



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**



# **Interação de Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos em Estações da Rede Ferroviária com Regeneração de Energia**

**JOÃO LUIS SALES RICARDO**  
(Licenciado em engenharia mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

**Orientadores:**

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

**Júri:**

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu Silva

Vogais:

Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

Dezembro de 2023





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**



## **Interação de Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos em Estações da Rede Ferroviária com Regeneração de Energia**

**JOÃO LUIS SALES RICARDO**

(Licenciado em engenharia mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

**Orientadores:**

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

**Júri:**

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu Silva

Vogais:

Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

Dezembro de 2023



## **Agradecimentos**

Gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão à minha família e aos meus dedicados orientadores pelo seu inabalável apoio e orientação ao longo desta jornada desafiadora na elaboração deste trabalho. O amor, encorajamento e compreensão constantes da minha família foram o alicerce que me permitiu alcançar este marco académico. Aos meus orientadores, agradeço por partilharem o vosso conhecimento, paixão e expertise, guiando-me com sabedoria e paciência ao longo deste percurso. Esta tese é uma conquista que partilho com todos vocês, e sou profundamente grato pelo vosso apoio incansável.



## RESUMO

A ferrovia representa 15% do consumo de energia do sector dos transportes. Apesar da implementação de tecnologias de regeneração de energia durante a travagem, apenas uma pequena porção é utilizada, sendo a maior parte dissipada na forma de calor. A crescente utilização de veículos elétricos e a desejada mobilidade integrada, torna as estações ferroviárias numa interface de pessoas, mercadorias, mas também energético, criando a oportunidade de utilizar a energia regenerada pela ferrovia na alimentação de veículos elétricos nos parques de estacionamento adjacentes às estações.

O presente trabalho tem como objetivo estudar numericamente os impactes energéticos da implementação de redes inteligentes em estações ferroviárias, que gerem a interação entre a frenagem regenerativa proveniente da ferrovia, a rede elétrica da estação e do estacionamento adjacente, integrando também um conjunto de baterias e painéis fotovoltaicos. Para isso desenvolveu-se uma ferramenta de simulação e análise de sistemas dinâmicos em Matlab Simulink, para modelar cada sistema individualmente, e posteriormente simular a sua interação tendo assim um programa modelar capaz de realizar vários casos de estudo, tendo em conta aspetos como os horários de chegada/partida de comboios, dimensão do parque de estacionamento e da estação.

Utilizando a Gare do Oriente e a estação de Corroios como casos de estudo, resultados indicam que a tração dos comboios representa a maior porção da energia consumida (cerca de 88%) o que traduz em 90MWh a 180MWh semanais dependendo da dimensão da estação sendo o restante consumo realizada pela carga de VE, e que possível obter através da frenagem regenerativa cerca de 20 MWh a 60 MWh semanais sendo possível reaproveitar 11% dessa energia utilizando SAEs.

**Palavras-chave:** *Ferrovia; Mobilidade elétrica; Painéis Fotovoltaicos; Travagem Regenerativa; Redes Inteligentes; Sistemas de Armazenamento de Energia; Eficiência Energética; Modelação Numérica.*



## ABSTRACT

The railway represents 15% of the energy consumption in the transportation sector. Despite the implementation of energy regeneration technologies during braking, only a small portion is utilized, with the majority being dissipated in the form of heat. The increasing use of electric vehicles and the desired integrated mobility make railway stations a hub for people, goods, and also energy, creating the opportunity to use the regenerated energy from the railway to power electric vehicles in the parking lots adjacent to the stations.

The present study aims to numerically investigate the energy impacts of implementing smart grids at railway stations, which manage the interaction between regenerative braking from the railway, the station's electrical grid, and the adjacent parking area, integrating a set of batteries and photovoltaic panels. To achieve this, a simulation and analysis tool for dynamic systems was developed in Matlab Simulink to model each system individually and subsequently simulate their interaction. This allows for a versatile modeling program capable of conducting various case studies, considering aspects such as train schedules, the size of the parking lot and the station, etc.

Using Gare do Oriente and Corroios station as case studies, the results indicate that train traction accounts for most of the energy consumption (about 88%), translating to 90 MWh to 180 MWh per week depending on the station's size. The remaining consumption is attributed to electric vehicle charging, and it is possible to obtain approximately 20 MWh to 60 MWh per week through regenerative braking, with the possibility of reusing 11% of that energy using energy storage systems (SAEs).

**Keywords:** *Railway; Electric Mobility; Photovoltaic Panels; Regenerative Braking; Smart Grids; Energy Storage Systems; Energy Efficiency; Numerical Modeling.*



## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

<b>VE</b>	Veículos elétricos
<b>SAE</b>	Sistema de armazenamento de energia
<b>PV</b>	Painel fotovoltaico
<b>CC</b>	Corrente contínua
<b>CA</b>	Corrente alternada
<b>BT</b>	Baixa tensão
<b>MT</b>	Media tensão
<b>SRE</b>	Sistemas de recuperação de energia
<b>SOC</b>	Estado de carga (Bateria)
<b>EDLC</b>	Condensador eletroquímico de dupla camada
<b>FW</b>	Volante de inércia



# Índice

<b>1.– INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1– Enquadramento .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2.– Objetivo .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 – Estrutura do Documento.....</b>	<b>4</b>
<b>2.– ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 – Rede Ferroviária .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 – Armazenamento .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 – Mobilidade elétrica .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 - Painéis fotovoltaicos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.5 – Smart Grids.....</b>	<b>33</b>
<b>3 – METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Desenvolvimento de ferramenta de avaliação energética, ambiental e económica do sistema.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.1 – Simulação do sistema.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2 – Simulação das cargas impostas pela ferrovia .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.3 – Simulação dos painéis fotovoltaicos .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.4 Simulação das cargas impostas pelos veículos elétricos .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.5 – Simulação do elemento de armazenamento da estação .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2 - Caso de estudo e definição de cenários .....</b>	<b>53</b>
<b>4 – RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 – Validação .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.1- Validação modelo cargas imposta pela ferrovia .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.2 – Validação do modelo bateria.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2 – Analise de Cenários .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.1 – Cenário 1-Base .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.1.1 – Estação do Oriente.....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.1.2 – Estação de Corroios.....</b>	<b>64</b>
<b>4.2.2 – Cenário 2,3,4 e 5 – Sistema completo .....</b>	<b>65</b>
<b>4.2.2.1 – Estação do Oriente.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2.2.2 – Estação Corroios.....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.3– Cenário 6,7 – Sem a alimentação da rede ferroviária .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.3.1 – Estação Oriente.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.3.2 – Estação de Corroios.....</b>	<b>79</b>
<b>4.2.4 Análise económica.....</b>	<b>81</b>
<b>5 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Locomotiva CC [12] .....	7
Figura 2 - Locomotiva CA [12] .....	8
Figura 3- Curva característica exemplo de um veículo ferroviário [15].....	9
Figura 4- Curva característica exemplo da frenagem de um veículo elétrico [15] .....	10
Figura 5 - Soluções para a recuperação de energia [7] .....	11
Figura 6- Exemplos de métodos estáticos de armazenamento de energia [20].....	13
Figura 7 – Sistema SMES e aplicação na rede ferroviária CC [22].....	14
Figura 8-Sistemas de ultra condensadores [22] .....	15
Figura 9 - Composição do sistema Flywheel [22] .....	15
Figura 10- Sistema Flywheel aplicado na rede Ferroviária CC [22] .....	16
Figura 11- Sistemas de baterias [22].....	16
Figura 12-Diferentes tecnologias para diferentes utilizações [23].....	17
Figura 13 - Comparação entre o tempo de descarga e a potência nominal dos diferentes sistemas de armazenamento de energia.[24] .....	18
Figura 14- Presente e futuro das baterias [25] .....	18
Figura 15- Tempo de vida de uma bateria em relação à profundidade de descarga [26] .....	19
Figura 16- Tipos de veículos elétricos [31] .....	21
Figura 17- Variação do valor global de irradiação [36].....	25
Figura 18- Representação das componentes constituintes da radiação solar [36] .....	26
Figura 19 – Somatório mensal da irradiação solar Difusa e Direta (Peniche) [37] .....	26
Figura 20- Irradiação global anual em Portugal [38].....	28
Figura 21- Ângulos para painéis solares[42] .....	28
Figura 22- Posição da terra ao longo do ano [43].....	29
Figura 23-Gráfico que relaciona o azimute e inclinação [44].....	30
Figura 24 - Célula fotovoltaica monocristalina[48].....	32
Figura 25-Célula fotovoltaica policristalina [49].....	32
Figura 26- Célula fotovoltaica de filme fino [50].....	33
Figura 27- Base do algoritmo de simulação .....	37
Figura 28- Arquitetura da rede construída.....	38
Figura 29- Algoritmo para o cálculo da potência consumida e regenerada por uma determinada locomotiva .....	39
Figura 30 - Curva característica tração (Adaptado de [9]) .....	43
Figura 31 - curva característica frenagem (Adaptado de [9]) .....	44
Figura 32- Distancia percorrida em função do tempo .....	45
Figura 33 - Irradiação solar media Portugal [38].....	46
Figura 34- Número de veículos elétricos a nível mundial [56].....	47
Figura 35 - Introdução Dados relativos aos veículos elétricos .....	49
Figura 36 – Algoritmo para simulação dos veículos elétricos .....	50
Figura 37 – Resultados VE referentes ao cenário 2.....	51
Figura 38 - Modelo de bateria utilizado. Fonte: [62].....	52
Figura 39 - Resultados obtidos por [14] .....	56
Figura 40- Relação de potência consumida pela ferrovia e distancia percorrida.....	56
Figura 41 - Curva de tensão típica com corrente oscilatória [45].....	58
Figura 42- Resultados modelo da bateria .....	59
Figura 43 - Input de potência no modelo da bateria .....	59
Figura 44- Cadência de chegadas/partidas Oriente.....	60
Figura 45 - Cadência de chegadas/partidas Corroios.....	61
Figura 46- Potência necessária da rede- Cenário 1 .....	62
Figura 47- Potência necessária da rede- Cenário 1(ampliação).....	62
Figura 48 - Potência regenerada cenário 1.....	63
Figura 49- Potência regenerada cenário 1(ampliação).....	63

Figura 50 - Potência regenerada (Vermelho); Potência necessária cenario1(Preto).....	64
Figura 51- Resultados painéis fotovoltaicos para os cenários 2,3,4,5 .....	66
Figura 52 - Potência solicitada à rede (a) e regenerada pela rede ferroviária (b) para o cenário 2	67
Figura 53 – Resultados referentes à potência do cenário 2.....	68
Figura 54 - Potência consumida VE para o cenário 2.....	68
Figura 55 - Potência debitada pela bateria no cenário 2 .....	69
Figura 56 - Potência debitada pela bateria no cenário 2 .....	69
Figura 57 - Potência debitada pela bateria (aplicação) .....	70
Figura 58-Comportamento da bateria: tensão e estado de carga .....	71
Figura 59-Comportamento da bateria corrente .....	71
Figura 60- Estado de carga do SAE referente ao cenário 2 .....	74
Figura 61 -Resultados potência necessária sem bat.; potencia regenerada e potência PV cenário 6 .....	76
Figura 62 – Resultados potência necessária com bat.; potencia VE e potência debitada pela bateria cenário 6.....	77
Figura 63 – Estado de carga da bateria cenário 6 .....	78
Figura 64 – Corrente debitada pela bateria cenário 6 .....	78
Figura 65- Resultados cenário 6 estação de pequenas dimensões .....	80
Figura 66 - resultados referentes a bateria- cenário 6.....	81

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Características de diferentes baterias utilizadas em VE [33], [34] .....	23
Tabela 2- Tempo e potência de carregamento para diferentes veículos elétricos [33], [34] .....	24
Tabela 3- U.S. DOE :Mapa para o desenvolvimento e implementação de tecnologias de Smart Grids [52].....	34
Tabela 4 - Cenários de carregamento veículos elétricos .....	49
Tabela 5 - Definição de Cenários .....	54
Tabela 6 - Características da máquina ferroviária e da via utilizadas no modelo criado .....	55
Tabela 7- Características da máquina ferroviária utilizada por [14].....	56
Tabela 8- Características da bateria [45] .....	57
Tabela 9 - Comparação cenário base entre as duas estações.....	64
Tabela 10- Características dos elementos referentes aos cenários 2 a 5 .....	65
Tabela 11 - Resultados referentes aos 4 cenários .....	72
Tabela 12- Característica dos componentes referentes à estação de pequenas dimensões .....	73
Tabela 13- Resultados referentes aos 4 cenários estação de pequenas dimensões .....	74
Tabela 14- características dos componentes referentes à estação de grandes dimensões .....	75
Tabela 15- Resultados cenário 6 e 7 estação de grandes dimensões .....	79
Tabela 16 – Consumo total cenários 6 e 7 estação de pequena dimensão .....	81
Tabela 17 - Custo de implementação de um SAE em MT [70].....	83
Tabela 18 - Custos dos diferentes sistemas.....	83
Tabela 19 – Análise económica .....	84

## **1.– INTRODUÇÃO**

O início deste documento apresenta dois subcapítulos, cuja finalidade é introduzir, destacar a importância e contextualizar o tema escolhido, além de estabelecer os objetivos da pesquisa.

### **1.1– Enquadramento**

A energia é indispensável para o desenvolvimento e bom funcionamento da sociedade, estando a sua produção maioritariamente associada à queima de combustíveis fósseis e originando riscos ambientais que se têm de contornar. A existência deste problema levou à realização de vários acordos de dimensão ambiental, sendo a produção de energia por meios renováveis uma das soluções para o aprovisionamento energético, contribuindo para reduzir a dependência do mercado do petróleo que por sua vez é bastante instável. Neste sentido, a União Europeia tem vindo a evoluir relativamente à promoção de energias renováveis, detendo 40% das patentes energéticas renováveis e 44% da capacidade de produção de energia renovável no mundo [1].

Por outro lado, a alteração comportamental, nomeadamente associada ao transporte pode também contribuir para a redução de consumo de energia, emissão de CO<sub>2</sub> e poluentes locais. Tomando como exemplo o Japão, a emissão de dióxido de carbono associada ao transporte (em passageiro/quilómetro) é de 164 gCO<sub>2</sub> para os veículos a combustão, 108 gCO<sub>2</sub> para a aviação, enquanto para o sector ferroviário é de apenas 19 gCO<sub>2</sub> [2]. Estudos afirmam que o transporte ferroviário efetua 28% das necessidades de transporte e apenas consome 7% da energia associada ao sector dos transportes, daí que a aposta para este sector se assuma como uma alternativa viável do ponto de vista energético e ambiental [2].

Com as restrições a nível das emissões de gases poluentes cada vez mais apertadas e a possível mudança do paradigma energético, existe a necessidade de tornar o sector dos transportes mais sustentável, sendo imperativo para atingir as metas europeias pretendidas. Por exemplo, no sector rodoviário, tem-se verificado um aumento da mobilidade elétrica [3][4] que leva a que seja necessária uma adaptação das infraestruturas a essa realidade. Por outro lado, no sector ferroviário é necessário eletrificar todas as linhas, assim como fazer com que estas sejam o mais eficientes

possível, criar uma interação entre os diferentes sectores em conjunto com fontes localizadas renováveis, com o intuito de aproveitar ao máximo a energia que por outro meio iria ser desperdiçada. E criar redes de transportes eficientes e convenientes capazes de competir com outras soluções dependentes de combustíveis fósseis [3] [4].

O aumento da mobilidade elétrica, com a adoção de veículos elétricos (VE) e híbridos plug-in, está a transformar a indústria automóvel e a forma como as pessoas se deslocam. Para que esta transição seja bem-sucedida e a mobilidade elétrica se torne a opção mais normal e conveniente, é essencial que haja adaptações significativas nas infraestruturas e nas políticas de transporte. A seguir, apresentam-se algumas considerações de relevância significativa [5]:

**Rede de Carregamento:** A infraestrutura de carregamento é fundamental. É necessário expandir e melhorar as redes de estações de carregamento para tornar o carregamento de VE fácil e acessível em todo o lugar. Isso inclui carregadores públicos em áreas urbanas, bem como estações de carregamento em autoestradas para viagens de longa distância.

**Padrões Universais:** É importante que haja padrões universais de carregamento para que os proprietários de VE possam utilizar diferentes estações de carregamento sem problemas. A padronização facilita a interoperabilidade entre diferentes fabricantes de veículos e sistemas de carregamento.

**Incentivos Fiscais:** Políticas governamentais, como incentivos fiscais e subsídios para a compra de VE, podem acelerar a adoção desta tecnologia. Isso torna os VE mais acessíveis e atraentes para os consumidores.

**Estacionamento e Carga:** As infraestruturas também devem ser adaptadas para permitir que os proprietários de VE carreguem os seus veículos em casa com facilidade. Isso pode envolver a instalação de carregadores residenciais em garagens e áreas de estacionamento.

**Educação:** É importante educar o público sobre os benefícios da mobilidade elétrica, como a redução das emissões de poluentes e a economia de custos a longo prazo. Isso pode aumentar a aceitação e o interesse em adotar VE.

**Planeamento Urbano Inteligente:** As cidades podem incorporar a mobilidade elétrica nos seus planos de desenvolvimento urbano, incentivando o uso de VE por meio de faixas dedicadas, estacionamento preferencial e outras medidas que tornem a mobilidade elétrica mais conveniente nas áreas urbanas.

**Gestão de necessidade de Energia:** À medida que mais VE estão ligados à rede elétrica, é importante gerir a necessidade de energia de forma eficaz para evitar

sobrecargas. Isso pode envolver a implementação de sistemas inteligentes de carregamento e armazenamento de energia.

**Energia Renovável:** Promover o uso de energia renovável, como solar e eólica, para alimentar a rede de carregamento de VE contribuirá para reduzir ainda mais as emissões de carbono associadas à mobilidade elétrica.

Em resumo, o aumento da mobilidade elétrica é uma tendência importante para reduzir a poluição do ar e a dependência de combustíveis fósseis. No entanto, para tornar esta transição bem-sucedida, é fundamental que haja investimentos em infraestruturas e políticas que tornem a mobilidade elétrica conveniente e acessível para todos. Isso envolve a criação de uma rede de carregamento robusta, a padronização de sistemas, planejamento urbano inteligente e a gestão da necessidade de energia.

A transição para a mobilidade elétrica não se limita apenas aos veículos de passageiros, mas também se estende ao setor ferroviário, desempenhando um papel crucial na busca por soluções mais sustentáveis. A eletrificação das linhas ferroviárias é uma parte integral dessa transformação, que visa reduzir as emissões de poluentes e a dependência de combustíveis fósseis. À medida que se desenvolve uma infraestrutura de carregamento robusta para veículos elétricos, essa mesma infraestrutura pode ser adaptada para receber energia de estações ferroviárias através da frenagem regenerativa de comboios, permitindo a criação de uma rede de transporte mais eficiente do ponto de vista energético.

## 1.2.– Objetivo

O objetivo deste trabalho é quantificar a energia gerada através da frenagem regenerativa de veículos ferroviários e investigar como essa energia pode ser reaproveitada de maneira eficaz. Pretende-se desenvolver uma solução que envolva a integração da energia regenerada na ferrovia numa rede inteligente. Isso seria possível através da combinação com outras fontes de energia, como painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia, localizados em estações ferroviárias. O objetivo final é transformar essas estações em unidades de produção de energia.

O estudo visa avaliar como a energia obtida com a regeneração é atualmente utilizada na rede ferroviária e analisar numericamente um possível sistema que permita um aproveitamento mais eficiente desta energia. Além disso, pretende-se verificar a viabilidade desta abordagem em termos de alimentação de postos de carregamento de veículos elétricos nas proximidades das estações ferroviárias, bem como a alimentação de

outros elementos, como a infraestrutura elétrica da estação ou até mesmo o fornecimento de energia para a rede urbana.

É essencial realizar essa análise em estações com diferentes níveis de tráfego ferroviário, desde aquelas com grande movimento até as de tráfego reduzido. O objetivo é determinar se a integração desse sistema faz sentido não apenas economicamente, mas também do ponto de vista ambiental e energético.

### **1.3 – Estrutura do Documento**

Este trabalho está dividido em quatro capítulos sendo estes:

**Estado da arte** - Onde serão abordadas as tecnologias e conceitos relevantes para este estudo começando pela rede ferroviária e frenagem regenerativa, seguido por sistemas de armazenamento de energia, veículos elétricos, painéis fotovoltaicos e por fim rede inteligentes.

**Metodologia- Onde** e explicado de forma detalhada como foi realizada a ferramenta numérica para a obtenção dos resultados

**Análise de resultados** – onde são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos neste estudo

Por fim um capítulo de conclusões retiradas dos resultados obtidos assim uma proposta de trabalho futuro.

## **2.– ESTADO DA ARTE**

O conceito de recuperação de energia a partir da travagem no setor dos transportes existe há algum tempo. Ao utilizar a frenagem regenerativa para converter a energia cinética do veículo em eletricidade, o setor dos transportes tem vindo a desenvolver formas de reutilizar essa energia. Por exemplo, os veículos ligeiros híbridos podem ser até 30% mais eficientes no consumo de combustível do que os veículos equivalentes a combustão [6].

No caso dos comboios elétricos, também é comum utilizar a frenagem regenerativa para recuperar parte da energia. No entanto, ao contrário dos veículos híbridos, os comboios geralmente não são concebidos com sistemas de armazenamento de energia a bordo. Isso significa que a energia regenerada durante a frenagem de um comboio só pode ser aproveitada se houver outro comboio a acelerar nas proximidades para receber essa energia através da catenária, caso contrário essa energia será dissipada através de resistências. Esta limitação pode resultar no desperdício de energia quando não há outra composição de comboio para aproveitar essa energia [7].

Algumas empresas e entidades, como a Autoridade de Transporte do Sudeste da Pensilvânia, estão a explorar sistemas de armazenamento de energia (SAE) para resolver este problema [8]. Estes sistemas capturam a energia gerada durante a frenagem que normalmente seria dissipada em forma de calor e armazenam-na. Em seguida, esta energia armazenada pode ser fornecida de volta aos comboios quando necessário, frequentemente para auxiliar na tração quando a procura por energia é elevada.

O uso de sistemas de armazenamento de energia em comboios não só melhora a eficiência, mas também contribui para a gestão inteligente de energia nos sistemas ferroviários, tornando o transporte ferroviário mais sustentável e eficiente do ponto de vista energético.

### **2.1 – Rede Ferroviária**

O transporte ferroviário é uma das formas mais antigas de transporte e, ao longo da sua história, passou por avanços significativos na tecnologia. Inicialmente, as locomotivas eram movidas a vapor, obtido a partir de fontes fósseis, como carvão. Estas locomotivas

desempenharam um papel fundamental na Revolução Industrial e no desenvolvimento das ferrovias.

No entanto, o transporte ferroviário está a passar por mudanças importantes nos tempos modernos. Os sistemas de tração elétrica estão a tornar-se mais populares devido à sua eficiência e menor impacto ambiental. A eletrificação das linhas ferroviárias, através da instalação de catenárias e a utilização de locomotivas elétricas, tem-se tornado uma prioridade em muitos países da União Europeia e em todo o mundo [9].

Esta transição para a eletrificação traz benefícios significativos, incluindo a redução das emissões de poluentes locais e de gases de efeito estufa, bem como a melhoria da eficiência energética. Além disso, locomotivas elétricas costumam ser mais silenciosas e requerem menos manutenção do que aquelas que utilizam motores a diesel ou vapor.

Apesar do declínio na utilização de locomotivas movidas a combustíveis fósseis, é importante notar que algumas áreas geográficas ainda dependem delas, especialmente em regiões onde a eletrificação das linhas ferroviárias pode ser mais desafiadora devido a questões logísticas ou geográficas. No entanto, a tendência global é claramente em direção à eletrificação e ao uso de fontes de energia mais limpas no transporte ferroviário, como parte dos esforços para tornar o setor mais sustentável do ponto de vista ambiental.

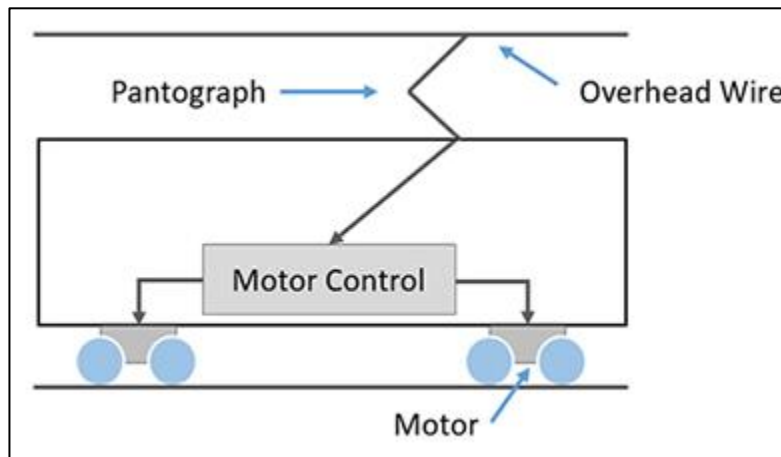
Os sistemas de tração elétrica são mais baratos de operar, mais limpos em termos ambientais, superiores em termos da quantidade de binário que conseguem aplicar e possibilitam a produção de energia elétrica através da frenagem regenerativa, que será um objeto de estudo deste trabalho [10].

Os veículos de tração elétrica necessitam sempre de um sistema que forneça energia em todo o seu percurso, podendo ser de corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) ou sistemas compostos. Os sistemas de alimentação da rede ferroviária estão normalmente ligados a redes transmissão e distribuição de energia por meio de subestações. No caso de redes CC, estas subestações incluem transformadores e retificadores; no caso de redes CA estas subestações incluem apenas um transformador e em alguns casos quando a frequência da rede de distribuição não é compatível com a rede ferroviária existem também conversores de frequência [10], [11].

## Sistema de eletrificação CC

A escolha de um sistema CC apresenta diversas vantagens como o espaço e o peso, a rápida aceleração e frenagem fornecida pelos motores elétricos CC, mais baratos e com menos consumo quando comparados com o sistema CA [10].

Em sistemas CC, a tensão AC retirada da rede de distribuição é reduzida e retificada nas subestações. Atualmente as redes CC usam tensões da ordem dos 300V até aos 3000 V, que é posteriormente fornecida aos motores da locomotiva [10][11].



*Figura 1-Locomotiva CC [12]*

Devido ao elevado binário produzido por motores CC estes são geralmente empregues em comboios pesados que necessitam de acelerações rápidas e frequentes. Motores CC também consomem menos energia quando comparados com equipamentos CA, no entanto devido à natureza da corrente CC as perdas de carga são significativas e é necessário que sejam construídas subestações com intervalos muito curtos, assim como os cabos necessários para transportar a energia, devido as correntes mais elevadas, têm de ser maiores e mais pesados dos que os usados para o sistema CA [10].

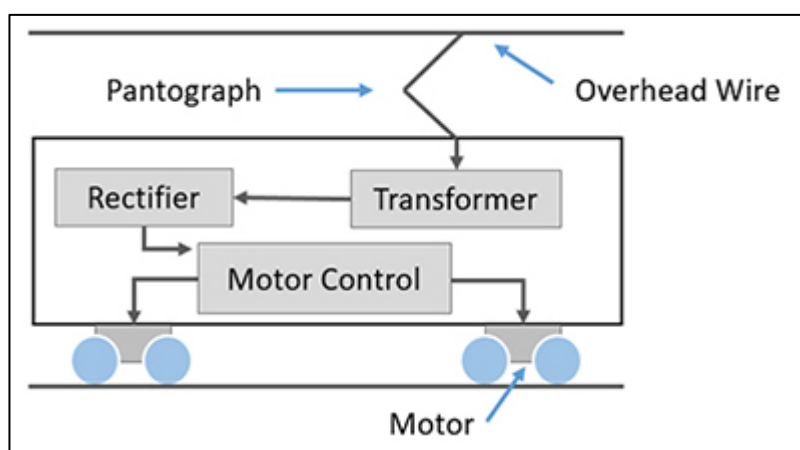
## Sistema de eletrificação corrente alternada (CA)

O sistema de eletrificação CA tem-se tornado mais comum, sendo utilizado em sistemas de tração devido a várias vantagens como a disponibilidade que existe atualmente de tensão CA que é facilmente amplificada ou reduzida, facilitando o controlo dos motores CA, este sistema ao contrário do sistema CC devido á sua elevada tensão na linha, o que resulta em correntes mais baixas possibilitando o uso de cabos de menor diâmetro o que leva a resistências mais baixas permitindo aumentar a distancia entre subestações devido a

menor perda de carga na linha. A rede distribuição do sistema CA pode ser de fase única, trifásico ou composto [13].

Os sistemas CA trifásicos usam motores de indução trifásica para mover as locomotivas, dimensionadas para uma tensão de 3.3 kV e 16.7 Hz, este sistema necessita de dois condutores aéreos, e os carris funcionam como terceira fase, levando a problemas na implementação deste sistema em cruzamentos de linha [10][11].

Os sistemas de fase única têm uma alimentação que pode variar entre 11kV e 25 kV com frequências a variar entre os 16.7Hz e 50Hz sendo os mais utilizado o sistema a 25kV e 50Hz, este é usado para equipamentos pesados e linhas principais pois não é necessário regular a frequência. A Figura 2 mostra um exemplo de um sistema composto em que a corrente CA é convertida para CC com o objetivo de alimentar um motor CC.



*Figura 2 - Locomotiva CA [12]*

Uma grande parte dos sistemas de potência da rede ferroviária partilham algumas características que tornam o uso de uma rede inteligente importante. O fator que mais difere numa rede ferroviária para outra é o facto de os comboios, que são a maior parte da carga, terem a possibilidade de efetuar frenagem regenerativa e assim fornecer energia a rede durante um certo período. No momento da frenagem, a carga fornecida de volta ao sistema pode chegar a valores da ordem dos 8 – 10 MW em poucos segundos pelo que à rede a elétrica tem de estar preparada para gerir estas cargas. Por outro lado, os caminhos ferroviários atravessam grandes distâncias pelo que se podem deparar com variados sistemas elétricos no seu percurso, um controlo inteligente deve ter em conta estes fatores de modo a manter a sua fiabilidade mesmo em redes com menos capacidades [12] [14].

De modo a se obter um modelo da energia total que estes equipamentos fornecem à rede é necessário realizar uma análise dos esforços envolvidos na movimentação dos comboios, estes são:

$E_{\text{tração}}$  – Esforço de tração

$E_{\text{frenagem}}$  – Esforço de frenagem

No caso dos esforços de tração ( $E_{\text{tração}}$ ) para qualquer veículo ferroviário com tração elétrica é possível obter as suas características mecânicas através de uma curva  $F(v)$  expressa na Figura 3 em que  $F$  indica corresponde a força de tração que a máquina ferroviária precisa de exercer para atingir uma determinada velocidade  $V$ . É de notar que através de uma curva deste tipo é possível definir a capacidade de utilização do veículo através da área limitada pela curva característica mecânica  $F(v)$ , pode-se também verificar o ponto de regime contínuo com força de tração e velocidade  $F_n$  e  $V_n$  respetivamente.

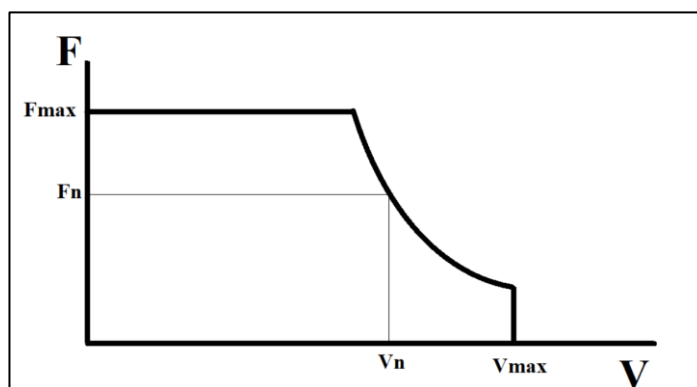


Figura 3- Curva característica exemplo de um veículo ferroviário [15]

As curvas características de diferentes máquinas podem ter características iguais, mesma potência em regime contínuo e a mesma área, mas mesmo assim terem funções diferentes. Por exemplo uma máquina que se destine a transporte de passageiros tem uma menor força de tração e maior velocidade enquanto uma máquina que se destine a transporte de mercadoria tem uma maior força de tração e menor velocidade [12].

No que diz respeito aos esforços de frenagem ( $E_{\text{frenagem}}$ ) e a regeneração de energia pode-se também considerar uma curva característica de esforço em função da velocidade, em que a energia regenerada é dada pela multiplicação da força de frenagem pela velocidade, aplicando um determinado coeficiente causado pelo rendimento próprio equipamento. A Figura 4 mostra o exemplo de uma curva característica de freio dinâmico com recuperação.

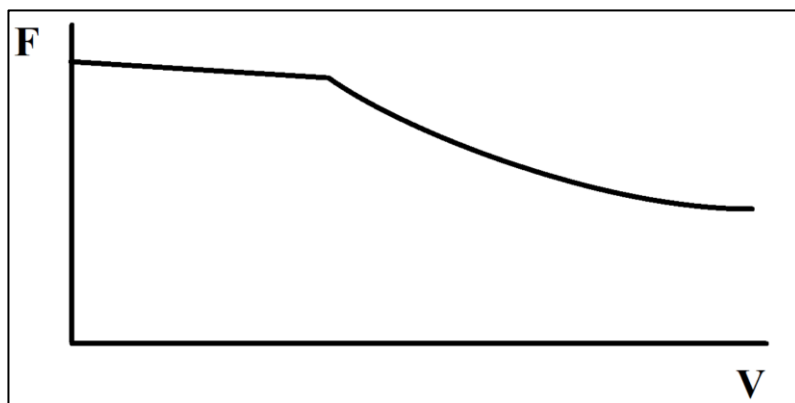


Figura 4- Curva característica exemplo da frenagem de um veículo elétrico [15]

A frenagem regenerativa é um método que utiliza a energia mecânica existente no veículo para produzir energia elétrica, para a utilização em outras cargas. Existem dois métodos de frenagem em sistemas de tração: frenagem dinâmica ou elétrica e a mais tradicional frenagem por fricção [13].

Na frenagem dinâmica, num certo estágio da viagem a corrente na armadura do motor é invertida de modo que este exerça um binário na direção oposta ao movimento assim motor de tração funciona como gerador, a corrente gerada pode ser utilizada de duas formas distintas sendo estas **frenagem reostática** e **frenagem regenerativa** [13]:

A frenagem reostática a corrente gerada é dissipada em bancos de resistências, que por sua vez irá abrandar o comboio; por outro lado, quando se aplica a frenagem regenerativa, os motores de tração transformados em geradores, fornecem corrente de volta a catenária que pode ser reutilizada. Tanto comboios elétricos como locomotivas a diesel podem ser equipadas com um sistema de frenagem dinâmica, no entanto torna-se mais eficiente quanto mais frequente são as paragens [13].

Atualmente o que se pode poupar com a frenagem regenerativa está diretamente interligada com a possibilidade de na mesma rota existir outra locomotiva pronta para receber essa energia. Tomando como exemplo uma estação muito movimentada, esta energia tem uma taxa de utilização de 15% [16]. Uma das soluções para aumentar este valor é implementar formas de armazenamento nas estações (ver 2.2). A frenagem dinâmica reduz a necessidade de frenagem convencional por fricção reduzindo assim os custos de manutenção associados. Teoricamente a frenagem dinâmica é capaz de substituir por completo a frenagem por fricção do comboio, sendo esta apenas utilizada para emergências, no entanto quando a velocidade é muito reduzida, entre 10-20 km/h a

frenagem dinâmica é muito pouco eficiente pelo que terá de se recorrer á frenagem convencional para levar o comboio a uma paragem total [13].

Relativamente à recuperação da energia resultante da frenagem de composições ferroviárias, várias abordagens estão a ser investigadas na literatura [17][18]. Até à data, as abordagens mais utilizadas são sistemas de recuperação de energia (SRE) a bordo, e SRE instalados ao longo da via. No caso dos SRE a bordo (OERS- Onboard Energy recovering system), o sistema dedicado a armazenar a energia cinética devido à frenagem está instalado a bordo do comboio, com claras vantagens como a possibilidade de reutilizar imediatamente a energia recuperada para o abastecimento do sistema de propulsão da própria composição e a conseqüente melhoria em termos de economia de energia para um determinado veículo. No entanto, o uso deste sistema com capacidade suficientemente grande inevitavelmente causa um aumento no volume e no peso do veículo ferroviário e, portanto, a energia total consumida irá aumentar, assim como é necessário espaço adicional a bordo para albergar este sistema.

Por outro lado, os SRE instalados ao longo da via (WERS-wayside energy recovery systems) não têm impacto no peso e volume do veículo, mas exigem que infraestruturas elétricas adequadas sejam construídas ao longo da via, como sistemas estacionários de recuperação de energia (SERS) ou subestações ferroviárias reversíveis, conforme resumido na Figura 5 [17][18].

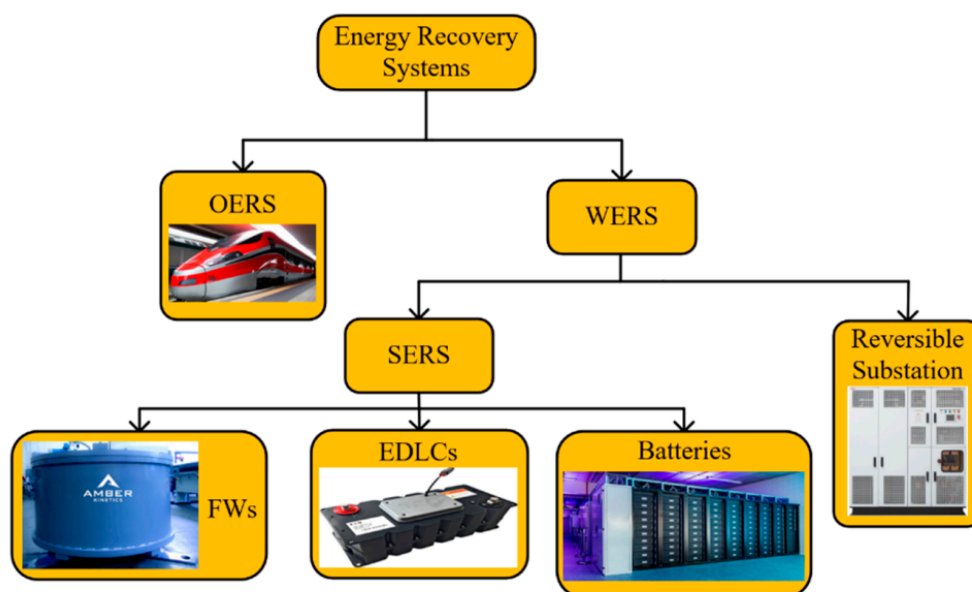


Figura 5 - Soluções para a recuperação de energia [7]

No caso das estações reversíveis não é necessário a instalação de um sistema de armazenamento de energia, pois a energia fornecida pelo comboio durante a frenagem é diretamente fornecida em média tensão para a rede de distribuição. No entanto devido à característica impulsiva do processo de frenagem, a energia recuperada durante esse período pode apresentar flutuações e picos que podem ser problemáticos para a operadora da rede de distribuição elétrica. Essas variações repentinas no fornecimento de energia podem comprometer a estabilidade da rede. A instalação de um sistema de armazenamento de energia de curto prazo atua como um intermediário, absorvendo a energia recuperada durante a frenagem e liberando-a de forma controlada na rede.

As soluções do tipo SERS são as mais consideradas para resolver a questão da recuperação de energia, e para isso o uso de condensadores eletrostáticos de dupla camada tem sido amplamente investigado com o objetivo de aumentar a eficiência energética, estabilidade de tensão destes equipamentos [19]. Os condensadores eletrostáticos de dupla camada são caracterizados pela sua elevada potência e alto número de ciclos de carga/descarga (cerca de, 200.000). No entanto, esta solução resulta em altos custos de investimento e baixa densidade de energia.

Outra solução que está a ser frequentemente considerada é baseada no uso de volantes de inércia, que possuem uma vida útil de cerca de 20 anos e uma eficiência de 90% a 95%. Comparado aos condensadores eletrostáticos de dupla camada, os volantes de inércia mostram uma densidade de energia mais alta e número muito maior de ciclos de carga/descarga (superior a 1.000.000), mas estes têm uma densidade de potência significativamente reduzida e uma grande necessidade de manutenção.

Uma solução mais económica para recuperar e armazenar a energia resultante da frenagem baseia-se no uso de baterias de células eletroquímicas, principalmente células de lítio, uma vez que esta solução é reconhecida por ser capaz de armazenar maiores quantidades de energia e ter menor tempo de resposta, quando comparado com os restantes [18].

## **2.2 – Armazenamento**

Os sistemas de armazenamento de energia atualmente empregados no sector ferroviário têm como objetivo otimizar a estabilidade da tensão fornecida aos comboios, neste capítulo serão abordados outros sistemas de armazenamento de energia que permitem

o aproveitamento da energia regenerada não só para maximizar a eficiência dos equipamentos, mas também para armazená-la e redistribuí-la para outras aplicações. O propósito deste aproveitamento da energia regenerada é reduzir a necessidade da frenagem reostática, minimizando, assim, as perdas de energia na forma de calor reutilizando essa energia. É importante notar que existem diversas categorias de sistemas de armazenamento de energia, abrangendo tecnologias mecânicas, eletroquímicas, químicas e elétricas, conforme destacado na Figura 6.

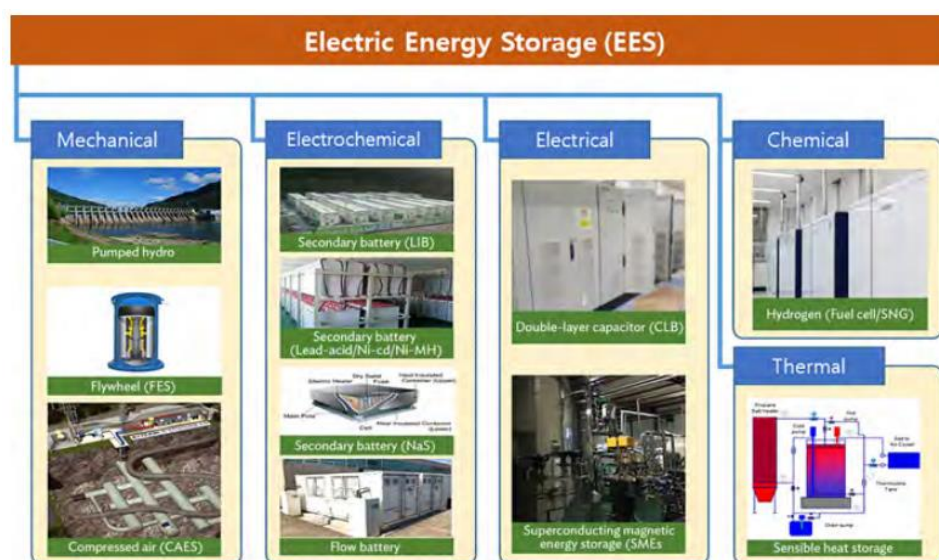


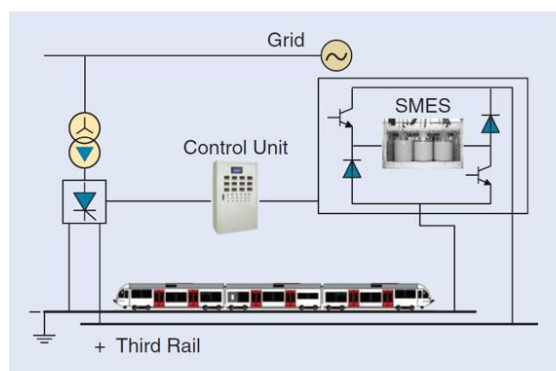
Figura 6- Exemplos de métodos estáticos de armazenamento de energia [20]

Dos métodos mencionados na Figura 6, sistemas de armazenamento como centrais hidroelétricas, Armazenamento de Ar Comprimido Energizado (CAES), produção de hidrogénio e armazenamento de calor não são relevantes para o estudo realizado neste trabalho, pois a sua aplicação numa rede ferroviária não seria prática.

### Sistema de armazenamento de energia magnética através de supercondutores

O Sistema de Armazenamento de Energia Magnética com supercondutores (SMES) é composto por enrolamentos supercondutores, recipientes criogénicos, equipamentos de refrigeração, um inversor e sistemas de medição e controlo [13]. Este sistema armazena energia num campo magnético gerado pela passagem de uma corrente contínua (CC) através de um enrolamento supercondutor. Ao contrário dos enrolamentos tradicionais, onde uma grande parte da energia é perdida na forma de calor devido à resistência elétrica, nos sistemas SMES, os cabos são feitos de materiais supercondutores como mercúrio, vanádio e ligas de nióbio-titânio. Quando arrefecidos a temperaturas criogénicas abaixo da temperatura crítica, permitem que a corrente elétrica flua quase sem resistência,

possibilitando o armazenamento de energia por longos períodos. A Figura 7 mostra um exemplo de um SMES e a sua aplicação na rede ferroviária CC [21].



*Figura 7 – Sistema SMES e aplicação na rede ferroviária CC [22]*

O sistema SMES é capaz de armazenar energia com uma eficiência superior a 95%, oferece uma grande capacidade e resposta rápida, bem como manutenção fácil, uma vez que as únicas partes móveis estão no sistema de refrigeração. No entanto, esta tecnologia ainda não é amplamente utilizada devido ao estado prematuro de desenvolvimento das técnicas de arrefecimento de materiais supercondutores e ao impacto ecológico dos campos magnéticos de alta intensidade, que ainda não são totalmente compreendidos. Além disso, a produção de materiais supercondutores é limitada, o que representa um risco para a viabilidade económica [21].

### **Sistema de armazenamento por Ultra condensadores**

A Figura 8 mostra o sistema de armazenamento por ultra condensadores aplicado em redes ferroviárias existentes em Frankfurt, Madrid e Pequim. Este sistema inclui um banco de condensadores, um transístor bipolar de porta isolada para comunicação com uma unidade de controlo. Devido à sua baixa capacidade de tensão, os ultras condensadores são montados em módulos em série e paralelo. No entanto, as alterações nos seus parâmetros devido a mudanças no meio resultam em flutuações na tensão, o que diminui a esperança de vida destes equipamentos e os torna menos fiáveis para aplicações de energia regenerativa [22].

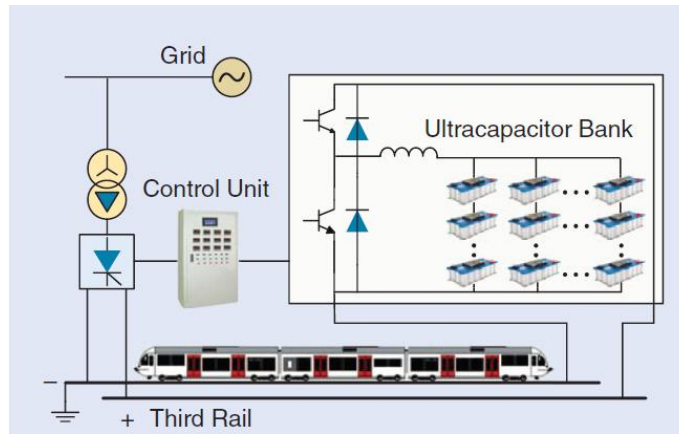


Figura 8-Sistemas de ultra condensadores [22]

### Sistema Flywheel

A tecnologia Flywheel é uma maneira engenhosa de armazenar energia. Essencialmente, um rotor é levitado numa câmara de vácuo por meio de imanes como mostra a Figura 9. Uma vez que o atrito é muito reduzido, o volante de inércia gira continuamente com muito pouca entrada de energia necessária. A energia pode então ser extraída do sistema através de um gerador. Na fase de armazenamento a energia extraída da frenagem regenerativa é utilizada para acionar um motor que faz girar um volante de inércia até uma determinada velocidade máxima constante. Na fase de descarga, o volante de inércia opera a máquina elétrica como um gerador que fornece energia elétrica de volta a rede.

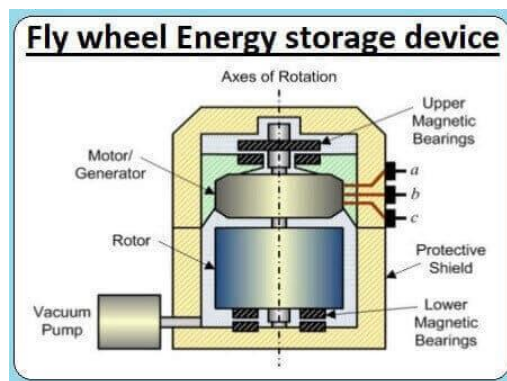


Figura 9 - Composição do sistema Flywheel [22]

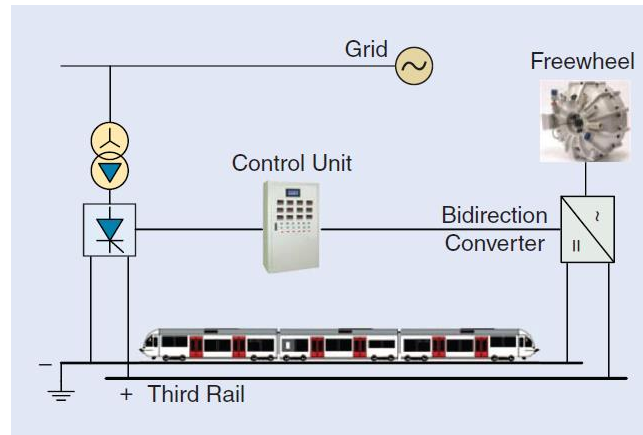


Figura 10- Sistema Flywheel aplicado na rede Ferroviária CC [22]

O sistema da Figura 10 está implementado no metro de Nova York e na TramWay em Hong-Kong. A empresa americana *Beacon Power* está a construir um sistema Flywheel de grandes dimensões com uma potência de 1 MW, e afirma que estes equipamentos são capazes de manter a sua energia durante um período de 15 minutos [21][22].

#### Sistema de armazenamento de energia elétrica através de baterias:

O Armazenamento de energia através de baterias é utilizada no metro da cidade de Berlim na Alemanha desde 1990. No entanto, as baterias não têm sido muito utilizadas nos sistemas ferroviários, devido a diversas desvantagens a ter em conta como a baixa densidade de potência, baixa eficiência energética e limitação quanto ao número de ciclos que fornece [22].

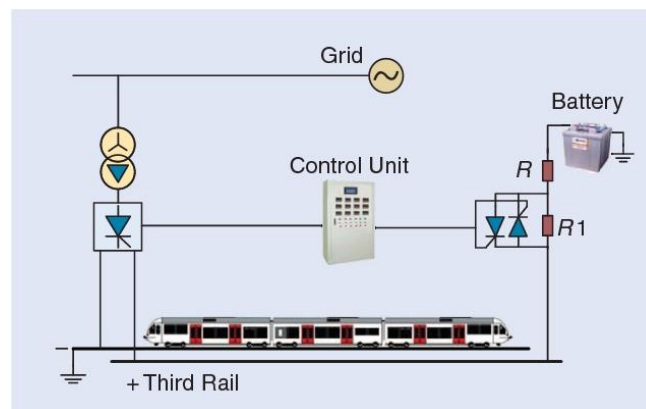


Figura 11- Sistemas de baterias [22]

No entanto a recente expansão do mercado dos veículos elétricos e equipamentos eletrónicos fez com que a produção em massa de baterias aumentasse drasticamente, assim como o avanço tecnológico destes equipamentos reduzindo assim o seu custo e aumentando

a eficácia. A performance dos sistemas de armazenamento de energia pode ser definida pela densidade de energia [25]. O gráfico da Figura 12 mostra os diferentes métodos de armazenamento de energia assim como as suas aplicações de acordo com o tempo de descarga, a geração de energia, e o local onde o sistema se insere permitindo assim ter uma base para a escolha de um determinado SEA.

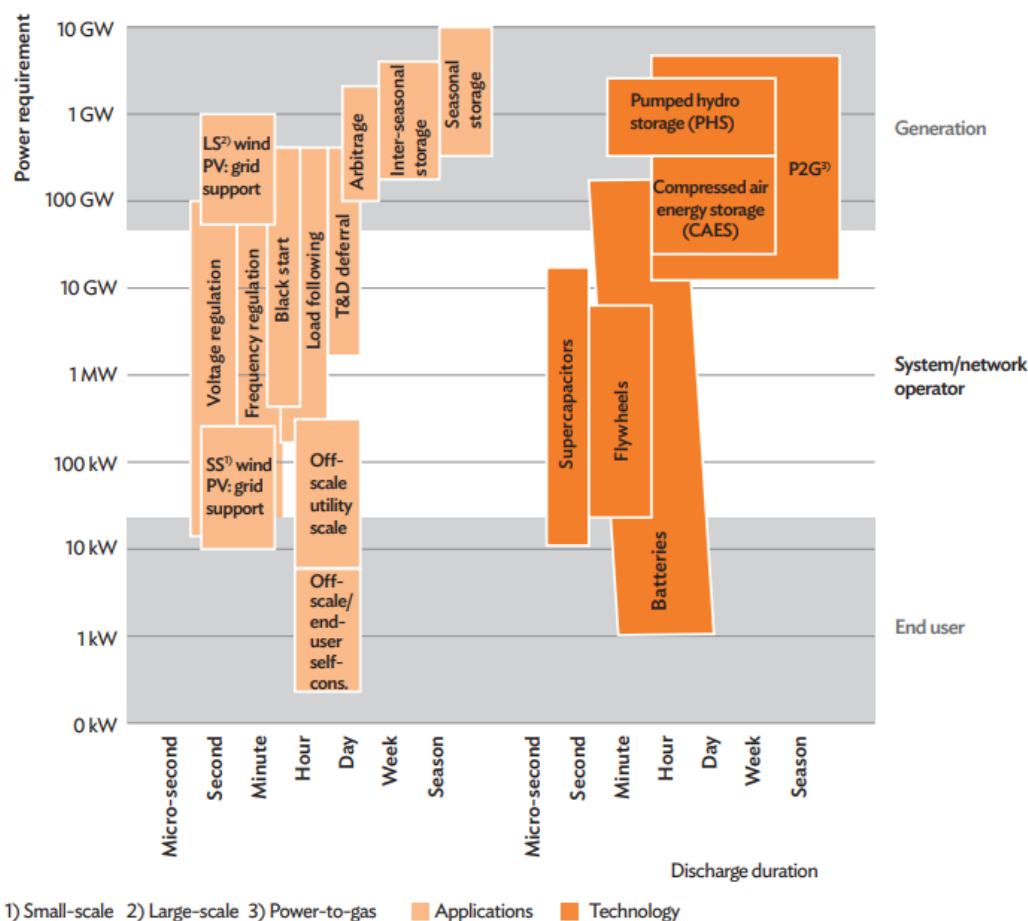


Figura 12-Diferentes tecnologias para diferentes utilizações [23]

Os sistemas de armazenamentos de energia podem ser utilizados como uma fonte de alimentação de energia ininterrupta (UPS), ou para transmissão e distribuição (T&D). Na Figura 13 pode-se observar as tecnologias mais utilizadas para estas aplicações assim como o tempo de descarga, a potência nominal, e o espectro de potência que estas são aplicadas. É de notar que as baterias de lítio são as mais usadas nos dias de hoje.

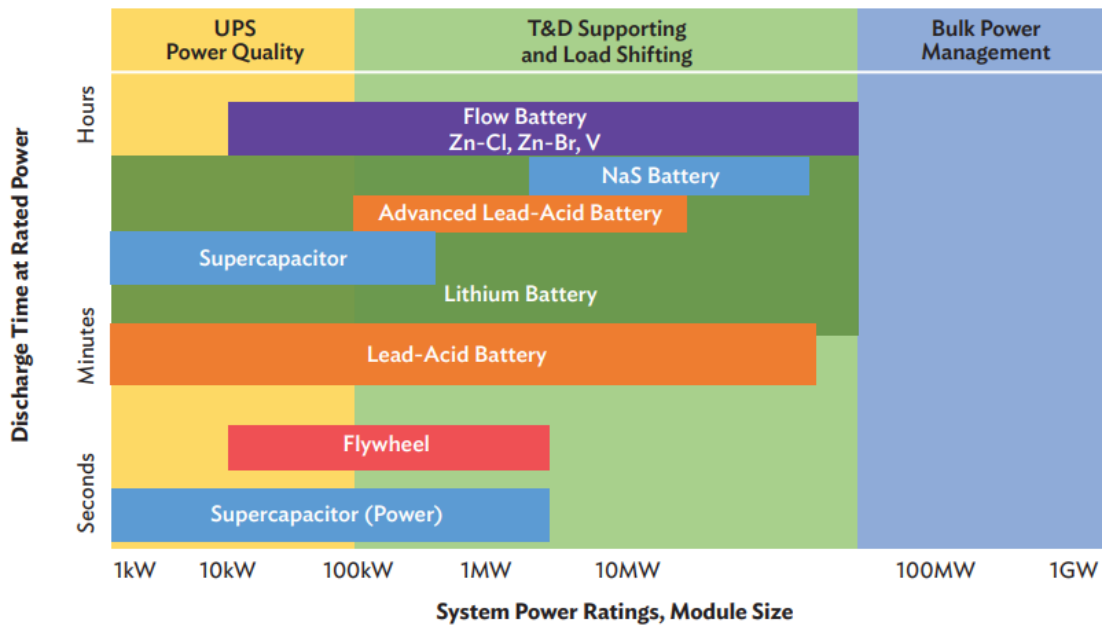


Figura 13 - Comparação entre o tempo de descarga e a potência nominal dos diferentes sistemas de armazenamento de energia.[24]

O uso de baterias para o armazenamento de energia pode ser diferenciado com base na densidade de energia, capacidade de carga e descarga, tempo de vida, e quão limpas são para o meio ambiente. A densidade de energia é definida como a quantidade de energia que pode ser armazenada num único sistema por unidade de volume ou peso. Baterias de lítio são capazes de armazenar entre 150 a 250 Watt-hora por quilograma (Wh/kg) e são capazes de armazenar entre 1.5 a 5 vezes mais energia que outros tipos de bateria [28].

Com os avanços tecnológicos atuais, estamos a progredir para um aumento significativo na densidade de energia, as próximas gerações de baterias como as de iões de lítio, zinco-ar, lítio-enxofre são expectáveis de ultrapassar a capacidade de armazenar energia das baterias de lítio atuais Figura 14, e reduzir o preço por kWh destes sistemas dos atuais 300€/kWh para 150€/kWh [25].

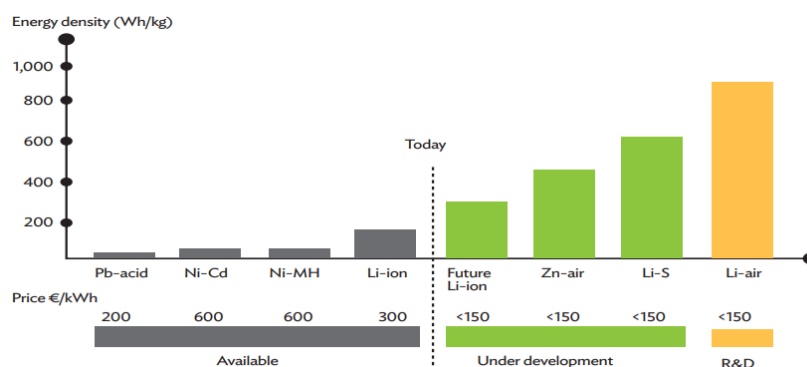
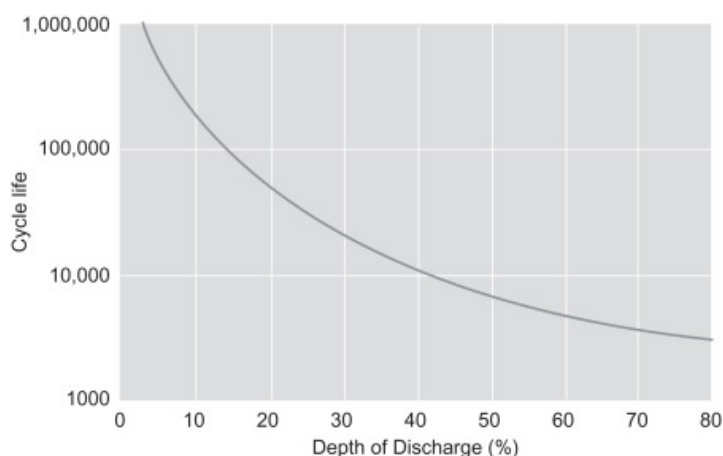


Figura 14- Presente e futuro das baterias [25]

No entanto, a capacidade de armazenamento de energia é apenas uma parte da equação e necessário também considerar o tempo de vida em média tensão

Para além da potência que uma bateria é capaz de fornecer é necessário também ter em conta o tempo útil de vida da mesma. O ciclo de vida das baterias é o número de ciclos de carga e descarga que uma bateria pode completar antes de perder o desempenho. O ciclo de vida das baterias de iões de lítio é afetado significativamente pela profundidade da descarga, que traduz a quantidade da capacidade armazenada de uma bateria que é utilizada. Por exemplo, uma bateria que é descarregada apenas em 20% da sua capacidade total de energia tem um ciclo de vida muito maior do que uma bateria que é descarregada mais profundamente em 80% da sua capacidade, restando apenas 20% da sua carga total de energia. A Figura 15 mostra o ciclo de vida de uma célula típica de iões de lítio.



*Figura 15- Tempo de vida de uma bateria em relação à profundidade de descarga [26]*

Com o aumento na produção e avanços tecnológicos, especialmente nas baterias de iões de lítio. O futuro prevê melhorias na densidade de energia e redução de custos, tornando as baterias mais viáveis para aplicações ferroviárias. A escolha do sistema deve considerar não apenas a capacidade de armazenamento, mas também o ciclo de vida da bateria, afetado pela profundidade da descarga. O progresso contínuo indica um futuro promissor para a eficiência e viabilidade econômica desses sistemas na área ferroviária.

### **2.3 – Mobilidade elétrica**

A mobilidade elétrica tem-se mostrado um meio essencial no projeto de alternativas no mercado do transporte sustentável. Devido à falta de fontes de energia fósseis e consequente aumento dos preços dos combustíveis, assim como, a necessidade de redesenhar os sistemas de transporte para corresponderem às exigências para reduzir o

consumo de fontes de energias fósil, a necessidade de reduzir a emissão de poluentes localizada e a poluição sonora, previsões apontam que o número de veículos elétricos irá duplicar em 2030 [29].

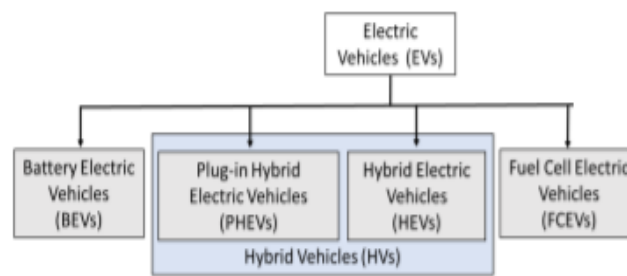
Na Alemanha o conceito de mobilidade sustentável passa por assumir um grande desenvolvimento na indústria dos veículos elétricos. O governo alemão notou que para manter a sua indústria automóvel competitiva teria também de ingressar pela via elétrica mantendo empregos e outputs financeiros, criando assim um plano de desenvolvimento elétrico que tinha a meta de 1 milhão de carros elétricos em 2020 que foi atingida e tem agora a meta de 6 milhões de veículos elétricos em 2030. A definição de veículo elétrico, inclui veículos totalmente elétricos, híbridos ou célula de combustível a hidrogénio [27].

Para um edifício que fornece eletricidade para carregar veículos elétricos, a interação com o sistema de distribuição elétrica local, bem como os impactos no pico de consumo do próprio edifício ou nos custos consequentes do tempo de uso dos equipamentos precisam ser considerados. Como tal, observa-se um crescente interesse na construção de edifícios eficientes e interativos com a rede elétrica. A atenção dedicada a esse especto na conceção de novos edifícios assume, assim, uma importância crucial. Essa abordagem traz consigo uma série de benefícios para a rede elétrica, incluindo uma maior resiliência, redução de custos operacionais e suporte à geração de energia renovável. Conforme identificado anteriormente o uso de energias renováveis assim como a eficiência no reaproveitamento da energia são uma necessidade num futuro próximo e o sucesso destas medidas está também no carregamento de veículos elétricos. O primeiro passo é entender o impacto que o carregamento descontrolado de VE pode ter nos perfis de carga típicos de edifícios. Com esse conhecimento, o carregamento de VE pode ser controlado e otimizado, juntamente com outras tecnologias, para gerir cargas à escala de construção para alcançar os benefícios desejados. A modelação preditiva ajuda a facilitar a estimativa dos impactos do carregamento de VE e a otimização do carregamento de uma perspetiva de integração de todo o edifício [28].

Existem vários desafios que envolvem a integração de veículos elétricos e dos seus respetivos postos de carregamento. É necessário um planeamento adequado no que toca a avaliar as rotas destes veículos, a localização dos postos de carregamento, rede elétrica disponível, taxas aplicadas, seguros, leis aplicadas, e o custo dos veículos[31]. As principais estratégias para o projeto e a construção de infraestruturas para suportar a integração de veículos elétricos são [28]:

- Determinar os tipos de postos de carregamento existentes que podem ser utilizados;
- Avaliar como é que a carga imposta pela integração de veículos elétricos irá afetar os objetivos definidos para a energia zero, tendo em conta o aumento do pico de consumo, a construção de infraestruturas dedicadas e as taxas empregues;
- Adaptar a localização dos postos de carregamento de acordo com as fontes de energia renovável disponíveis assim como a conveniência e acesso;
- Capacitar os novos postos de carregamento para controlar e adaptar a carga necessária com o objetivo de minimizar picos de energia elevados;

A tecnologia existente no que toca a veículos elétricos está normalmente dividida em três categorias principais, os veículos híbridos, a célula de combustível e veículos totalmente elétrico. Os veículos híbridos dividem-se em duas subcategorias, híbridos plug-in e híbridos.



*Figura 16- Tipos de veículos elétricos [31]*

Os veículos totalmente elétricos são alimentados exclusivamente por uma bateria, dispensando completamente a necessidade de qualquer tipo de combustível, uma vez que não possuem um motor a combustão. Para garantir autonomias adequadas, esses veículos contam com baterias de grande capacidade. Estes veículos possuem um sistema de regeneração de energia, em que o motor funciona como gerador e utiliza a energia cinética do veículo para regenerar alguma energia quando se dá a frenagem. assim este veículo tem dois modos de operação:

1. Em aceleração ou velocidade constante a bateria propulsiona o veículo
2. Em desaceleração ou frenagem o motor/gerador regenera alguma da energia outrora dissipada, de volta para a bateria

Os veículos híbridos plug-in são movidos por um motor de combustão interna e um motor elétrico alimentado por uma bateria que pode ser carregada por meios externos através de um posto de carregamento. Estes veículos possuem uma bateria de menores dimensões quando comparada com os veículos totalmente elétricos. Em média um híbrido plug-in está equipado com uma bateria de 12 kWh o que permite uma autonomia de 50 km quando usado apenas o motor elétrico, com isto estes veículos permitem uma redução no consumo de combustível [33]. Os híbridos elétricos tal como os plug-in possuem um motor de combustão interna e um motor elétrico apenas diferem no facto de que os híbridos elétricos não têm a opção de carregamento externo, pelo que a bateria que alimenta o motor elétrico é carregada pelo motor de combustão e por meios de frenagem regenerativa com isto estes veículos ainda possuem baterias mais pequenas que os híbridos plug-in (em média 1.3 kWh) que permitem uma autonomia de 25 km totalmente elétrico nos melhores cenários [31][32].

Os postos de carregamentos permitem o seguro carregamento de um veículo elétrico com máxima eficiência. Ao contrário de uma tomada normal que é projetada para uso geral, estes postos são projetados apenas para o carregamento de veículos elétricos pelo que existe uma comunicação entre o veículo e o posto para garantir um feedback em tempo real do que está a suceder [33].

Os Equipamentos de carregamentos de veículos elétricos podem ser classificados como **Dispositivos de carregamento CA** e **Dispositivos de carregamento CC**

No caso de carregamento CA, a velocidade de carregamento depende da saída CC do conversor CA - CC integrado no veículo. Por exemplo, a alimentação monofásica a 230 V CA, 15 A conectada a um veículo elétrico com uma bateria com capacidade de 10 kWh e um conversor CA - CC integrado com uma saída de apenas 1 kW CC pode levar até 10 horas para carregar totalmente a bateria. Existem carregadores CA de alta potência capazes de carregar rapidamente as baterias, mas é preciso ter em conta a química da bateria e do sistema de gestão de bateria do VE.

Os dispositivos de carregamento CC com saída de alta potência podem fornecer energia CC para a bateria e podem carregar a bateria dos veículos com maior velocidade. Um CC FC de 50 kW pode teoricamente carregar um VE com uma bateria de 25 kWh em 30 minutos. Os CC FCs são mais económicos, pois a conversão CA - CC ocorre no próprio carregador, e não dentro do veículo. Quando um VE é conectado ao posto de carregamento,

estes comunicam entre si e o sistema de gestão da bateria do veículo elétrico assume o controlo do processo de carregamento [33][31].

Nem todas as baterias podem ser carregadas rapidamente. O C rating é usado para referir a velocidade a que a bateria é carregada. 1C refere-se à corrente necessária para que o carregamento esteja completo em uma hora. À taxa de 2C o carregamento está completo em 30 minutos; 10C em 6 minutos. E C/2 significa que são necessárias duas horas para carregar totalmente a bateria. A Tabela 1 mostra a velocidade a que diferentes tipos de baterias podem ser carregadas.

*Tabela 1- Características de diferentes baterias utilizadas em VE [33], [34]*

Battery Chemistry	Maximum C Rate	Max Temperature (Degree C)	Life (Maximum Cycles)	Power Density (Wh/kg for cell)	Average Module Price (US\$/kWh in 2018)*
Lithium Ion Iron-Phosphate (LFP)	Up to 2C	40	1500-3000	100-130 Wh/kg	270
Lithium Ion-Nickel Manganese Cobalt (NMC)	C/2	40	1000-2000	230-250 Wh/kg (for NMC 811)	250
Lithium Ion-Nickel Manganese Cobalt (NMC)	3C	40	3000-4000	200 Wh/kg (for NMC 811)	400
Lithium Nickel Cobalt Aluminium (NCA)	2C	40	1000-1500	250-270 Wh/kg	230
Lithium ion Titanate Oxide (LTO)	6C	60	7500-10000	50-80 Wh/kg	700

Não importa qual tensão ou corrente o carregador possa fornecer, o tempo de carregamento é controlado ou limitado pela bateria e pela corrente que esta é capaz de aceitar. A Tabela 2 mostra os tempos de carga e as correntes de carga associadas para uma variedade de carregadores usados para carregar baterias em vários veículos [33], [34].

Tabela 2-Tempo e potência de carregamento para diferentes veículos elétricos [33], [34]

EV Battery Charging Times Using the Maximum Available Power from Different Chargers												
Representative Vehicles and Chargers (Many variants are possible)				Charging Times and Rates (Hours and Equivalent Battery C Rates Supplied by Charger)								
				Charger	Level 1				Level 2		Level 3	
				Available Power	2 kW US Domestic		3kW Euro Domestic		20 kW 3 Phase Public		50kW DC Public Fast Charge	
Vehicle	Charge Level and Equivalent C Rate	Battery Capacity (kWh)	Battery C Rate (Amps)	Charger Efficiency (%)	Hours to 80%	Charger Equiv C Rate (C)	Hours to 80%	Charger Equiv C Rate (C)	Hours to 80%	Charger Equiv C Rate (C)	Hours to 80%	Charger Equiv C Rate (C)
	Electric Bike	0.5	20	85	0.2	4.3	0.2	6.4	0.02	42.5	0	425
	Plug In Hybrid PHEV	10	41	85	4.7	0.2	3.1	0.3	0.5	2.1	0.05	21.3
	EV Passenger Car	24	66.2	85	11.8	0.1	7.8	0.1	1.2	0.9	0.1	8.5
	Heavy Delivery Van	50	200	90	22.2	0.05	14.8	0.1	2.2	0.5	0.2	4.5

A Tabela 2 mostra o tempo mínimo de carregamento teórico para cada aplicação com diferentes carregadores assumindo que a potência total do carregador é aplicada à bateria, ou seja, a capacidade do carregador é totalmente utilizada. No entanto, baterias menores podem não conseguir usar toda essa capacidade, pois os carregadores de maior capacidade podem fornecer muito mais corrente do que as baterias menores podem aceitar e, portanto, a corrente deve ser limitada pelo Sistema de Gestão da Bateria.

## 2.4 - Painéis fotovoltaicos

O sol desempenha um papel fundamental na nossa existência, uma vez que é responsável por grande parte da energia que a Terra recebe. A sua importância é essencial para a manutenção da vida no nosso planeta. Prevê-se que o Sol tenha uma vida útil de cerca de 10 bilhões de anos, o que o torna uma fonte de energia virtualmente inesgotável no contexto da vida humana.

No entanto, é importante observar que, embora o Sol seja uma fonte abundante de energia, grande parte dela é desperdiçada no espaço. Aproveitar essa energia de forma eficiente e sustentável é fundamental para atender às nossas necessidades energéticas. Uma das tecnologias que tem ganhado destaque é a utilização de painéis solares fotovoltaicos, que convertem a luz solar em eletricidade.

A implementação crescente de painéis solares fotovoltaicos tem sido uma abordagem importante para aproveitar essa fonte de energia renovável. Estes painéis são usados como uma fonte de apoio ou complementar ao fornecimento de energia convencional, como eletricidade gerada a partir de combustíveis fósseis. Além de serem

ambientalmente sustentáveis, os painéis solares ajudam a reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis e contribuem para a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que não emitem poluentes ou gases de efeito estufa durante a produção de eletricidade.

O aproveitamento da energia solar através de painéis solares é uma abordagem sustentável que pode desempenhar um papel significativo na transição para um sistema energético mais limpo e na redução do desperdício de energia proveniente do sol.

## Radiação Solar

Uma das desvantagens de uma instalação solar é a variabilidade da energia solar disponível na Terra. A quantidade de radiação solar que atinge um determinado local depende da sua latitude geográfica e do mês do ano em que se encontra. Essa variação está relacionada com a inclinação do eixo da Terra, resultando em uma maior altitude solar no verão em comparação com o inverno [35], conforme ilustrado na Figura 17.

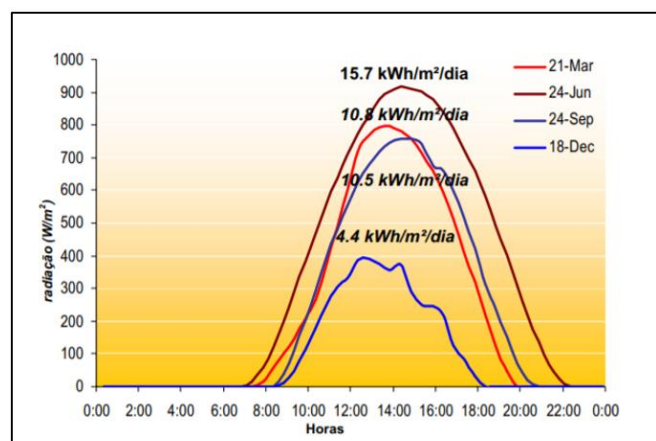


Figura 17- Variação do valor global de irradiação [36]

A energia solar divide-se em duas componentes: a radiação direta e a radiação difusa. A radiação direta é aquela que atinge a superfície sem sofrer qualquer interação que a faça refletir ou mudar de direção, indo diretamente da fonte solar para a superfície. Por outro lado, a radiação difusa chega à superfície terrestre após ter sido difundida pelas moléculas de ar e partículas de pó na atmosfera, ou após ser refletida pela própria superfície [28].

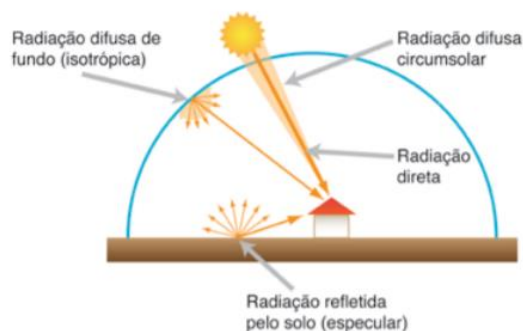


Figura 18- Representação das componentes constituintes da radiação solar [36]

Considerando que a radiação refletida é considerada como difusa a radiação total é dada pela soma da energia direta com a energia difusa.

A nebulosidade ou o estado das condições climatéricas são fatores fundamentais para o desempenho da instalação fotovoltaica, pois afetam quantidade de energia irradiada assim como a proporção de radiação difusa e direta [35].

A Figura 19 indica claramente que existe uma grande diferença na quantidade de irradiação solar ao longo do ano na região de Peniche. Essa diferença é particularmente evidente ao comparar os meses de inverno e verão.

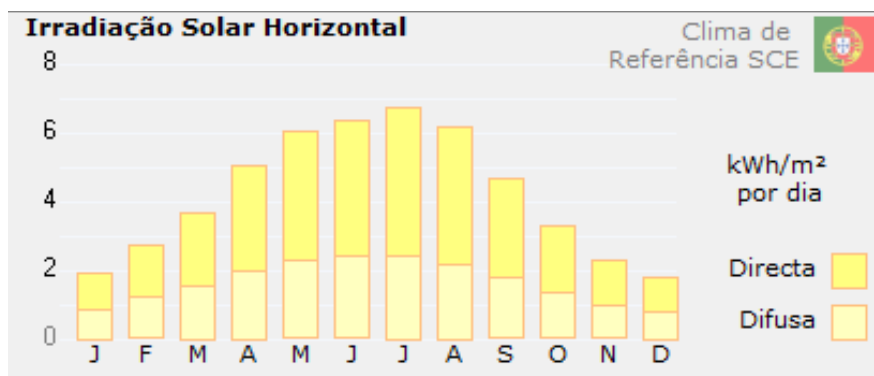


Figura 19 – Somatório mensal da irradiação solar Difusa e Direta (Peniche) [37]

No inverno, a quantidade total de irradiação solar é significativamente menor do que no verão. Isso é esperado devido à inclinação do eixo da Terra, que resulta em dias mais curtos e um ângulo solar mais baixo durante o inverno. Consequentemente, a quantidade de irradiação solar direta também é menor no inverno, e a irradiação difusa representa uma porção maior da irradiação total durante essa estação.

No verão, por outro lado, os dias são mais longos, o ângulo solar é mais alto e, como resultado, a quantidade total de radiação solar é consideravelmente maior. Além disso, a

proporção de radiação solar direta em relação à radiação difusa é maior no verão, o que significa que uma maior quantidade de energia solar direta está disponível para aproveitamento.

Estas variações sazonais na irradiação solar são importantes para o dimensionamento e o desempenho de sistemas fotovoltaicos, pois afetam a quantidade de eletricidade que pode ser gerada ao longo do ano. Portanto, o planeamento de instalações fotovoltaicas deve levar em consideração essas diferenças sazonais para otimizar a produção de energia solar.

A irradiação solar total e o número de horas de luz (insolação) são, de facto, fatores cruciais para o projeto de um sistema solar, seja ele um sistema fotovoltaico ou térmico. Portugal, devido à sua localização geográfica favorável, goza de uma excelente disponibilidade solar, com uma média anual de cerca de 2500 horas de sol. Estas condições tornam o país um local ideal para a implementação de sistemas solares [38].

No entanto, mesmo em locais com alta irradiação solar, é essencial realizar estudos de viabilidade económica e energética antes de investir em projetos solares. Isso ocorre porque outros fatores também desempenham um papel importante, como o custo dos sistemas solares, as tarifas de eletricidade, os incentivos governamentais e a demanda de energia. A análise de viabilidade ajudará a determinar se um projeto solar é financeiramente vantajoso e qual o retorno do investimento esperado.

Além disso, é importante considerar a localização específica do projeto, uma vez que a irradiação solar pode variar significativamente dentro de um país, como mostra a Figura 20. A topografia, a orientação dos painéis solares e a presença de sombreamento também podem influenciar o desempenho de um sistema solar.

Em resumo, Portugal tem uma excelente disponibilidade solar, mas a viabilidade de um projeto solar depende de uma análise cuidadosa que leve em consideração todos os fatores relevantes, incluindo a irradiação solar, o custo do sistema, os incentivos disponíveis e a demanda de energia específica do local em estudo [35], [39].

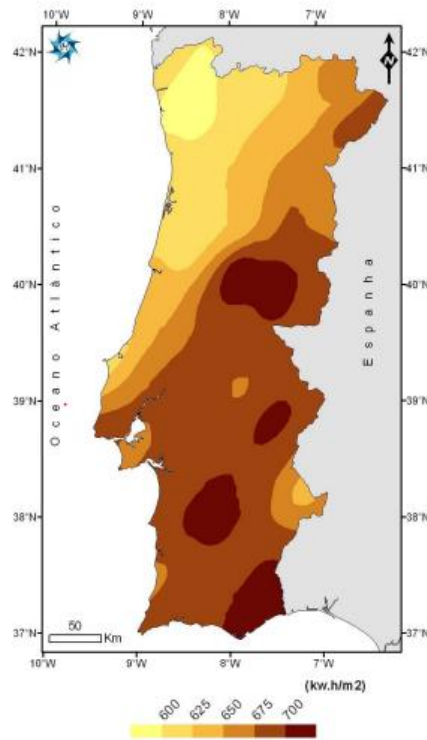


Figura 20- Irradiação global anual em Portugal [38]

A otimização da inclinação e orientação dos painéis solares é fundamental para maximizar a eficiência na captação de energia solar. A Figura 21 ilustra alguns ângulos importantes na orientação dos painéis solares:

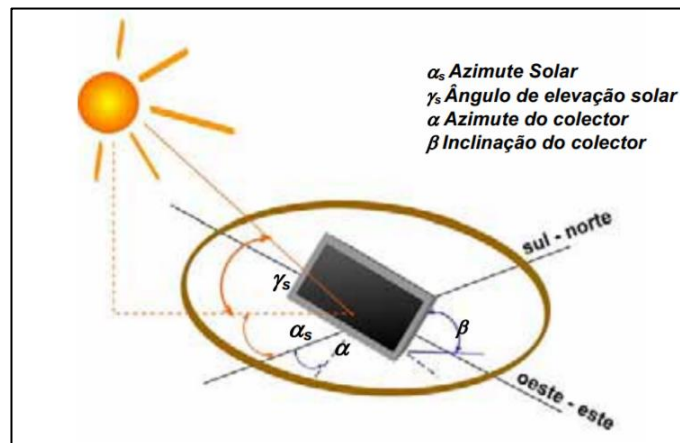


Figura 21- Ângulos para painéis solares[42]

$\alpha_s \rightarrow$  **Azimute Solar** – Este ângulo refere-se à direção em que o sol está localizado no horizonte em um determinado momento. Varia ao longo do dia à medida que o sol se move no céu.

$\gamma_s \rightarrow$  **Angulo de elevação solar** – Este ângulo representa a altura do sol acima do horizonte em um dado momento. Também varia ao longo do dia, sendo maior ao meio-dia solar.

$\alpha \rightarrow$  **Azimute do coletor** – Este ângulo relaciona-se com a direção para a qual os painéis solares estão virados, especificamente em relação ao norte geográfico.

$\beta \rightarrow$  **Inclinação do coletor** – Este ângulo determina a inclinação dos painéis solares em relação à horizontal. É crucial para capturar a luz solar de forma mais eficiente, especialmente em diferentes estações do ano [40],[41].

A Figura 22 mostra como a posição da Terra varia ao longo do ano na sua órbita ao redor do sol, o que afeta os ângulos ideais de inclinação e orientação dos painéis solares. O ângulo ótimo pode ser diferente no verão e no inverno devido à inclinação do eixo da Terra.

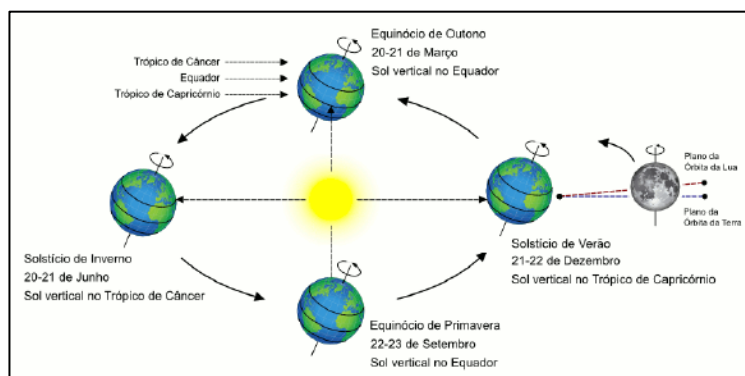


Figura 22- Posição da terra ao longo do ano [43]

Para resolver esse problema, existem gráficos e cartas, como mostrado na Figura 23, que ajudam a determinar a inclinação e o azimute ideais dos painéis solares para cada localização geográfica. Esses recursos ajudam a otimizar a captação de energia solar ao longo do ano, permitindo um melhor desempenho e rendimento dos sistemas de energia solar [39].

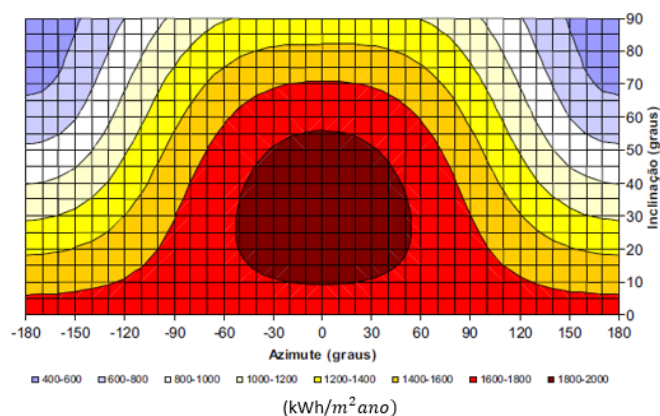


Figura 23-Gráfico que relaciona o azimute e inclinação [44]

## Tecnologias existentes

A configuração típica de um sistema fotovoltaico inclui os seguintes componentes [44]:

**Painéis Fotovoltaicos (PV):** Os painéis fotovoltaicos são a parte central do sistema e são responsáveis por capturar a energia solar e convertê-la em eletricidade. São compostos por células fotovoltaicas que realizam essa conversão.

**Regulador de Carga de Bateria:** Em sistemas autônomos ou isolados, onde não há conexão direta com a rede elétrica, é utilizado um regulador de carga de bateria para controlar o carregamento das baterias. Este dispositivo evita que as baterias sejam sobrecarregadas ou descarregadas em excesso, prolongando assim a sua vida útil.

**Baterias:** As baterias são utilizadas para armazenar a energia elétrica gerada pelos painéis solares. Isso permite o uso da energia solar mesmo quando não existe sol, como durante a noite ou em dias nublados.

**Conversor de Corrente:** O conversor de corrente, também conhecido como inversor, desempenha um papel crucial no sistema. Converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares e armazenada nas baterias em corrente alternada (CA), que é a forma de eletricidade usada na maioria dos dispositivos elétricos e na rede elétrica.

**Gerador (Opcional):** Em sistemas autônomos, um gerador de backup, como um grupo gerador a diesel, pode ser incluído para fornecer eletricidade quando os painéis solares e as baterias não são suficientes para atender à demanda de energia.

**Quadro:** O quadro elétrico é utilizado para distribuir e controlar a eletricidade gerada pelo sistema solar. Ele pode incluir disjuntores, fusíveis e outros dispositivos de proteção elétrica.

Esta configuração pode variar dependendo das necessidades específicas do sistema, nomeadamente se está ligado à rede elétrica ou é autónomo, e qual a finalidade do sistema (por exemplo, fornecer eletricidade para uma residência, empresa ou instalação remota). A capacidade de injetar energia na rede elétrica, quando apropriada, é um recurso importante dos sistemas fotovoltaicos ligados à rede, pois permite a venda de energia excedente de volta para a rede [45].

As células solares são compostas por várias camadas de material semicondutor que, quando expostas à luz solar, geram uma força eletromotriz que induz um fluxo de corrente elétrica. Quanto maior a intensidade da radiação solar, maior será o fluxo de corrente gerado. O material mais comum utilizado no fabrico de células solares é o silício, que é obtido a partir da areia e é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, garantindo um suprimento praticamente ilimitado de matéria-prima.

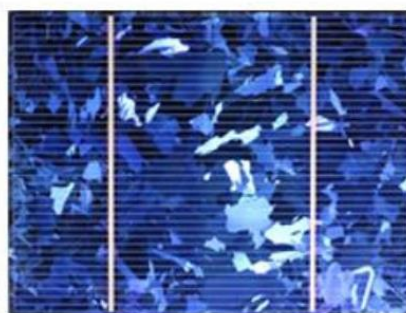
Existem várias tecnologias de células solares disponíveis, sendo as mais comuns as seguintes:

**Células Monocristalinas de Silício:** Estas células têm uma eficiência de conversão de energia que varia de 13% a 17% e são frequentemente utilizadas em aplicações comerciais. São consideradas as mais eficientes em condições de boa luminosidade. Um metro quadrado de células monocristalinas é capaz de converter 1.000 W/m<sup>2</sup> de irradiação solar incidente em 140 W de potência elétrica. A produção destas células requer um material semicondutor de pureza absoluta. Bastões monocristalinos são extraídos do silício fundido e cortados em finas fatias (wafer). Esta abordagem de produção resulta em uma alta usabilidade. A expectativa de vida típica destas células é de 25 a 30 anos [46][47].



*Figura 24 - Célula fotovoltaica monocristalina[48]*

**Células Policristalinas de Silício :** Um metro quadrado de células policristalinas é capaz de converter 1.000 W/m<sup>2</sup> de irradiação solar em 130 W de potência elétrica. A produção destas células é economicamente mais eficiente em comparação com as monocristalinas. O silício líquido é derramado em blocos, que são posteriormente cortados em placas. Durante o processo de solidificação, são formadas estruturas de tamanhos variados, resultando em pequenos defeitos que reduzem a eficiência das células solares policristalinas, que varia de 10% a 14%. A expectativa de vida destas células é de 20 a 25 anos [46][47].



*Figura 25-Célula fotovoltaica policristalina [49]*

**Tecnologia de Filme Fino:** Nesta tecnologia, os módulos solares são fabricados com camadas extremamente finas de materiais fotossensíveis num substrato de baixo custo, como vidro, aço inoxidável ou plástico. A produção de módulos de filme fino resulta em custos mais baixos em comparação com a tecnologia de silício cristalino. No entanto, essa vantagem de preço resulta em menor eficiência, que varia de 5% a 13%. A utilização da tecnologia de filme fino no mercado é de 15%, com expectativa de aumento nos próximos anos devido à melhoria da eficiência desta tecnologia [46][47].



*Figura 26- Célula fotovoltaica de filme fino [50]*

## **2.5 – Smart Grids**

Smart Grid (ou rede elétrica inteligente) é um conceito que se baseia na utilização da tecnologia de informação e comunicação dentro da rede elétrica para tornar o controle e a otimização mais eficientes [51]. Inicialmente, as redes elétricas não possuíam qualquer tecnologia de informação e comunicação, uma vez que estas tecnologias ainda não existiam. Com o desenvolvimento das tecnologias digitais, a fidelidade e eficiência dos sistemas elétricos aumentaram consideravelmente. Com o tempo, uma grande variedade de Smart Grids tem sido desenvolvida [52].

Em 2004 o departamento de energia americano (U.S. DOE) desenvolveu um guia para o desenvolvimento das Smart-Grids como mostra a Tabela 3.

Tabela 3- U.S. DOE :Mapa para o desenvolvimento e implementação de tecnologias de Smart Grids [52].

Tipo de Tecnologia	Fase 1 2010 Teste e Design	Fase 2 2010 a 2020 Desenvolvimento da tecnologia e aceitação no mercado	Fase 3 2020 a 2030 Fabrico e Integração
<b>Condutores avançados</b>	Desenvolvimento de ferramentas para um melhor aproveitamento de recursos já existentes  Compósitos testados no terreno  Acelerar a I&D de materiais	Testar tecnologias subterrâneas de baixo custo Testar e demonstrar condutores avançados Continuar a I&D de materiais	Realizar a implementação local, regional e nacional
<b>Supercondutores de alta-temperatura</b>	Desenvolver a primeira geração de um cabo supercondutor a altas temperaturas comercial  Acelera a implementação de aplicações supercondutores como transformadores e condensadores  Aumentar a produção de cabo supercondutor de segunda geração a baixo custo  Demonstrar a condução em cabos supercondutores de segunda geração	Implementar comercialmente o primeiro cabo supercondutor  Demonstrar o limitadores de corrente de falha de transformados usando esta tecnologia  Desenvolver a próxima geração de cabos supercondutores  Expandir as utilizações internacionais	Realizar a implementação local, regional e nacional
<b>Armazenamento energético</b>	Testar sistemas de armazenamento de energia avançados  Acelerar a I&D	Expandir as demonstrações e implementação Continuar a I&D Expandir as utilizações internacionais	Realizar a implementação local, regional e nacional
<b>Controlo e distribuição inteligente</b>	Realizar protocolos e normas  Testar protótipos  Acelerar a I&D	Aprovar normas nacionais e internacionais  Expandir as demonstrações e implementação  Continuar a I&D	Realizar a implementação local, regional e nacional
<b>Eletrónica de potência</b>	Implementar dispositivos avançados  Acelerar a I&D	Expandir as demonstrações e implementação  Continuar a I&D	Realizar a implementação local, regional e nacional

As tecnologias utilizadas nas Smart Grids abrangem todas as áreas da rede de distribuição e possuem vários níveis de inteligência. A National Electrical Manufacturers Association (NEMA) propôs uma classificação desses sistemas em 6 níveis de inteligência, desde equipamentos de nível 0, que não possuem qualquer tipo de automação, até equipamentos de nível 5, capazes de coordenar com elementos de vários sistemas [53].

As redes elétricas inteligentes, são redes elétricas avançadas que incorporam tecnologia digital e sistemas de comunicação para melhorar a eficiência, confiabilidade e sustentabilidade da geração, distribuição e consumo de eletricidade. É possível definir Smart Grids através dos seguintes aspectos [53], [15]:

**Infraestrutura de Medição Avançada (AMI):** As Smart Grids frequentemente envolvem a implantação de medidores inteligentes em casas e empresas. Estes medidores fornecem informações em tempo real sobre o consumo de energia, permitindo que os consumidores tomem decisões mais informadas sobre seu consumo de energia e ajudando as concessionárias a gerir a demanda de forma mais eficaz.

**Sistemas de Controlo Automatizado:** As Smart Grids utilizam sistemas de automação e controlo para monitorizar e gerir o fluxo de eletricidade. Estes sistemas podem detetar e responder a cortes de energia, redirecionar eletricidade para minimizar interrupções e otimizar o uso de recursos energéticos disponíveis.

**Comunicação Bidirecional:** As Smart Grids facilitam a comunicação bidirecional entre as empresas de serviços públicos e os consumidores. Isso permite que as empresas enviem sinais para aparelhos e dispositivos inteligentes para reduzir o consumo de energia durante os períodos de maior procura (Resposta à Procura) e notificar os consumidores sobre alterações de preços com base na oferta e procura.

**Integração de Energias Renováveis:** As Smart Grids acomodam uma variedade de fontes de energia, incluindo energia solar e eólica. Podem integrar eficientemente estas fontes de energia intermitentes na rede, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis.

**Melhoria da Confiabilidade:** Com uma monitorização e manutenção preditiva melhoradas, as Smart Grids podem identificar e resolver potenciais problemas antes que causem cortes de energia. Isso resulta num fornecimento de eletricidade mais confiável.

**Eficiência e Conservação de Energia:** As Smart Grids otimizam a distribuição de energia, reduzindo as perdas de energia durante a transmissão. Também incentivam a

conservação de energia, fornecendo dados em tempo real sobre o consumo, permitindo que os consumidores ajustem o seu uso de acordo.

**Resiliência da Rede:** As Smart Grids são projetadas para serem mais resilientes face a desastres naturais e ciberataques. Podem isolar rapidamente áreas afetadas, minimizando interrupções e acelerando a recuperação.

**Benefícios Económicos:** As Smart Grids podem levar a poupanças de custos para as empresas de serviços públicos e os consumidores. As empresas de serviços públicos podem gerir melhor os seus recursos, reduzir os custos operacionais e prolongar a vida útil da infraestrutura da rede. Os consumidores podem poupar dinheiro através do uso mais eficiente da energia e de tarifas de acordo com o horário de consumo.

**Integração de Veículos Elétricos:** As Smart Grids também acomodam o carregamento de veículos elétricos (VE). Podem otimizar os padrões de carregamento para evitar sobrecarregar a rede durante as horas de maior procura [53], [15].

Além das instalações em grande escala, como centrais eólicas e solares, a maioria da energia renovável encontra-se ao nível da distribuição. No entanto, a maioria das redes atualmente instaladas não está preparada para integrar este tipo de tecnologia. A integração de energia, como a fotovoltaica, é um desafio, uma vez que a maioria das redes está configurada para a distribuição convencional e não é garantido que os transformadores funcionem na direção oposta, o que torna difícil o fornecimento de energia não utilizada de volta à rede. Uma alternativa a este problema é integrar sistemas de armazenamento. A integração de Smart Grids promete gerir a capacidade das redes de distribuição de modo a evitar a necessidade de realizar grandes investimentos em sistemas de armazenamento [52].

Neste capítulo, foram abordados os avanços nas áreas de ferrovia e frenagem regenerativa, bem como sistemas de armazenamento de energia, veículos elétricos, painéis fotovoltaicos e redes inteligentes. Obtendo-se assim as bases para o desenvolvimento de uma ferramenta que permite uma análise integrada da sinergia entre estes elementos. Esta abordagem visa compreender de como este interagem entre si e como se complementam. Ao fazê-lo, espera-se fornecer insights valiosos que contribuirão para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis no campo da mobilidade e da energia, promovendo a transição para sistemas mais limpos e eficientes.

### 3 – METODOLOGIA

#### 3.1 Desenvolvimento de ferramenta de avaliação energética, ambiental e económica do sistema

A análise será realizada através do software Matlab Simulink podendo assim obter-se uma noção temporal da evolução das variáveis em causa. O código criado permite uma fácil alternância entre cenários que serão definidos na secção 3.2. Pode-se dividir a ferramenta criada em quatro grupos que se identificam de acordo com o elemento da rede em causa. A Figura 27 mostra a base em que foi construído o algoritmo da simulação.

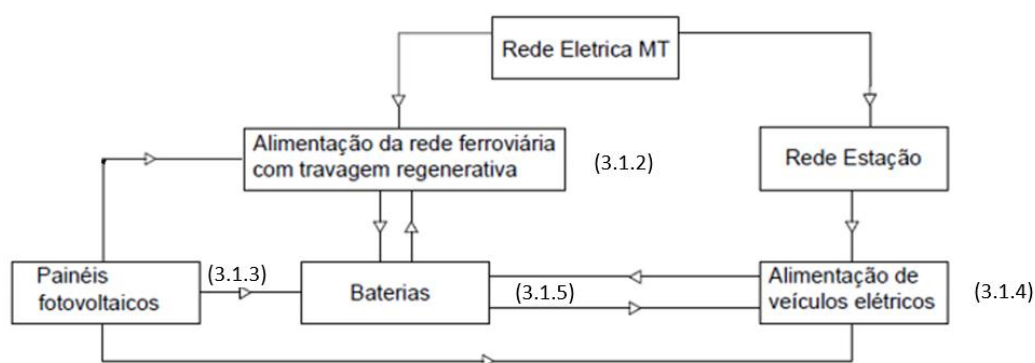


Figura 27- Base do algoritmo de simulação

Para o estudo e otimização de sistemas físicos, normalmente são utilizados métodos computacionais com o intuito de obter resultados preliminares sobre o sistema em análise. O sistema representado na Figura 27 foi numericamente implementado com o objetivo de ser modular, pelo que se pode facilmente retirar e adicionar elementos dando a possibilidade de estudar vários cenários. Com isto o sistema foi dividido em quatro subsistemas: rede ferroviária, painéis fotovoltaicos, sistema de armazenamento e alimentação de veículos elétricos, sendo cada um destes abordado nas subsecções seguintes. É de notar que a rede da estação será apenas uma carga fixa e a potência que lhe é fornecida será um dos resultados a obter no estudo que se irá realizar.

##### 3.1.1 – Simulação do sistema

A Figura 28 representa o sistema modelado que consiste na integração de painéis fotovoltaicos, baterias e frenagem regenerativa do veículo ferroviário para alimentação de veículos elétricos e para o apoio à própria rede ferroviária.

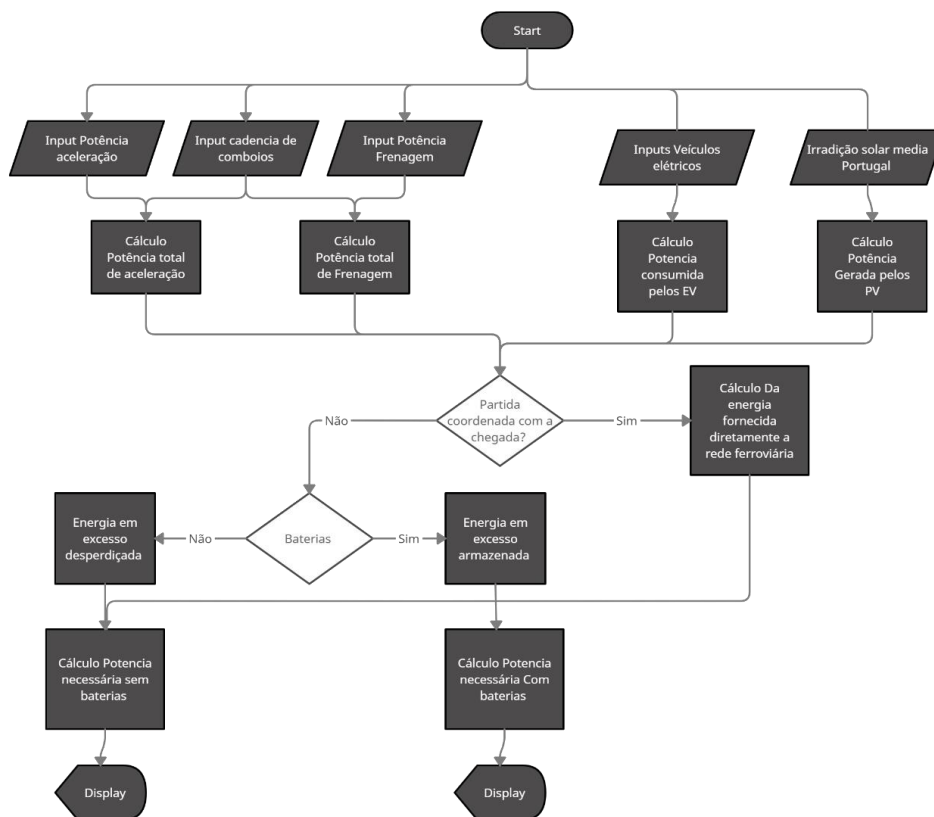


Figura 28- Arquitetura da rede construída

A potência proveniente ou consumida dos sistemas modelados nos capítulos seguintes é combinada com base no algoritmo da Figura 28 onde está implementada a lógica que permite que a potência regenerada pela frenagem na chegada de um comboio seja diretamente utilizada na partida de outro. Se isto não se verificar esta será armazenada em baterias no caso de esta estar disponível para o realizar. Ainda existe outro cálculo que não inclui baterias, para avaliar o comportamento do sistema quando estas não estão instaladas.

### 3.1.2 – Simulação das cargas impostas pela ferrovia

A Figura 29 mostra a estrutura do código que será descrito nesta secção. Este irá permitir escolher uma determinada máquina ferroviária e retirar a potência que a mesma consome da rede ferroviária, assim como a capacidade que tem para regenerar energia de volta à rede publica.

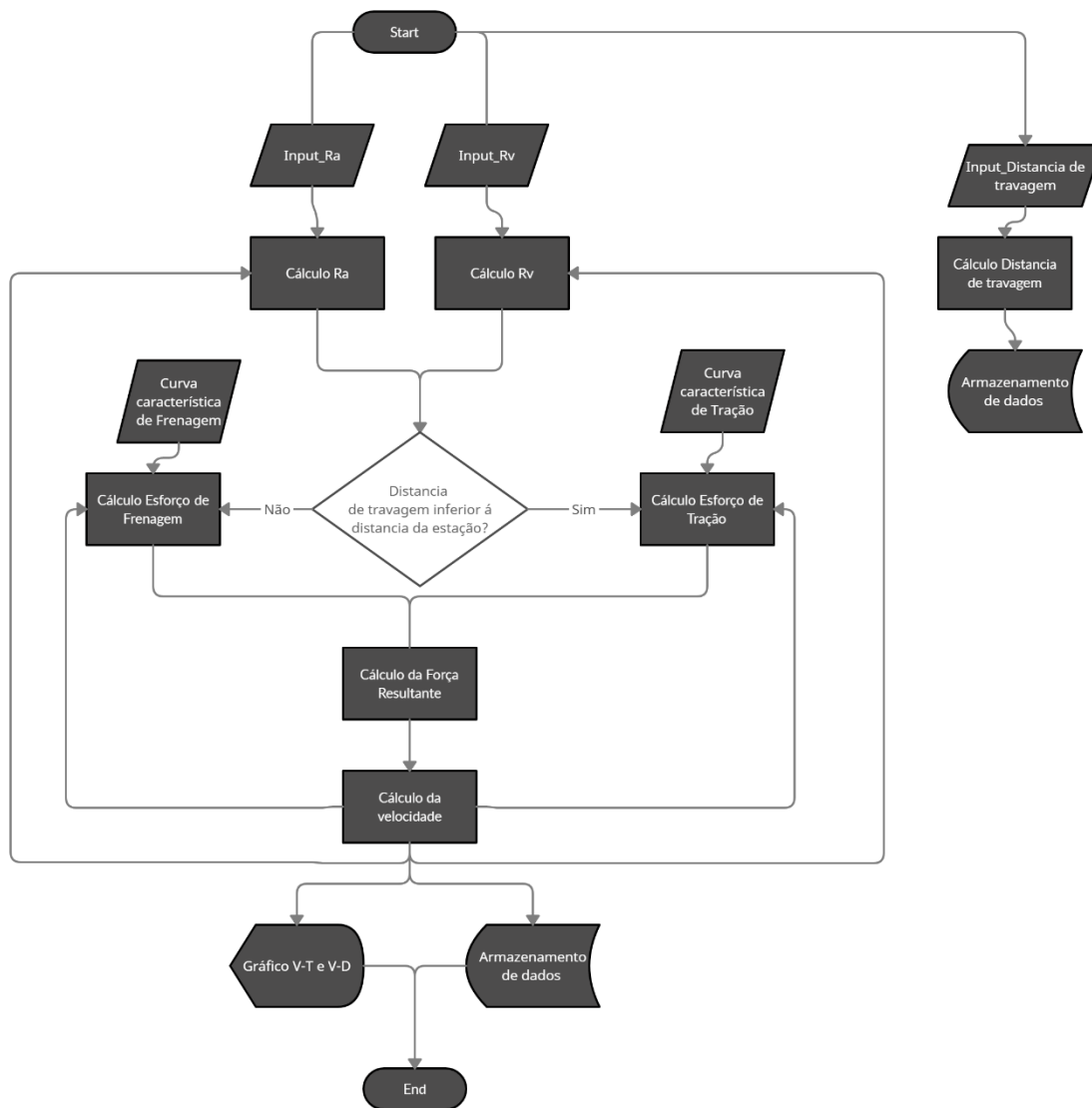


Figura 29- Algoritmo para o cálculo da potência consumida e regenerada por uma determinada locomotiva

O algoritmo desenvolvido para esta secção permite escolher uma determinada máquina ferroviária e quantificar a potência que a mesma consome da rede ferroviária, assim como a capacidade que tem para regenerar energia de volta à rede em função do ciclo de velocidade e das características da via. Desta forma obtém-se uma representação da potência ao longo do tempo para um determinado percurso, em função de parâmetros como o esforço de tração e frenagem, secções de velocidade constante, distância à estação e especificações da linha ferroviária.

A potência elétrica é obtida de acordo com a Eq. 1 através da multiplicação da velocidade com a força resultante, sendo esta a soma de todas as forças resistivas com o esforço de tração ou frenagem da máquina ferroviária.

$$P = F V \quad (1)$$

Para o cálculo das cargas que um equipamento ferroviário consome e fornece a rede elétrica tem de se começar pelo cálculo das forças resistentes ao avanço do equipamento. Estas forças podem ser divididas em **resistência ao avanço** representado por  $R_a$  e em **resistência imposta pela via** representada por  $R_v$ .

Em que a força resultante  $F$  é obtida pela Eq. 2

$$F = R_a + R_v + Ft \quad (2)$$

A força resultante à qual o veículo ferroviário se encontra sujeito depende das forças resistentes ao avanço do equipamento, podendo ser divididas em resistência ao avanço ( $R_a$ ) e resistência imposta pela via ( $R_v$ ), bem como do esforço de tração que a máquina elétrica pode desenvolver em função da sua velocidade ( $Ft$ ) (positivo em aceleração e negativo em frenagem) [54].

A resistência ao avanço ( $R_a$ ) é a resistência criada por esforços mecânicos e aerodinâmicos podendo-se escrever de acordo com a Eq.3

$$R_a = A + BV + CV^2 \quad (3)$$

Em que:

**$R_a$**  – Resistência ao avanço

**A,B,C**- Coeficiente numéricos que dependem do material circulante e da via

**V** – Velocidade

O coeficiente  $A$  da expressão resulta de dados experimentais e é função da massa total da composição assim como da carga por eixo multiplicados por um fator  $\lambda$  escrevendo-se de acordo com a Eq. 4

$$A = \lambda \sqrt{\frac{10}{m}} M \quad (4)$$

Em que:

**A** – Coeficiente da Eq.3 [N]

$\lambda$  – Coeficiente numérico

**M** – Massa total da composição [ton]

**m** – Carga média por eixo [ton]

O coeficiente numérico  $\lambda$  é dependente da via, e devido à modernização dos caminhos férreos e à uniformização dos componentes utilizados no material circulante, o valor de  $\lambda$  está compreendido entre 9 e 18, sendo mais alto no caso de locomotivas suburbanas e mais baixo no caso de comboios de alta velocidade.

O coeficiente B depende da massa total da composição e define-se pela Eq. 5

$$B = bM = 0.1M \quad (5)$$

Em que:

**B** – Coeficiente da Eq.3 [N]

**b** – Coeficiente numérico com um valor normal de 0.1

**M** – Massa total da composição [ton]

O coeficiente C depende da forma e das dimensões do comboio, representando os esforços aerodinâmicos incidentes no comboio, de acordo com a Eq. 6

$$C = K_1s + K_2pL \quad (6)$$

Em que:

**C** – Coeficiente da Eq.3 [N]

**K<sub>1</sub>** – Coeficiente global de forma das extremidades do comboio

**K<sub>2</sub>** – Coeficiente característico da rugosidade da superfície molhada

**s** – área frontal projetada [m<sup>2</sup>]

**p** – Perímetro molhado, carril a carril (m)

**L** – Comprimento total da composição (m)

Para além da resistência criada pelo avanço da locomotiva é necessário também ter em conta o percurso que esta está a percorrer, cujo valor da resistência varia consoante a inclinação e o raio de curvatura da via, dado que o mesmo veículo, dependendo da via em que circula, pode sofrer alterações significativas no seu consumo e produção de energia.

Sendo o processo de recolher informação para toda a extensão da via muito laborioso é necessário simplificar o cálculo desta variável. É comum representar um troço da via com várias curvas e inclinação constante, por meio de um troço retilíneo equivalente com inclinação compensada  $i'$ , a resistência ao movimento devido a esta inclinação pode ser representada por uma expressão que engloba a resistência criada pela inclinação da rampa real assim com a resistência criada pelas curvas que se encontram nessa rampa.

Assim num troço **AB** retilíneo e com inclinação constante que representa um certo segmento **X** da linha com várias curvas, mas inclinação constante, pode-se escrever que o trabalho realizado pela locomotiva para percorrer o troço **X** [ $W_x$ ] é igual ao trabalho realizado para percorrer o troço **AB** [ $W_{AB}$ ]. (Eq. 7)

$$W_X = W_{AB} \quad (7)$$

Logo para o troço X o trabalho realizado é dado pela integração da força necessária para movimentar a locomotiva no percurso (Eq. 8)

$$W_X = \int_0^L F dL = F_i L + F_{s1} L_{s1} + \dots + F_{sn} L_{sn} \quad (8)$$

Sendo **L** a distância real e **S** a distância medida na horizontal. Como as inclinações das vias ferroviárias são relativamente pequenas pode-se considerar que **L=S** [9], de acordo com a Eq. 9

$$W_X = M g i S + M k \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{p_j} \quad (9)$$

Em que:

**M** – Massa total da composição[ton]

**g**- Aceleração da gravidade[m/s<sup>2</sup>]

**i**- Inclinação da via [°]

**S** – Distancia total da via medida na horizontal [m]

**k** – Constante adimensional que depende do material da via

**p** – Raio de curvatura da secção da via [m]

**L** – Comprimento total da secção da via [m]

O trabalho realizado no troço **AB** é dado pela Eq. 10

$$W_{AB} = \int_0^L F' dL = F'_i L = M g i' S \quad (10)$$

Igualando os dois trabalhos resulta a Eq.11

$$i' = i + \frac{k}{gS} \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{p_j} \quad (11)$$

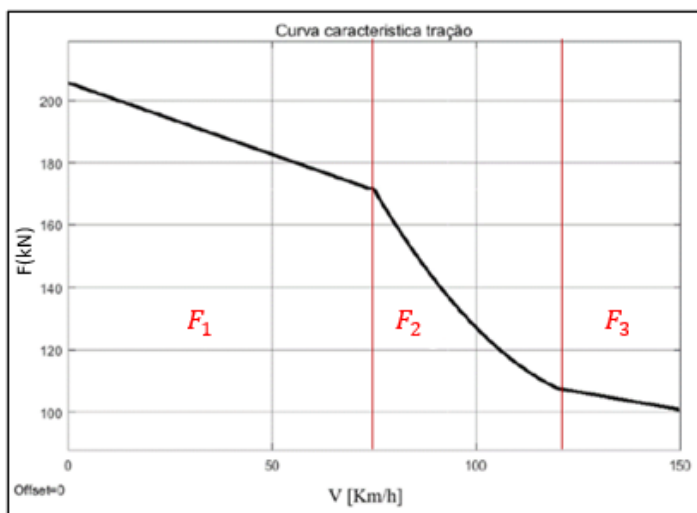
Assim a resistência ao movimento devido á inclinação do perfil compensado é dado pela Eq. 12

$$Rv = Mgi' = Mgi + i + \frac{k}{gS} \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{p_j} \quad (12)$$

O esforço de tração e o esforço de frenagem são obtidos através da curva característica de uma máquina ferroviária. Para este trabalho, por razões de simplificação, foi admitido apenas um tipo de equipamento circulante em todas as linhas ferroviárias. As curvas características mecânicas  $F(v)$  descritas na secção 2.1 podem ser representadas por um conjunto de três ou mais polinómios. O código desenvolvido permite inserir qualquer conjunto de três polinómios para representar a curva característica quer do esforço de tração quer do esforço de frenagem.

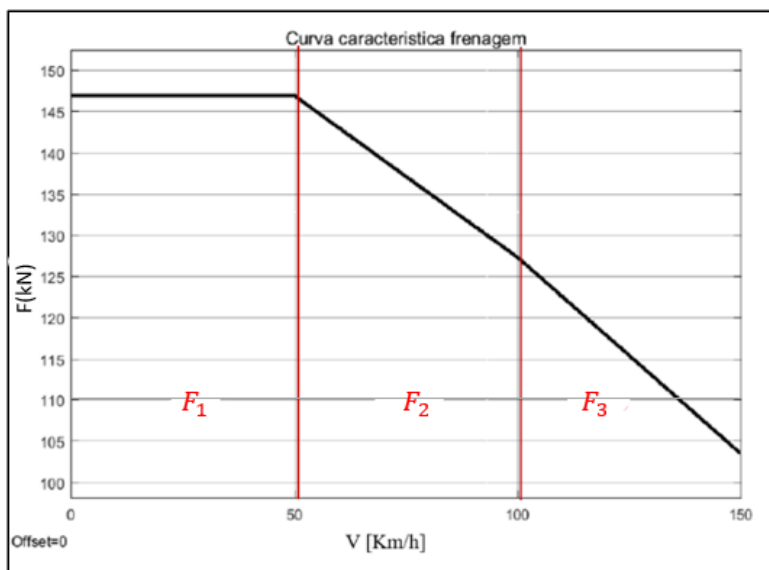
Para inserir a curva característica basta especificar o valor do índice de cada grau do polinómio estando este ficheiro preparado para polinómios com grau igual ou inferior a quatro. É necessário também inserir o intervalo em que a equação 1 e 2 são válidas sendo a equação 3 a que tende para infinito não necessita de se especificar o intervalo, todo este processo é realizado fora do Simulink num script do Matlab.

As curvas características utilizadas foram retiradas da literatura [9] e são representativas de uma grande parte das máquinas ferroviárias de passageiros que circulam atualmente. Na Figura 30 e na Figura 31 estão as representações gráficas obtidas das curvas características escolhidas para a tração e frenagem respetivamente:



$$\begin{cases} F_1 = 134.848 - 0.2254v \\ F_2 = 434.464 - 4.813v + 1.742v^2 \\ F_3 = 205.8 - 0.457v \end{cases}$$

Figura 30 - Curva característica tração (Adaptado de [9])



$$\begin{cases} F_1 = 147 \\ F_2 = 166.6 - 0.392v \\ F_3 = 175.09 - 0.477v \end{cases}$$

Figura 31 - curva característica frenagem (Adaptado de [9])

Através destas curvas obtém-se o esforço de tração/frenagem ( $F_t$ ), que será utilizado em conjunto com resistência ao avanço ( $R_a$ ) e a resistência imposta pela via ( $R_v$ ) na Eq. 2 para obter a força de tração/frenagem realizado pelo comboio

O cálculo da velocidade que permite o cálculo da potência elétrica é um processo iterativo, onde a velocidade é calculada através da multiplicação da aceleração instantânea pelo tempo decorrido desde o início da marcha. A aceleração é obtida pelo quociente entre a força resultante  $F$  (proveniente da Eq. 2) pela massa  $M$  da composição. Como se trata de um processo iterativo a força resultante utilizada será a do momento imediatamente anterior ( $t-1$ ), de acordo com a Eq. 15.

$$V = \frac{FR_{(t-1)}}{M} t \quad (14)$$

O código criado segue este princípio e permite calcular a velocidade para a aceleração e desaceleração provocada pela força  $F$  resultante da Eq.2, sendo utilizados blocos de decisão para fazer a troca de regime de tração para regime de frenagem. A troca de regime de movimento com aceleração para velocidade constante ocorre quando a locomotiva atinge a velocidade máxima, ou seja, quando a resistência iguala a força de tração ou quando existe um limite de velocidade imposto pelo utilizador a Figura 32 mostra os três regimes em que **A** corresponde à tração, **B** ao regime de velocidade constante e **C** ao regime de frenagem.

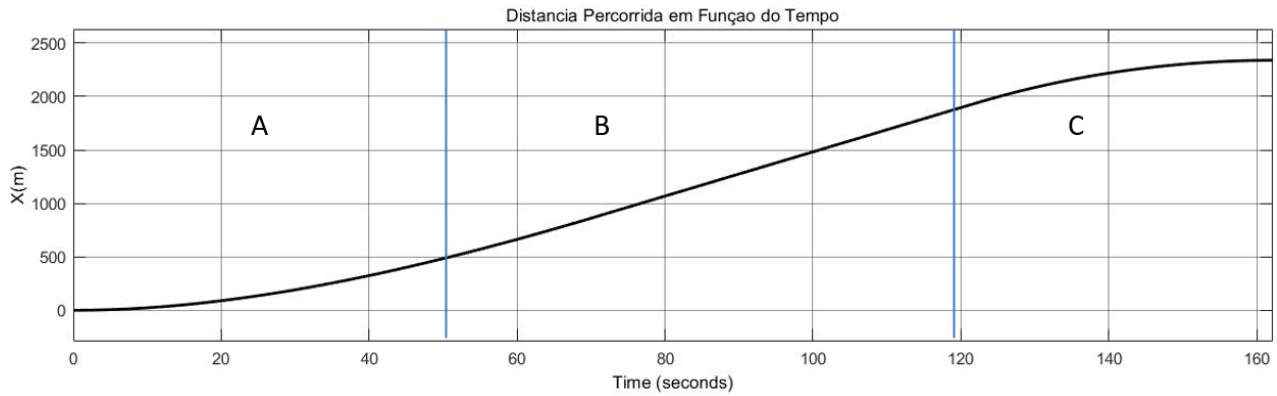


Figura 32- Distancia percorrida em função do tempo

O ponto onde começa a frenagem é calculado com base na distância do comboio a estação começando aproximadamente 1000 m da estação. A distância de frenagem é calculada através das características do comboio e é dada pela Eq. 16:

$$Dt = \frac{T_r V}{3.6} + \frac{\lambda V^2}{25.9 g (a+i'+\psi m)} \quad (16)$$

Onde:

Dt – Distancia de frenagem (m)

V – Velocidade no momento de ativação dos freios (km/h)

Tr – Tempo de reação do maquinista (s)

$\lambda$  – Coeficiente das massas rotativas = 1.1 [15]

a – Coeficiente adimensional [15]

g – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

i' - Inclinação do perfil compensado (%)

$\psi$  – proporção peso-freio do comboio

m – Coeficiente dependente da velocidade do comboio, obtido por [15]

Desta forma, obtêm-se todos os dados necessários para aplicar a Eq.1 de modo a determinar a potência ao longo do tempo da rede ferroviária.

### 3.1.3 – Simulação dos painéis fotovoltaicos

A potência gerada pelos painéis fotovoltaicos calculou-se através dos dados da irradiação solar numa determinada zona. Neste trabalho foi utilizada uma curva de irradiação (Figura 33) media de modo a ser possível determinar a potência total gerada tanto no inverno como no verão poupando assim recursos computacionais a calcular para as duas situações.

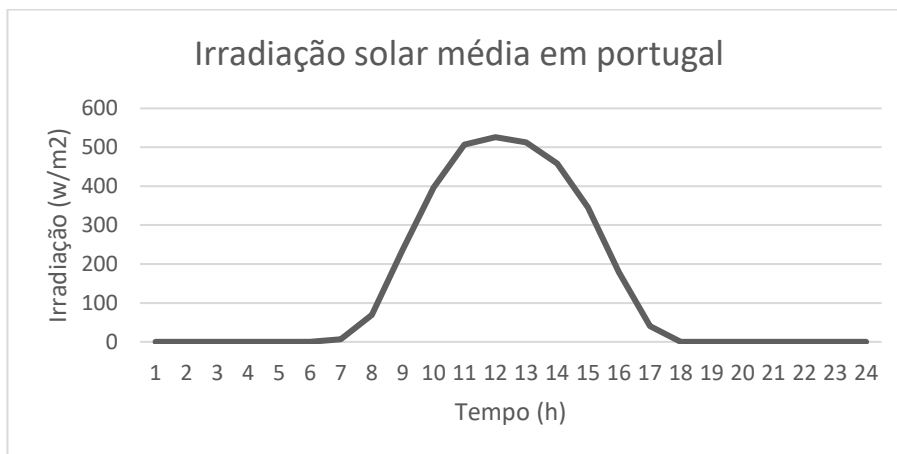


Figura 33 - Irradiação solar media Portugal [38]

O cálculo da potência gerada pelos painéis fotovoltaicos resulta da área e eficiência dos painéis, assim como da irradiação solar disponível no local de implementação ao longo do dia. O cálculo da potência obtida nos painéis fotovoltaicos, num determinado instante, é obtido através da Eq. 17, onde  $I$ ,  $S$  e  $A$  representam a irradiação solar incidente ao longo do tempo, o sombreamento existente e a área de painéis fotovoltaicos, respetivamente, isto multiplicado pelo rendimento dos painéis fotovoltaicos.

$$P = I S A \eta \quad (17)$$

Para o caso estudado, considerou-se uma área de painel de  $1000\text{m}^2$  e  $600\text{m}^2$  para a estação do oriente e de Corroios respetivamente e eficiência 15% para ambas as estações [47].

### 3.1.4 Simulação das cargas impostas pelos veículos elétricos

De modo a simular a carga imposta pelos veículos elétricos é necessário ter em conta três variáveis o número de veículos elétricos, a potência de carregamento e o estado de carga da bateria.

Segundo a agência internacional da energia no ano de 2020 as vendas de veículos elétricos subiram 41% e, como mostra a Figura 34, têm vindo a crescer exponencialmente desde 2010, existindo nos dias de hoje cerca de 12 milhões de veículos elétricos em circulação, representando cerca de 5% do total de veículos [55].

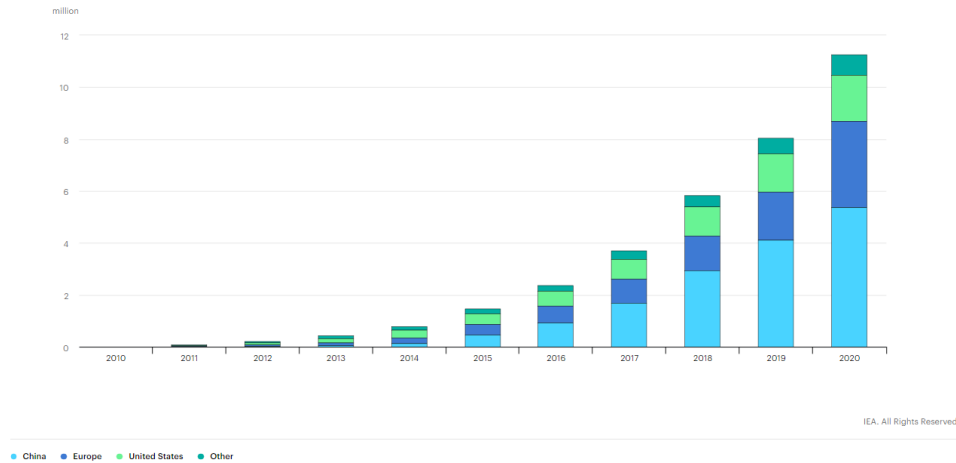


Figura 34- Número de veículos elétricos a nível mundial [56]

Quanto á potência de carregamento, por norma, os postos públicos fornecem uma potência de 2400W a 230V [57].

A gestão do carregamento de veículos elétricos depende essencialmente do estado de carga da bateria e da respetiva capacidade. Numa estação ferroviária é expectável existir alguma aleatoriedade neste ponto. Consequentemente, foram colocadas algumas hipóteses relativamente ao estado de carga na chegada de cada veículo que se ligará à estação ferroviária, nomeadamente: assumiu-se que a energia consumida pelos veículos varia consoante o estilo de condução, de forma aleatória, com valores admitidos neste caso entre 20 e 30 kWh/100km [31]; exceto casos particulares de veículos que realizem viagens longas, num ambiente urbano os veículos percorrem uma distância média de 4 a 20 km por dia [58].

Desta forma, gerando aleatoriamente o consumo/km e a respetiva distância percorrida, é possível deduzir o estado da bateria quando o veículo chega ao posto de carregamento, de acordo com a Eq. 18, onde a percentagem de energia consumida  $SOC_{consumido}$  é calculada através da energia média consumida pelos veículos elétricos  $E_c$ , da distância percorrida  $D$  e da capacidade total das baterias dos veículos  $E_t$ . Salienta-se que foi admitida uma capacidade fixa de 24 kWh das baterias dos veículos elétricos de modo a simplificar a simulação.

$$SOC_{consumido} = \frac{E_c * D}{100 * E_t} \quad (18)$$

No modelo desenvolvido é possível para cada cenário introduzir o número de veículos elétricos, a potência de carregamento e a energia consumida por 100 quilômetros.

De modo a inicializar a simulação é necessário definir o valor inicial do estado da bateria,  $SOC_0$ , gerado através de um número aleatório entre 20 e 80% da carga total. De modo a ser possível inserir um elevado número de veículos foram criados 11 cenários de carregamento que representam várias rotinas de carregamento nos quais é possível atribuir um certo número de veículos [28].

O estado da bateria ao longo do tempo é dado pela Eq. 19 e representa o efeito que as rotinas de carregamento irão ter na bateria do veículo. Ao estado de carga inicial  $SOC_0$  arbitrado aleatoriamente, irá ser retirada a energia consumida até à estação, que é calculada tendo em conta a distância de viagem media num ambiente urbano como mostra a Eq.18, e adicionado o estado de carga quando este se encontra disponível para carga, já na estação.

$$SOC(t) = SOC_0 - SOC_{consumido}(t) + SOC_{carregado}(t) \quad (19)$$

A percentagem de energia carregada irá depender da potência de carregamento dos postos, assim como o tempo disponível para o mesmo, de acordo com a Eq. 20, onde  $P_c$  corresponde à potência de carregamento,  $E_t$  à capacidade total da bateria e  $t_{carregamento}$  ao tempo em que o veículo se encontra em carga.

$$SOC_{carregado} = \frac{P_c}{E_t} * t_{carregamento} \quad (20)$$

Os veículos elétricos apenas carregam quando o valor de SOC é inferior a 100%, sendo a potência total obtida pela Eq.21, onde  $N_{veiculos}$  traduz o número de veículos que se encontram disponíveis para carga.

$$P(t) = P_c * N_{veiculos} \quad (21)$$

No modelo criado é possível para cada cenário introduzir o número de veículos assim como a capacidade máxima da bateria definida a 24 kWh, a potência de carregamento e a energia consumida em 100 quilômetros, como mostra o exemplo da Figura 35.

```

%cenario 2
Ncarros2=20;
Etotal_carro2=24000; %Wh
P_carregamento2=2400; %W
EConsumida_100Km2=20000 + (30000-20000) .* rand(Ncarros2,1); % Wh/100km
Estado_B2= 0.2 + (0.8-0.2) .* rand(Ncarros2,1);

```

Figura 35 - Introdução Dados relativos aos veículos elétricos

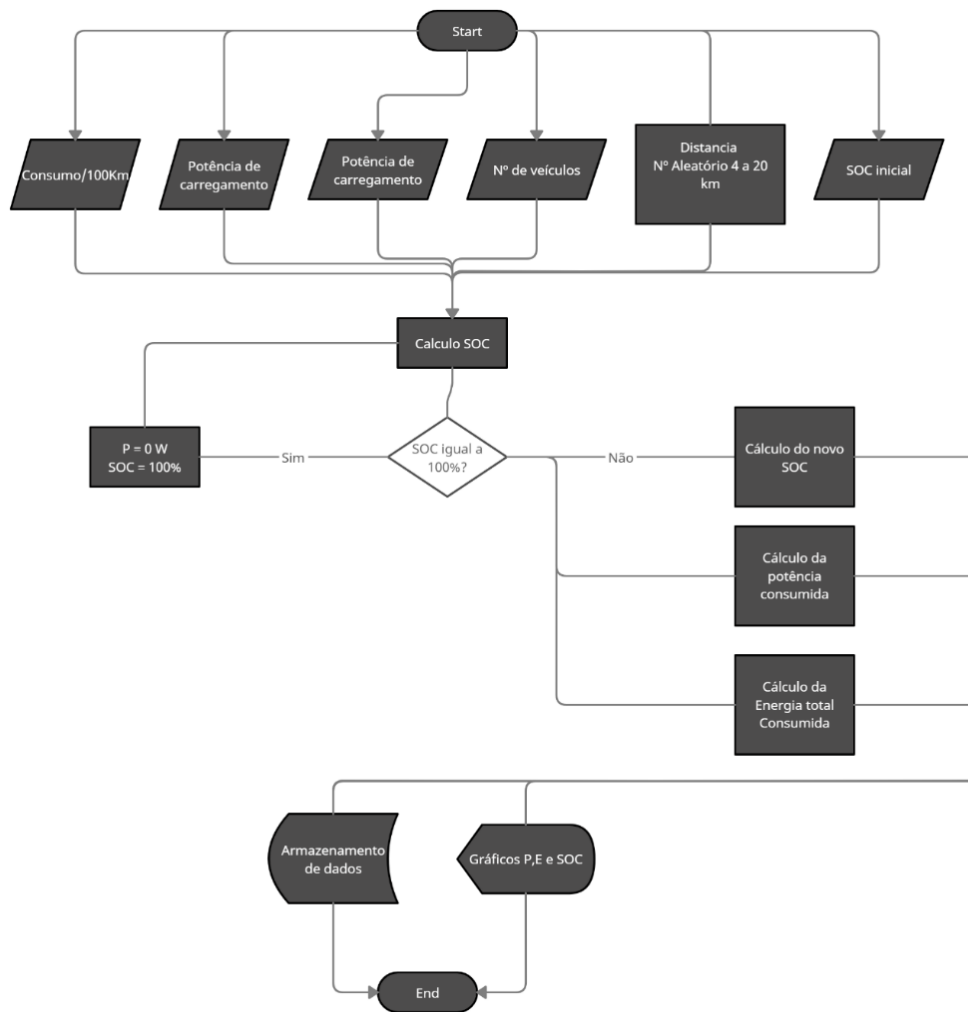
De modo a ser possível inserir um elevado número de veículos foram criados 11 cenários de carregamento nos quais é possível atribuir um certo número de veículos. A Tabela 4 define estes cenários em que a verde estão as horas em que o veículo se encontra no parque disponível para carregamento. Estes cenários pretendem modelar com maior precisão o fluxo de veículos elétricos na estação, tendo em conta 11 diferentes rotinas que os condutores destes veículos possam ter.

Tabela 4 - Cenários de carregamento veículos elétricos

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Cenário 1						█	█	█	█	█	█	█	█			█	█							
Cenário 2									█	█	█	█				█	█							
Cenário 3										█	█	█	█											
Cenário 4											█	█	█			█	█	█						
Cenário 5																█	█	█	█					
Cenário 6	█	█	█	█	█	█	█	█	█											█	█	█	█	█
Cenário 7	█	█	█	█	█	█	█	█										█	█	█	█	█	█	█
Cenário 8													█	█	█	█	█	█						
Cenário 9													█	█	█	█								
Cenário 10						█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█					
Cenário 11										█	█	█	█	█	█	█	█							

█ -Disponível para carregamento

O modelo Simulink, começa por calcular a distância percorrida por cada veículo. Essa distância que varia entre 4 e 20 quilómetros, para simular diferentes rotinas de condução. Pode-se escolher estas configurações usando uma interface de entrada de dados, eliminando a necessidade de criar 11 subsistemas separados para cada cenário, como mostrado na Figura 35.



*Figura 36 – Algoritmo para simulação dos veículos elétricos*

A Figura 36 ilustra o algoritmo usado para gerar as distâncias percorridas pelos veículos. Uma vez que os cenários para cada grupo de veículos são seleccionados, o código calcula a distância percorrida por cada veículo. O código também garante que os veículos não excedam sua capacidade de carga. Em seguida, é calculado o estado de carga da bateria e a potência que cada veículo vai consumir da estação de carregamento.



*Figura 37 – Resultados VE referentes ao cenário 2*

A Figura 37 exibe um exemplo dos resultados obtidos para um dos cenários com base no modelo referido. Estes resultados fornecem informação sobre o estado de carga e a energia armazenada da bateria de cada veículo, sendo cada veículo representado por uma curva de cor diferente, o terceiro gráfico refere-se a potencia que é necessário fornecer aos postos de carregamento para alimentar os veículos deste cenário. É de notar que numa simulação serão gerados 11 conjuntos de resultados como o da Figura 37, isto permite avaliar como os diferentes cenários afetam a carga na estação de carregamento e os seus requisitos de energia.

### **3.1.5 – Simulação do elemento de armazenamento da estação**

Vários modelos de baterias têm a ser vindo desenvolvidos com diferentes níveis de complexidade. A maior parte são desenvolvidos para casos específicos para o projeto de baterias com o objetivo de prever a performance e simular os circuitos elétricos.

Modelos eletroquímicos são usados principalmente para aspetos físicos do design das baterias, caracterizam os mecanismos fundamentais de geração de energia e relacionam

os parâmetros de design das baterias com informações macroscópicas (por exemplo, tensão e corrente) e microscópicas (por exemplo, distribuição de concentração), no entanto estes modelos são complexos e demasiado morosos em termos de tempo necessário para a simulação [59].

Modelos matemáticos são demasiado abstratos para aplicações práticas, pois não são capazes de fornecer informação relacionada com corrente e tensão que seja útil para a simulação e otimização do sistema, não deixando de notar que estes modelos são a base para outros que o permitem fazer [60][61].

Modelos elétricos tem uma precisão que se encontra entre os modelos eletroquímicos e matemáticos com cerca de 1% a 5% de erro [59], estes consistem numa combinação de resistências e condensadores com o objetivo de serem integrados facilmente em outros circuitos. Estes modelos são mais práticos e fáceis de interpretar especialmente quando usados em conjunto com outros sistemas. A maioria destes modelos enquadra-se em três categorias básicas: Thevenin, impedância e modelos baseados no tempo decorrido. O modelo utilizado, representado na figura 38, permite simular respostas transientes do sistema através de um circuito baseado no modelo de Thevenin [59]. O circuito adotado permite prever a resposta em regime transiente da bateria, recolhendo toda a informação necessária como a capacidade disponível, a tensão, corrente debitada e a resposta do sistema [59].

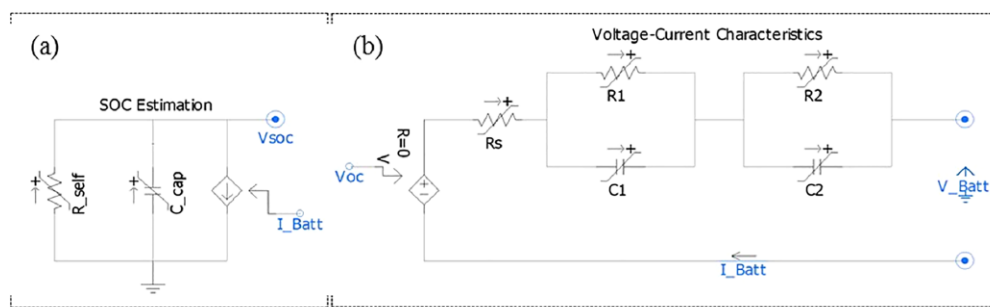


Figura 38 - Modelo de bateria utilizado. Fonte: [62]

O modelo é composto por dois sub-circuitos a) e b): a Figura 38 a) apresenta a modelação que permite determinar o estado de carga (SOC) da bateria, em que  $R_{self-discharge}$  representa a descarga da bateria quando não existe carga induzida pelo sistema, o valor do condensador representa a capacidade da bateria e a tensão do condensador é aproximadamente o SOC da bateria. Este subsistema varia de acordo com uma corrente induzida exterior, proveniente do subsistema apresentado na Figura 38 b). O subsistema b)

gera a quantidade de corrente que circula na bateria assim como a tensão nos seus terminais ( $V_{batt}$ ), que é função da tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ . Os componentes resistivos representam as perdas e os capacitivos definem os atrasos na resposta da bateria. Todos estes são dependentes do SOC e podem ser calculados através das seguintes expressões empíricas de acordo com as Eq. 22 [62][63].

$$\begin{aligned}
 V_{oc} &= -1.031 \times e^{(-35 \times SOC)} + 0.3201 \times SOC^3 - 0.1178 \times SOC^2 + 0.2156 \times SOC + 3.685 \\
 R_s &= 0.1562 \times e^{-24.37 \times SOC} + 0.07446 \\
 R_1 &= 0.3208 \times e^{-29.14 \times SOC} + 0.04669 \\
 C_1 &= -752.9 \times e^{-13.51 \times SOC} + 0.07446 \\
 R_2 &= 6.603 \times e^{-155.2 \times SOC} + 0.04984 \\
 C_2 &= -6056 \times e^{-27.12 \times SOC} + 4475
 \end{aligned} \tag{22}$$

O estudo realizado em [62] simplifica o modelo anterior ao substituir o cálculo do SOC calculado pelo subsistema a) baseado em condensadores pelo método de contagem de coulomb (CCM), este método integra o fluxo de corrente para o interior (fase de carga) assim como para o exterior (fase de descarga) ao longo do tempo, com o objetivo de determinar a energia armazenada e libertada. Esta aproximação do SOC pode-se escrever de acordo com a Eq.23, em que o  $SOC_0$  corresponde ao estado de carga inicial definido,  $Q$  traduz a capacidade nominal da bateria e  $I$  indica a corrente que circula no circuito proveniente do subsistema b) da Figura 38.

$$SOC = 1 - \left( \left( \left( 1 - \frac{SOC_0}{100} \right) Q \right) - \frac{(\int I dt)}{Q} \right) \tag{23}$$

Para efeitos de inicialização da simulação foi admitido que inicialmente a bateria estará totalmente carregada, convergindo ao longo da simulação para os valores de operação. O sistema de armazenamento funcionará ligado à rede ferroviária a 25kV com uma capacidade 6000Ah, estando ligado aos restantes elementos da rede por meio de transformadores [64][65].

### 3.2 - Caso de estudo e definição de cenários

Para a realização deste estudo foram criados sete cenários de simulação para ambas as estações admitidas sendo estas uma de grandes dimensões (Gare do Oriente) e uma de pequenas dimensões (Estação de Corroios). A Tabela 5 mostra a características dos cenários admitidos.

Tabela 5 - Definição de Cenários

Cenário	Consumo Ferrovia	Regeneração Ferrovia	Painéis fotovoltaicos	Sistema de Armazenamento de Energia	Incidência de veículos elétricos [%]
1 - Base					0%
2					5%
3					15%
4					25%
5					50%
6					15%
7					15%

Para ambas as estações admitiu-se que os painéis fotovoltaicos estão colocados na cobertura, com uma área de 1000 m<sup>2</sup> para a estação do oriente e 600m<sup>2</sup> para a estação de Corroios. O SEA para os cenários 1 a 5 será instalado em média tensão (25kV) e em baixa tensão (400V) para os cenários 6 e 7 devido à tensão necessária para alimentar a rede ferroviária.

Cenário 1 descreve uma situação em que a energia regenerada é diretamente utilizada para impulsionar os comboios, sendo empregue apenas quando existem comboios a chegar e a partir simultaneamente. Os objetivos dos cenários 2 a 5 visam analisar o aumento na eficiência decorrente da presença de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) carregados pela energia regenerada, bem como painéis fotovoltaicos, que armazenam a energia anteriormente não utilizada na alimentação da rede ferroviária, adicionando ainda uma frota de veículos elétricos, estes que aumentam de 5% a 50% de ocupação do parque da estação consoante os cenários, prevendo o aumento futuro a curto e longo prazo destes veículos. Por fim, os cenários 6 e 7 têm como objetivo estudar o sistema quando não é necessário alimentar a rede ferroviária, sendo a única carga os veículos elétricos, e também avaliar a contribuição dos painéis fotovoltaicos.

## 4 – RESULTADOS

### 4.1 – Validação

#### 4.1.1- Validação modelo cargas imposta pela ferrovia

O modelo das cargas impostas pela ferrovia será validado recorrendo aos resultados obtidos em [14], em que foi desenvolvido um modelo matemático com o objetivo de simular as potências de tração e regeneração de máquinas ferroviárias. O objetivo é verificar que a potência elétrica assim como a potência regenerada estão em concordância.

*Tabela 6 - Características da máquina ferroviária e da via utilizadas no modelo criado*

Parâmetro		Valor
<b>Característica da máquina ferroviária</b>		
Massa total da composição	M	200 t
Carga media por eixo	m	10 t
Área transversal projetada	s	9 m <sup>2</sup>
Coefficiente numérico	b	0,1
Coefficiente de formada das extremidades do comboio	k1	2,00E-02
Coefficiente característico da rugosidade da superfície molhada	k2	2,40E-04
Perímetro molhado, carril a carril	p	0,4 m
Comprimento total da composição	200	m
<b>Característica da via</b>		
inclinação da via	i	-30 a 30
Constante dependente da bitola da via	K	8000
aceleração da gravidade	g	9,81 m/s <sup>2</sup>
Projeção referida a rampa do plano horizontal	S	259
Somatório dos comprimentos das curvas	Lj	200
somatório dos raios de curvatura	Pj	1345

Nas tabelas 6 e 7 estão representadas respectivamente as características da máquina ferroviária utilizadas em [14] e os inputs inseridos no modelo desenvolvido de modo a corresponder ao modelo da literatura.

Tabela 7- Características da máquina ferroviária utilizada por [14]

Parâmetro		Valor
<b>Característica da máquina ferroviária</b>		
Área transversal projetada	s	9 m <sup>2</sup>
Coefficiente de arrasto	Cw	0,5
Massa total da composição	M	200 t
densidade do ar	p	1,225 kg/m <sup>3</sup>

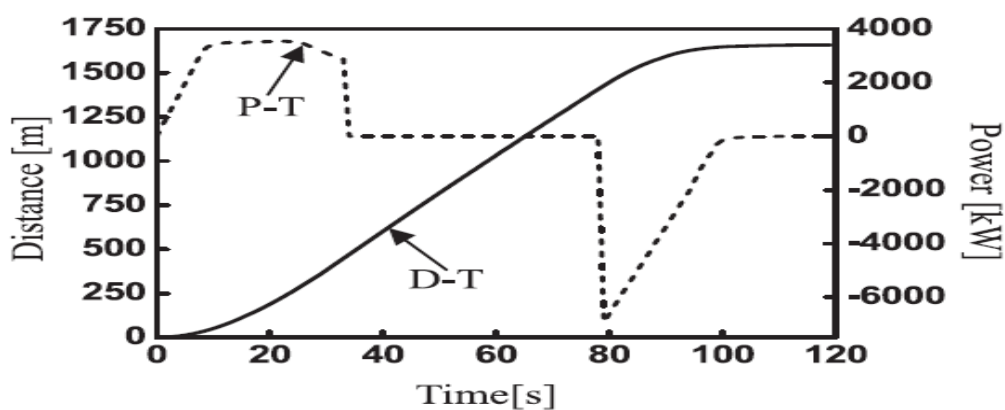


Figura 39 - Resultados obtidos por [14]

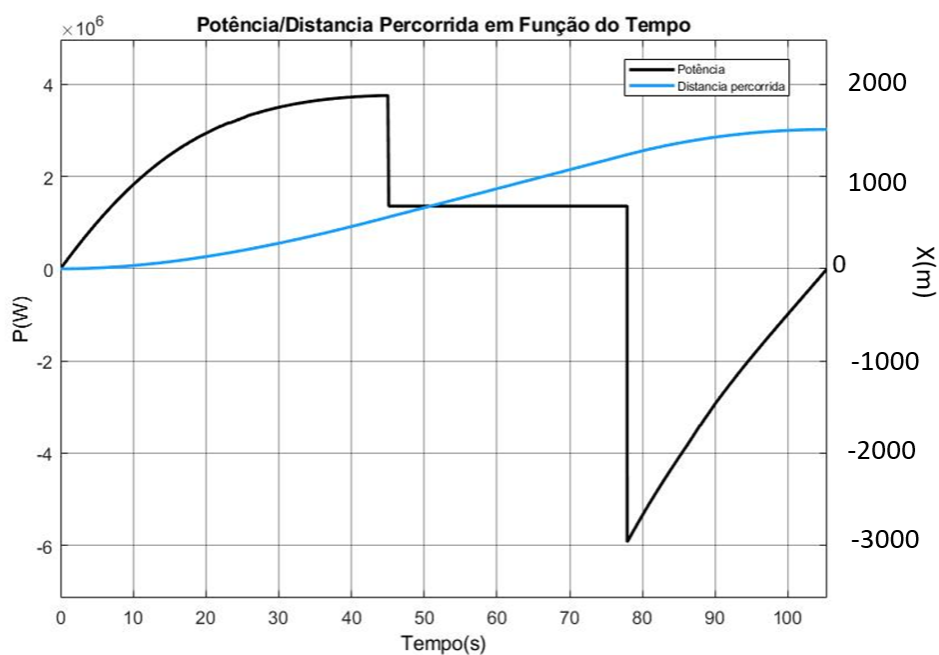


Figura 40- Relação de potência consumida pela ferrovia e distancia percorrida.

O gráfico da figura 40 tem como origem as equações 1 e 14 onde a velocidade obtida pela eq.14 foi traduzida para distancia com base no tempo decorrido na simulação. Comparando os resultados obtidos no modelo criado neste trabalho (Figura 40) com o da bibliografia [14] (Figura 39) verifica-se que convergem para os mesmos resultados tendo a potência regenerada um calor máximo de 6 MW no modelo criado para 6.5MW no modelo de [14] durante cerca de 20 segundos e a força de tração um valor máximo de 4.9MW decrescendo ligeiramente para 1.3 MW no modelo criado para 4.5MW decrescendo para 2.3MW no modelo de [14]. Correspondendo a um desvio de 8% entre os dois modelos.

#### 4.1.2 – Validação do modelo bateria

Para extrair todos os parâmetros no modelo proposto, optou-se por realizar uma comparação deste modelo com valores experimentais típicos de descarga de uma bateria de Li-Ion. Os valores típicos são obtidos através de uma descarga oscilatória entre 0.1C e 1C, em que C corresponde à corrente de descarga que é necessário para descarregar a bateria no espaço de uma hora. Os valores foram obtidos num estudo realizado por [59], apresentando-se na Figura 41 um valor típico de descarga com uma corrente oscilatória de 0.16 A.

A Tabela 8 corresponde às características da bateria utilizada ensaiada em [59]. O modelo foi adaptado para que as baterias simuladas vão ao encontro das características da bateria ensaiada, sendo neste caso constituída apenas por uma célula Li-íon.

*Tabela 8- Características da bateria [45]*

Características da bateria	
Modelo	TCL PL-383562
Tensão	3.8 V
Capacidade	0.8 Ah
Número de células	1
Corrente máxima	2C

A Figura 42 mostra os resultados obtidos através do modelo criado, é de notar que neste modelo o input para a bateria não é corrente, mas sim potência. Assim para corresponder ao valor de corrente admitido em [59] foi necessário fornecer à bateria uma

potência de 0.6 W, representada na Figura 43. A disparidade que se observa no final no modelo experimental mostra uma queda repentina da tensão devido ao facto de esta já se encontrar no fim da sua capacidade, o que não acontece no modelo criado, pelo facto de a bateria ter sido modelada para negar qualquer tipo de descarga quando se encontra a 20% da sua capacidade máxima de modo a evitar danos na bateria. Isto pode-se verificar na Figura 42 na curva que corresponde à corrente, onde existe um corte quando esta atinge um valor próximo de 3.7V.

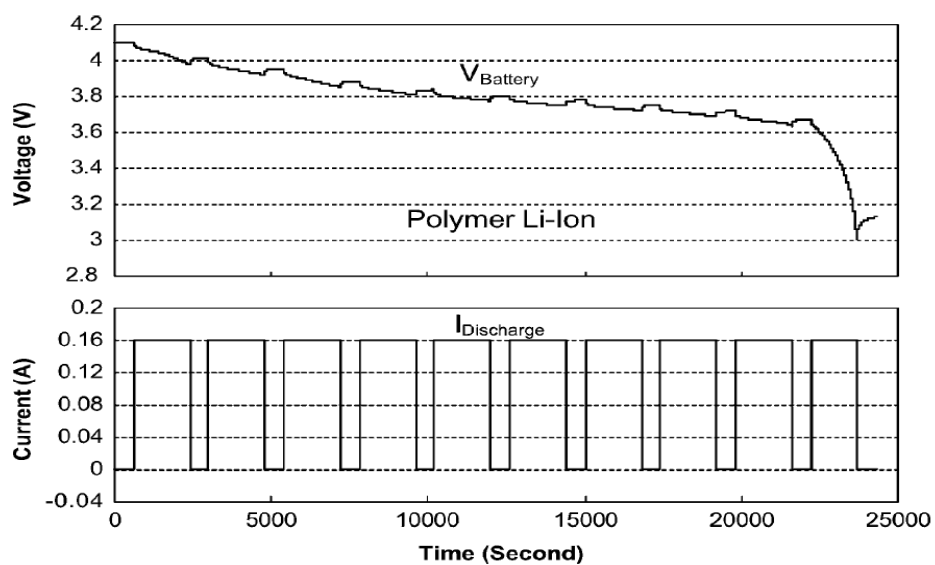
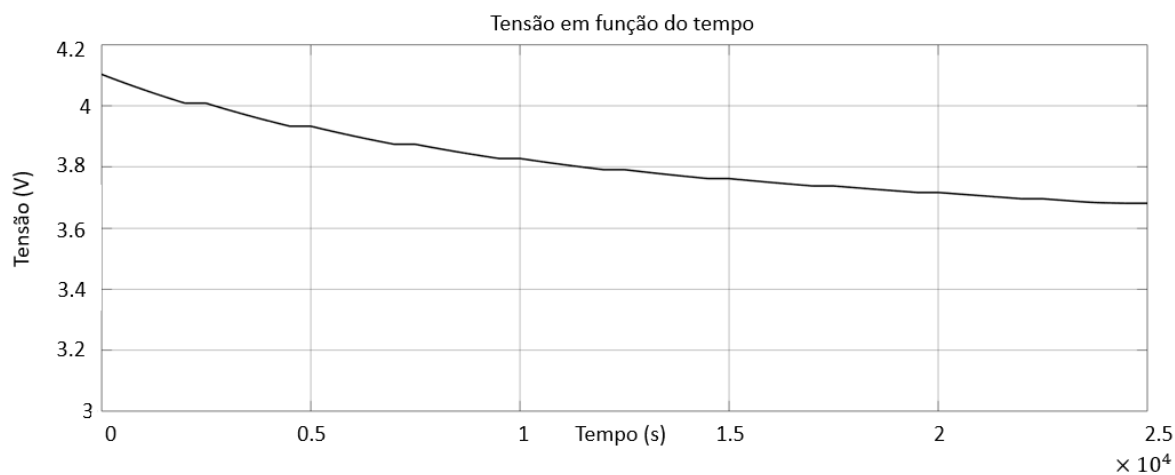
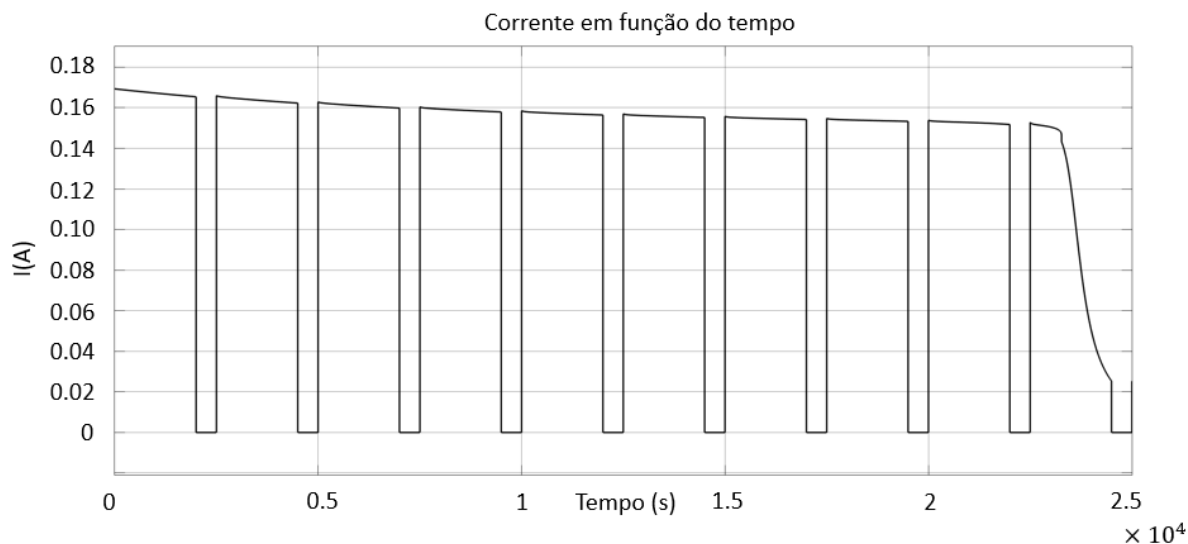
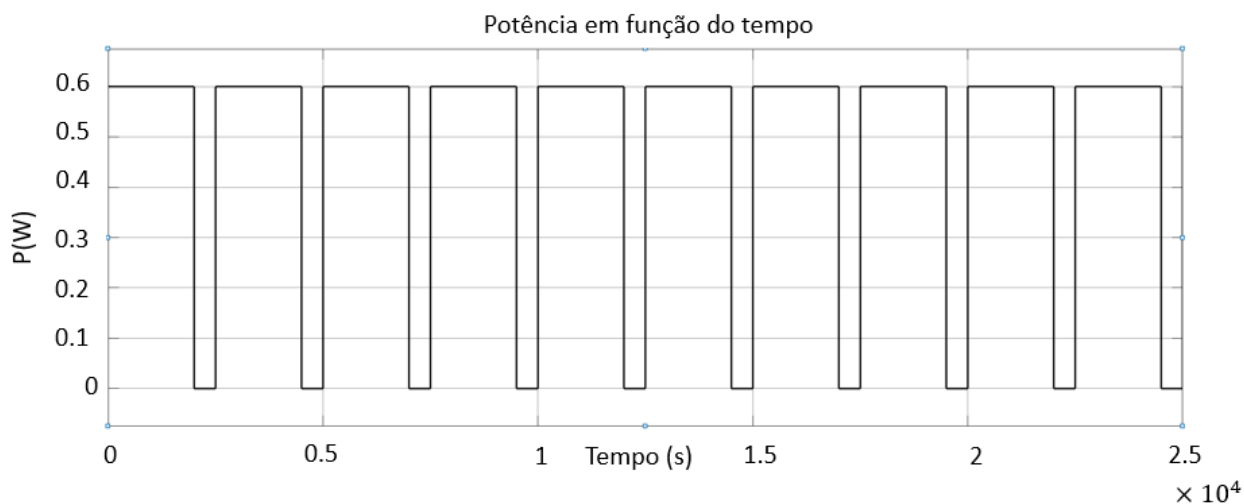


Figura 41 - Curva de tensão típica com corrente oscilatória [45]





*Figura 42- Resultados modelo da bateria*



*Figura 43 - Input de potência no modelo da bateria*

É possível observar que a tensão resultada obtida pelo modelo criado resulta numa curva idêntica à obtida em [45]. Por cada impulso de 0,16A fornecido a tensão da bateria decresce cerca de 0,1V no início da simulação e cerca de 0,05V no final em ambos os casos sendo a disparidade entre os modelos nula.

## 4.2 – Análise de Cenários

Com base no modelo apresentado e descrito na seção 3, é viável calcular a variação da potência que deve ser retirada da rede elétrica, bem como a potência regenerada por meio da frenagem regenerativa e pelos painéis fotovoltaicos. Além disso, é possível

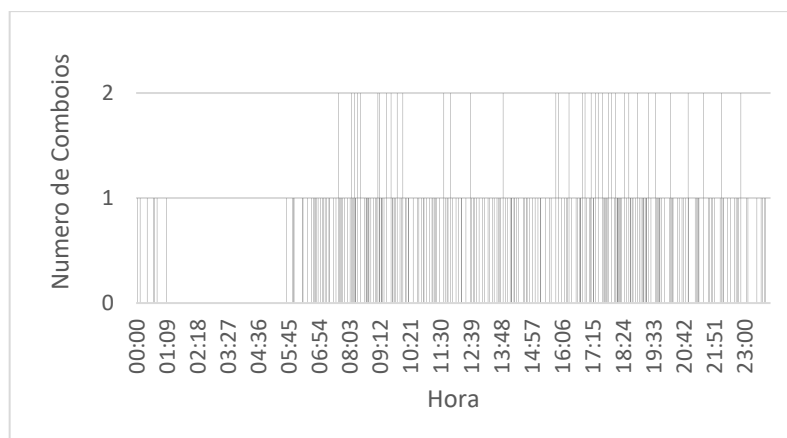
monitorizar a evolução do estado do sistema de armazenamento de energia. Esse processo permitirá uma análise aprofundada das interações e variações no sistema, considerando diferentes variáveis.

No entanto, para realizar essa análise de forma precisa e consistente, é essencial manter constantes, em todos os cenários, as características fundamentais das máquinas ferroviárias, das baterias e dos veículos elétricos. Isso garantirá que as variações observadas sejam atribuíveis a outras variáveis em estudo, proporcionando uma compreensão mais clara e confiável do sistema.

A manutenção das características básicas como constantes ao longo dos cenários permitirá isolar e analisar de forma mais eficaz o impacto das mudanças de outras variáveis como a cadência de comboios na estação, a presença de um SAE, a quantidade de VE e a quantidade de painéis fotovoltaicos. Isto facilitará a avaliação dos benefícios e desafios associados à integração destas tecnologias no sistema ferroviário, contribuindo para a tomada de decisões informadas e otimização do sistema como um todo.

Para analisar o potencial de energia regenerada na frenagem, as Figuras 44 e 45 apresentam a cadência diária de chegadas e partidas de comboios, obtidos através da página da CP, nas estações de grande dimensão (Oriente) e pequena dimensão (Corroios), respetivamente.

Na Figura 44, que representa a cadência na estação Oriente, cada pico corresponde ao número de chegadas/partidas de comboios. Em determinados momentos do dia há mais de uma composição a chegar e a partir simultaneamente, refletindo um alto volume de tráfego ferroviário. Isso se deve à presença de um maior número de linhas na estação do Oriente, o que permite acomodar mais comboios simultaneamente.



*Figura 44- Cadência de chegadas/partidas Oriente*

Por outro lado, na Figura 45, que mostra a cadência na estação Corroios, observa-se que o número de picos é menor em comparação com a estação Oriente. Isso se deve ao fato da estação de Corroios possuir um número mais limitado de linhas, o que resulta em menos composições a chegar e a partir simultaneamente.

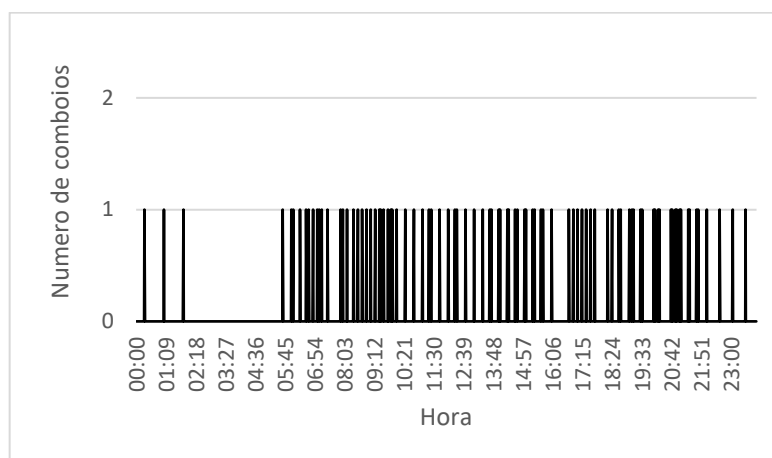


Figura 45 - Cadência de chegadas/partidas Corroios

É importante destacar que a estação de Corroios oferece um espaço consideravelmente maior para o estacionamento de veículos em comparação com a estação Oriente. Enquanto a estação de Corroios dispõe de 1500 lugares de estacionamento, a estação Oriente possui apenas 750 vagas disponíveis. Essa diferença na capacidade de estacionamento implica que a estação de Corroios tem a capacidade de acomodar um número maior de VE, o que pode influenciar diretamente o consumo de energia do sistema.

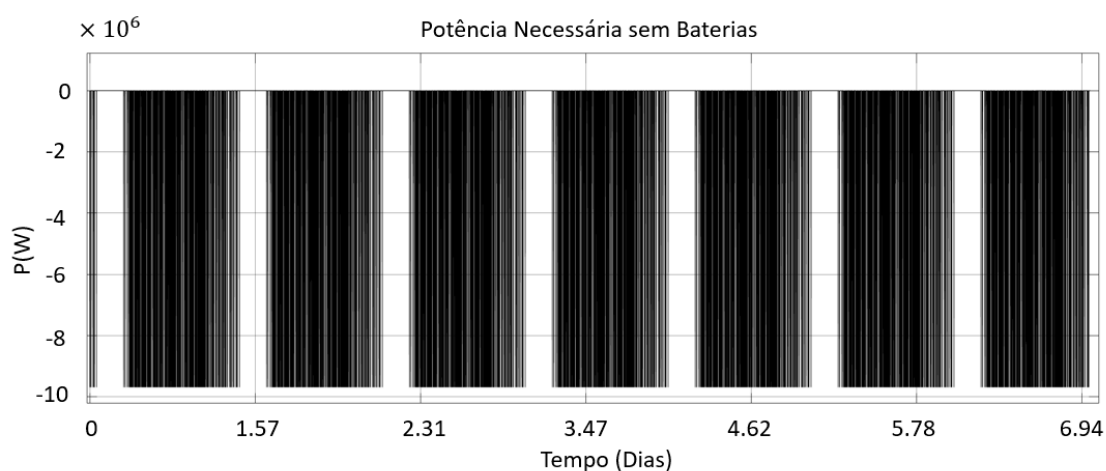
#### 4.2.1 – Cenário 1-Base

No cenário 1, o sistema atual funciona de forma a aproveitar imediatamente a energia gerada durante a frenagem dos comboios para alimentar outros comboios que estejam em aceleração. Em vez de armazenar essa energia para uso posterior, ela é direcionada instantaneamente para fornecer potência aos comboios que estão a iniciar o movimento.

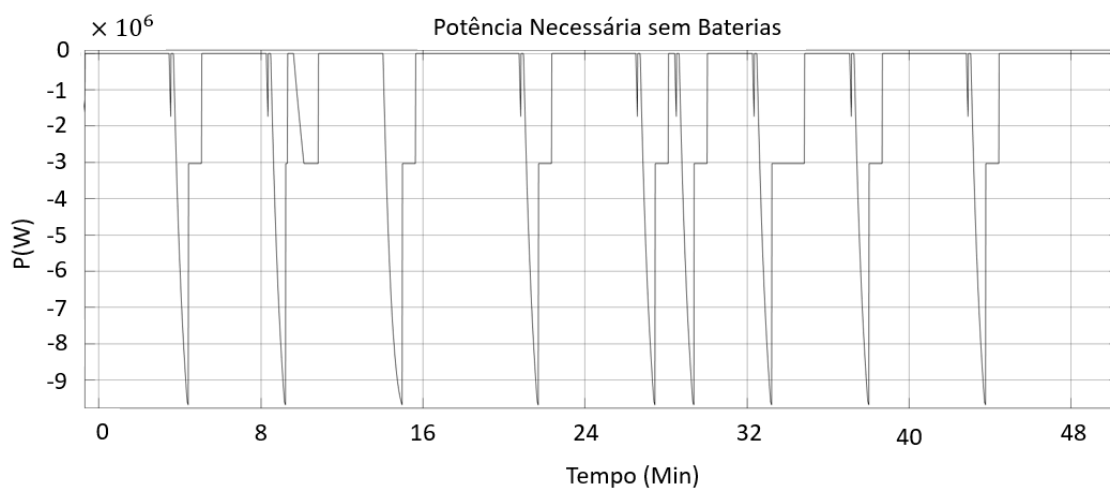
##### 4.2.1.1 – Estação do Oriente

No cenário 1, que corresponde à estação de grande dimensão, os gráficos apresentados nas Figuras 46 a 49 fornecem informações sobre o consumo e regeneração de energia do sistema.

Nas Figuras 46 e 47, é apresentada a energia que precisa ser retirada da rede elétrica para alimentar exclusivamente a rede ferroviária. Verifica-se uma série de picos, cada um equivalente à partida de um comboio. Cada comboio leva 60 segundos para sair da área coberta pela estação e começar a ser alimentado por outra subestação. Isso justifica o fato de apenas parte de a curva de potência ferroviária ser visível. Observa-se que cada comboio, ao iniciar, consome até 9.8 MW e, em seguida, passa para um regime contínuo a velocidade constante, consumindo 3.7 MW.

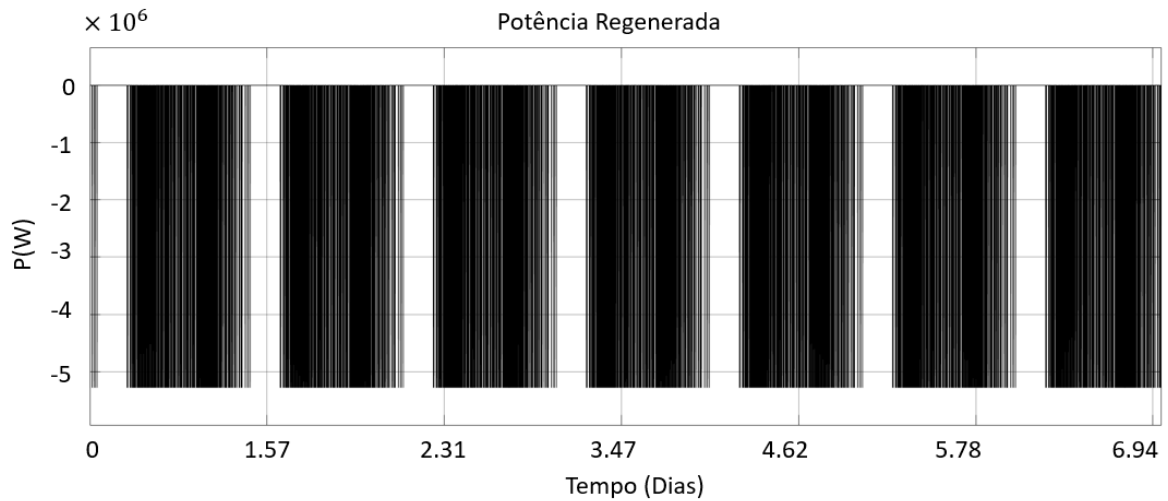


*Figura 46- Potência necessária da rede- Cenário 1*

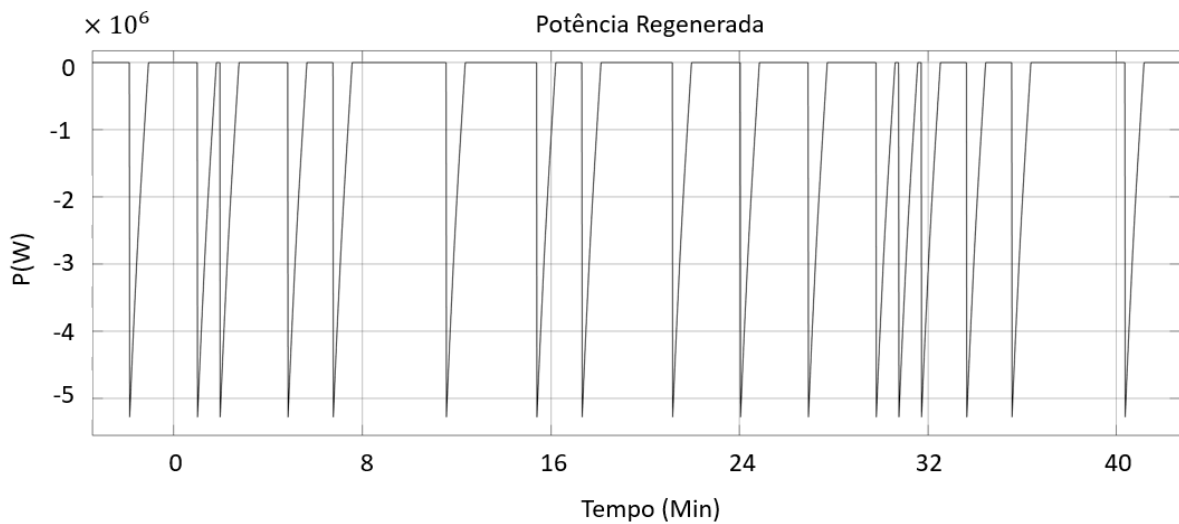


*Figura 47- Potência necessária da rede- Cenário 1(ampliação)*

Quanto há regeneração, de acordo com a Figura 48 e 49, cada máquina ferroviária é capaz de regenerar até 6 MW, diminuindo gradualmente à medida que a velocidade diminui durante o processo de frenagem, que dura cerca de 60 segundos. É importante notar que cada pico representa a chegada de um comboio.



*Figura 48 - Potência regenerada cenário 1*



*Figura 49- Potência regenerada cenário 1(ampliação)*

Ampliando e sobrepondo a Figura 47 e a Figura 49, obtemos o resultado da Figura 50 a), onde a preto está representado a potencia necessária para a tração e a vermelho a potencia regenerada, é possível verificar que, coordenando as chegadas e as partidas, parte da energia consumida durante o arranque pode ser fornecida através da regeneração. Isso pode levar a uma parcial independência da rede. Quando observado em uma escala diária maior, percebe-se que este fenómeno se repete várias vezes ao dia. O gráfico b) da Figura 50 representa a curva de velocidade de cada locomotiva na e chegada (Preto) e partidas (vermelho) é de notar que apenas parte da curva esta representada pois o modelo apenas contabilizar 1000m a montante e jusante da estação ferroviária.

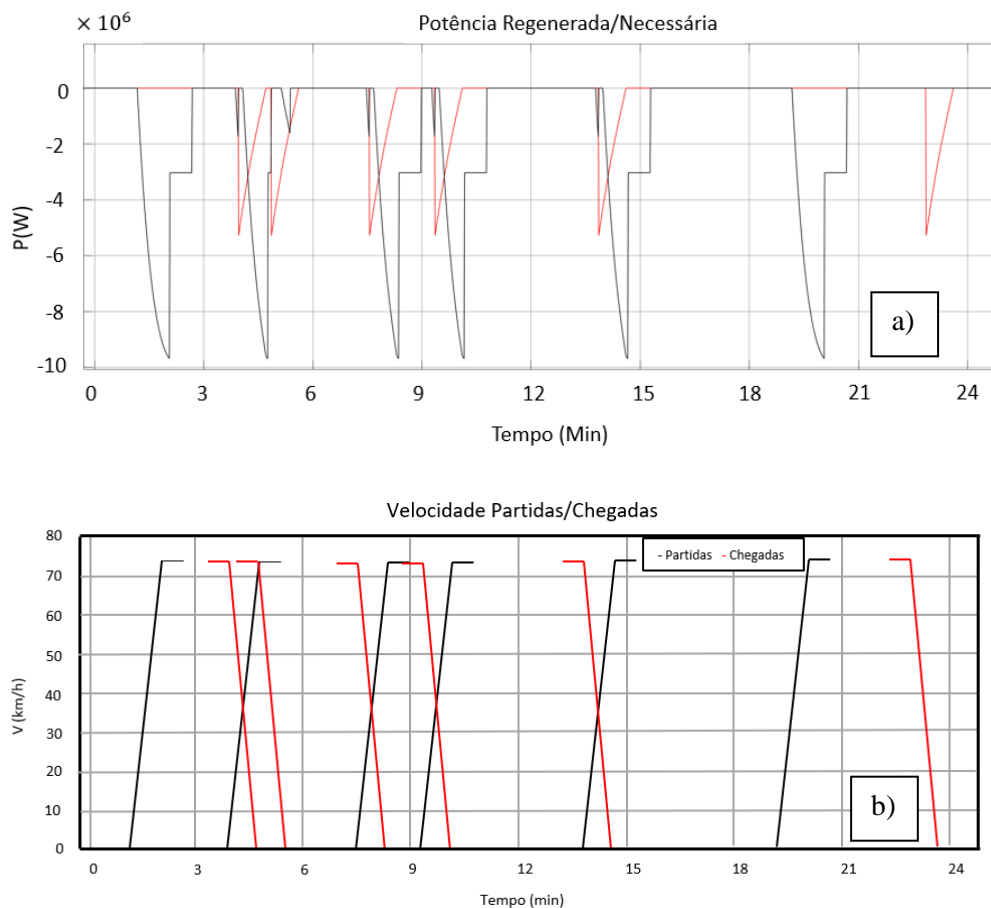


Figura 50 - Potência regenerada (Vermelho); Potência necessária cenário1(Preto)

#### 4.2.1.2 – Estação de Corroios

Os resultados do cenário 1 para a estação de pequenas dimensões são semelhantes aos resultados da estação de grandes dimensões. No entanto, devido ao menor tráfego ferroviário e à menor frequência, a energia consumida e a energia regenerada são menores. A Tabela 9 apresenta um resumo dos resultados deste cenário, bem como uma comparação com o cenário 1 da estação de grandes dimensões.

Tabela 9 - Comparação cenário base entre as duas estações

	Energia Requerida da rede	Potencial Energia regenerada
Estação grande dimensões [MWh]	181.4	59.3
Estação pequenas dimensões [MWh]	92.6	21.9

Ao analisar a Tabela 9, observa-se que a energia regenerada representa 32% e 23% da energia exigida pela rede ferroviária na estação de grandes e pequenas dimensões, respectivamente. É importante notar que este valor corresponde à energia disponível para utilização. No entanto, devido às limitações impostas pelos equipamentos que irão utilizar ou armazenar essa energia, ela não será totalmente utilizada, como veremos nos próximos cenários.

#### 4.2.2 – Cenário 2,3,4 e 5 – Sistema completo

Nos cenários 2, 3, 4 e 5, o objetivo é analisar como os veículos elétricos afetarão um sistema semelhante. Essa análise será feita através de ensaios que variam a proporção de carros elétricos em relação aos carros a combustão, começando com 5%, o que reflete os números atuais, e indo até 50%, considerando o aumento futuro esperado a curto e longo prazo no uso de veículos elétricos.

##### 4.2.2.1 – Estação do Oriente

A Tabela 14 10 apresenta as características dos elementos que compõem a rede, incluindo os veículos elétricos, o sistema de armazenamento e os painéis fotovoltaicos. Estes parâmetros descrevem as especificações técnicas dos elementos da rede e são essenciais para calcular e dimensionar o sistema em questão.

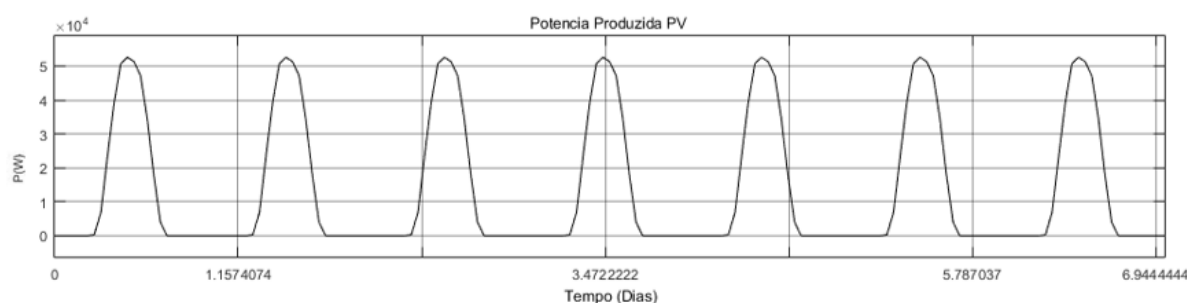
Tabela 10- Características dos elementos referentes aos cenários 2 a 5

Parâmetro		Valor
<b>Características dos veículos elétricos</b>		
Capacidade da bateria	E	24 kWh
Potência de carregamento	Pc	2400 W
Energia consumida em 100Km	E_100	20 kWh a 30 kWh
Estado inicial da bateria	Ei	20% a 80%
Distancia mínima percorrida	Dmin	2 km
Distancia máxima percorrida	Dmax	10 km
Número de veículos	Nc	5% a 50% da capacidade máxima

Tabela 10 (continuação)- Características dos elementos referentes aos cenários 2 a 5

<b>Características do sistema de armazenamento</b>		
Capacidade	C	3000 Ah
Tensão por célula	Vcell	3,8V
<b>Parâmetro</b>		<b>Valor</b>
<b>Características do sistema de armazenamento (Continuação)</b>		
Tensão total	V	25 kV
Total de células	Nc	328 950
Corrente máxima	Imax	450 A
Potência máxima	Pmax	11 MW
<b>Painéis fotovoltaicos</b>		
Número de painéis	Np	500 Un.
Área ocupada	A	1000 m <sup>2</sup>

Figura 51 mostra a potência que é produzida pelos painéis fotovoltaicos ao longo dos sete dias de simulação. Verifica-se que os 1000 metros quadrados de painéis fotovoltaicos admitidos para a estação do Oriente fornecem uma potência até 50 kW de pico por dia.



*Figura 51- Resultados painéis fotovoltaicos para os cenários 2,3,4,5*

A Figura 52 mostra a potência fornecida pela rede elétrica (Figura 52a), assim como a potência regenerada pela rede ferroviária (Figura 52b) que será utilizada diretamente para alimentar o sistema ou armazenada em baterias caso estejam integradas. A partida de um comboio (período de aceleração) pode ser associada a um consumo crescente até atingir um pico de 9.8 MW, seguido de um consumo mais baixo de 3MW (velocidade constante), tal como se observa na Figura 52 a). No caso de não existir regeneração, a potência associada à partida dos comboios é totalmente fornecida pela rede (Figura 52 a), entre os minutos 15 e 20). Em períodos em que existe regeneração de eletricidade decorrente da

frenagem associada à chegada de comboios (Figura 52b), em torno do minuto 5), verifica-se um decréscimo da energia solicitada à rede elétrica quando ocorre um cruzamento entre comboios que chegam e partem.

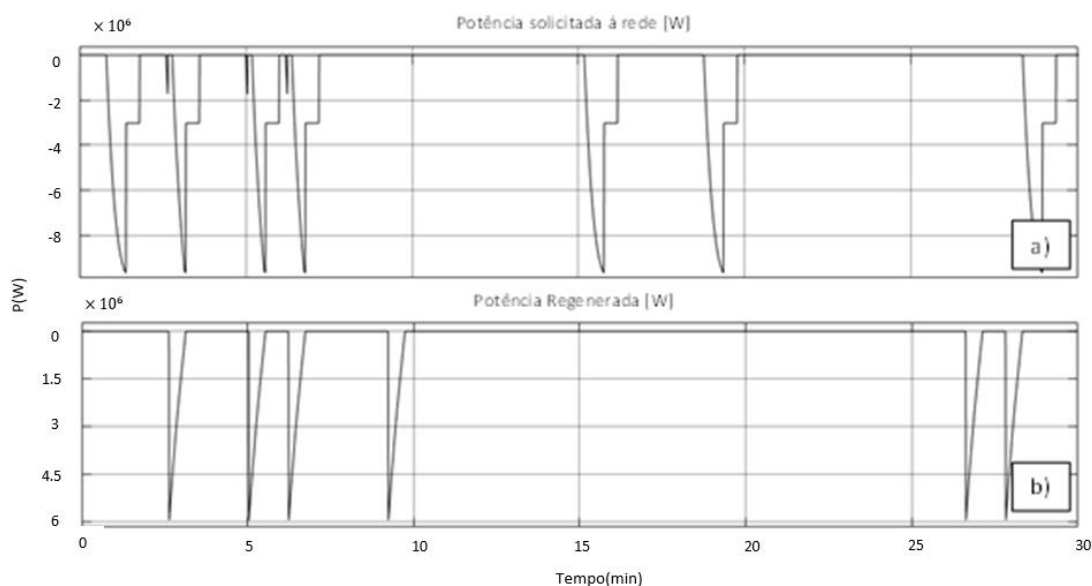
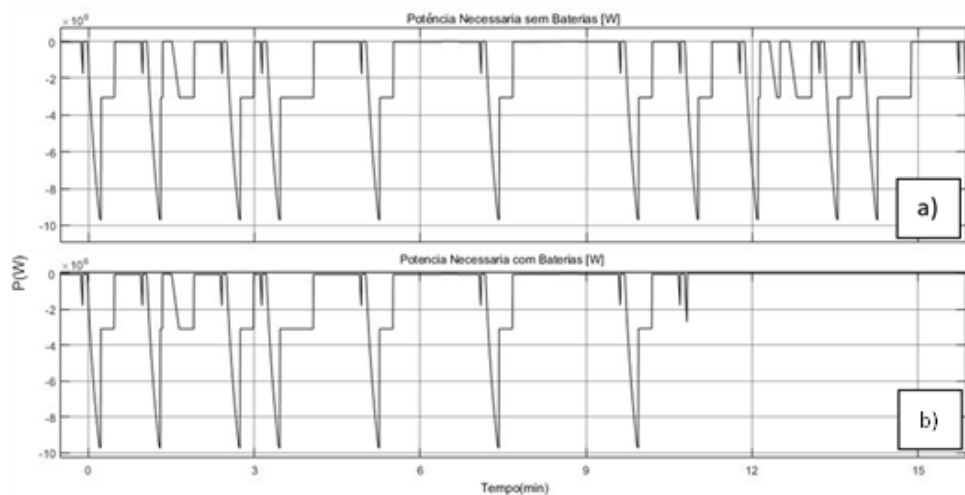


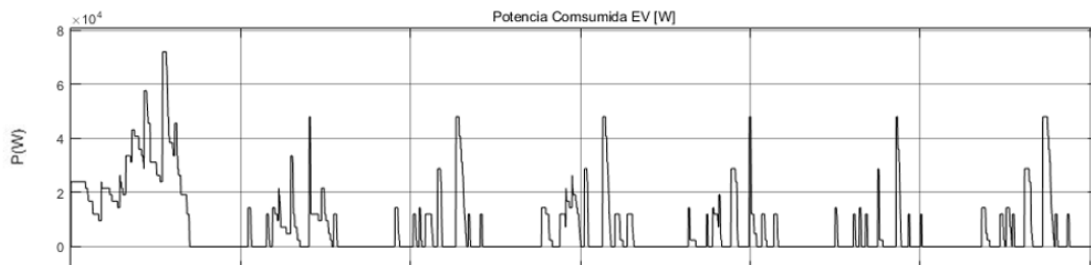
Figura 52 - Potência solicitada à rede (a) e regenerada pela rede ferroviária (b) para o cenário 2

As Figura 53 a) e b) representam a potência solicitada à rede sem a implementação de um sistema com baterias estacionárias e com a utilização deste sistema, respetivamente. É possível identificar os períodos em que as baterias são capazes de suportar por inteiro as solicitações da ferrovia, Gare do Oriente e veículos elétricos. Por exemplo, entre o minuto 12 e 15, constata-se que sem suporte das baterias (Figura 53 a) é necessário recorrer à rede, enquanto no mesmo período na Figura 53 b) a potência fornecida pela rede é nula.

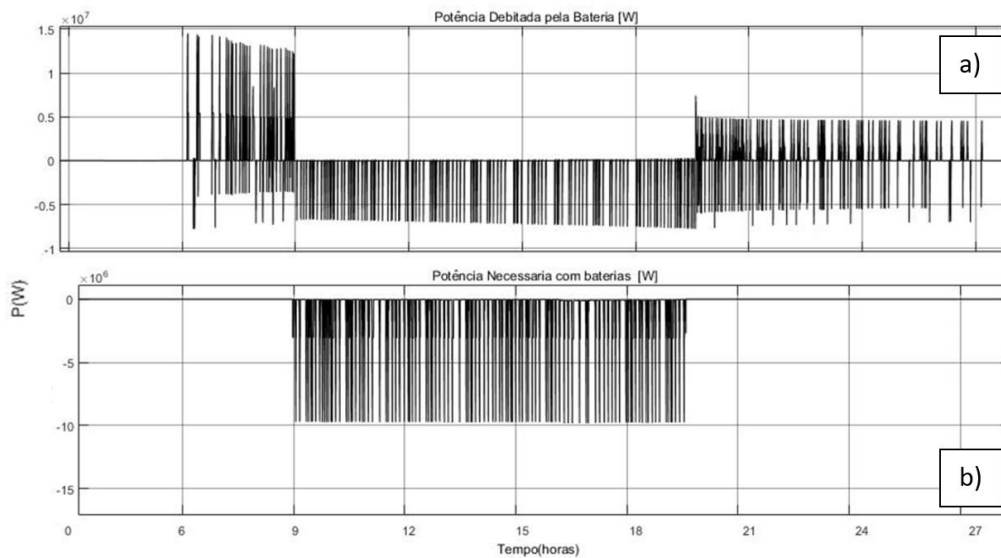


*Figura 53 – Resultados referentes à potência do cenário 2*

O consumo associado ao carregamento dos veículos elétricos está representado na Figura 54, verificando-se que no primeiro dia o consumo de energia é 60% mais elevado comparativamente aos restantes, chegando a ter um pico de consumo de 70 kW enquanto durante o resto da simulação o máximo verificado é de cerca de 42kW. Isto deve-se ao facto de ser necessário uma inicialização à simulação, admitindo-se que os veículos chegam à estação com SOC inferior a 40%, sendo que nos dias seguintes este valor já se encontra estabilizado e é representativo do que seria próprio das premissas assumidas na secção 3.1.4. para veículos que realizam uma rotina urbana.

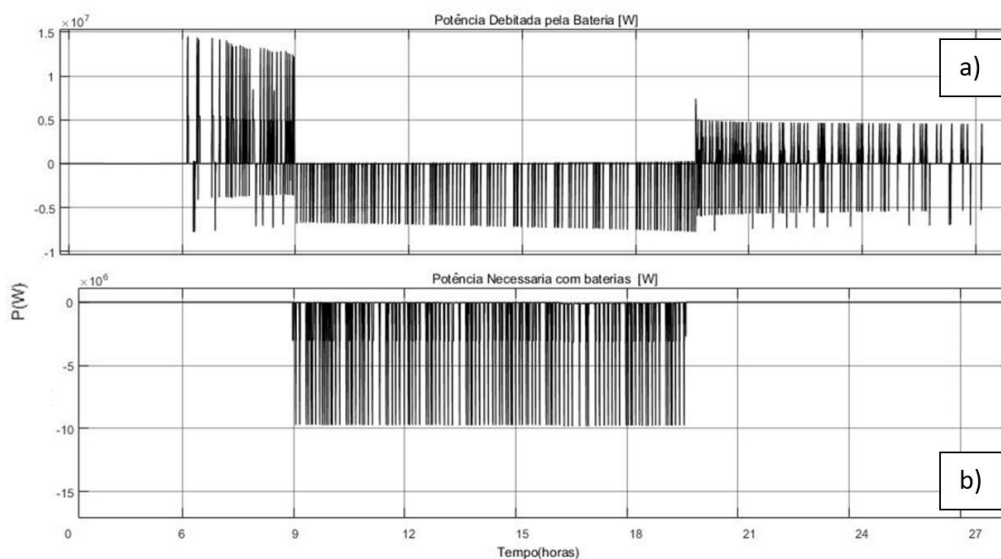


*Figura 54 - Potência consumida VE para o cenário 2*



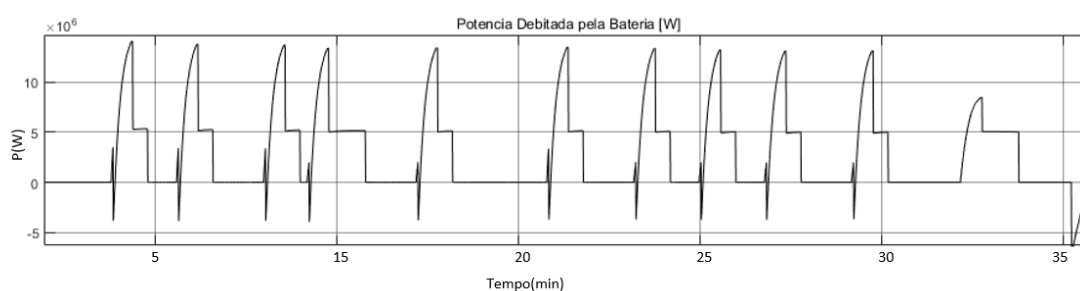
*Figura 55 - Potência debitada pela bateria no cenário 2*

O gráfico da Figura 56a) representa a potência que a bateria está a fornecer/receber ao longo de um dia, onde valores de potência positivos representam a descarga da bateria e resultados negativos representam a fase de carga da bateria (neste caso de 6 MW). Ao comparar com o gráfico da potência fornecida pela rede no sistema com inclusão de baterias (Figura 56b) verifica-se também que quando a bateria atinge o seu SOC mínimo, às 9h, e é necessário carregar, a rede elétrica irá suportar as necessidades energéticas da estação enquanto a bateria se encontra em fase de carregamento, sendo este efetuado pela energia regenerada pela ferrovia e pelos painéis fotovoltaicos.



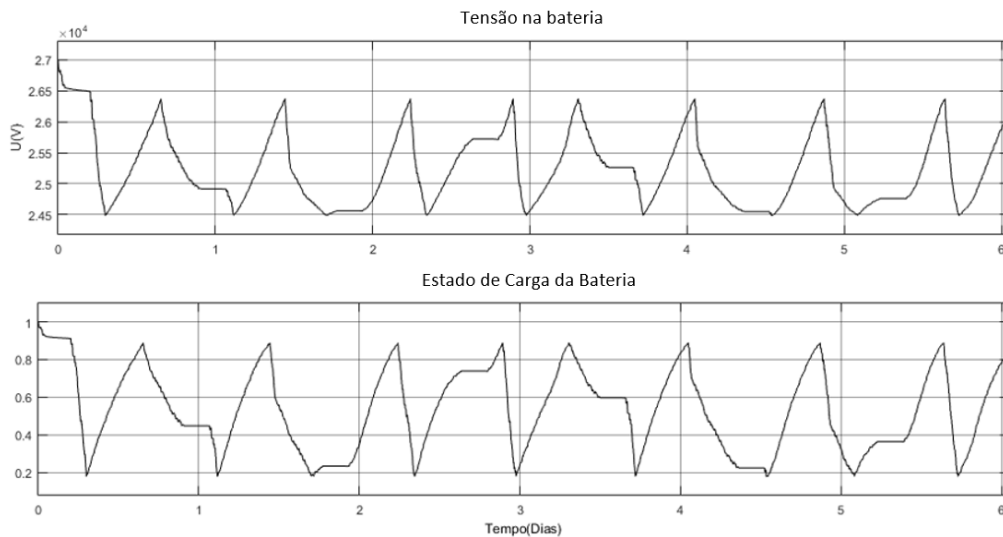
*Figura 56 - Potência debitada pela bateria no cenário 2*

É de notar que que na fase de descarga hora 6 a 9 e 19 a 27 da Figura 56 a) parece existir ao mesmo tempo o carregamento da bateria o que na realidade não é possível, estes valores são criados por valores residuais que resultam do facto de o modelo possuir um passo de simulação muito elevado, o que é necessário para efetuar a simulação para uma semana, logo este não tem tempo para detetar o exato momento entre o fim da aceleração de o comboio e o início da frenagem de outro, pelo que existem valores de carregamento que proveem da frenagem representados no gráfico a) de descarga. Se realizar uma aproximação da Figura 56 tem-se a Figura 57 e que é possível observar estes picos residuais (valores negativos) que depois de observar os resultados referentes a bateria (Figura 58 e Figura 59) não têm influência na simulação pelo que podem ser ignorados.



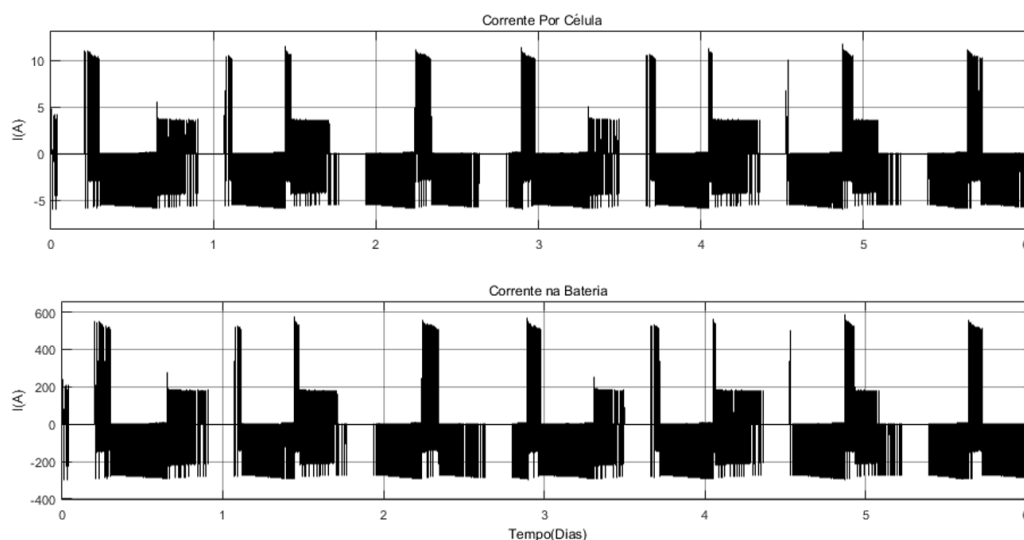
*Figura 57 - Potência debitada pela bateria (aplicação)*

A Figura 58 e Figura 59 representam o comportamento do sistema de armazenamento de energia. Verifica-se que a tensão das baterias oscila entre 26.5 kV e 24.5 kV. E como pretendido o SAE descarrega até 20% da sua carga máxima. Quando baixa deste valor irá ser novamente carregado até a carga máxima evitando a total descarga da bateria e consequentes danos, permitindo também reduzir o número de ciclos da bateria, sendo um ciclo um carregamento seguido de uma descarga independentemente da sua dimensão. Observando a Figura 58 verifica-se que o número de ciclos realizados pela bateria neste cenário é de 8, o que extrapolando para um ano tem-se cerca de 384 ciclos anuais, e de acordo com o estado da arte atual uma bateria de lítio e capaz de realizar 2000 ciclos até ser necessária intervenção, permitindo obter uma vida útil de 5 a 6 anos para estes equipamentos.



*Figura 58-Comportamento da bateria: tensão e estado de carga*

A Figura 59 mostra a corrente que o SAE debita para cumprir com as necessidades do sistema. Cada célula tem uma descarga máxima de 10 A e uma corrente de carregamento de 5 A. Visto que as células utilizadas tem uma capacidade de 6 Ah estes valores representam uma descarga de 1.5C e um carregamento de 0.9C, sendo importante para a o tempo de vida da bateria manter estes valores perto de 1C. A bateria no seu total debita uma corrente de 500 A e carrega a 200 A. É de notar que nos gráficos da Figura 59 dá-se o mesmo fenómeno de carregamento e descarga simultânea já explicado anteriormente.



*Figura 59-Comportamento da bateria corrente*

Os cenários 3,4 e 5 são variantes do cenário 2 detalhado em cima pelo que os resultados estão representados no anexo A. A Tabela 11 mostra a energia total requerida em uma semana pelos quatro cenários.

*Tabela 11 - Resultados referentes aos 4 cenários*

	Cenário 2 (5% veículos elétricos)	Cenário 3(15% veículos elétricos)	Cenário 4(25% veículos elétricos)	Cenário 5(50% veículos elétricos)
Energia Requerida s/ baterias [MWh]	180,6	182,4	184,0	189,6
Energia Requerida c/ baterias [MWh]	159,4	161,4	163,6	169,0
Energia poupada [MWh]	21,2	20,9	20,4	20,6
Energia poupada [%]	11.7 %	11,5%	11%	10.6%
Energia Total Regen. [MWh]	59,3	59,3	59,3	59,4
Energia Produzida PV [MWh]	2,2	2,3	2,3	2,3
Energia consumida VE [MWh]	1,2	2,9	4,3	10,4

Com base na Tabela 11, é possível observar que os veículos elétricos representam uma parcela crescente da energia total necessária fornecida pela rede elétrica, do cenário 3 para o cenário 5, correspondendo a 0.7%, 1.6%, 2.3% e 5.5%, respectivamente, da energia total requerida.

Os painéis fotovoltaicos e o sistema de armazenamento de energia (baterias) representam uma parte significativa do suprimento energético. Os painéis fotovoltaicos contribuem com 1.2% da energia fornecida ao sistema, enquanto as baterias são responsáveis por 10%. A maior parte da energia total usada para alimentar a rede ferroviária ainda provém da rede elétrica, representando 88% da energia total em todos os cenários.

A forma como as baterias estão programadas, carregando apenas quando atingem uma carga mínima de 20%, tem um impacto importante na eficiência do sistema pois permite limitar o número de ciclos aumentando o tempo de vida das baterias. Com uma quantidade substancial de energia proveniente da frenagem regenerativa, quanto mais rápido a bateria é descarregada, mais rápido fica disponível para um novo ciclo de carga. Isso resulta numa relação direta entre o aumento do número de ciclos de carga e descarga da bateria e o aumento da eficiência energética. Essa eficiência energética reflete-se num leve aumento na energia poupada entre o cenário 4 e o cenário 5, à medida que a bateria é usada de forma mais eficaz, no entanto em termos percentuais a energia poupada em

relação a requerida continua a descer com o aumento da carga. Ou seja, conclui-se que o devido dimensionamento do SAE é extramente relevante para a eficiência do mesmo.

#### 4.2.2.2 – Estação Corroios

A Tabela 12 representa as características referentes aos elementos do sistema para a estação de pequenas dimensões. Verifica-se uma diminuição na área de painéis fotovoltaicos e é de notar que apesar de a estação ser mais pequena e ter menos volume de tráfego ferroviário, como é uma estação que faz ligação de uma zona suburbana a uma zona urbana, o estacionamento disponível é maior comparando com a estação do Oriente, fazendo com que o número de veículos elétricos seja maior.

*Tabela 12- Característica dos componentes referentes é estação de pequenas dimensões*

<b>Parâmetro</b>		<b>Valor</b>
<b>Características dos veículos elétricos</b>		
Capacidade da bateria	E	24 kWh
Potência de carregamento	Pc	2400 W
Energia consumida em 100km	E_100	20 kWh a 30 kWh
Estado inicial da bateria	Ei	20% a 80%
<b>Parâmetro</b>		<b>Valor</b>
Distancia mínima percorrida	Dmin	2 km
Distancia máxima percorrida	Dmax	10km
Número de veículos	Nc	5% a 50% da capacidade máxima
<b>Características do sistema de armazenamento</b>		
Capacidade	C	3000 Ah
Tensão por célula	Vcell	3,8V
Tensão total	V	25 kV
Total de células	Nc	328 950
Corrente máxima	Imax	450 A
Potência máxima	Pmax	11 MW
<b>Painéis fotovoltaicos</b>		
Número de painéis	Np	250 Un.
Área ocupada	A	600 m <sup>2</sup>

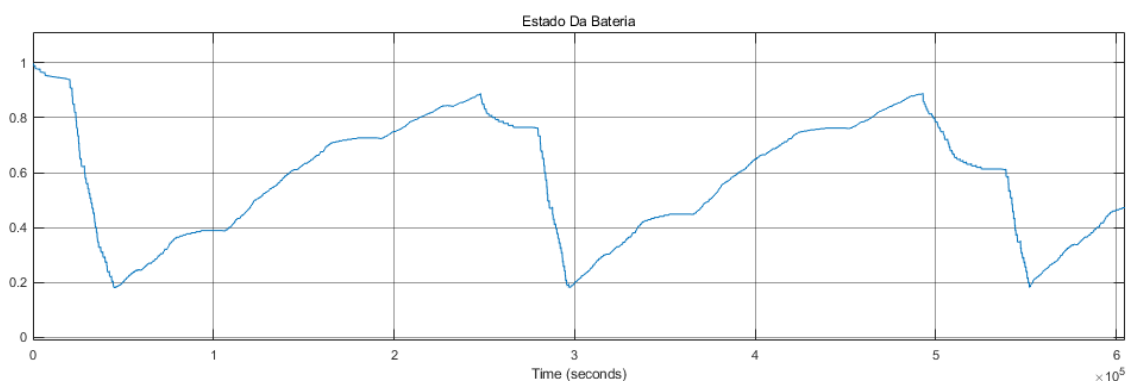
A Tabela 13 resume os resultados dos quatro cenários para a estação de pequenas dimensões.

*Tabela 13- Resultados referentes aos 4 cenários estação de pequenas dimensões*

	Cenário 2 (5% veículos elétricos)	Cenário 3(15% veículos elétricos)	Cenário 4(25% veículos elétricos)	Cenário 5(50% veículos elétricos)
Energia Requerida s/ baterias [MWh]	92.6	95.8	98.0	115.5
Energia Requerida c/ baterias [MWh]	73.7	77.3	79.4	97.0
Energia poupada [MWh]	18.9	18.5	18.6	18.5
Energia Total Regen. [MWh]	21.9	21.8	21.8	21.8
Energia Produzida PV [MWh]	1.5	1.4	1.4	1.5
Energia consumida VE [MWh]	2.2	5.5	7.8	17.3

Neste contexto, ocorre uma redução de 50% na energia total necessária para o funcionamento da estação quando comparada com a estação do Oriente. No entanto, a energia consumida pelos veículos elétricos aumenta em 54% devido ao aumento no número de vagas de estacionamento disponíveis. Isso faz com que os veículos elétricos representem uma parcela de 2% a 15% da energia total consumida, dependendo do cenário específico.

Nestes cenários verifica-se uma redução de 11% na energia recuperada em relação da estação do Oriente, isto deve-se a menor tráfego de comboios de comboios que resulta em tempos de carregamento dos SAEs mais elevados como mostra a Figura 60.



*Figura 60- Estado de carga do SAE referente ao cenário 2*

#### **4.2.3– Cenário 6,7 – Sem a alimentação da rede ferroviária**

O objetivo dos cenários 6 e 7 é analisar o impacto e a eficácia dos painéis fotovoltaicos e das baterias no sistema. Nestes cenários a energia gerada pelos painéis

fotovoltaicos e armazenada em baterias de baixa tensão que pode ser aproveitada para fornecer energia à rede elétrica e como essa contribuição afeta o funcionamento global do sistema mantendo o número de VE fixo em 15%. Recebendo apenas a energia regenerada da rede ferroviária e isolando a alimentação da rede de tração do sistema.

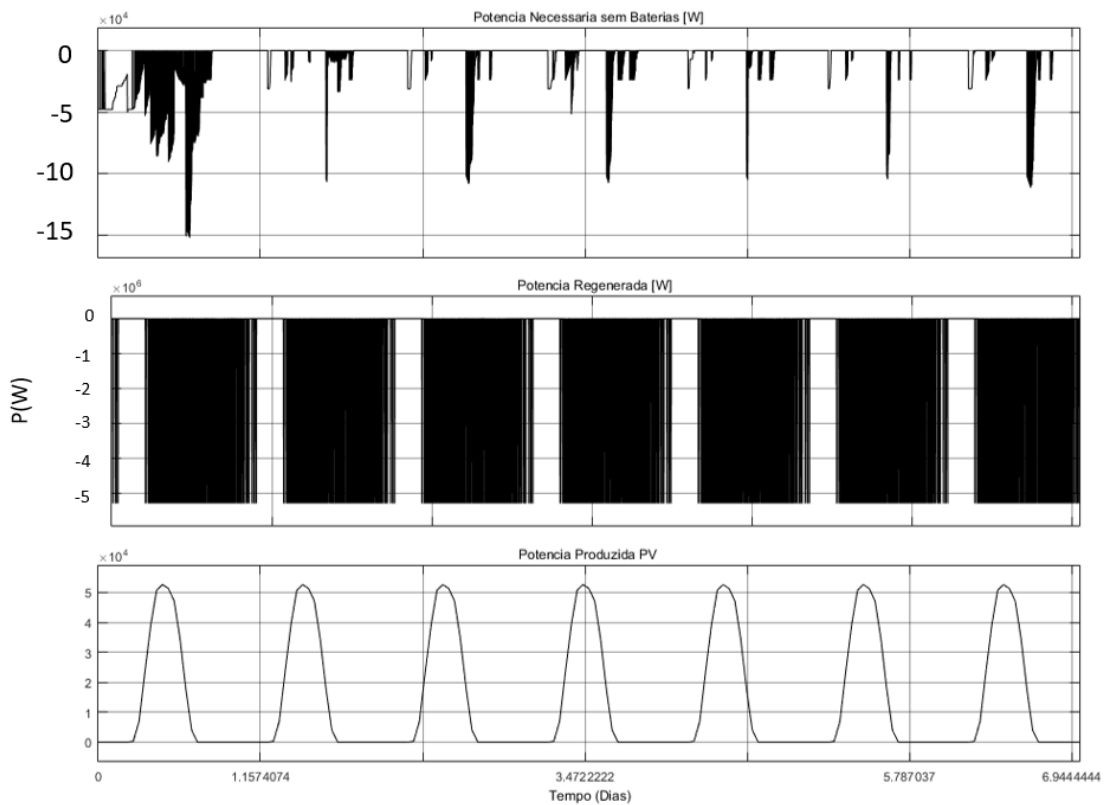
#### 4.2.3.1 – Estação Oriente

Na Tabela 14 estão listadas as características dos elementos que compõem o sistema da estação de grandes dimensões. A principal diferença em relação ao cenário anterior (4.2.2.1) é o dimensionamento reduzido do sistema de armazenamento de energia, uma vez que a rede ferroviária não será alimentada pela bateria de alta tensão, permitindo o uso de baterias menores e mais econômicas, conectadas em baixa tensão.

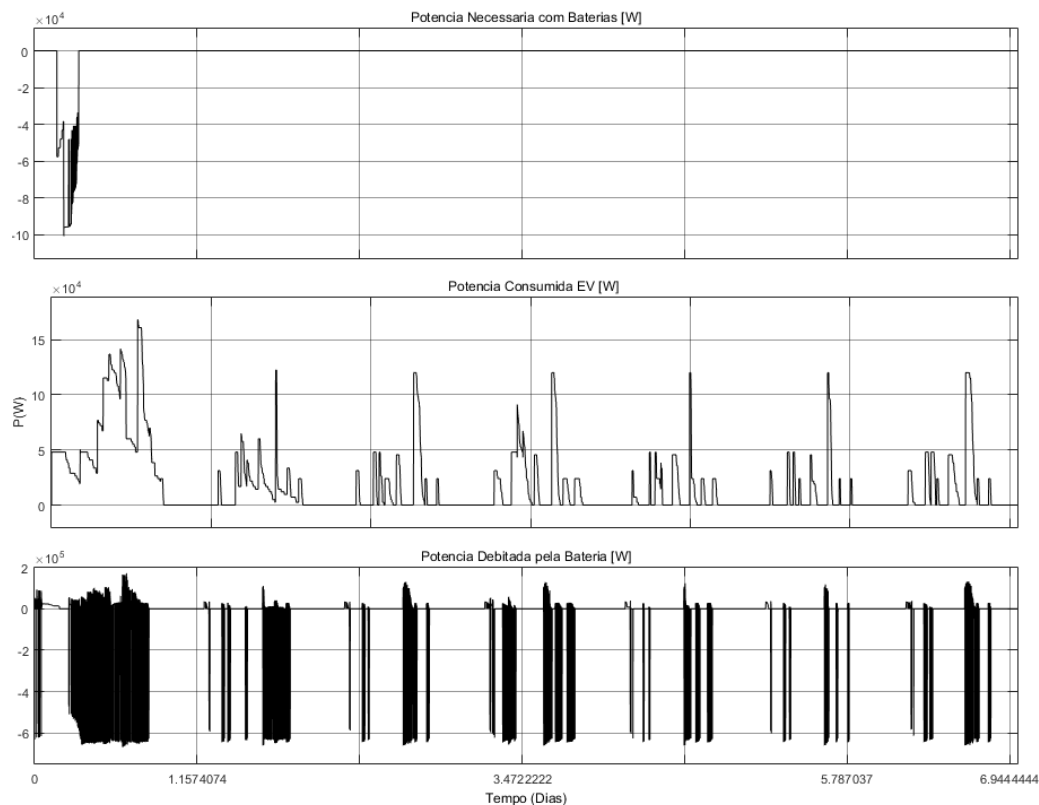
*Tabela 14- características dos componentes referentes a estação de grandes dimensões*

Parâmetro		Valor
<b>Características dos veículos elétricos</b>		
Capacidade da bateria	E	24 kWh
Potência de carregamento	Pc	2400 W
Energia consumida em 100Km	E_100	20 kWh a 30 kWh
Estado inicial da bateria	Ei	20% a 80%
Distancia mínima percorrida	Dmin	2 km
Distancia máxima percorrida	Dmax	10km
Número de veículos	Nc	15% da capacidade máxima (114)
<b>Características do sistema de armazenamento</b>		
Capacidade	C	3000 Ah
Tensão por célula	Vcell	3,8V
Tensão total	V	230 V/400V
Total de células	Nc	3200
Corrente máxima	Imax	2000 A
Potência máxima	Pmax	50 kW
<b>Painéis fotovoltaicos</b>		
Número de painéis	Np	500 Un.
Área ocupada	A	1000 m <sup>2</sup>

No cenário 6 o objetivo é analisar o impacto dos veículos elétricos no sistema quando apenas as baterias, os painéis fotovoltaicos e a frenagem regenerativa são usados para alimentar os veículos elétricos, eliminando o consumo da ferrovia. Como as baterias só precisam de alimentar sistemas em baixa tensão, baterias de menor dimensão podem ser utilizadas. As Figuras 60 e 61 mostram que a potência regenerada pelos sistemas regenerativos dos comboios é significativamente maior do que a energia consumida pelos veículos elétricos. Portanto, a energia armazenada nas baterias é suficiente para abastecer todo o sistema sem recorrer à rede elétrica quando esta não alimente a rede ferroviária. A rede da estação representa apenas 2% do consumo total do sistema, enquanto 98% da energia consumida provém do carregamento dos veículos elétricos.



*Figura 61 - Resultados potência necessária sem bat.; potencia regenerada e potência PV cenário 6*



*Figura 62 – Resultados potência necessária com bat.; potencia VE e potência debitada pela bateria cenário 6*

No que diz respeito à bateria, analisando os resultados obtidos (Figura 62 e 63) verifica-se que a bateria selecionada mostra-se sobredimensionada pelo que, o estado de carga depois de estabilizada a simulação não é inferior a 70% podendo-se utilizar uma bateria de menores dimensões. No entanto, se as potências de carregamento ultrapassarem os 100 kW, como se verifica no início da simulação, o sistema de armazenamento de energia já não é suficiente para suportar esta carga e é necessário recorrer à rede a montante da subestação.

Pode-se ainda concluir que esta tem capacidade de armazenamento e de descarga, para alimentar todo o sistema sem ser necessário recorrer à rede a montante pública. Apesar de se poder utilizar baterias em baixa tensão devido à mais reduzida carga, em relação aos cenários anteriores a corrente debitada pela bateria passa os 2000A o que pode ser um desafio no projeto destes equipamentos, apesar de a corrente por célula estar dentro dos limites desta tecnologia.

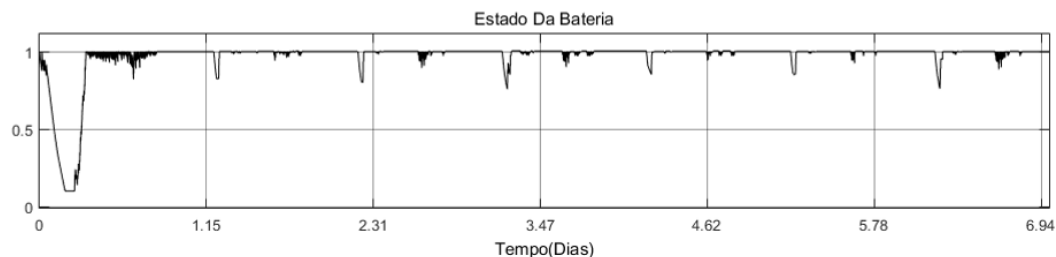


Figura 63 – Estado de carga da bateria cenário 6

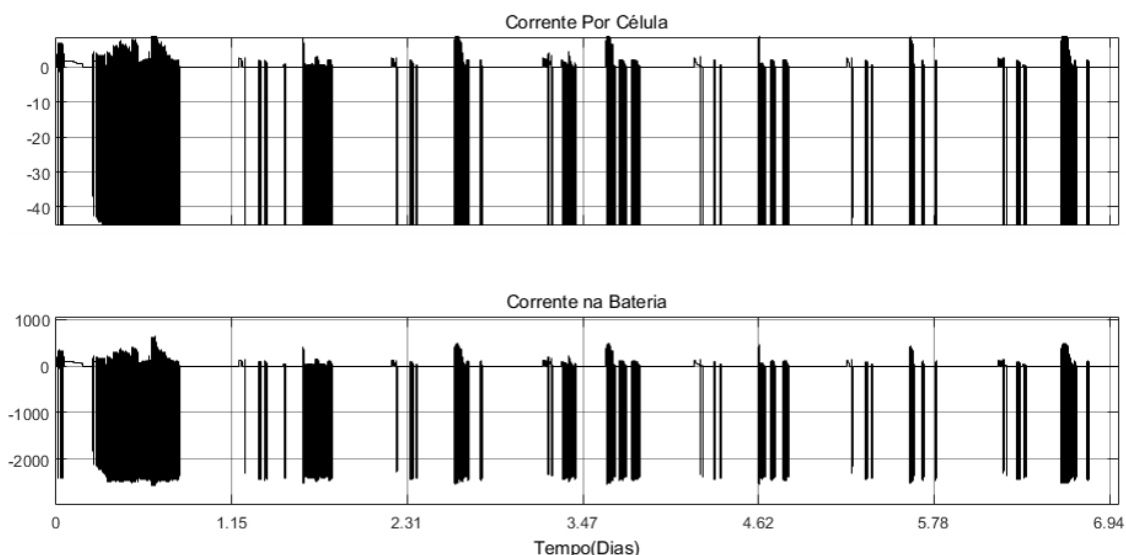


Figura 64 – Corrente debitada pela bateria cenário 6

O cenário 7 é semelhante ao cenário 6, cujos gráficos estão no anexo A. A Tabela 15 resume a energia necessária para alimentar o sistema durante uma semana nos cenários 6 e 7 na estação de grandes dimensões. A principal diferença entre eles é a presença ou ausência de painéis fotovoltaicos. Quando o sistema possui painéis fotovoltaicos (cenário 6), a energia necessária sem o sistema de armazenamento de energia é significativamente menor do que no cenário 7 (sem painéis), pois os painéis solares suportam parte da carga durante as horas de incidência solar. Com o sistema de armazenamento de energia, a energia requerida diminui consideravelmente, pois as baterias podem sustentar o sistema ao longo da semana, com exceção de um pequeno intervalo de tempo no primeiro dia, quando ainda não há um grande fluxo de tráfego ferroviário para manter as baterias carregadas. No entanto, uma vez que o sistema esteja estabilizado, a energia necessária para carregar os veículos elétricos será nula.

*Tabela 15- Resultados cenário 6 e 7 estação de grandes dimensões*

	Cenário 6 (15% veículos elétricos)	Cenário 7 (15% veículos elétricos)
Energia Requerida s/ baterias [MWh]	1.542	2.397
Energia Requerida c/ baterias [MWh]	0.275	0.294
Energia poupada [MWh]	1.267	2.103
Energia Total Regen. [MWh]	59.3	59.3
Energia Produzida PV [MWh]	2.2	-
Energia consumida VE [MWh]	2.9	2.9

De acordo com os resultados da Tabela 15, os painéis solares são capazes de economizar cerca de 36% da energia consumida, quando não há sistema de armazenamento de energia. Porém, quando o sistema possui o sistema de armazenamento de energia, essa economia é reduzida a 6%. A influência dos painéis solares neste sistema pode ser considerada insignificante devido ao grande volume de energia proveniente da rede ferroviária.

#### **4.2.3.2 – Estação de Corroios**

Ao analisar os resultados para o cenário 6 numa estação de menores dimensões, observa-se que o consumo realizado pelos veículos elétricos é maior em comparação com uma estação de maiores dimensões (Figura 64). Além disso, a energia produzida pela frenagem regenerativa é inferior quando comparada com a estação de maiores dimensões.

Quando o sistema é inicializado, verifica-se um aumento significativo no consumo de energia com baterias em comparação com o sistema sem baterias. Este aumento também é refletido na Tabela 16. A razão para isso é que, quando a bateria é carregada, não pode fornecer energia ao sistema. Portanto, se a fase de carregamento e a fase de descarga acontecerem simultaneamente, o sistema precisará de energia da rede pública. No entanto, observando a Figura 65, percebe-se que, apesar da bateria ter um número maior de ciclos de carga e descarga em comparação com a estação de maiores dimensões, ainda é capaz de suportar todo o sistema devido à grande quantidade de energia regenerada na rede ferroviária.

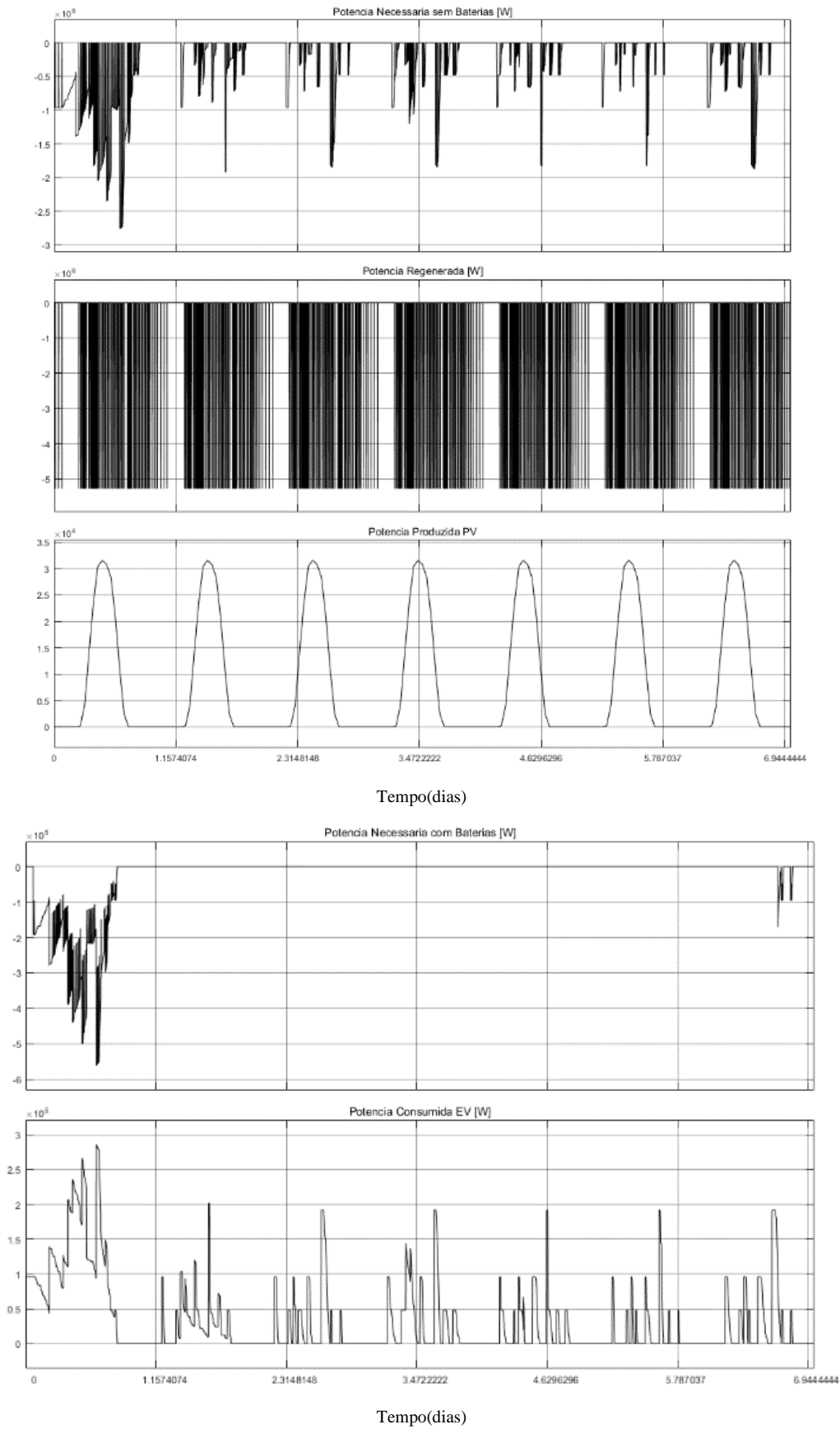
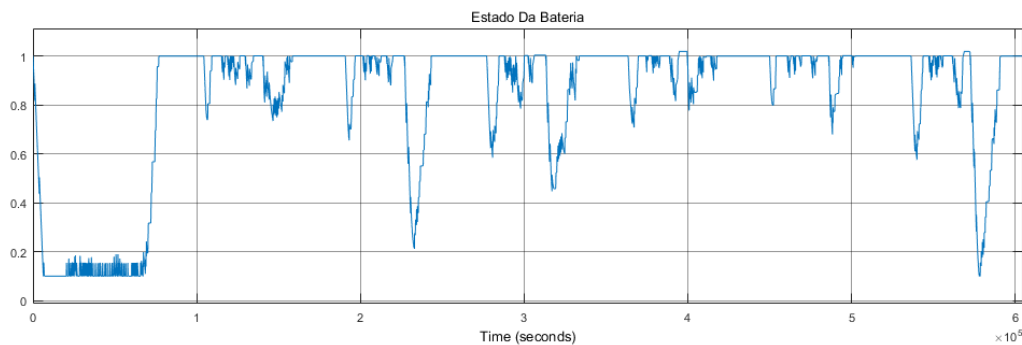


Figura 65- Resultados cenário 6 estação de pequenas dimensões



*Figura 66 - resultados referentes a bateria- cenário 6*

*Tabela 16 – Consumo total cenários 6 e 7 estação de pequena dimensão*

	Cenário 6 (15% veículos elétricos)	Cenário 7 (15% veículos elétricos)
Energia Requerida s/ baterias [MWh]	2.929	4.554
Energia Requerida c/ baterias [MWh]	0.522	0.558
Energia poupada [MWh]	2.407	3.996
Energia Total Regen. [MWh]	21.8	21.8
Energia Produzida PV [MWh]	1.4	-
Energia consumida VE [MWh]	5.5	5.5

Os cenários 6 e 7 destacaram a importância das baterias, painéis fotovoltaicos e sistemas regenerativos na alimentação dos veículos elétricos. A capacidade das baterias em suportar picos de consumo utilizando a energia regenerada na frenagem dos comboios são fatores cruciais para garantir um funcionamento eficiente do sistema, minimizando a dependência da rede elétrica pública.

#### **4.2.4 Análise económica**

A análise energética é fundamental para determinar a viabilidade económica deste sistema. Para uma análise inicial, é essencial considerar três componentes: o custo de operação da rede ferroviária, a receita gerada pelos postos de carregamento de veículos elétricos e o investimento necessário para implementar o sistema de armazenamento de energia e os postos de carregamento.

Com base no Diretório da Rede fornecido pelas Infraestruturas de Portugal e no preço médio do kWh em 2022, estimou-se um custo médio de operação para a tração de máquinas ferroviárias de 0,55 €/kWh [66].

O custo de carregamento de veículos elétricos dependerá do preço do kWh no momento do carregamento, que atualmente é em média cerca de 0,16 €/kWh. Além disso, deve ser aplicada uma taxa do fornecedor, variando entre 0,2 €/kWh e 0,3 €/kWh. Isso resulta num custo médio de carregamento de cerca de 0,5 €/kWh para os utilizadores em postos públicos de carregamento. Além disso, é necessário um investimento médio de 3.000 € por posto de carregamento para a construção do parque de carregamento [67].

No que diz respeito ao sistema de armazenamento de energia (SAE), foram considerados dois tipos: um de média tensão para os cenários 2, 3, 4 e 5 e outro de baixa tensão para os cenários 6 e 7. O SAE de média tensão, embora ainda em fase inicial de desenvolvimento e com uso limitado no mercado, tem um custo significativamente mais elevado em comparação com os sistemas de baixa tensão amplamente utilizados, conforme indicado no estudo realizado em [68] de onde origina a Tabela 17 que diz respeito ao custo de implementação e utilização de diferentes SAE. Para o cenário de SAE de média tensão, que opera em média 8 horas por dia com uma potência de 10 MW e uma capacidade de 20 MWh, o custo do SAE é estimado em 266 €/kWh no ano de 2030. Para os cenários 6 e 7, em que a bateria deve ter uma potência não superior a 2,5 MW em baixa tensão, de acordo com [70] o custo é de 68,4 €/kWh de energia armazenada, que é de 2,5 MWh neste caso. Com base nestes valores, foi possível criar a tabela 18, que representa os custos e as receitas esperadas.

Assim, é possível avaliar a viabilidade do projeto com uma duração de 6 anos, que é a vida útil esperada do sistema de armazenamento de bateria para cada cenário, utilizando o Valor Atualizado Líquido (VAL) calculado através da eq.24

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+t)^i} \quad (24)$$

**CF<sub>i</sub>** = Cash-flow no ano i  
**t** = taxa de desconto

A Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) é uma métrica financeira que representa a taxa de retorno de um investimento, tornando o valor presente líquido (VPL) zero. Quanto maior a TIR, mais atrativo é o investimento.

Tabela 17 - Custo de implementação de um SAE em MT [70]

			Lithium-ion LFP 2030 Cost & Performance Estimates									
ESS Installed Cost	Parameter	Units	1 MW					10 MW				
			2hr	4hr	6hr	8hr	10hr	2hr	4hr	6hr	8hr	10hr
			Energy Storage System	Storage Block	\$/kWh	[89 - 129] 111	[87 - 128] 109	[87 - 127] 108	[86 - 126] 108	[86 - 125] 107	[85 - 123] 106	[83 - 122] 104
Storage Balance of System	\$/kWh	[27 - 37] 32		[25 - 35] 30	[25 - 34] 29	[24 - 33] 28	[24 - 33] 28	[26 - 36] 30	[24 - 33] 28	[24 - 32] 27	[23 - 32] 27	[23 - 31] 27
Power Equipment	\$/kW	[59 - 77] 73		[59 - 77] 73	[59 - 77] 73	[59 - 77] 73	[59 - 77] 73	[51 - 66] 63	[51 - 66] 63	[51 - 66] 63	[51 - 66] 63	[51 - 66] 63
Controls & Communication	\$/kW	[24 - 33] 28		[24 - 33] 28	[24 - 33] 28	[24 - 33] 28	[24 - 33] 28	[5 - 6] 5	[5 - 6] 5	[5 - 6] 5	[5 - 6] 5	[5 - 6] 5
Systems Integration	\$/kWh	[42 - 51] 46		[37 - 46] 36	[35 - 44] 33	[35 - 42] 32	[34 - 42] 32	[38 - 47] 38	[35 - 42] 33	[33 - 41] 31	[32 - 40] 30	[32 - 39] 30
Engineering, Procurement, and Construction	\$/kWh	[52 - 64] 57		[45 - 56] 50	[43 - 53] 48	[42 - 51] 46	[41 - 50] 45	[46 - 57] 51	[42 - 51] 46	[40 - 49] 44	[39 - 48] 43	[38 - 47] 43
Project Development	\$/kWh	[62 - 76] 69		[54 - 67] 60	[52 - 63] 57	[50 - 62] 56	[49 - 61] 55	[55 - 68] 61	[50 - 61] 55	[48 - 59] 53	[47 - 58] 52	[46 - 57] 51
Grid Integration	\$/kW	[23 - 28] 25		[23 - 28] 25	[23 - 28] 25	[23 - 28] 25	[23 - 28] 25	[18 - 23] 20	[18 - 23] 20	[18 - 23] 20	[18 - 23] 20	[18 - 23] 20
Total ESS Installed Cost*	\$/kW	[650 - 854] \$757	[1105 - 1460] \$1,266	[1555 - 2059] \$1,780	[2002 - 2654] \$2,290	[2447 - 3245] \$2,797	[575 - 757] \$661	[1008 - 1334] \$1,156	[1437 - 1905] \$1,645	[1863 - 2471] \$2,131	[2287 - 3035] \$2,614	
	\$/kWh	[325 - 427] \$378	[276 - 365] \$317	[259 - 343] \$297	[250 - 332] \$286	[245 - 325] \$280	[287 - 378] \$330	[252 - 333] \$289	[240 - 317] \$274	[233 - 309] \$266	[229 - 303] \$261	
Operating Costs	Fixed O&M	\$/kW-yr	[1.86 - 2.29] 2.07	[3.26 - 4] 3.61	[4.63 - 5.7] 5.13	[6 - 7.38] 6.65	[7.36 - 9.05] 8.16	[1.65 - 2.03] 1.83	[2.98 - 3.67] 3.30	[4.29 - 5.28] 4.76	[5.6 - 6.88] 6.20	[6.89 - 8.48] 7.64
	Variable O&M	\$/MWh	0.5125					0.5125				
	System RTE Losses	\$/kWh	0.004					0.004				
Performance Metrics	Round Trip Efficiency	%	88%					88%				
	Response Time	sec	1-4					1-4				
	Cycle Life	#	2,100					2,100				
	Calendar Life	yrs	10					10				
	Duration Corresponding to Cycle Life**	yrs	6.06					6.06				

Tabela 18 - Custos dos diferentes sistemas

Custos		
	Baterias em MT	Baterias em BT
<b>Custo investimento SAE</b>	5 780 000 €	171 000 €
<b>Custo investimento postos de carregamento</b>	3000€ por posto	
<b>Custo manutenção SAE</b>	6.2€ / kW-ano	2.07€ / kW-ano
Receitas		
<b>Receita carregamento de VE</b>	0.3 €/kWh	
<b>Receita energia poupada devido ao SAE</b>	0.55 €/kWh	

Tabela 19 – Análise económica

Estação de grandes dimensões						
	Bateria em MT				Bateria em BT	
	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
VAL (€)	-2 694 655	-2 472 679	-2 325 993	-1 347 222	58 649	23 444
TIR (%)	-	-	-	-	16%	11%
Estação de pequenas dimensões						
	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
VAL (€)	-2 243 493	-1 342 932	-1 019 842	678 942	170 734	135 529
TIR (%)	-	-	-	13%	23%	19%

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o investimento num SAE de média tensão só é rentável quando a energia geradora de receitas é igual ou superior ao cenário 5 da estação de pequenas dimensões. Ou seja, sem a receita dos veículos elétricos, o investimento não é justificável. No entanto, quando a energia vendida aos utilizadores dos postos de carregamento é igual ou superior a 17,3 MW (equivalente ao consumo dos veículos elétricos no sistema no cenário 5 da estação de pequenas dimensões), começa a ser lucrativo após 6 anos de operação.

Por outro lado, quando se utiliza um SAE de baixa tensão, o investimento é rentável para ambas as estações. O retorno de investimento será 60% maior para a estação de maiores dimensões e 21% superior para a estação de menores dimensões, quando comparamos os cenários 6 e 7. Devido à implementação de painéis fotovoltaicos. No entanto, o retorno do investimento da estação de menores dimensões será mais elevado devido ao maior número de veículos elétricos que suporta.

## 5 – CONCLUSÕES

O estudo conduzido revela uma série de conclusões significativas sobre a dinâmica da energia em estações ferroviárias, particularmente quando se considera a integração de painéis fotovoltaicos, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia (SAE). O desenvolvimento desta ferramenta numérica permitiu fornecer uma compreensão abrangente dos desafios e oportunidades envolvidos:

Primeiramente, destaca-se que a rede ferroviária possui um considerável potencial para recuperar energia regenerada de comboios durante a frenagem, que pelo estudo realizado é possível obter semanalmente a partir da frenagem regenerativa 21.9 MWh a 59.3MWh dependendo da dimensão da estação ferroviária. Esta energia, atualmente em grande parte desperdiçada, pode não apenas atender às necessidades energéticas locais da estação, mas também ser reintroduzida na rede elétrica. No entanto, isso requer o desenvolvimento de infraestrutura adequada para capturar e redirecionar essa energia excedente.

Além disso, os veículos elétricos representam uma parcela do consumo de energia numa estação ferroviária, cerca de 1% atualmente, mas com perspectiva de aumentar até 5% do consumo total da estação, em cenários com um grande número de VE a carregar simultaneamente. Esta necessidade energética cria uma oportunidade importante para abastecer uma frota considerável de VE e desempenha um papel crucial na transição para a mobilidade elétrica.

Com a inserção de SAEs no sistema é possível aproveitar cerca de 11% da energia regenerada pela ferrovia quando se considera a alimentação da rede ferroviária, quando esta não é considerada estas possibilitam a alimentação no seu todo do sistema sendo capazes de fornecer semanalmente até 5 MWh em baixa tensão. No entanto, um dos principais desafios identificados é a viabilidade económica. A instalação de sistemas de armazenamento de energia de grande porte numa estação ferroviária, embora possa ter o potencial de atender às necessidades energéticas ao armazenar grandes quantidades de energia regenerada, pode enfrentar dificuldades devido aos altos custos iniciais e ao período prolongado necessário para recuperar o investimento.

Em casos em que a rentabilidade económica é o principal critério, o estudo realizado aponta que sistemas de armazenamento de energia de menor capacidade ou outras alternativas, podem ser mais eficazes. Isto aplicasse especialmente quando a estação não está diretamente envolvida na injeção de energia na rede ferroviária, mas se concentra

principalmente no fornecimento de energia para os VE. Isto justifica-se pelo facto de as o preço baterias em baixa tensão atualmente representar 3% do preço das baterias de media tensão tendo em conta que tem aproximadamente o mesmo tempo de vida.

Finalmente, enfatiza-se a importância da diversificação dos usos da energia armazenada. Além de alimentar os VE, essa energia pode ser direcionada para outras aplicações, como participação em programas de gestão da necessidade energética e venda de energia excedente.

Em resumo, o estudo destaca a complexidade da implementação de sistemas de energia em estações ferroviárias e a necessidade de uma abordagem personalizada com base no tamanho da estação, na necessidade de energia e nos objetivos económicos e ambientais. Embora possa não ser economicamente vantajoso em todos os casos, a busca pela sustentabilidade ambiental e a integração inteligente de sistemas de armazenamento de energia ainda desempenham um papel crucial na modernização do transporte ferroviário.

Este trabalho focou-se numa análise macroscópica de um sistema integrado por diversos subsistemas olhando para estes de forma independente como uma caixa negra dando relevância apenas a capacidade energética que cada um seria capaz de fornecer e não a como estes se interligam entre si fisicamente, como trabalho futuro seria interessante analisar e estudar as tecnologias e métodos de o realizar, assim como estudar os diferentes tipos de SAEs em alternativa as baterias de li-íon.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Jur, “União Europeia, 2015. Resumo Das Estratégias Da CE Sobre Energia Renováveis.,” no. 2006, pp. 1–6, 2020.
- [2] H. Hayashiya *et al.*, “Necessity and possibility of smart grid technology application on railway power supply system,” *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2011*, 2011.
- [3] ACAP, “Mercado Automóvel em Portugal Por Tipo de Energia em 2021 Junho 2021 Pesados Janeiro a Junho 2021 Ligeiros Gasolina % Gasolina HEV / Gasóleo Híbridos Não Elétricos GPL / Gasolina Total Ligeiros,” pp. 0–3, 2021.
- [4] ACAP, “Veículos automóveis produzidos em Portugal,” p. 16, 2021.
- [5] I. Energy Agency, “Global EV Outlook 2021 Accelerating ambitions despite the pandemic,” 2021. [Online]. Available: [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
- [6] L. Márcio and H. Bastos, “Monitorização do desempenho energético e ambiental de um veículo híbrido”.
- [7] S. Menicanti, M. Di Benedetto, D. Marinelli, and F. Crescimbeni, “Recovery of Trains’ Braking Energy in a Railway Micro-Grid Devoted to Train Plus Electric Vehicle Integrated Mobility,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 4, 2022, doi: 10.3390/en15041261.
- [8] SEPTA, “WILL BRAKE FOR BATTERIES: SEPTA, CONSTELLATION, AND VIRIDITY ENERGY ANNOUNCE 8.75-MEGAWATT ENERGY STORAGE PROJECT.”
- [9] Conselho da União Europeia, “PLANO DE CHOQUE PARA UMA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL, SEGURA E CONECTADA NAS ÁREAS URBANAS E METROPOLITANAS.”
- [10] babak Fahimi and Ali Emadi, “Comparison between AC and DC Traction Drives.”
- [11] Bhag S. Guru and Hüseyin R. Hiziroglu, *Electric Machinery and Transformers*. vol. 3, pp. 202-205, 2014
- [12] Electric Traction Systems “[railsystem.net/electric-traction-systems/](http://railsystem.net/electric-traction-systems/).” (Accessed dec.12, 2022)
- [13] Y. Jiang, J. Liu, W. Tian, M. Shahidehpour, and M. Krishnamurthy, “Energy Harvesting for the Electrification of Railway Stations: Getting a charge from the regenerative braking of trains,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 39–48, 2014, doi: 10.1109/MELE.2014.2333561.
- [14] J. Yang, Y. Hou, R. Song, and T. Yuan, “Modeling and analysis of the electrical braking energy of urban railway vehicles,” *Simulation*, vol. 91, no. 11, pp. 989–997, 2015, doi: 10.1177/0037549715609671.
- [15] N. P. Ferreira Henriques, “Simulação de Sistemas de Tracção Eléctrica Dimensionamento das Instalações Fixas de Alimentação de Energia Eléctrica,” 2004.
- [16] Sadiq, D. and Mansor, M. (2018) Review of Energy Storage Systems in Regenerative Braking Energy Recovery in DC Electrified Urban Railway Systems: Converter Topologies, Control Methods & Future Prospects.

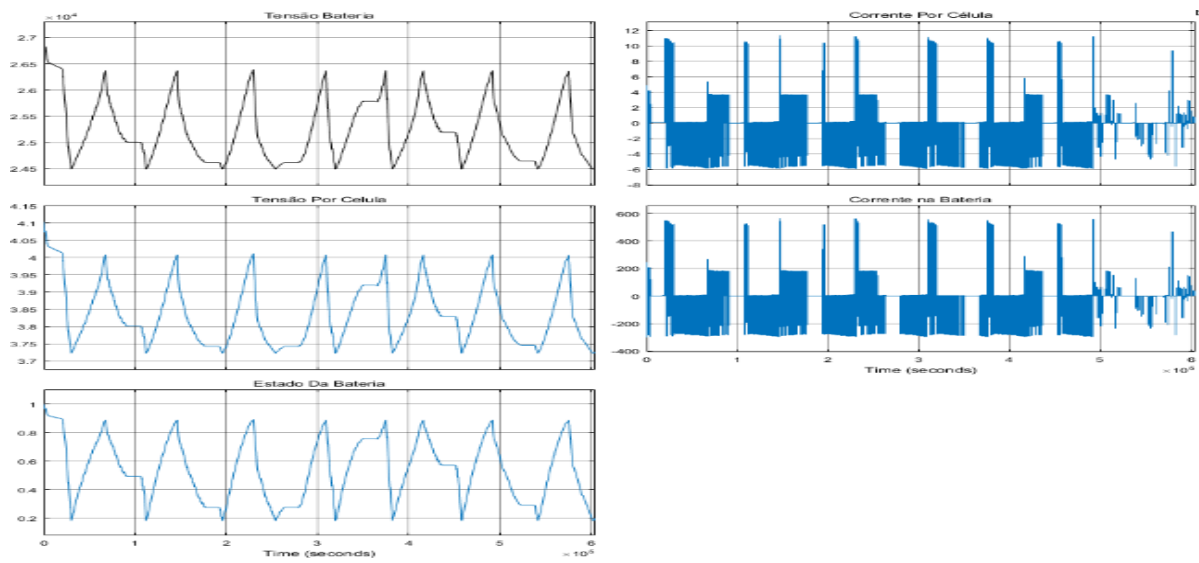
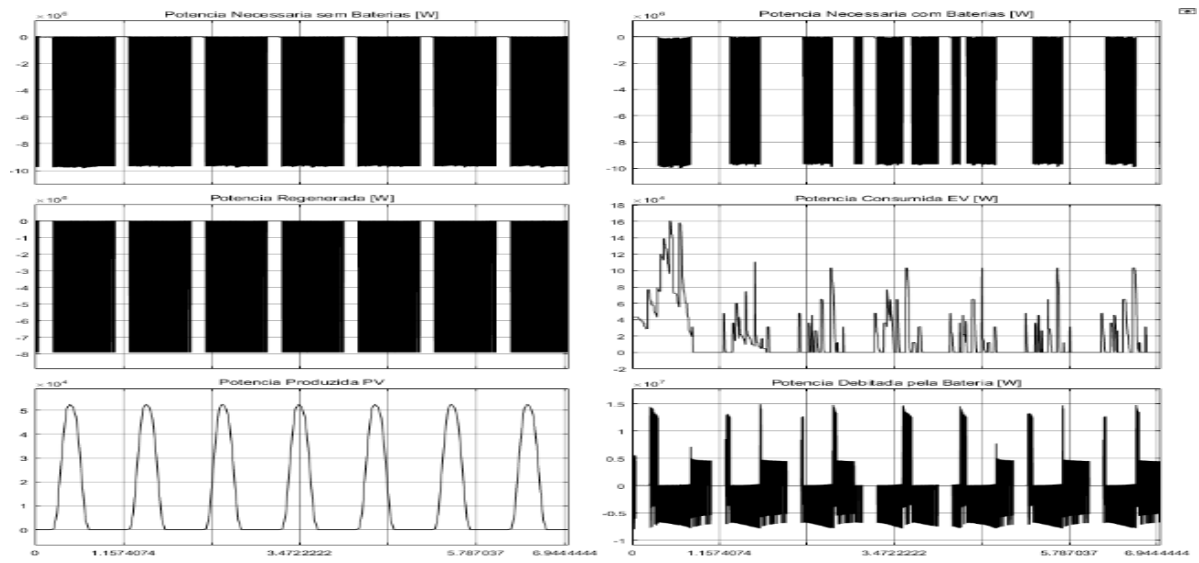
- [17] L. Alfieri, L. Battistelli, and M. Pagano, “Energy efficiency strategies for railway application: Alternative solutions applied to a real case study,” *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 8, no. 2, pp. 122–129, 2018, doi: 10.1049/iet-est.2017.0072.
- [18] S. Menicanti, M. Di Benedetto, D. Marinelli, and F. Crescimbeni, “Recovery of Trains’ Braking Energy in a Railway Micro-Grid Devoted to Train Plus Electric Vehicle Integrated Mobility,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 4, 2022, doi: 10.3390/en15041261.
- [19] R. Lamedica, A. Ruvio, L. Palagi, and N. Mortelliti, “Optimal siting and sizing of wayside energy storage systems in a D.C. railway line,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 23, pp. 1–22, 2020, doi: 10.3390/en13236271.
- [20] ADB, “Handbook on Battery Energy Storage System,” Manila, Philippines, Dec. 2018. doi: 10.22617/TCS189791-2.
- [21] “Samuel C. Johnson, ... Michael E. Webber, in *Storage and Hybridization of Nuclear Energy*, 2019.”
- [22] Y. Jiang, J. Liu, W. Tian, M. Shahidehpour, and M. Krishnamurthy, “Energy Harvesting for the Electrification of Railway Stations: Getting a charge from the regenerative braking of trains,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 39–48, 2014, doi: 10.1109/MELE.2014.2333561.
- [23] “ROLAND BERGER GMBH (2017). R. Berger, “Business models in energy storage – Energy Storage can bring utilities back.pdf.”
- [24] H. A. Torsvik, “Optimum power control of a battery energy storage system,” 2022.
- [25] G. Reid, J. Julve, E. Energie, E. V. U. Der, H. Messe, and Ü. F. Berlin, “Second Life-Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies,” *Bundesverbandes Erneuerbare Energie E.V.* p. 46, 2016.
- [26] N. J. J. W. Meysam Qadrdan, “Chapter II-3-D - Smart Grid and Energy Storage”.
- [27] A. Peters *et al.*, “Electric mobility concepts and their significance and the environment,” no. 153, 2012.
- [28] S. Pless, A. Allen, L. Myers, D. Goldwasser, A. Meintz, and B. Polly, “Integrating Electric Vehicle Charging Infrastructure into Commercial Buildings and Mixed-Use Communities : Design , Modeling , and Control Optimization Opportunities,” *2020 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, no. C40, pp. 1–16, 2020.
- [29] Alanazi, F. (2023) ‘Electric vehicles: Benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation’, *Applied Sciences*, 13(10), p. 6016. doi:10.3390/app13106016.
- [30] P. Plötz, C. Moll, G. Bieker, P. Mock, and Y. Li, “Real-World Usage of Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Fuel Consumption, Electric Driving, and CO<sub>2</sub> Emissions,” *International Council on Clean Transportation (ICCT) white paper*, no. September, p. 57, 2020.
- [31] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, “A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 372–404, 2021, doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [32] S. M. Arif, T. T. Lie, B. C. Seet, S. Ayyadi, and K. Jensen, “Review of electric vehicle technologies, charging methods, standards and optimization techniques,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, no. 16, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/electronics10161910.
- [33] M. Kumar and M. Tirupati, “An Overview on Electric Vehicle Charging Infrastructure,” 2019.

- [34] M. Kumar and M. Tirupati, “An Overview on Electric Vehicle Charging Infrastructure,” 2019.
- [35] Q. Fu, “RADIATION ( SOLAR ),” no. 1981, pp. 1859–1863, 1996.
- [36] D. Alexandra and L. Machado, “SOLAR PLANO EM PORTUGAL.”
- [37] “SOLTERM5.” (2019), LNEG
- [38] R. Vieira, “RADIÇÃO SOLAR GLOBAL ANUAL PORTUGAL CONTINENTAL,” 2008, doi: 10.13140/RG.2.2.31629.18402.
- [39] J. E. Yellowhair, “Solar Radiation Energy,” *Field Guide to Solar Optics*, no. January 2007, 2021, doi: 10.1117/3.2567289.ch14.
- [40] J. A. Duffie and W. A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes.”
- [41] M. Rezaei and F. Varzandeh, “Solar energy system design: A review on angle and orientation of solar panels. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ”.
- [42] “ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UMA RESIDÊNCIA DA ZONA RURAL - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Representacao-de-angulos-nas-tecnicas-solares\\_fig2\\_334526816](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Representacao-de-angulos-nas-tecnicas-solares_fig2_334526816) [accessed 16 Oct, 2023]”.
- [43] A. B. Canedo, M. Miranda, O. : Robson, F. Da, S. Dias, and R. De Janeiro, “ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE,” 2014.
- [44] “Modelação técnico económica da integração de painéis fotovoltaicos no Corinthia Lisboa Hotel - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-46-Radiacao-solar-anual-em-Lisboa-para-diferentes-orientacoes-do-painel-solar\\_fig4\\_334654382](https://www.researchgate.net/figure/Figura-46-Radiacao-solar-anual-em-Lisboa-para-diferentes-orientacoes-do-painel-solar_fig4_334654382) [accessed 16 Oct, 2023]”.
- [45] J. Vaz, “Dimensionamento de um sistema fotovoltaico: caso de estudo edifício Azevedo Gomes,” pp. 1–70, 2017.
- [46] Kenu E. Sarah, “A Review of Solar Photovoltaic Technologies,” *International Journal of Engineering Research and*, vol. V9, no. 07, pp. 741–749, 2020, doi: 10.17577/ijertv9is070244.
- [47] A. F. Čotar, Andrej, “Photovoltaic Systems,” *Darko Jardas, dipl. ing. REA Kvarner Ltd*, p. 1, 2012.
- [48] “<https://soleenergias.com.br/o-que-e-um-painel-solar-fotovoltaico/>,” 2018.
- [49] SoloPower, “<http://solopower.com/products/solopower-sp3/>.”
- [50] D. M. Falcão, “Smart Grids E Microredes : O Futuro Já É Presente,” *VIII Simpase*, pp. 1–11, 2009.
- [51] P. Palensky and F. Kupzog, “Smart Grids,” *Annu Rev Environ Resour*, vol. 38, pp. 201–226, 2013, doi: 10.1146/annurev-environ-031312-102947.
- [52] Departamento de Energia dos Estados Unidos, “Smart Grid Overview.”
- [53] H. Farhangi, “The path of the smart grid,” *IEEE Power and Energy Magazine*.
- [54] “International Energy Agency: IEA.”

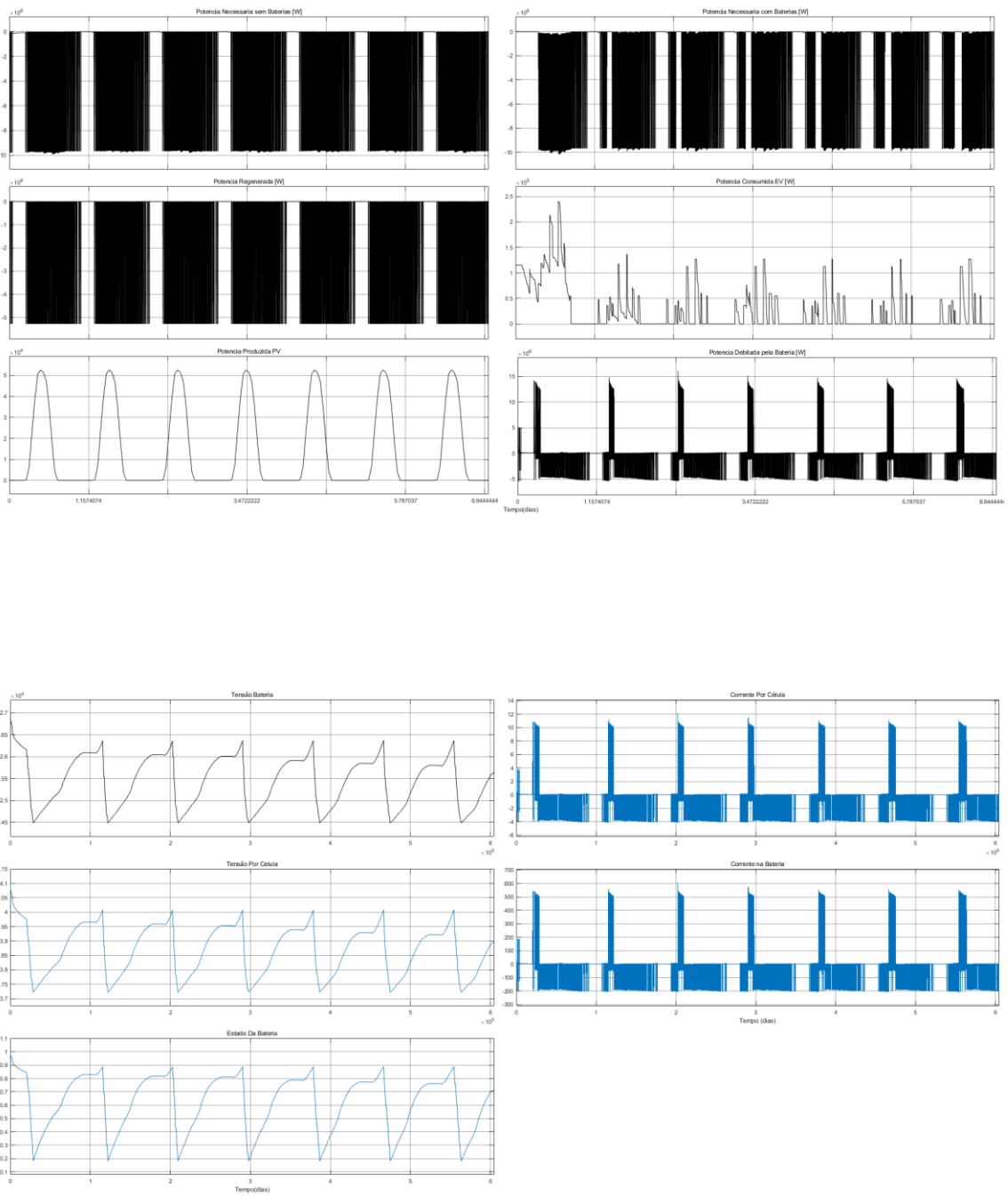
- [55] T. H. A. B. D. C. Darbhamalla Satya Sai Surya Varun, “A Brief Review of Current Smart Electric Mobility Facilities and Their Future Scope”.
- [56] Accenture, *Carderno Carros Eletricos*, 7th ed. FGV ENERGIA, 2017.
- [57] O. Olatunde, M. Y. Hassan, M. P. Abdullah, and H. A. Rahman, “Hybrid photovoltaic/small-hydropower microgrid in smart distribution network with grid isolated electric vehicle charging system.,” *J Energy Storage*, vol. 31, no. April, p. 101673, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101673.
- [58] M. Chen and G. A. Rincón-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.874229.
- [59] C. F. Chiasserini and R. R. Rao, “Energy efficient battery management,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 7, pp. 1235–1245, 2001, doi: 10.1109/49.932692.
- [60] P. M. Gomadam, J. W. Weidner, R. A. Dougal, and R. E. White, “Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems,” *J Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 267–284, 2002, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00190-8.
- [61] M. Abbas, I. Cho, and J. Kim, “Reliability-constrained optimal sizing and rechargeable battery selection for improved load distribution in a fuel-cell hybrid railway propulsion system,” *Energy Convers Manag*, vol. 196, no. April, pp. 1167–1179, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.061.
- [62] M. Ceraolo, G. Lutzemberger, E. Meli, L. Pugi, A. Rindi, and G. Pancari, “Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains,” *J Energy Storage*, vol. 16, pp. 269–279, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.01.017.
- [63] ABB, “Introduction to Energy Storage Solutions ELDS – Packaging and Solutions”.
- [64] G. Réchard and R. Gouttefangeas, “Recovering energy from train braking for traction and grid use,” *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 61–66, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.648.
- [65] Infraestruturas de Portugal, “Diretório da Rede,” 148AD.
- [66] EDP, “certificacao-energetica”.
- [67] K. Mongird, V. Viswanathan, J. Alam, C. Vartanian, V. Sprenkle, and R. Baxter, “2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment,” *Energy Storage Grand Challenge Cost and Performance Assessment 2020*, no. December, pp. 1–20, 2020.
- [68] S. M. Deorah, N. Abhyankar, S. Arora, A. Gambhir, and A. Phadke, “Estimating the Cost of Grid-Scale Lithium-Ion Battery Storage in India Energy Technologies Area Lawrence Berkeley National Laboratory,” no. April, 2020.

# ANEXO A – RESULTADOS

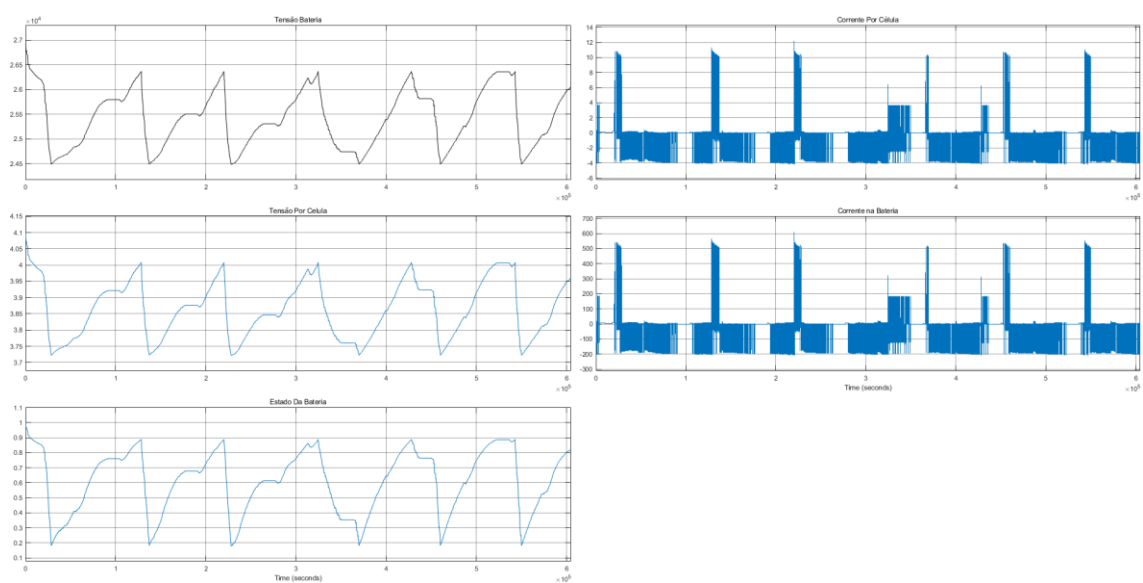
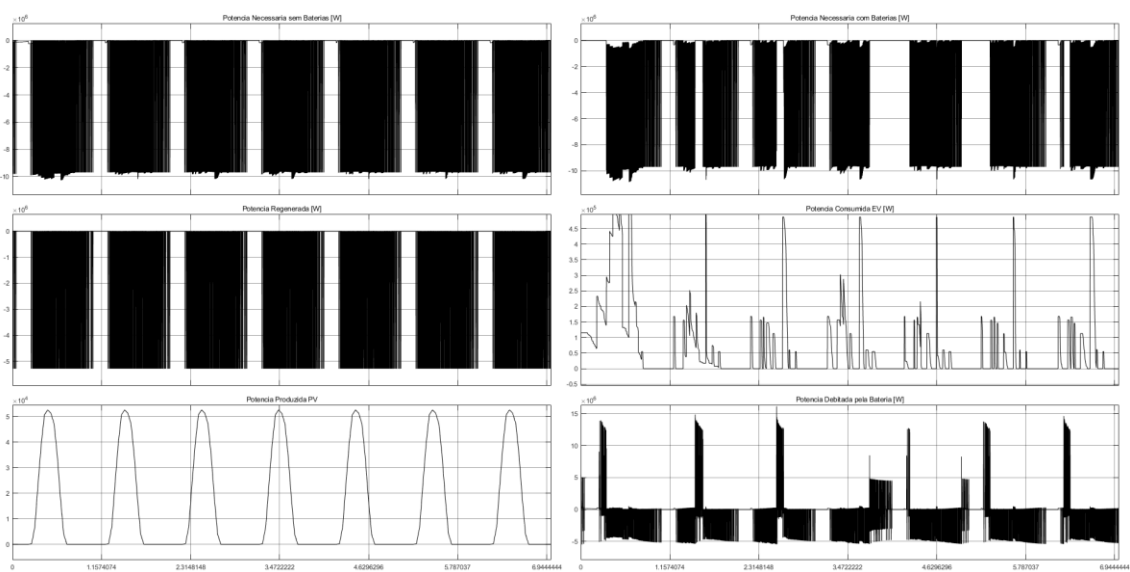
## Cenário 3 – Estação de grandes dimensões



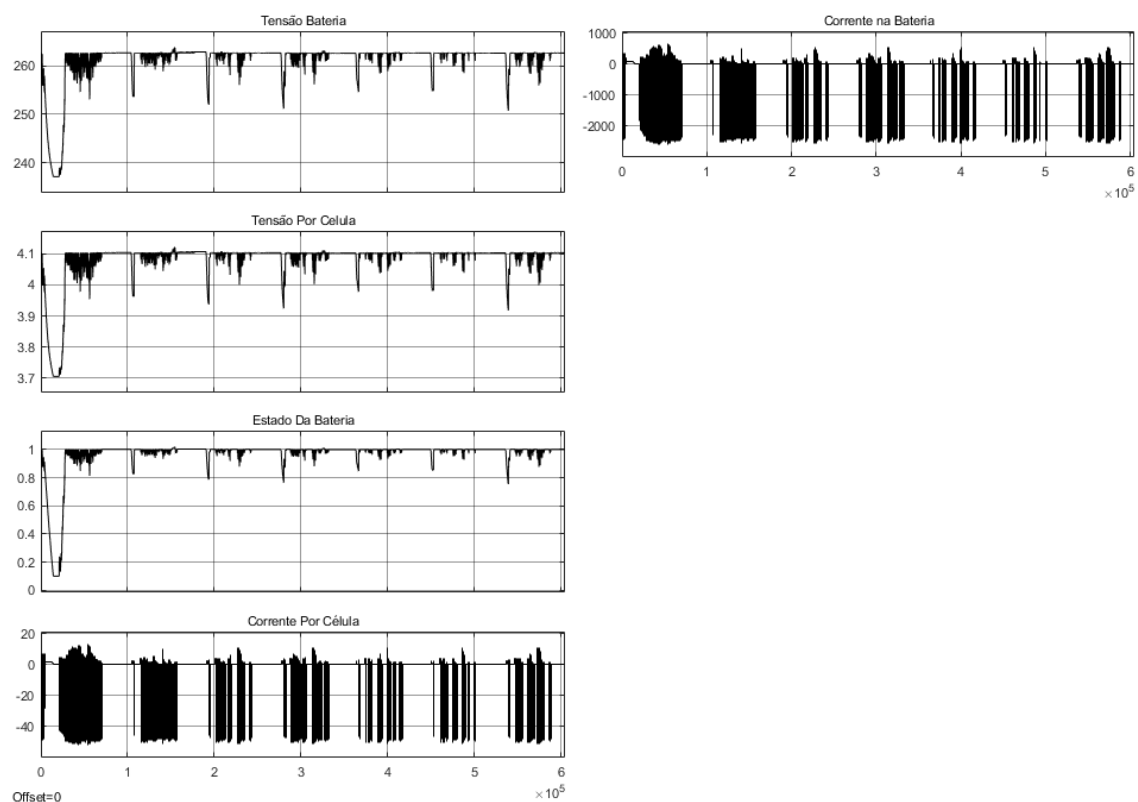
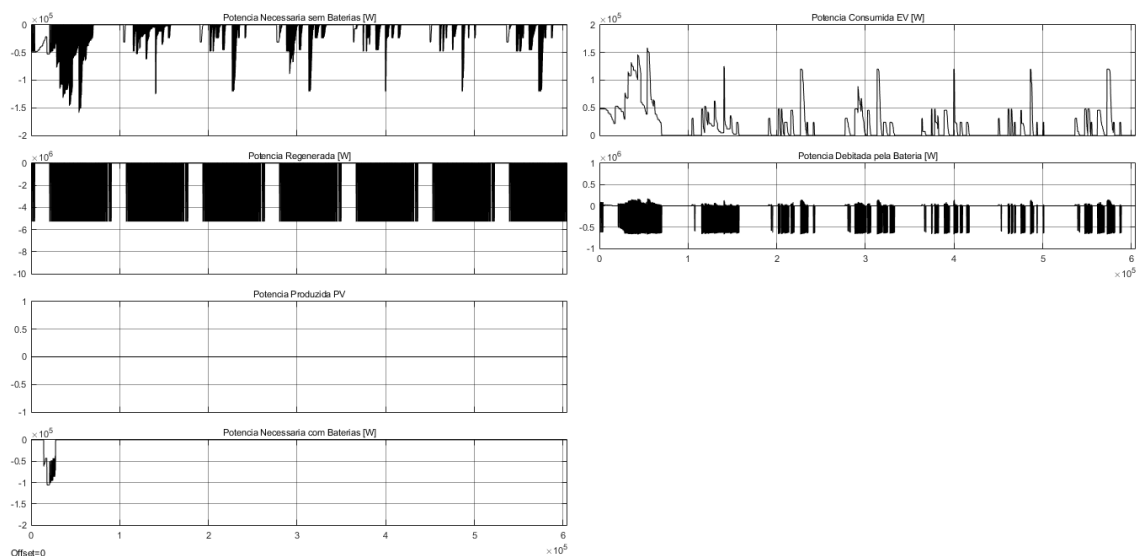
## Cenário 4 – Estação de grandes dimensões



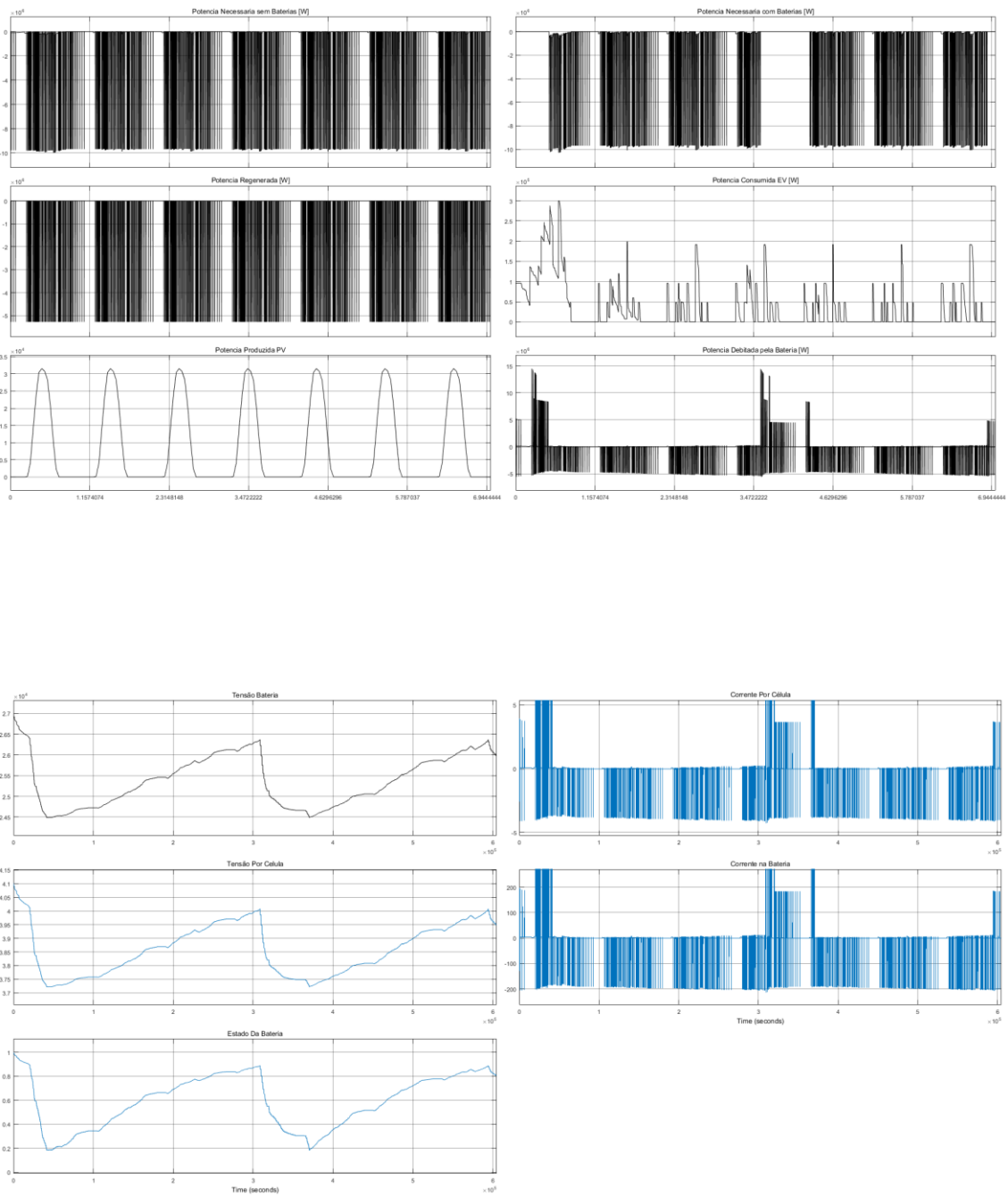
## Cenário 5 – Estação de grandes dimensões



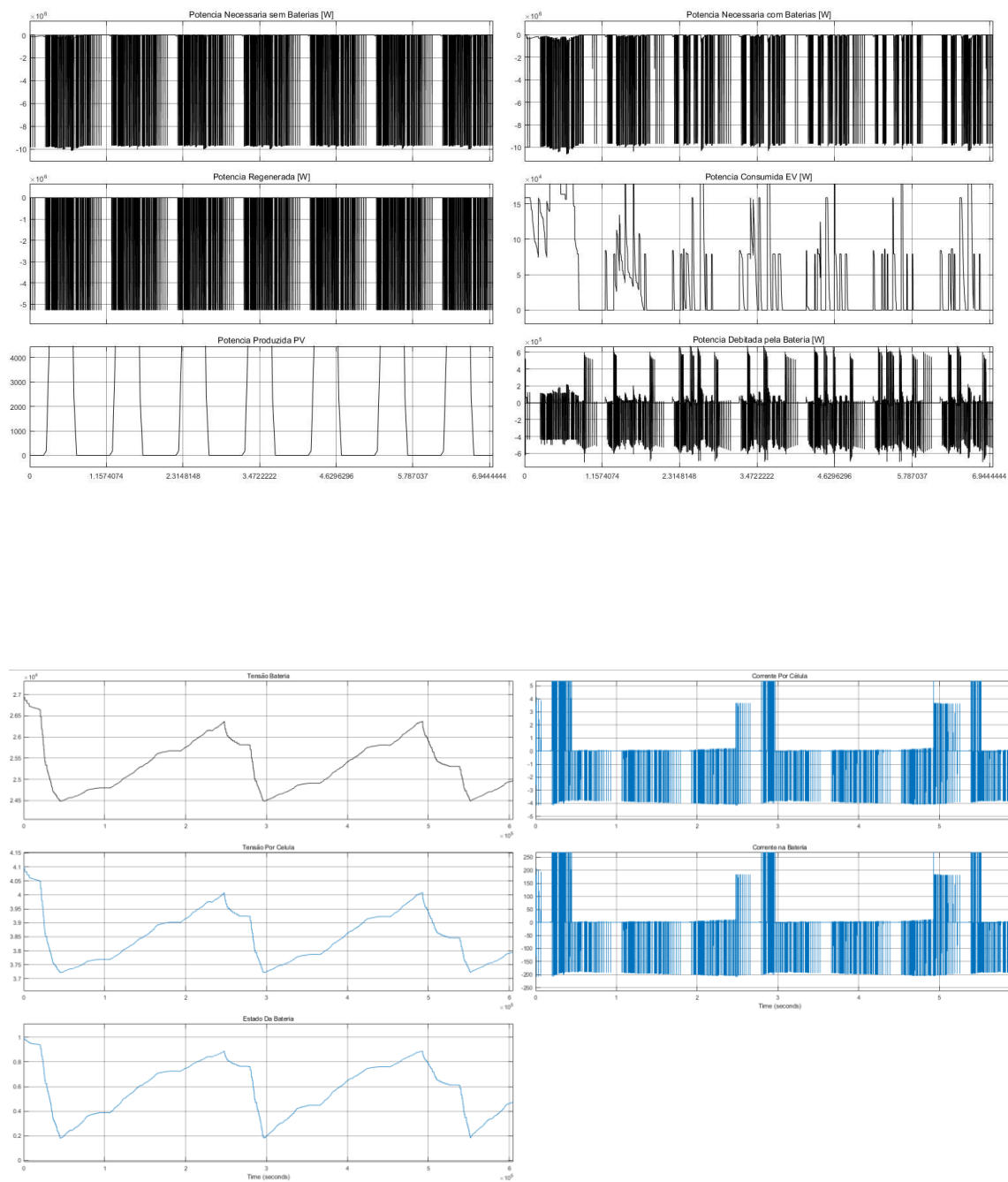
# Cenário 7 – Estação de grandes dimensões



### Cenário 3 - Estação de Pequenas dimenções



# Cenário 4 -Estação de Pequenas dimensões



## Cenário 7 - Estação de Pequenas dimensões

