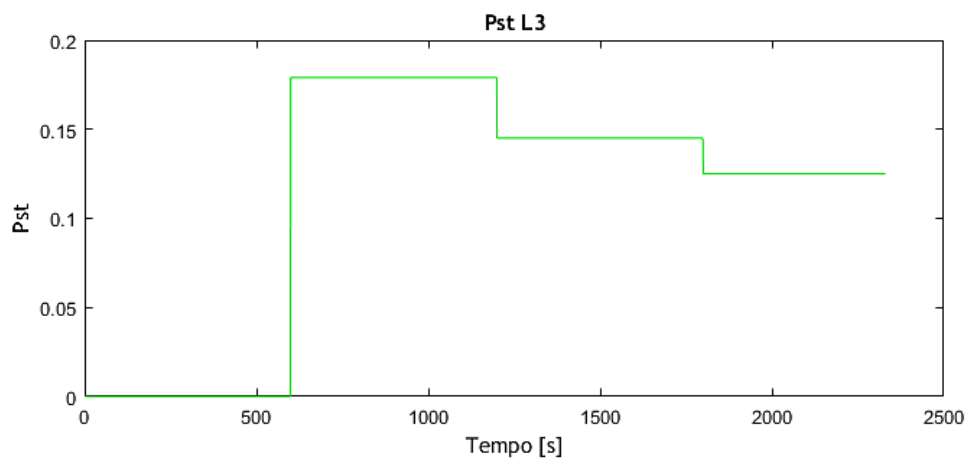
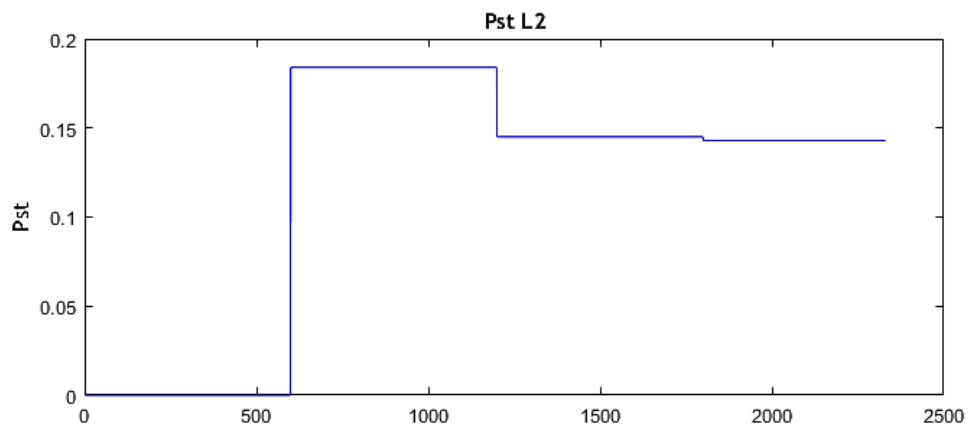
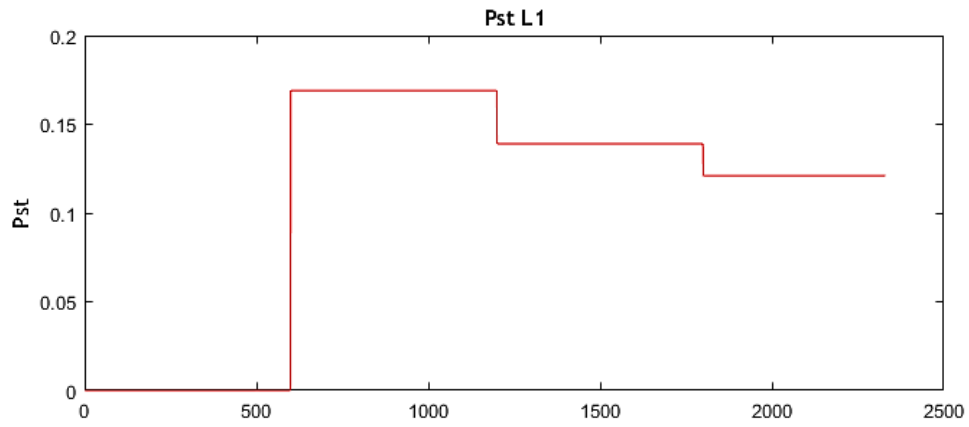
- Cos(Phi)

- Fator de Potência



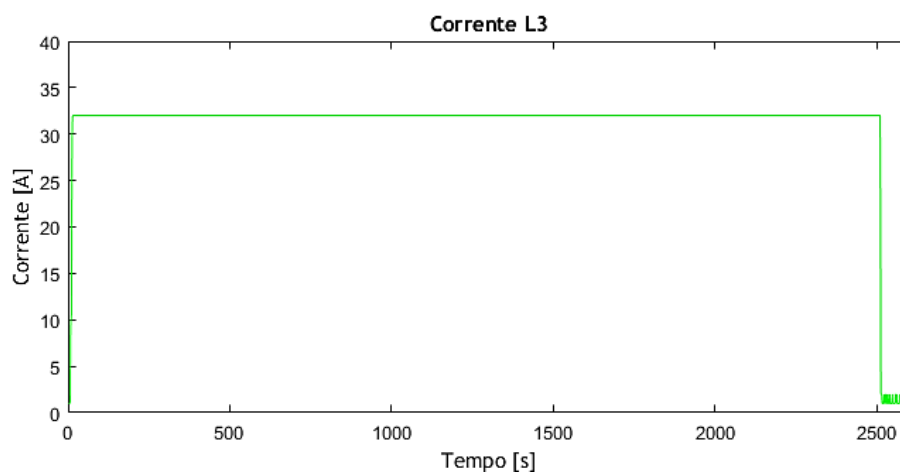
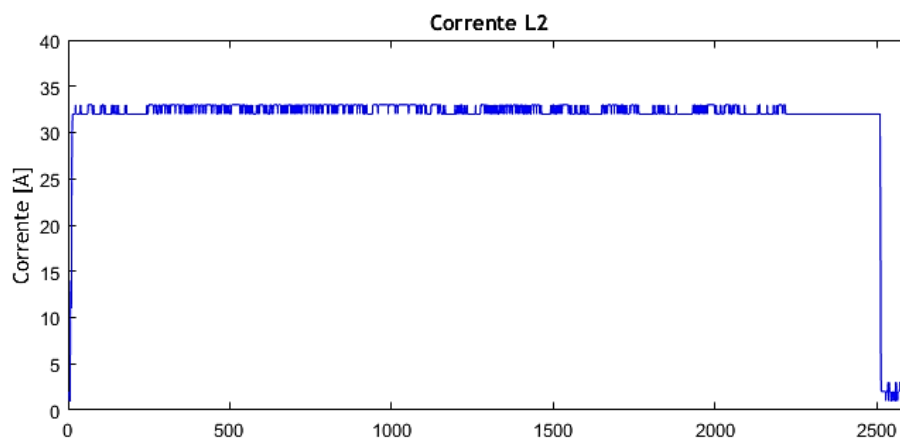
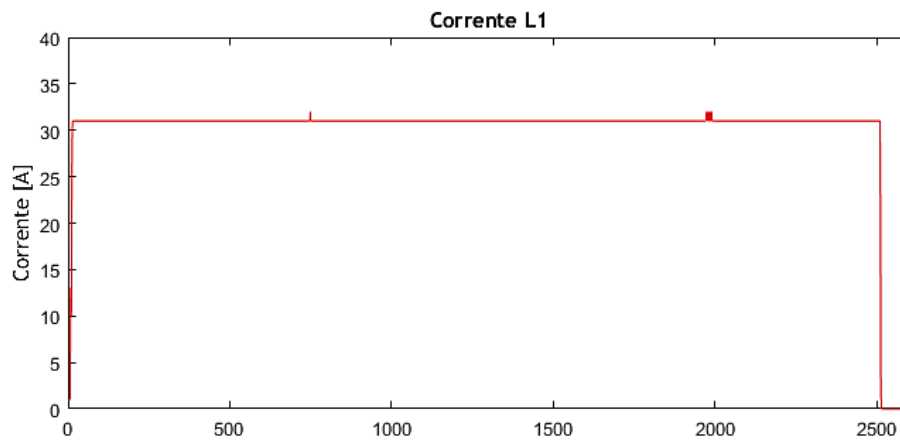
- **Pst: severidade de curta duração**

A tolerância do flicker é de até 1 Pst (nível de severidade de curta duração).

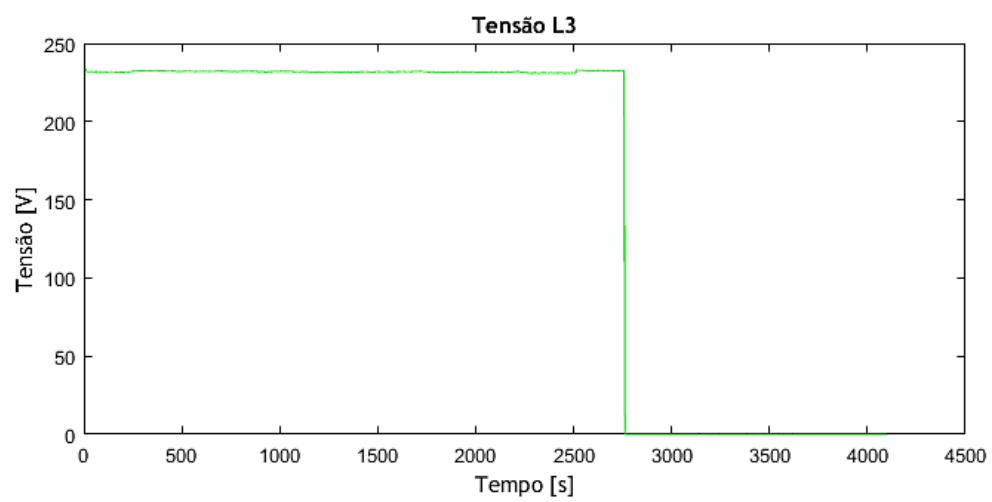
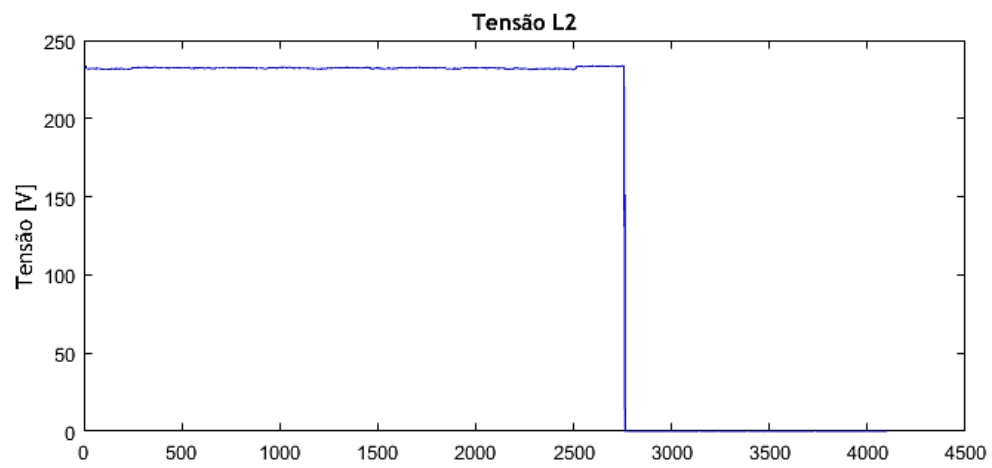
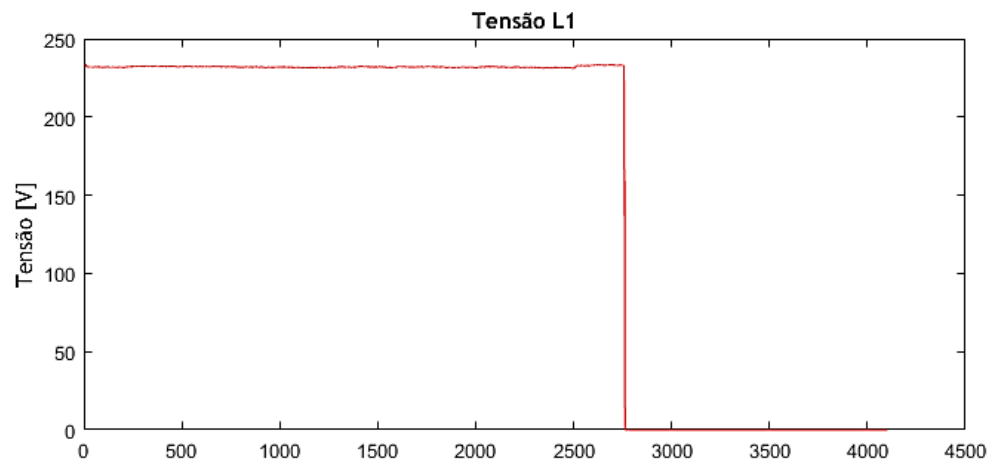


Anexo B: Gráficos para cada grandeza do Caso 2 - Carregamento 2

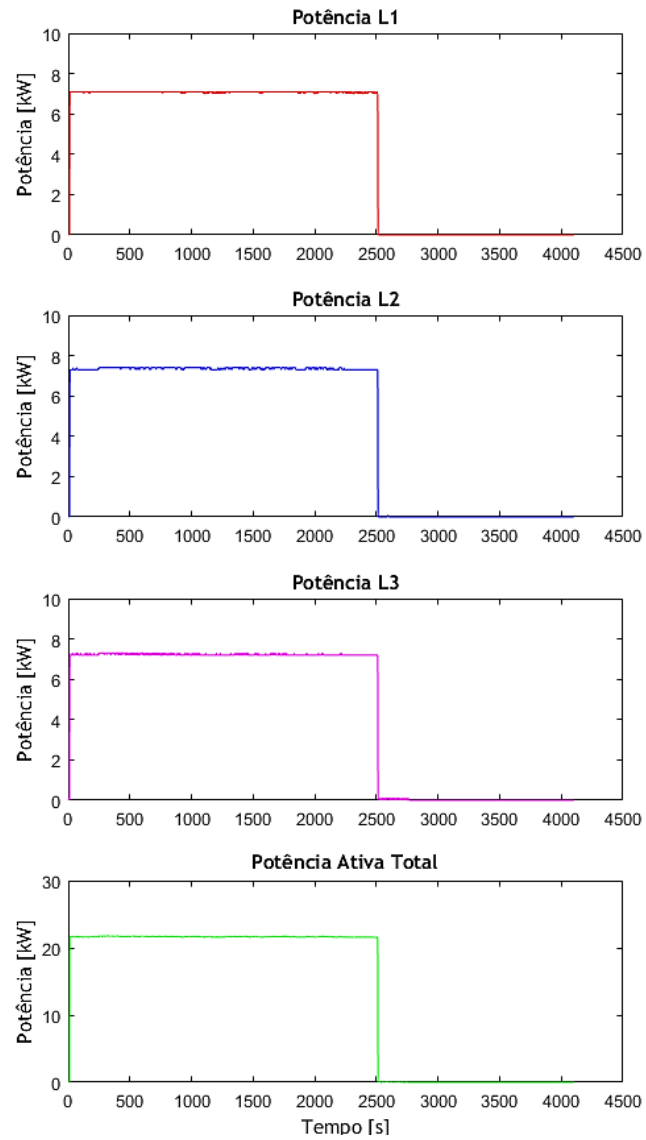
- Corrente



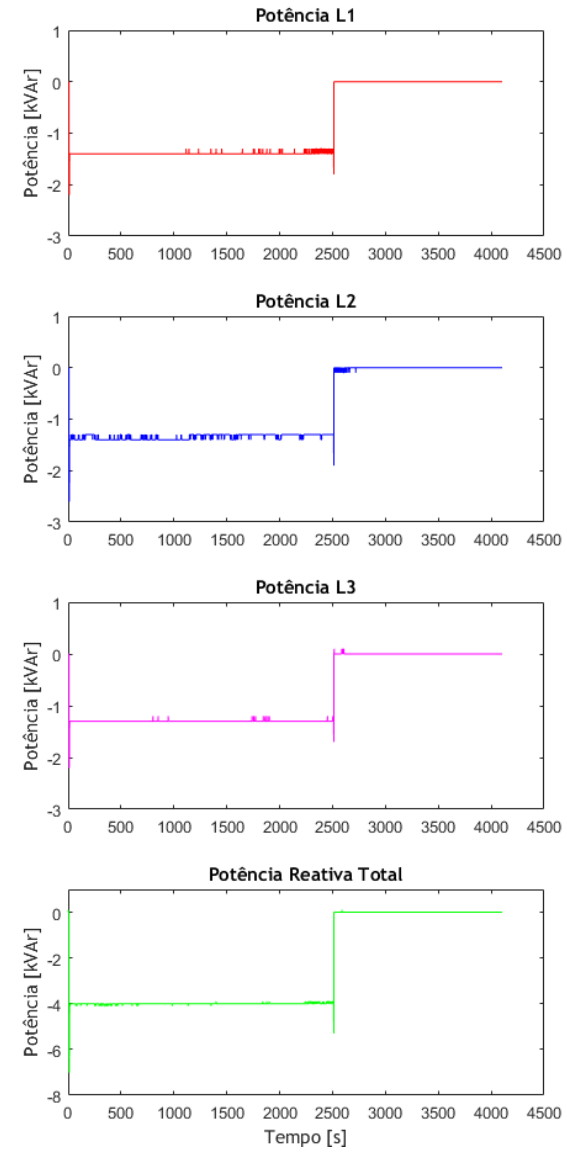
- Tensão



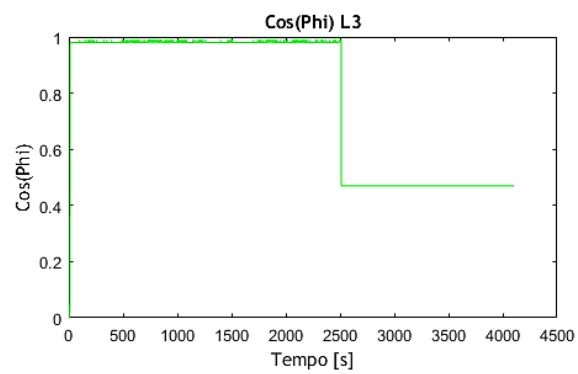
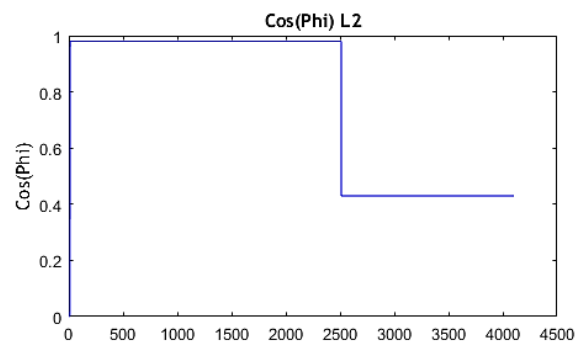
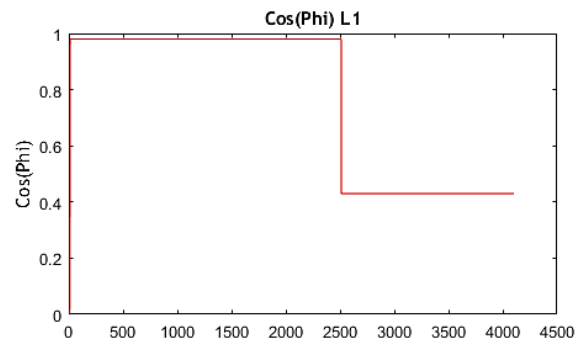
- Potência Ativa



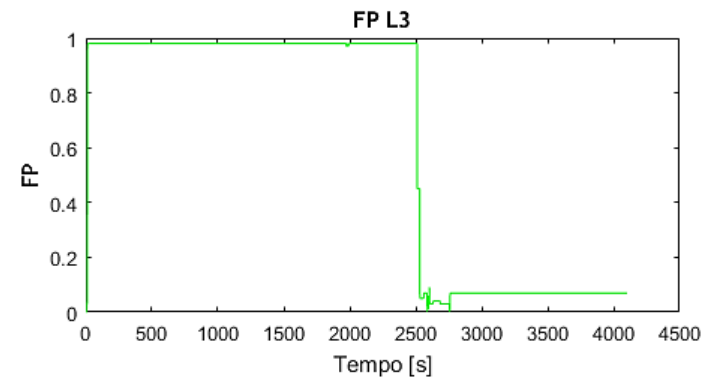
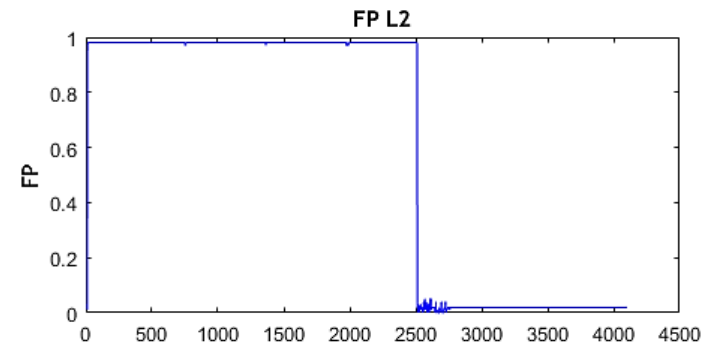
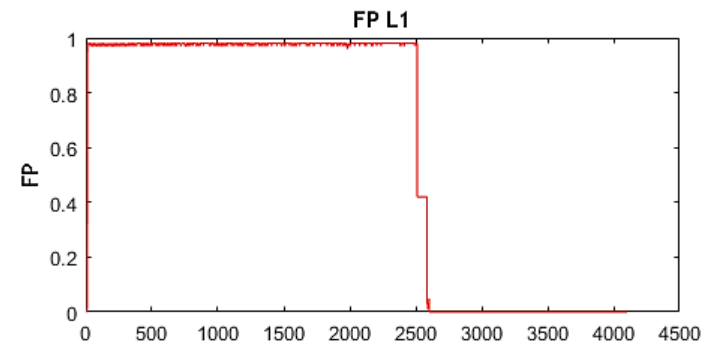
- Potência Reativa



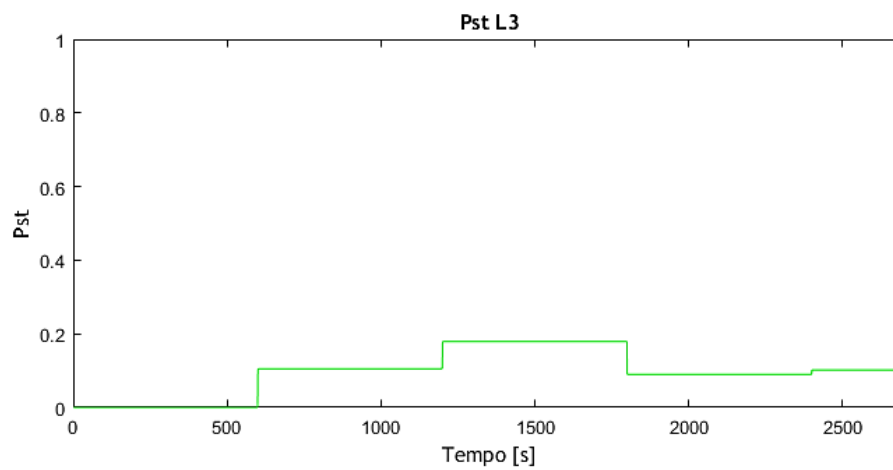
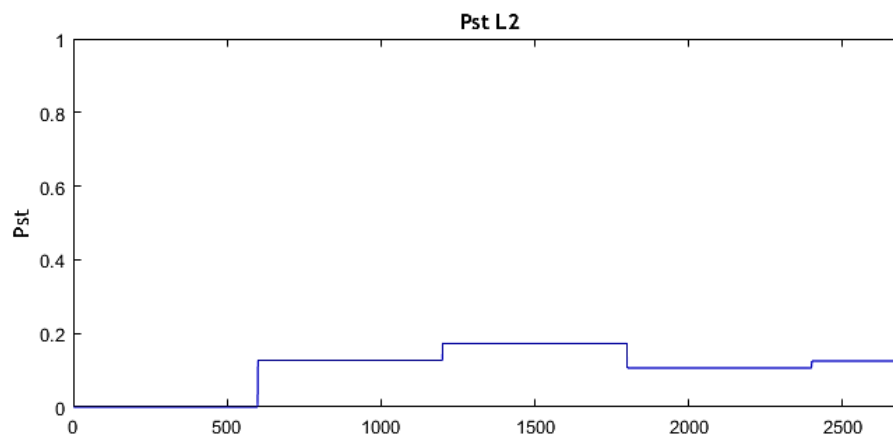
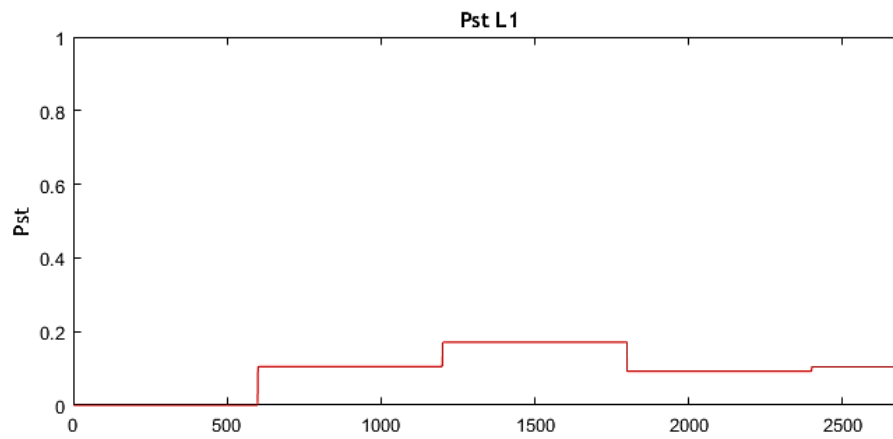
- **Cos(Phi)**



- **Fator de Potência**

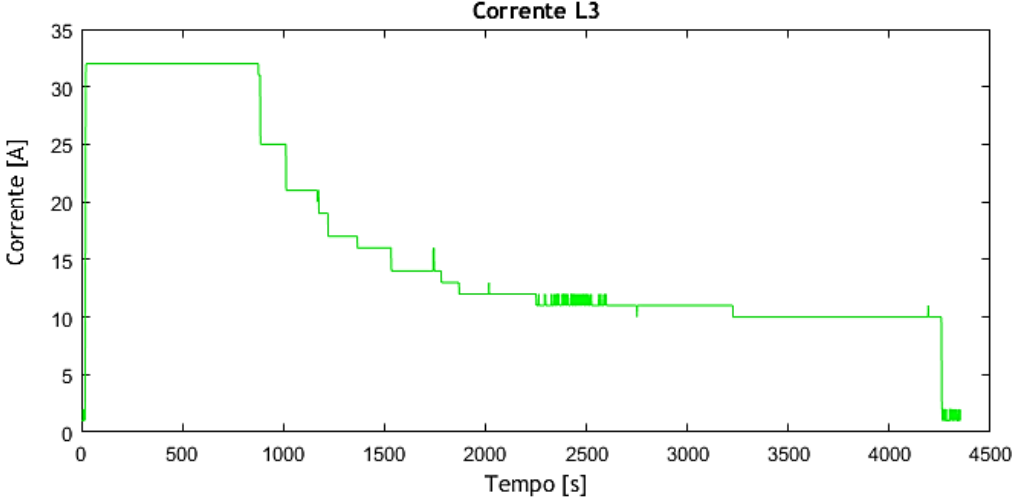
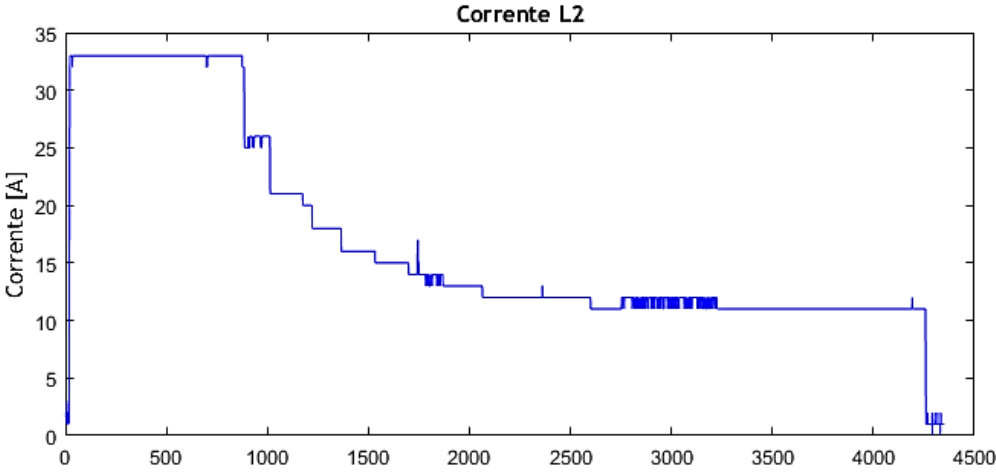
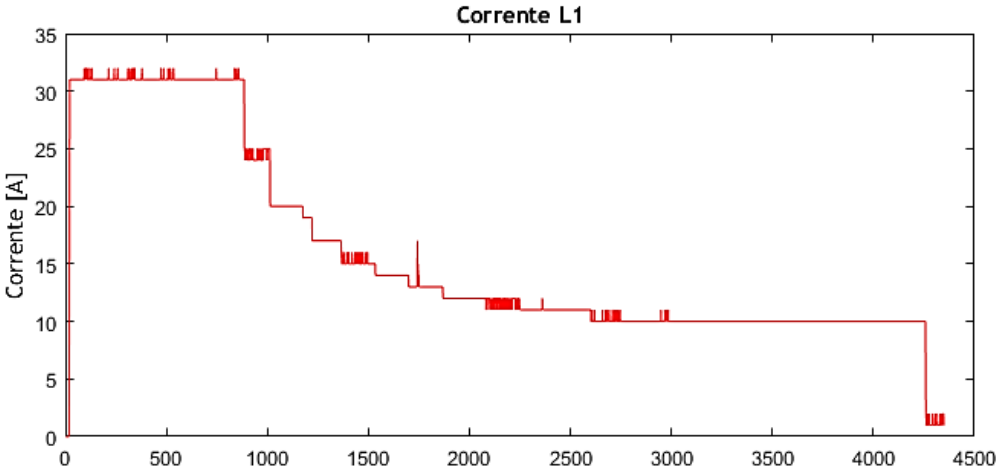


- Pst: severidade de curta duração

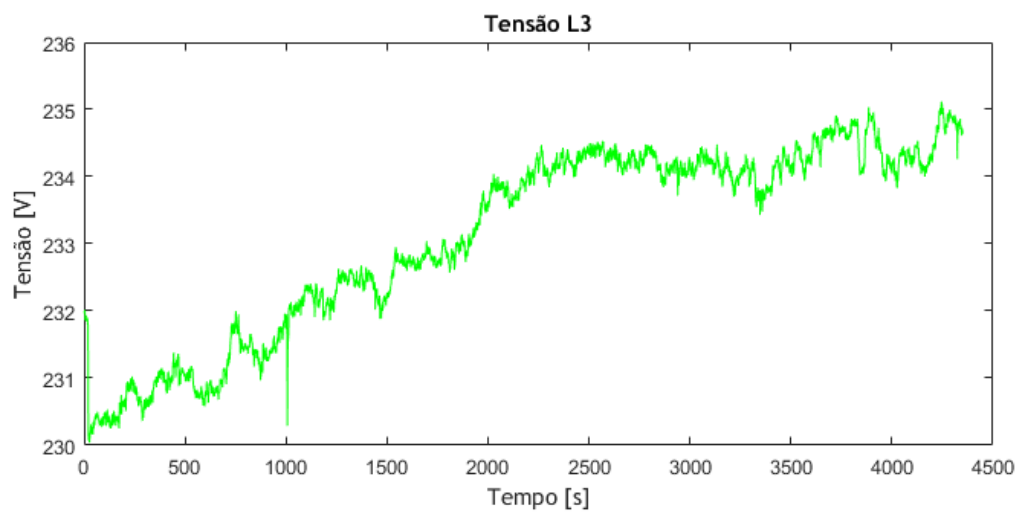
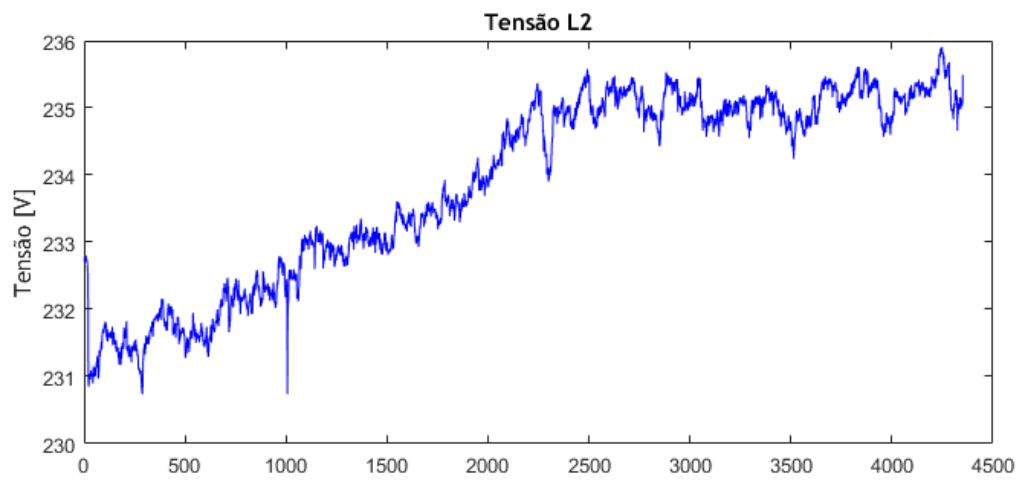
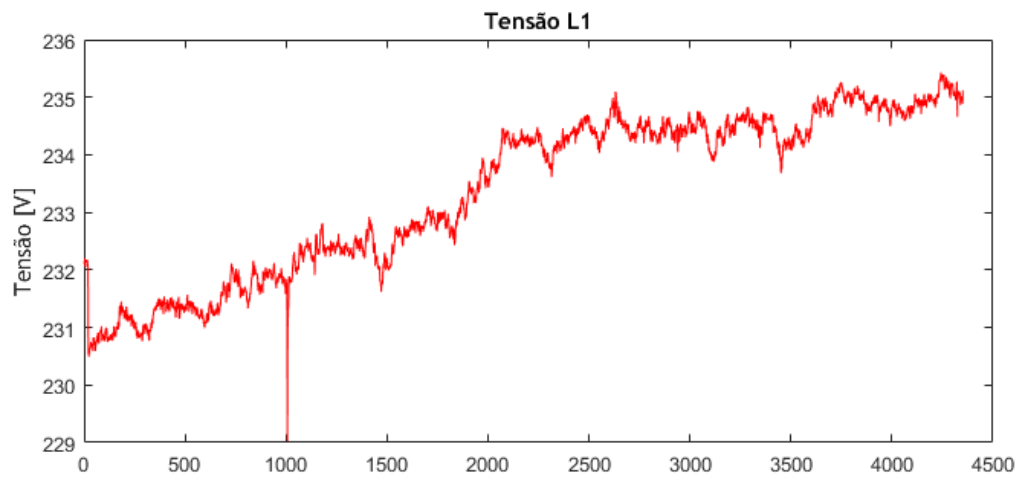


Anexo C: Gráficos para cada grandeza do Caso 3 - Carregamento 3

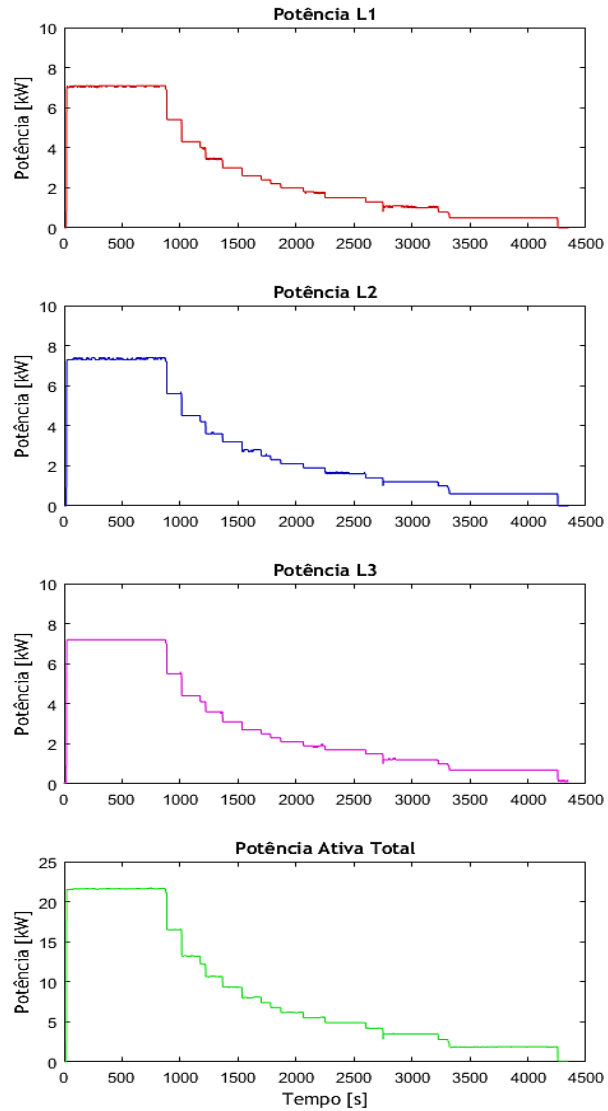
- Corrente



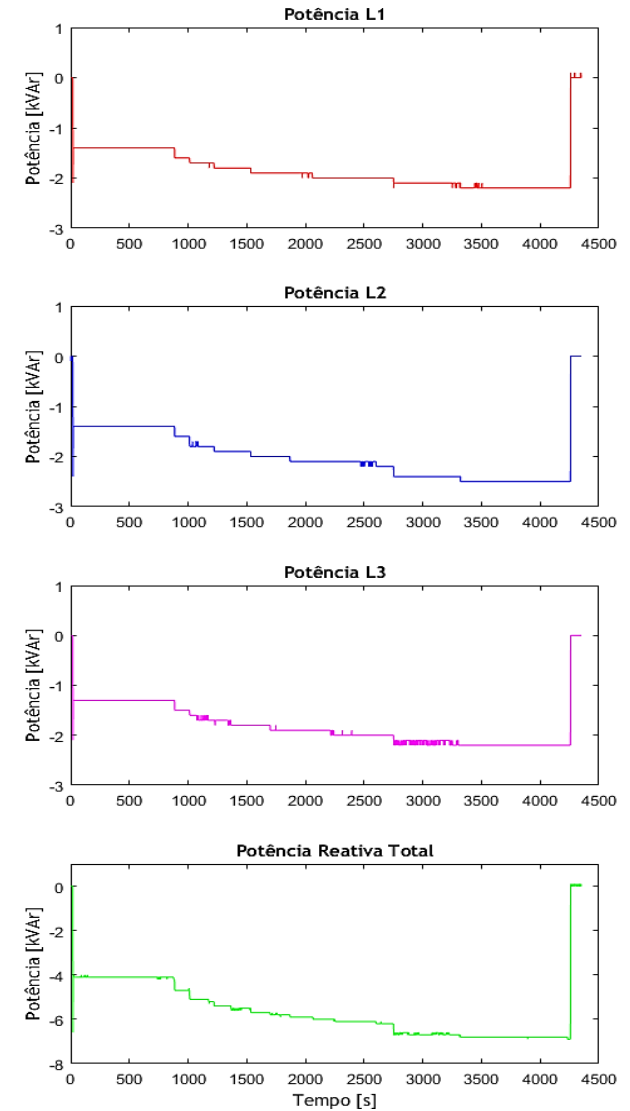
- Tensão



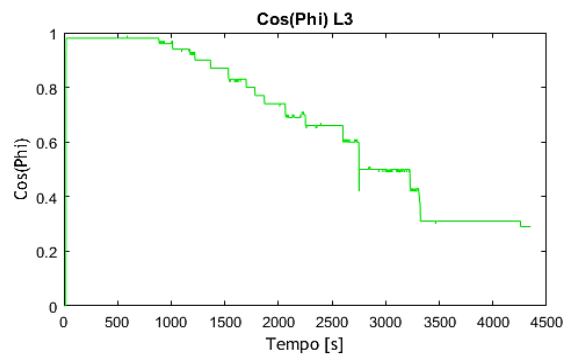
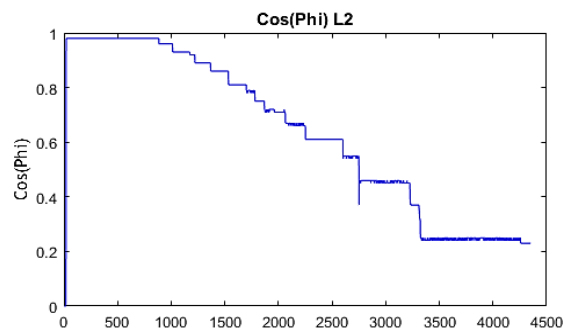
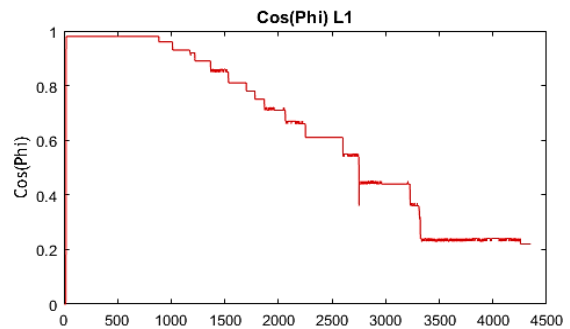
- **Potência Ativa**



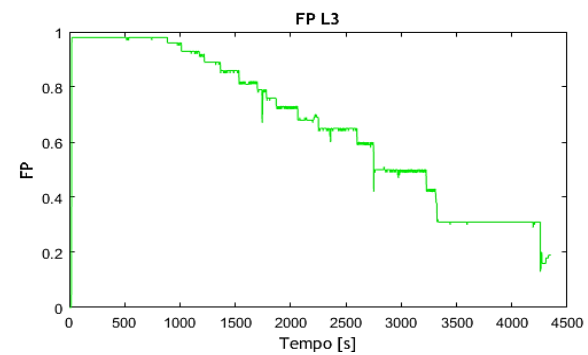
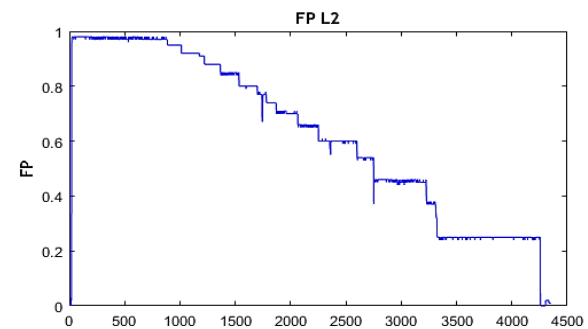
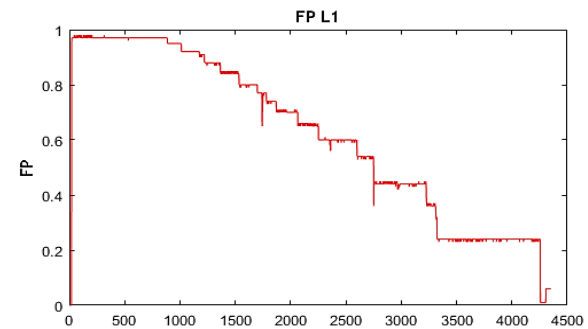
- **Potência Reativa**



- **Cos(Phi)**



- **Fator de Potência**



- Pst: severidade de curta duração

