



Polytechnic of Leiria
School of Technology and Management
Department of Electrical Engineering
Bachelor's Degree in Electrical and Computer Engineering

BATTAIHEALTH
BATTERY CONDITION ESTIMATION IN
AUTOMOTIVE AND RAILWAY APPLICATIONS
USING AI

PEDRO ANDRÉ SILVA FERREIRA

Leiria, Junho de 2025



ESCOLA SUPERIOR
DE TECNOLOGIA
E GESTÃO

Polytechnic of Leiria
School of Technology and Management
Department of Electrical Engineering
Bachelor's Degree in Electrical and Computer Engineering

BATTAIHEALTH
BATTERY CONDITION ESTIMATION IN
AUTOMOTIVE AND RAILWAY APPLICATIONS
USING AI

Final report of the Project Curricular Unit of the Bachelor's Degree in
Eletrotechnical and Computers Engineering, branch of Eletronics and
Computers.

PEDRO ANDRÉ SILVA FERREIRA
N: 2222035

Work done under the guidance of Professor Luís Conde Bento (luís.conde@ipleiria.pt) and
Professor Mónica Figueiredo (monica.figueiredo@ipleiria.pt).

Leiria, Junho de 2025

ACKNOWLEDGEMENTS

agradecer a familia, mae pai irmao e namorada, orientadoes e amigos.

RESUMO

Deverá conter de forma sucinta, clara e objetiva as questões mais importantes tratadas no corpo do trabalho.

Deverá ter, no máximo, 250 palavras.

A estimativa precisa do Estado de Saúde (SoH), Estado de Carga (SoC) e Vida Útil Restante (RUL) das baterias é crucial para aplicações automóveis e ferroviárias, dado o papel essencial das baterias na eficiência energética e fiabilidade dos sistemas de transporte. A gestão eficaz destes parâmetros pode prevenir falhas inesperadas, otimizar os ciclos de carga e descarga, e prolongar a vida útil das baterias, contribuindo assim para uma redução significativa nos custos operacionais e ambientais. A Inteligência Artificial (IA) tem mostrado grande potencial na tarefa de estimar SoH, SoC e RUL das baterias. Algoritmos de machine learning e redes neurais podem analisar grandes volumes de dados históricos e em tempo real, identificando padrões complexos que são difíceis de detectar com métodos tradicionais. A aplicação de IA permite uma previsão mais precisa e adaptativa das condições da bateria, melhorando a segurança e a eficiência operacional em veículos automóveis e ferroviários. Os datasets utilizados para a estimativa de SoH, SoC e RUL de baterias incluem uma variedade de dados recolhidos de ciclos de carga e descarga, condições de temperatura, tensões, correntes e outros parâmetros relevantes. Estes dados podem ser obtidos a partir de testes laboratoriais controlados, bem como de operações reais em campo. A qualidade e a abrangência dos datasets são essenciais para o treino eficaz dos modelos de IA, garantindo que eles possam generalizar bem para diferentes tipos de baterias e condições de operação. O desenvolvimento deste projeto envolve várias etapas-chave. Inicialmente, serão identificados os datasets e pré-processados os dados relevantes das baterias. Em seguida, serão desenvolvidos e treinados modelos de IA utilizando técnicas de machine learning supervisionado e não supervisionado. A validação dos modelos será realizada através de testes exaustivos com datasets distintos, assegurando a sua robustez e precisão. Finalmente, será implementado um sistema protótipo capaz de estimar em tempo real o SoH, SoC e RUL das baterias, com o objetivo de ser integrado em aplicações automóveis e ferroviárias, promovendo a inovação e a sustentabilidade nos sistemas de transporte.

ABSTRACT

Escrever o resumo em inglês.

INDEX

Acknowledgements	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Glossário	xii
Lista de Abreviaturas	xiii
1 Introdução	1
2 Background material and Supporting Technologies	3
2.1 Core Concepts	3
2.2 Supporting Technologies	4
2.3 Methodological Background	4
2.4 Related Frameworks	4
3 State of the Art	5
4 Development	7
5 Conclusões	9
Bibliografia	11
Apêndices	
A Apêndice A	15
A.1 Appendix Section Test	15
A.2 Another Appendix Section Test	16
B Apêndice B	17

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Autem usu id	16
----------	------------------------	----

INTRODUÇÃO

Este documento serve de orientação para o relatório da unidade curricular de Projeto do Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da ESTG – IPLEIRIA. Como tal, é constituído por um conjunto predefinido de estilos. Estes devem ser utilizados sem serem alterados ou substituídos. Para começar a escrever o relatório, basta guardar uma cópia deste documento e substituir os campos e as secções de acordo com o projeto em questão.

A intenção deste documento é fazer com que os estudantes se concentrem na produção dos conteúdos e não se preocupem com formatações de tipos de letra, parágrafos, etc.

Quanto à introdução, ela deve preparar o leitor para o resto do relatório.

Entre outros, deverá incluir:

- uma apresentação do assunto e contexto;
- a definição do objetivo do trabalho;
- as preocupações que o motivaram;
- a metodologia de ação para a persecução do trabalho;
- a colaboração solicitada e recebida e o grau de auxílio que esse eventual apoio teve para o bom andamento dos trabalhos;
- eventualmente, aspetos particulares do trabalho: situações vividas e técnicas adquiridas.

Por fim, a introdução deve descrever como foi organizado o relatório, referindo, brevemente, o propósito de cada secção considerada no mesmo.

As referências bibliográficas são extremamente importantes e podem ser feitas da seguinte forma (ver código fonte do `LATEX`):

- Para fazer uma citação no fim de uma frase: (Sims, 1992).
- Múltiplas citações: (Darwin, 1859; Koza, 1992).
- Para fazer uma citação que serve também como sujeito dessa frase (por exemplo no início): Sims (1992).

- Obter apenas o nome do autor: Sims.
- Obter apenas o título do obra: «Interactive evolution of dynamical systems».
- Segundo Rudolph (2016), bla, bla *The minted package: Highlighted source code in L^AT_EX 2_ε*.

Para mais informações sobre o L^AT_EX 2_ε aconselha-se a consulta do livro *The Not So Short Introduction to L^AT_EX 2_ε* (Oetiker et al., 2000).

Para a gestão de referências bibliográficas aconselha-se o JabRef.

BACKGROUND MATERIAL AND SUPPORTING TECHNOLOGIES

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

2.1 CORE CONCEPTS

Battery technology serves as the foundation for energy storage systems across numerous applications, from portable electronics to electric vehicles and grid-scale storage. Modern batteries primarily fall into several categories, including lithium-ion, lead-acid, nickel-metal hydride, and flow batteries, each with distinct electrochemical properties, energy densities, and lifecycle characteristics. The health of these batteries is characterized by parameters such as state of charge (SoC), state of health (SoH), capacity fade, internal resistance, and degradation rates, which collectively determine performance and longevity. Monitoring these parameters presents unique challenges due to the complex, nonlinear relationships between observable measurements and underlying battery conditions. Artificial intelligence and machine learning approaches offer powerful solutions to these challenges by enabling pattern recognition across multidimensional battery data. Supervised learning algorithms can predict remaining useful life, while unsupervised methods can detect anomalies indicative of impending failure. Deep learning architectures, particularly recurrent neural networks and transformers, have demonstrated exceptional capability in

extracting temporal patterns from battery operational data, making them especially valuable for health prognostics in dynamic usage scenarios.

2.2 SUPPORTING TECHNOLOGIES

2.3 METHODOLOGICAL BACKGROUND

2.4 RELATED FRAMEWORKS

STATE OF THE ART

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

DEVELOPMENT

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

CONCLUSÕES

A apresentação das conclusões tem como objetivo realizar uma síntese, acompanhada de um conjunto de observações acerca do que foi escrito anteriormente.

BIBLIOGRAFIA

- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. John Murray.
- Koza, J. R. (1992). *Genetic Programming. On the programming of computers by means of natural selection*.
- Oetiker, T. et al. (2000). *The Not So Short Introduction to L^AT_EX 2_ε*. <http://www.ctan.org/tex-archive/info/lshort/english/lshort.pdf>.
- Rudolph, Konrad (2016). *The minted package: Highlighted source code in L^AT_EX 2_ε*. <http://mirrors.fe.up.pt/pub/CTAN/macros/latex/contrib/minted/minted.pdf>. CTAN.
- Sims, Karl (1992). «Interactive evolution of dynamical systems». Em: *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. Ed. por F. Varela e P. Bourguine. Paris, FR: MIT Press, pp. 171–178.

APÊNDICES



APÊNDICE A

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

A.1 APPENDIX SECTION TEST

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus, augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris.

LABITUR BONORUM PRI NO	QUE VISTA	HUMAN
fastidii ea ius	germano	demonstratea
suscipit instructor	titulo	personas
quaestio philosophia	facto	demonstrated

Tabela 1: Autem usu id.

Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

A.2 ANOTHER APPENDIX SECTION TEST

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum.

APÊNDICE B

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus, augue.