



**POLITECNICO
SETÚBAL**

PEDRO ANDRÉ
BEXIGA MOREIRA

**Monitorização e Gestão de Energia
em Sistemas de Armazenamento
com Baterias - Desenvolvimento de
um Gateway ESP32**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da
Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

ORIENTADOR

Professor Doutor José Henrique Querido Maia

Dezembro de 2025

PEDRO ANDRÉ
BEXIGA MOREIRA

**Monitorização e Gestão de Energia
em Sistemas de Armazenamento
com Baterias - Desenvolvimento de
um Gateway ESP32**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor Daniel José Medronho
Foito, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Professor Doutor José Henrique Querido
Maia, ESTSetúbal/IPS

Vogal: Professor Doutor Armando José Leitão
Cordeiro, ISEL/IPL

Dezembro de 2025

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor José Maia, pela sua orientação, apoio, conhecimento e disponibilidade ao longo de todo este processo.

Ao Engenheiro Francisco Curado, pela ideia principal desta dissertação e pelas variadas sugestões ao longo deste ano, todas elas fundamentais para que se levasse o barco a bom porto.

À empresa Amp Fusion Lda, pela disponibilidade dos seus equipamentos para testar este protótipo, foi uma experiência muito boa e essencial nesta aprendizagem.

Ao Professor Victor Antunes, pela ajuda e disponibilidade no laboratório, pelas explicações e pelos valiosos conhecimentos partilhados.

Aos meus colegas e professores de mestrado, que ao longo destes 2 anos me mostraram o que é o mundo da Engenharia Eletrotécnica e nunca me deixaram “ir abaixo”.

Aos meus amigos pelo apoio nesta “aventura” e por estarem sempre presentes quando mais precisei.

À minha namorada, um grande Obrigado Ana Rita! Por me teres aturado nas minhas constantes reclamações e por me teres apoiado nesta grande decisão da minha vida.

Um agradecimento especial à minha família, aos meus pais e irmão. A vossa presença, em todos os momentos, mas sobretudo nos momentos mais difíceis, foi essencial para que mantivesse a determinação e alcançasse este objetivo. Esta conquista não é apenas minha, mas também é vossa.

E, por último, agradeço a mim mesmo. Por ter acreditado, lutado e conseguido.

Resumo

A transição energética trouxe uma transformação significativa ao setor, marcada pelo aumento das fontes de energia renovável, principalmente da energia solar e eólica, que se vieram juntar à energia hídrica. Este crescimento repentino trouxe novos desafios e dificuldades, nomeadamente a intermitência da produção, que exige soluções para garantir a estabilidade das redes elétricas. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) foram desenvolvidos e assumem atualmente um papel fundamental na estabilização e otimização das redes elétricas, permitindo a introdução de técnicas de gestão de energia, nomeadamente, o aproveitamento da energia gerada em períodos de menor consumo e o seu uso em momentos de maior procura ou preços elevados.

No entanto, o rápido crescimento dos BESS tornou cada vez mais relevante a monitorização e gestão remota destes sistemas. Esta dissertação propõe o desenvolvimento de um *gateway* com capacidade de recolha e manipulação de registos internos em diferentes protocolos de comunicação, nomeadamente Modbus RTU e Modbus TCP/IP, bem como o seu envio para um *broker* MQTT, de forma a facilitar a troca de informação e o acompanhamento remoto do desempenho dos diversos equipamentos.

Neste contexto, vão ser apresentados os processos de desenvolvimento, construção e testes deste *gateway*. O dispositivo desenvolvido baseia-se num microcontrolador ESP32 de baixo custo, podendo ser utilizado com sistemas compatíveis com um dos protocolos de comunicação Modbus RTU ou Modbus TCP/IP. Este é configurável por software necessitando apenas de realizar pequenos ajustes na programação.

Por fim, são explicados os motivos das escolhas das tecnologias, tanto a nível de hardware como de software, bem como a escolha dos testes realizados de forma a validar as ferramentas deste dispositivo desenvolvido.

Apesar dos resultados positivos dos testes, foi possível identificar algumas limitações do sistema, no entanto também surgiram ideias para trabalhos futuros, de forma a dar continuidade a este projeto.

Palavras-chave: Transição energética, BESS, Modbus RTU, Modbus TCP, ESP32, Monitorização remota.

Abstract

The energy transition has brought significant transformation to the sector, marked by the increase in renewable energy sources, especially solar and wind power, which have come to complement hydropower. This rapid growth has brought new challenges, especially the intermittency of production, which requires solutions to ensure the stability of electrical grids. In this context, battery energy storage systems (BESS) have been developed and currently play a fundamental role in stabilizing and optimizing electrical networks, enabling energy management techniques, such as storing energy generated during periods of low consumption for use during periods of higher demand or elevated prices.

However, the rapid expansion of BESS has made the remote monitoring and management of these systems increasingly important. This dissertation proposes the development of a gateway capable of collecting and manipulating internal registers across different communication protocols, namely Modbus RTU and Modbus TCP/IP, as well as transmitting the data to an MQTT broker, in order to facilitate the information exchange and remote monitoring of equipment performance.

In this context, the processes of development, implementation, and testing of this gateway are presented. The developed device is based on a low-cost ESP32 microcontroller and can be used with systems compatible with either the Modbus RTU or Modbus TCP/IP communication protocols. This is software-configurable, requiring only minor programming adjustments for integration.

Finally, the reasons behind the chosen technologies are explained, both in terms of hardware and software, as well as the selection of tests performed to validate the functionality of the developed device.

Despite the positive test results, some system limitations were identified, however, ideas for future work are also proposed to allow the continuation of this project.

Keywords: Energy transition, BESS, Modbus RTU, Modbus TCP, ESP32, Remote monitoring.

Índice

<i>Agradecimentos</i>	iii
<i>Resumo</i>	iv
<i>Abstract</i>	v
<i>Índice</i>	vi
<i>Lista de figuras</i>	viii
<i>Lista de tabelas</i>	x
<i>Lista de siglas e acrónimos</i>	xi
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. Estado de arte	5
2.1. Tecnologias de Armazenamento de Energia	5
2.2. Sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS)	6
2.2.1. Papel e constituição dos BESS.....	6
2.2.2. Aplicações e Soluções.....	7
2.3. Baterias para armazenamento de energia	8
2.3.1. Baterias de iões de lítio (<i>LIBs</i>)	9
2.3.2. Comparação entre Baterias de lítio <i>NMC</i> e <i>LiFePO₄</i>	14
2.3.3. Baterias de iões de sódio (<i>SIBs</i>).....	15
2.3.4. Baterias de níquel-hidrogénio (<i>Ni-H₂</i>).	18
2.4. Sistemas de Gestão e Monitorização de Energia	20
2.4.1. BMS - <i>Battery Management System</i>	21
2.4.2. EMS - <i>Energy Management System</i>	21
2.5. Comunicação e Integração em Sistemas de Energia	22
2.5.1. Papel do Inversor Híbrido	22
2.5.2. Protocolo de comunicação Modbus	24
3. Metodologia e Desenvolvimento do Sistema	29
3.1. Integração de Hardware e Software	29
3.2. Microcontrolador ESP32	30
3.3. Ferramentas utilizadas	30
3.3.1. Ambiente de Desenvolvimento - Arduino	30
3.3.2. Ambiente de Desenvolvimento - Python	30
3.3.3. Estrutura dos Programas Desenvolvidos	30
3.3.4. Principais bibliotecas do Arduino IDE utilizadas:	31

3.3.5.	Limitações do Arduino IDE.....	32
3.4	Arquitetura do Sistema	32
3.4.1.	Diagrama de blocos.....	32
3.4.1.1.	Comunicação Modbus RTU	33
3.4.1.2.	Comunicação Modbus TCP/IP	34
3.4.2.	Principais componentes.....	35
3.4.3.	Ligações da montagem.....	36
3.5.	Comunicação Modbus RTU e TCP	37
4.	Gestão de Energia	43
4.1.	Gestão dos Principais Fatores que Influenciam a Vida Útil e a Eficiência Energética das Baterias	43
4.1.1.	Correntes de carga e descarga controladas	43
4.1.2.	Temperatura de Operação	44
4.1.3.	Profundidade de descarga (DoD- <i>Depth of Discharge</i>)	45
4.1.4.	Sistemas de equilíbrio de células de baterias	46
4.2.	Estratégias de utilização das baterias na gestão de energia	47
4.2.1.	<i>Peak Shaving</i>	47
4.2.2.	<i>Load Shifting</i>	48
4.2.3.	<i>Valley Filling</i>	49
4.3.	Parâmetros Modbus nas Estratégias de Gestão de Energia	50
5.	Testes e Resultados	55
5.1.	Teste - Leitura Modbus RTU	56
5.2.	Teste - Leitura Modbus TCP.....	58
5.3.	Teste - Escrita Modbus RTU	59
5.4.	Teste - Escrita Modbus TCP.....	60
5.5.	Teste - Envio de dados recolhidos via Modbus RTU e Modbus TCP para broker MQTT	61
5.6.	Teste - Envio de comandos de escrita via broker MQTT para equipamento via Modbus TCP e Modbus RTU	62
5.7.	Teste - Download de dados de broker MQTT para CSV	65
6.	Conclusão e Trabalhos Futuros	67
6.1.	Conclusão	67
6.2.	Limitações do trabalho	67
6.3.	Trabalhos futuros	68
7.	Bibliografia.....	69
8.	Anexos	75

Lista de figuras

Figura 1 - Diagrama de carga do consumo de energia elétrica em Portugal [5]	2
Figura 2 - Preço do Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL) diário, Euro/MWh [6]	2
Figura 3 - Imagem do BESS em Alcouthim [13]	8
Figura 4 - Diagrama esquemático de uma bateria LiFePO_4 [26]	10
Figura 5 - Curva de descarga para diferentes temperaturas (Adaptado de [29])	11
Figura 6 - Curva de vida útil de ciclos de descarga para diferentes DoD, em 1C e a 25°C (Adaptado de [30])	12
Figura 7 - Diagrama esquemático de uma bateria NMC (Adaptado de [32])	13
Figura 8 - Curvas de descarga de uma bateria de 160Ah para diferentes temperaturas (Adaptado de [34])	14
Figura 9 - Comparação entre baterias de lítio NMC e LiFePO_4 [35]	15
Figura 10 - Diagrama esquemático de uma SIB [37]	16
Figura 11 - Comparação da tensão em circuito aberto (OCV) em função do SoC (%) entre bateria Na-Ion e LiFePO_4 [38]	17
Figura 12 - Bateria ESV-4.0. [42]	19
Figura 13 - Especificações das células ESV 4.0 da empresa EnerVenue [42]	19
Figura 14 - Inversor híbrido, Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 [50]	23
Figura 15 - Diagrama ilustrativo simplificado do funcionamento de um inversor híbrido adaptado de [49]	24
Figura 16 - Estrutura de dados ADU e PDU para Modbus RTU e TCP/IP [53].	25
Figura 17 - Modelo de mensagem Modbus RTU [55]	26
Figura 18 - Modelo de mensagem Modbus TCP/IP [55]	27
Figura 19 - Esquema em blocos do sistema com comunicação Modbus RTU	33
Figura 20 - Esquema em blocos do sistema com comunicação Modbus TCP	34
Figura 21 - Especificações do XIAO ESP32C3 [56]	35
Figura 22 - Módulo conversor TTL-RS485 JZK [64]	36
Figura 23 - Esquema das ligações para comunicação Modbus RTU	37
Figura 24 - Bibliotecas utilizadas no projeto	37
Figura 25 - Configuração dos modos Modbus TCP e RTU	38
Figura 26 - Comutação automática entre Modbus TCP e RTU	38
Figura 27 - Leitura e escrita nos registos via ModBus TCP e RTU	39
Figura 28 - Definição e publicação de registos lidos por ModBus RTU e TCP	40
Figura 29 - Função de reconexão automática	40
Figura 30 - Receção e processamento de comandos externos via MQTT	41
Figura 31- Curvas de descarga de uma bateria LCO a diferentes taxas de descarga (C-rate) a 25°C. (Adaptado de [66]).	44
Figura 32 - Longevidade de uma bateria de íões de lítio em função da temperatura de operação para diferentes taxas de descarga (C-rate) (1 C, 2 C e 3 C) [67]	45
Figura 33 - Influência de diferentes DoD na capacidade e número de ciclos de uma bateria de LiFePO_4 . (Adaptado de [30])	45
Figura 34 - Gráfico representativo da estratégia Peak shaving. (Adaptado de [72])	48
Figura 35 - Gráfico representativo da estratégia load shifting. (Adaptado de [74])	48
Figura 36 - Gráfico representativo da estratégia valley filling (Adaptado de [75]).	49
Figura 37 – Fotografia da montagem, utilizando o conversor de frequências, SEW Eurodrive Movitrac LTE-B+, acoplado a um motor assíncrono trifásico	55
Figura 38 - Resultados obtidos da leitura via Modbus RTU, do registo 7 e 135.	56

Figura 39 - Fotografia de alguns resultados da leitura de dados via Modbus RTU em ambiente real.	57
Figura 40 - Imagem dos resultados obtidos da leitura via Modbus TCP, utilizando Software Modbus Slave.	58
Figura 41 - Resultados do teste de escrita, alterando o valor do registro 138 de 3000 para 2900 utilizando comunicação por Modbus RTU.	59
Figura 42 - Resultados do teste de escrita utilizando Modbus TCP e o software Modbus Slave.	61
Figura 43 - Imagem dos resultados no broker MQTT, capturados por Modbus TCP....	62
Figura 44 - a) Comando de escrita via MQTT para escrita em Modbus RTU. b) Resultado do comando de escrita.	63
Figura 45 - a) Comando de escrita via MQTT para escrita em Modbus TCP. b) Resultado do comando de escrita.	64
Figura 46 - Resultados do teste de download de dados para CSV, durante o ensaio de leitura de dados no Modbus TCP.	65

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parâmetros Modbus RTU do inversor híbrido Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4.....	50
---	----

Lista de siglas e acrónimos

- ADU - *Application Data Unit* (Unidade de Dados da Aplicação)
- BESS - *Battery Energy Storage System* (Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria)
- BMS - *Battery Management System* (Sistema de Gestão de Bateria)
- CA - Corrente Alternada
- CC - Corrente Contínua
- CAT 5 - *Category 5* (Cabo de Rede)
- CRC - *Cyclic Redundancy Check* (Verificação de Redundância Cíclica)
- CSV - *Comma-Separated Values* (Valores Separados por Vírgula)
- DE - *Driver Enable* (Ativação do Driver)
- DoD - *Depth of Discharge* (Profundidade de Descarga)
- EMS - *Energy Management System* (Sistema de Gestão de Energia)
- EV - *Electrical Vehicle* (Veículo Elétrico)
- GEO - *Geosynchronous Equatorial Orbit*
- IoT - *Internet of Things* (Internet das Coisas)
- LAN - *Local Area Network* (Rede de área local)
- LEO - *Low-Earth Orbit*
- LIB - *Lithium-Ion Battery* (Bateria de Iões de Lítio)
- MBAP - *Modbus Application Protocol* (Protocolo de Aplicação Modbus)
- MIBEL - Mercado Ibérico de Eletricidade
- MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport*
- MPPT - *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento do Ponto de Potência Máxima)
- OCV – *Open Circuit Voltage* (Tensão de Circuito Aberto)
- PDU - *Protocol Data Unit* (Unidade de Dados de Protocolo)
- PCS - *Power Conversion System* (Sistema de Conversão de Energia)
- PWM - *Pulse-Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)
- RE - *Receiver Enable* (Ativação do Recetor)
- RJ45 - Conector Ethernet Padrão
- RTU - *Remote Terminal Unit*
- SIB - *Sodium-Ion Battery* (Bateria de Iões de Sódio)
- SoC - *State of Charge* (Estado de Carga)
- SoH - *State of Health* (Estado de Saúde)
- USB-A - *Universal Serial Bus* (tipo A)
- USB-C - *Universal Serial Bus* (tipo C)
- VSC - *Visual Studio Code*

Capítulo 1

1. Introdução

Neste capítulo vai ser apresentado o enquadramento geral da dissertação, contextualizando o tema com a transição energética e as tecnologias de armazenamento. São também definidos os principais objetivos da dissertação e descrita a estrutura global do documento.

1.1. Enquadramento

A transição energética na Europa tem vindo a ser marcada pela criação de metas ambiciosas, com o intuito de alcançar a neutralidade climática até 2050. Isso significa reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa, investir em tecnologias sustentáveis e proteger o ambiente. Este objetivo foi formalizado pela Lei Europeia do Clima, aprovada em 2021, que inclui um compromisso de cortar as emissões líquidas de gases de efeito estufa em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990 [1][2].

Esta transição energética está a ser feita através da substituição gradual de fontes de energia com origem fóssil, por fontes de energia renováveis, e é essencial aumentar a capacidade de armazenamento de energia para que a transição para fontes renováveis seja efetiva. Embora a energia solar e a eólica sejam uma das principais fontes de energia renovável, elas apresentam um carácter intermitente, pois a geração depende de condições climáticas, que são bastante voláteis. Por exemplo, em 2024 a produção de energia elétrica renovável totalizou 36,7 TWh, contabilizando 71% do consumo nacional, devido a esse ano ter tido condições globalmente favoráveis (chuva, vento e sol) [3], no entanto em 2022, as condições ideais não se proporcionaram e apenas 34,7% da energia total consumida em Portugal foi proveniente de energias renováveis [4].

Para assegurar um fornecimento de energia contínuo e estável, é fundamental aumentar a capacidade de armazenamento disponível. Esse aumento é necessário para ser possível compensar as flutuações das fontes renováveis, tal como se consegue visualizar no diagrama de carga do dia 03/02/2025 representado na figura 1.

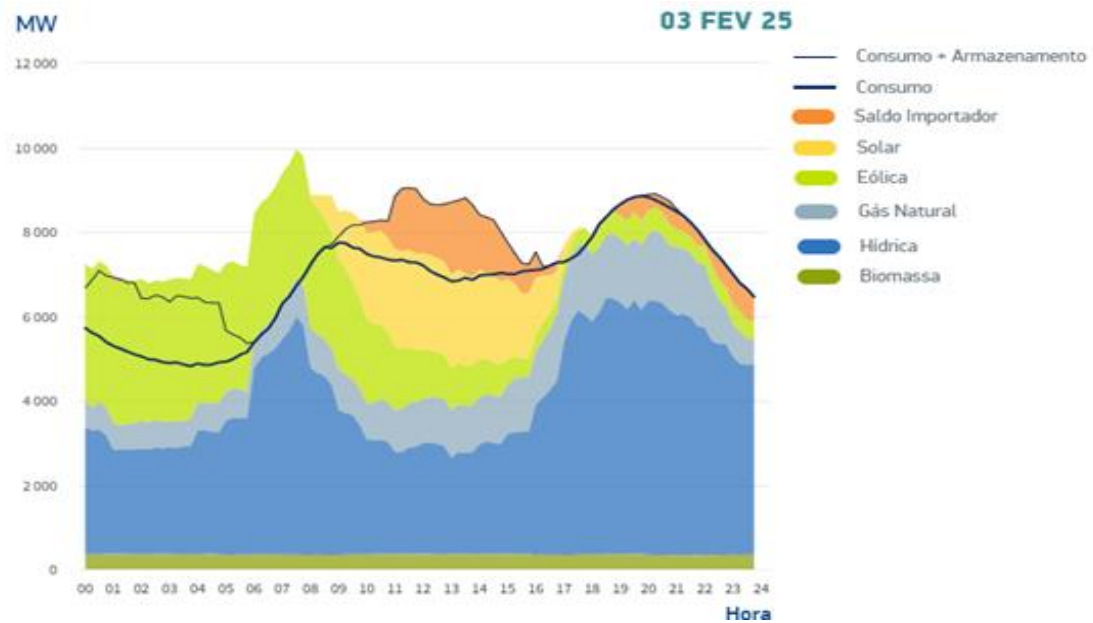


Figura 1 - Diagrama de carga do consumo de energia elétrica em Portugal [5]

As altas flutuações de energia gerada pelas fontes renováveis, cria uma variação acentuada dos preços da energia. Sendo a figura 2 exemplo, podemos visualizar este efeito no dia 03/02/2025, onde após ocorrer o abrandamento da produção de energia renovável, e um aumento do consumo de energia, o preço do MWh ultrapassa o dobro do valor mínimo. Estes aumentos de preço da energia, criam uma pressão extra no desenvolvimento e aumento de tecnologias de armazenamento de forma a mitigar as flutuações de preço.

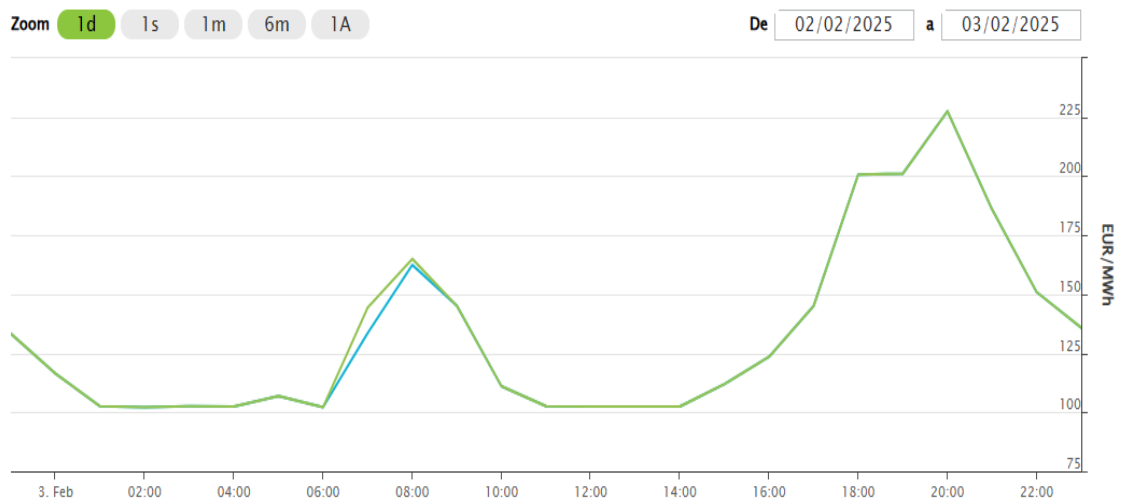


Figura 2 - Preço do Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL) diário, Euro/MWh [6]

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste no estudo de um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias, com capacidade de monitorização e atuação dos principais parâmetros fundamentais para o seu controlo de modo eficiente. Para isso é necessário desenvolver um equipamento para a sua monitorização remota, tendo-se utilizado o microcontrolador ESP32 como principal componente. Para tal, desenvolveu-se um *gateway* capaz de estabelecer comunicações bidirecionais com dispositivos industriais através dos protocolos Modbus RTU e Modbus TCP/IP, realizando a leitura e escrita de registos para monitorização e controlo dos sistemas de armazenamento.

O *gateway* converterá estes dados para o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), amplamente adotado em soluções de Internet das Coisas (*IoT*), permitindo assim a integração entre os equipamentos industriais e plataformas de monitorização remota. Esta solução permite a troca de informações essenciais para a gestão energética, garantindo controlo em tempo real e otimização dos sistemas de armazenamento de energia em baterias.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em oito capítulos principais:

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento da dissertação, os objetivos e a sua estrutura.

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte sobre sistemas de armazenamento de energia em baterias, destacando a sua importância na integração de energias renováveis. Explora as principais tecnologias de baterias, tais como as de íões de Lítio-Lítio-Ferro-Fosfato ($LiFePO_4$) e Níquel-Manganês-Cobalto (*NMC*), íões de sódio e níquel-hidrogénio, discutindo as suas características e aplicações. Aborda também os protocolos de comunicação Modbus RTU e Modbus TCP/IP, essenciais para a monitorização e controlo dos sistemas energéticos.

No Capítulo 3 são apresentadas as abordagens adotadas para o desenvolvimento do *gateway*, incluindo a justificação da escolha do microcontrolador ESP32, as ferramentas de desenvolvimento utilizadas, como o Arduino IDE e as bibliotecas específicas para Modbus e MQTT. É descrita a arquitetura do sistema, composta pelo ESP32, conversor RS485 e inversor, bem como a implementação da comunicação Modbus RTU e TCP, incluindo as operações de leitura e escrita de dados. Por fim, aborda-se a integração com o protocolo MQTT para a monitorização remota e visualização dos dados.

O Capítulo 4 foca-se na gestão de energia, analisa os principais fatores que afetam a vida útil das baterias, incluindo correntes de carga e descarga, temperatura e profundidade de descarga. Explora ainda estratégias para otimização da utilização das baterias, como *peak shaving* e *load shifting*. Apresenta uma análise detalhada de alguns registos modbus RTU aplicado a um caso específico.

No Capítulo 5 são apresentados os testes realizados ao sistema desenvolvido, com análise dos dados recolhidos. Inclui imagens e descrições que comprovam a validação da solução implementada.

O Capítulo 6 aborda as principais conclusões da dissertação, e os trabalhos futuros.

O Capítulo 7 é a lista de referências bibliográficas consultadas na realização desta dissertação.

No final são apresentados os anexos que complementam a dissertação.

Capítulo 2

2. Estado de arte

Neste capítulo será abordado o estado de arte relativo a um dos caminhos da transição energética. Começando por destacar as tecnologia de armazenamento existentes e focando na importância dos BESS, a sua constituição, e as suas principais aplicações. Seguidamente vão ser apresentadas as principais tecnologias de baterias utilizadas atualmente, destacando as suas características e aplicações. Serão aprofundados os conceitos fundamentais dos sistemas BMS e EMS, responsáveis por garantir a segurança, eficiência e otimização do fluxo energético. Para finalizar são descritos os protocolos de comunicação Modbus RTU e Modbus TCP, muito utilizados em ambiente industrial e muito importantes para a monitorização e controlo de sistemas energéticos.

2.1. Tecnologias de Armazenamento de Energia

Atualmente já existem várias tecnologias de armazenamento de energia, podendo estas ser divididas em tecnologias de armazenamento de energia de larga escala e de pequena escala.

Tecnologias de armazenamento em larga escala:

- **Centrais Hídricas equipadas com bombagem** - Atualmente é a tecnologia mais utilizada para aplicações que necessitam de elevada energia. Em 2020, em Portugal, a capacidade instalada desta tecnologia representava 99,8% da capacidade nacional de armazenamento, num total de 3,4 GW instalados [7]. Este armazenamento hídrico é bem visível nas figuras 1 e 2: quando existiu uma grande produção de origem eólica ou fotovoltaica foi efetuada bombagem, tendo depois a água sido turbinada quando o preço da energia aumentou significativamente.

- **Ar Comprimido** é a principal alternativa às centrais hídricas, utilizando sistemas com turbinas a gás de alta potência. O funcionamento baseia-se na compressão do ar, que é armazenado sob pressão em reservatórios subterrâneos ou tanques, e posteriormente libertado para movimentar turbinas que geram eletricidade quando necessário. Em termos mundiais, esta tecnologia é a segunda com mais capacidade instalada, com uma capacidade total de cerca de 450 MW, representando 0,3% da capacidade total de armazenamento de energia no mundo [7].

- **Hidrogénio verde** corresponde a uma das alternativas mais recentes, considerada das soluções mais promissoras para o futuro e uma alternativa viável aos combustíveis fósseis. O hidrogénio é obtido através da eletrólise da água, um processo que separa a molécula de água (H_2O) em hidrogénio (H_2) e oxigénio (O_2), utilizando corrente elétrica. Para gerar energia, o hidrogénio reage com o oxigénio numa célula de

combustível, produzindo eletricidade, calor e vapor de água como único subproduto [8]. O hidrogénio pode ser armazenado no formato líquido com temperaturas inferiores a -235°C e guardado em câmaras criogénicas de grande capacidade, ou comprimido em elevadas pressões [8].

Tecnologias de armazenamento em pequena escala:

- **Volante de inércia** ou *Flywheel* - Tecnologia que consiste em fazer girar uma massa com elevada constante de inércia acoplado a uma máquina elétrica, promovendo assim o armazenamento de energia sob a forma de energia cinética durante variações de potência [7].

- **Supercondensadores** - Dispositivos que armazenam energia, composto por dois elétrodos: um do tipo bateria (ânodo) e um do tipo condensador (cátodo). Uma das suas principais características é uma maior área ativa comparativamente às baterias e condensadores, o que permite converter e armazenar mais carga. Os supercondensadores têm várias vantagens, como não precisarem de refrigeração, suportarem altas tensões e terem grande capacidade [9].

- **Baterias** - Principal tecnologia de armazenamento de pequena escala. As baterias são compostas por duas ou mais células eletroquímicas, formadas por um elétrodo positivo, um elétrodo negativo e um eletrólito, permitindo a conversão de energia química em energia elétrica [10]. Quando várias baterias são combinadas em série e em paralelo, juntamente com sistemas de segurança e gestão de energia, formam sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS), que possuem maior capacidade e são utilizados para aplicações de maior escala.

2.2. Sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS)

Os sistemas de armazenamento de energia em baterias permitem armazenar energia elétrica para uso posterior, tanto contribuindo para a estabilidade da rede como em sistemas isolados. De seguida, serão abordados o seu papel, constituição e principais aplicações.

2.2.1. Papel e constituição dos BESS

Os BESS estão-se a tornar essenciais na transição energética, apresentando diversas aplicações e benefícios significativos na integração das energias renováveis e posteriormente na economia, na sociedade e no meio ambiente.

Um BESS é constituído por vários sistemas e componentes sendo os seus principais elementos:

- **Células eletroquímicas:** Armazenam a energia química e convertem em energia elétrica. Estas células fazem parte da categoria de geradores estacionários de força eletromotriz conhecidos como “baterias secundárias”, que, ao contrário das baterias primárias, podem ser recarregadas, possibilitando

também a conversão de energia elétrica em energia química. Estas células constituem o elemento principal de um BESS, sendo responsáveis pelo armazenamento e fornecimento de energia de forma flexível e controlável [10][11];

- **Sistema de gestão de bateria (BMS):** Supervisiona e controla o estado de carga e descarga, monitoriza a temperatura e garante a segurança e eficiência de operação do sistema. É obrigatório em sistemas com baterias de iões de lítio, no entanto, pode ser dispensado nas baterias de chumbo-ácido;
- **Sistema de conversão de energia (PCS):** Equipamentos responsáveis para a conversão de energia. Por exemplo, quando se pretende extrair energia armazenada nas baterias, o conversor de potência converte a corrente contínua (CC) armazenada nas baterias em corrente alternada (CA), para uso na rede ou pelo consumidor final, funcionando como inversor.
- **Sistema de gestão de energia (EMS):** Elemento central do sistema, encarregado de supervisionar e controlar o fluxo de energia entre a rede elétrica e as baterias, que flui através dos vários equipamentos de potência.

Em contexto de distribuição de energia elétrica, um sistema de armazenamento de energia em baterias é um conjunto de dispositivos ligados à rede elétrica, concebido para armazenar a energia gerada num determinado momento e utilizá-la posteriormente para diferentes finalidades [12].

No entanto através da tecnologia dos novos sistemas híbridos, além de apenas se importar energia a partir da rede elétrica, também se pode exportar energia para a rede, sendo esta uma solução para as flutuações das energias renováveis que ocorrem ao longo do dia.

2.2.2. Aplicações e Soluções

Estes sistemas são cada vez mais valorizados como solução no setor energético, fornecendo diversos serviços auxiliares, como regulação de frequência, acompanhamento de carga, arranque a frio, manutenção do equilíbrio energético entre períodos de pico e de baixa procura, e fornecimento de energia localizada. Além disso, contribuem para reduzir o número de centrais em reserva (*standby*) e os respetivos custos, garantindo ainda o fornecimento contínuo de energia a setores críticos, como hospitais, sistemas informáticos, indústria, transportes, bancos e comunicações [12].

Em Portugal, estes sistemas de armazenamento de energia em baterias começam a aparecer e estão rapidamente a expandir-se, sendo exemplo, figura 3, um projeto de grande escala numa das centrais fotovoltaicas da Galp em Alcoutim, no Algarve, onde a Galp em parceria com a Powin LLC, instalaram no início de 2024 um sistema de baterias com uma capacidade de 5MW/20MWh [13].

Outro projeto de referência é o sistema implementado na Ilha Terceira (Açores), promovido pela EDA, Eletricidade dos Açores, com a participação da Siemens, Fluence e colaboração da EDP Labelec. O sistema apresenta 15 MW de potência instalada e 10,5 MWh de capacidade de armazenamento. Permite uma maior integração de energias renováveis, estabilizando a frequência e a tensão da rede e garantindo um fornecimento contínuo a setores críticos da ilha. Além disso, contribui para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, diminuir emissões de CO₂ e aproveitar de forma eficiente a energia gerada localmente [14].



Figura 3 - Imagem do BESS em Alcoutim [13]

Este tipo de aplicações pode revelar-se especialmente útil quando as baterias são carregadas em períodos de elevada oferta fotovoltaica, nos quais o preço da eletricidade no MIBEL tende a descer significativamente devido ao excesso de produção de energia renovável. Nesses momentos, a energia disponível pode atingir preços muito baixos ou mesmo negativos, tornando vantajoso armazenar a energia para utilização posterior em horas de menor geração ou maior procura [15].

2.3. Baterias para armazenamento de energia

Os BESS desempenham um papel fundamental na integração de energias renováveis nas redes elétricas e na sua estabilização. A escolha do tipo de baterias utilizadas nestes sistemas é crucial para garantir eficiência, durabilidade e segurança.

O desempenho das baterias é influenciado por fatores químicos e estruturais como a resistência interna, a capacidade, a composição química, e fatores operacionais como a potência de carregamento e descarregamento, a temperatura de operação e a profundidade da descarga (*Depth of Discharge* - DoD), entre outros.

Com o uso contínuo, surgem desequilíbrios entre as células, resultando em variações de tensão e estado de carga (*State of Charge* - SoC). Estas diferenças podem levar a perdas de eficiência energética e acelerar o envelhecimento da bateria diminuindo o seu estado de saúde (*State of Health* - SoH), aumentando o risco de sobrecarga ou descarga profunda.

Dada a importância de maximizar a vida útil e o desempenho das baterias, é essencial analisar as diferentes tecnologias disponíveis. A escolha da química e da estrutura de cada tipo de bateria impacta diretamente a eficiência, segurança e desempenho. Neste contexto, serão comparados quatro tipos de baterias:

- As baterias de íons de lítio, uma tecnologia já muito bem estabelecida, tanto a nível de EVs (veículos elétricos), como em BESS, mais especificamente as baterias $LiFePO_4$ e NMC , que são amplamente atualizadas e aplicadas no setor devido à sua confiabilidade e eficiência.
- As baterias de níquel-hidrogénio, muito aplicadas no setor aeroespacial no século XX devido à sua alta durabilidade, têm mostrado, em estudos recentes, potencial para redução de custos, tornando-as viáveis para aplicações de maior escala.
- As baterias de íons de sódio, uma tecnologia emergente, com muitas semelhanças às baterias de íons de lítio, no entanto com um enorme potencial económico.

Esta comparação permitirá compreender os pontos fortes e limitações de cada tipo de bateria, facilitando a seleção da solução mais adequada.

2.3.1. Baterias de íons de lítio (*LIBs*)

As baterias de íons de lítio (*LIBs*) afirmaram-se como a tecnologia de referência a nível global na última década, tendo sido comercializadas pela primeira vez em 1991. Desde então têm registado um crescimento significativo no mercado de armazenamento de energia, sendo atualmente a tecnologia mais utilizada para os veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia em baterias ligadas à rede elétrica. Esse sucesso deve-se à sua alta densidade energética, tamanho compacto, menor peso, longa vida útil e elevada fiabilidade. Quando comparada com outras baterias, uma bateria de íons lítio oferece uma densidade de armazenamento cerca de dez vezes superior a uma bateria de chumbo-ácido [16][17].

Embora o custo inicial seja superior a outros tipos de baterias, esse valor tem vindo a diminuir devido ao avanço da tecnologia para veículos elétricos, beneficiando também outro tipo de aplicações. Numa bateria, o número de células, o tamanho de cada célula e a forma como estão dispostas determinam a tensão fornecida pela bateria e a sua capacidade, ou seja, a quantidade de energia que é capaz de armazenar, podendo ser carregadas com potências elevadas, e suportando uma grande amplitude de temperaturas de funcionamento [17][18][19].

As baterias de íons de lítio são constituídas por um cátodo de lítio, um ânodo de carbono poroso e um eletrólito composto por sais de lítio num solvente orgânico, isto é, uma solução não aquosa. As baterias são leves e têm um tempo de vida útil elevado, comparativamente com as tradicionais baterias de chumbo-ácido. Atualmente apresentam uma elevada densidade de energia (200-300 Wh/kg) e uma longa vida útil, podendo atingir até 10.000 ciclos, dependendo dos materiais utilizados no desenvolvimento da bateria e da forma como estas são utilizadas. A eficiência pode atingir entre 90% e 95%, embora algumas baterias comerciais de íons de lítio apresentem uma eficiência de ciclo completo superior a 95% [20][21].

Embora as baterias de íons de lítio apresentem vantagens óbvias, o desempenho a baixas temperaturas continua a ser um problema que tem merecido uma maior atenção. Em ambientes de baixa temperatura, o desempenho de carga e descarga das baterias de íons de lítio diminui significativamente. As empresas fabricantes de baterias de íons de lítio e os investigadores têm realizado inúmeros estudos para melhorar o desempenho de carga e descarga destas baterias [20].

Por fim, diferentes combinações químicas nos elétrodos influenciam o desempenho das baterias *LIBs*, sendo os tipos de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO_4) e Níquel-Manganês-Cobalto (*NMC*) das mais relevantes [17][21][22].

2.3.1.1. Baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO_4)

As baterias LiFePO_4 destacaram-se entre as baterias de íons de lítio recarregáveis desde a sua descoberta por Goodenough em 1997. Esta tecnologia é ideal para aplicações em sistemas de armazenamento de energia, por possuir elevada segurança, durabilidade e estabilidade química/térmica. Apresentam uma densidade de energia teórica inferior a 200 Wh/kg e podem efetuar entre 2000 e 10000 ciclos de carga/descarga completa sem que a perda da capacidade de armazenamento seja superior a 20% da capacidade inicial. Estas baterias utilizam um cátodo de fosfato de ferro de lítio, um ânodo geralmente composto por carbono (grafite), o eletrólito é normalmente uma mistura de solventes orgânicos e sais de lítio, com boa condutividade iónica e estabilidade térmica e por fim o separador é geralmente composto por um ou dois materiais, como polietileno e polipropileno [23][24][25]. Esta estrutura está retratada na figura 4.

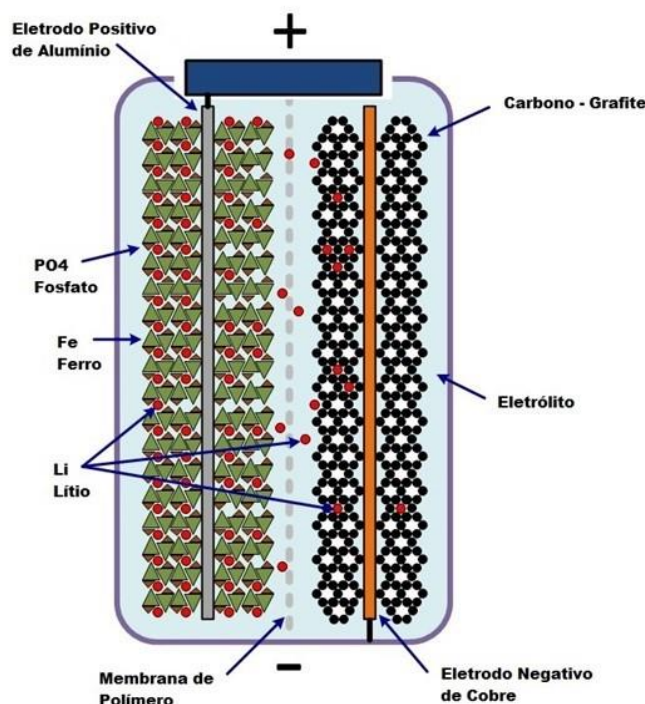


Figura 4 - Diagrama esquemático de uma bateria LiFePO_4 [26]

As baterias de LiFePO_4 devido a serem constituídas por uma estrutura do tipo olivina, possuem uma alta segurança, sendo que o cátodo da bateria possui excelentes propriedades químicas e resistência a altas temperaturas, apresentam uma degradação mínima, mesmo em taxas de carregamento aceleradas, garantindo uma saída de energia consistente ao longo de um período prolongado. O facto de conseguirem suportar taxas de carregamento mais elevadas sem uma degradação substancial da capacidade, torna as baterias LiFePO_4 uma opção ideal para aplicações que exigem um alto desempenho. As células LiFePO_4 possuem uma tensão nominal de 3,2V, sendo esta inferior a outras LIBs (como as NMC que apresentam $\approx 3,7\text{V}$) [25][27][28].

Uma das principais vantagens destas baterias é o seu menor impacto ambiental durante a fase de operação, uma vez que não produzem emissões nem substâncias nocivas. Estas baterias oferecerem alta segurança devido a possuir uma estrutura do tipo olivina, o cátodo da bateria apresenta excelentes propriedades químicas e resistência a altas temperaturas e mesmo após 5000 ciclos de uso conseguem manter cerca de 84% da sua capacidade original. Além disso, como os materiais primários da bateria são abundantes na natureza e não estão limitadas a alguns territórios, é possível apresentar um custo menor comparado com outros tipos, o que facilita a produção e aplicação em larga escala [25].

Alguns desafios que este tipo de baterias enfrenta é o seu desempenho em baixas temperaturas, a sua capacidade de descarga é bastante menor, como se pode ver na figura 5, em temperaturas de -20°C , a capacidade da bateria desce para valores rondando os 60 - 65% comparativamente com o seu valor de funcionamento a 45°C .

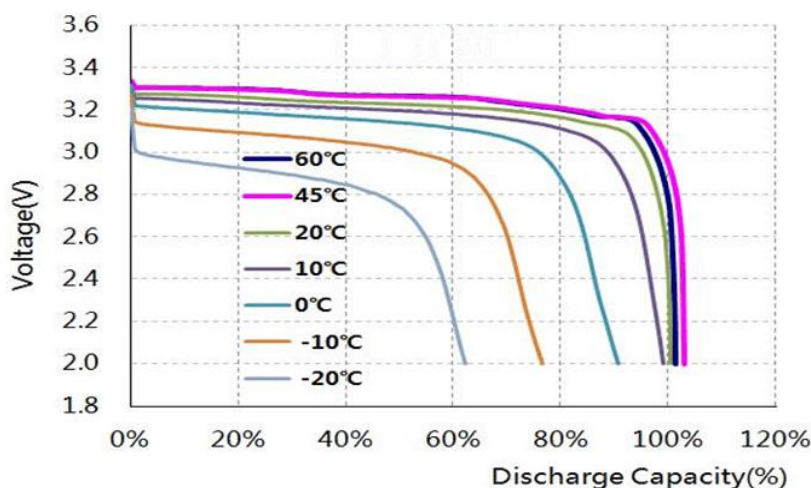


Figura 5 - Curva de descarga para diferentes temperaturas (Adaptado de [29])

A profundidade de descarga (DoD) é algo muito importante a ter em consideração, na figura 6, consegue-se visualizar a curva de vida útil em função do número de ciclos de carga e descarga, para diferentes DoD, a uma taxa de descarga de 1C e temperatura de 25°C .

É possível observar que quanto maior a profundidade de descarga em cada ciclo, menor é a vida útil da bateria. Quando descarregada completamente, (100% DoD), a bateria perde capacidade rapidamente, atingindo 80% da sua capacidade inicial em menos de 2000 ciclos. Já com uma descarga parcial de 80% DoD, a bateria duplica o número de ciclos de funcionamento, demonstrando assim que reduzir a profundidade de descarga prolonga significativamente a longevidade da bateria.

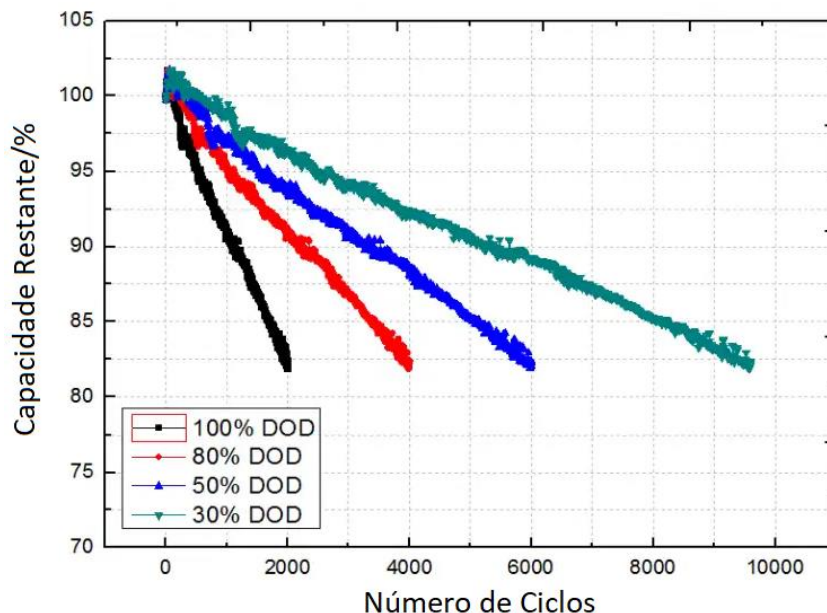


Figura 6 - Curva de vida útil de ciclos de descarga para diferentes DoD, em 1C e a 25°C (Adaptado de [30])

Na prática, para aplicações que exigem maior durabilidade, como sistemas de armazenamento de energia, é recomendável evitar descargas profundas. Assim, deve-se ter em consideração a utilização de DoD que não deve ultrapassar os 80 % de modo a garantir um desempenho mais estável e uma vida útil mais longa.

Os pontos positivos das baterias $LiFePO_4$ são:

- Durabilidade;
- Segurança, em comparação com outras baterias de LIBs;
- Preço;
- Bom desempenho em altas temperaturas;
- Menor impacto ambiental.

Os pontos negativos das baterias $LiFePO_4$ são:

- Baixo desempenho em baixas temperaturas;
- Menor densidade de energia, sendo que não é muito importante em BESS, mas é um inconveniente em EVs.

2.3.1.2. Baterias de níquel manganês-cobalto (NMC)

As baterias de níquel manganês-cobalto (NMC), são baterias ternárias de lítio e utilizam uma combinação de níquel manganês-cobalto no cátodo. O material do cátodo de uma bateria de lítio ternária NMC possui uma estrutura em camadas, onde os átomos de níquel, manganês, cobalto e oxigênio formam um octaedro. Os íons de lítio estão localizados entre as camadas octaédricas e podem ser inseridos e extraídos de forma reversível entre as camadas. A presença de níquel ajuda a aumentar a capacidade da bateria e o cobalto contribui para manter a estabilidade da camada e melhora a condutividade eletrônica. O manganês pode reduzir os custos e melhorar a estabilidade estrutural e a segurança. Os eletrólitos são geralmente encontrados na forma de géis poliméricos, compostos por uma mistura de polímeros, solventes orgânicos e sais de lítio, sendo que estes combinam as vantagens dos eletrólitos sólidos e líquidos, oferecendo boa condutividade iônica e alguma estabilidade térmica. O separador é frequentemente fabricado a partir de materiais como polipropileno ou membranas de vinil. Assim, as proporções de manganês, cobalto e níquel no cátodo destas baterias podem ser ajustadas de acordo com diferentes requisitos e condições de utilização [18][25][31]. Esta estrutura está representada na figura 7.

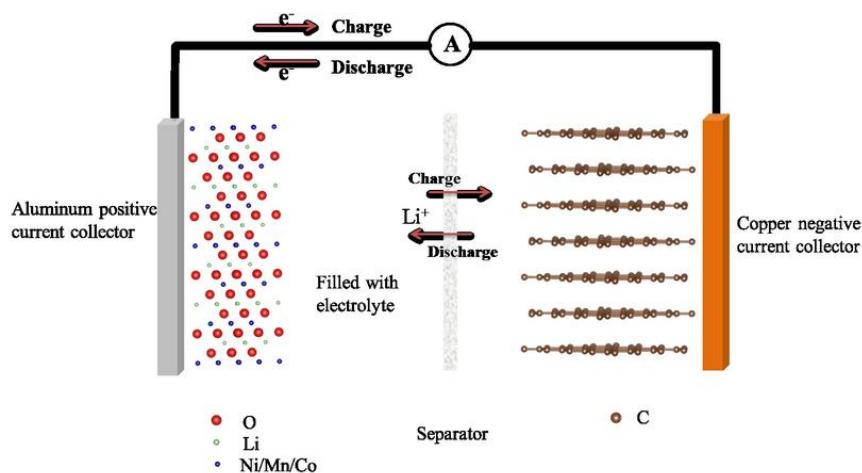


Figura 7 - Diagrama esquemático de uma bateria NMC (Adaptado de [32])

Atualmente, a densidade energética das atuais baterias NMC é por volta de 260 Wh/kg, no entanto com o avanço da pesquisa e o amadurecimento da tecnologia, as previsões é chegar a 300 Wh/kg no futuro próximo. Na figura 8, consegue-se observar que as baterias NMC apresentam bom desempenho, mesmo a baixas temperaturas. Por exemplo a -20°C a bateria possui 85% da capacidade comparativamente com o seu valor funcionamento de 25°C. No entanto, o cátodo não é resistente a muito altas temperaturas, pois quando exposto a temperaturas entre 250 °C e 300 °C, pode ocorrer decomposição interna, o que compromete a estabilidade térmica, tornando-a inviável.

Em caso de impacto por força externa, o separador entre o cátodo e o ânodo da bateria de lítio ternária pode ser facilmente danificado, resultando em um curto-circuito.

Uma bateria de lítio *NMC* em curto-circuito sofrerá fuga térmica e aquecerá rapidamente podendo ocorrer ignição espontânea [18][25][31][33].

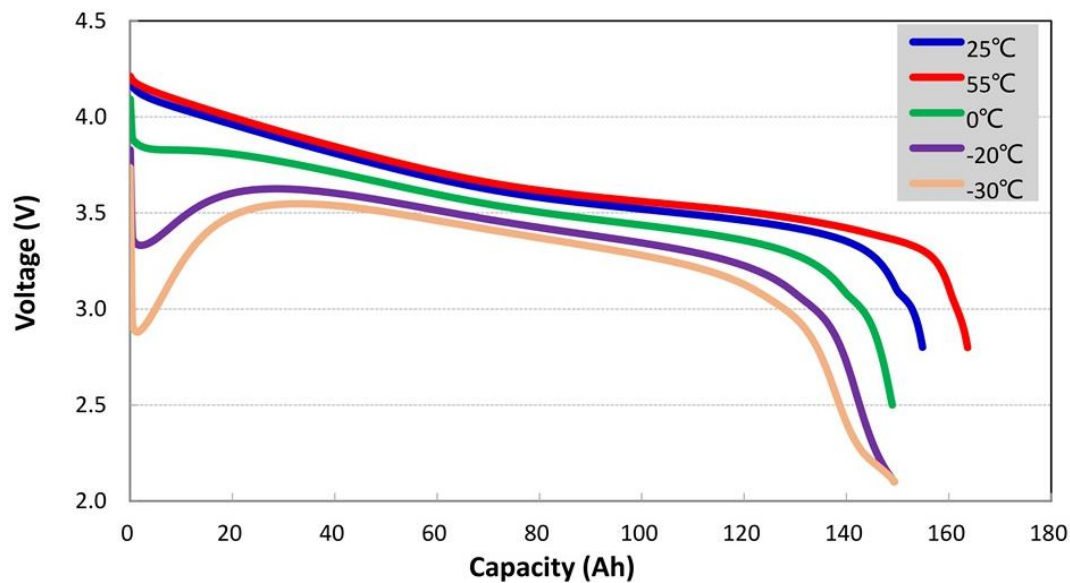


Figura 8 - Curvas de descarga de uma bateria de 160Ah para diferentes temperaturas (Adaptado de [34])

Os pontos positivos das baterias *NMC* são:

- Elevada densidade energética;
- Bom desenho em baixas temperaturas;
- Tensão nominal mais elevada;
- Menor impacto ambiental.

Os pontos negativos das baterias *NMC* são:

- Maior risco térmico;
- Vida útil inferior comparativamente com $LiFePO_4$;
- Custo mais elevado.

2.3.2. Comparação entre Baterias de lítio *NMC* e $LiFePO_4$

Ambas as tecnologias, possuem vantagens e desvantagens, existindo diferenças significativas entre estas. A bateria *NMC* possui maior densidade energética (260 Wh/kg) e maior eficiência de carga e descarga. No entanto, após cerca de 4000 ciclos, a sua capacidade é reduzida para valores entre 60% e 70%, não é resistente a altas temperaturas e é propensa a fuga térmica quando a bateria é danificada. A bateria $LiFePO_4$ tem um custo mais baixo, um cátodo mais estável e uma vida útil em ciclos mais longa, conseguindo possuir uma capacidade de 84% após 5000 ciclos. No entanto,

também tem uma densidade energética mais baixa ($<200 \text{ Wh/kg}$), menor eficiência de carga e descarga e um desempenho inferior em condições de baixa temperatura. Ambas as baterias são ambientalmente amigáveis pois nenhuma das baterias produz substâncias tóxicas [25][31]. Na figura 9 é ilustrada a comparação das características destas baterias.

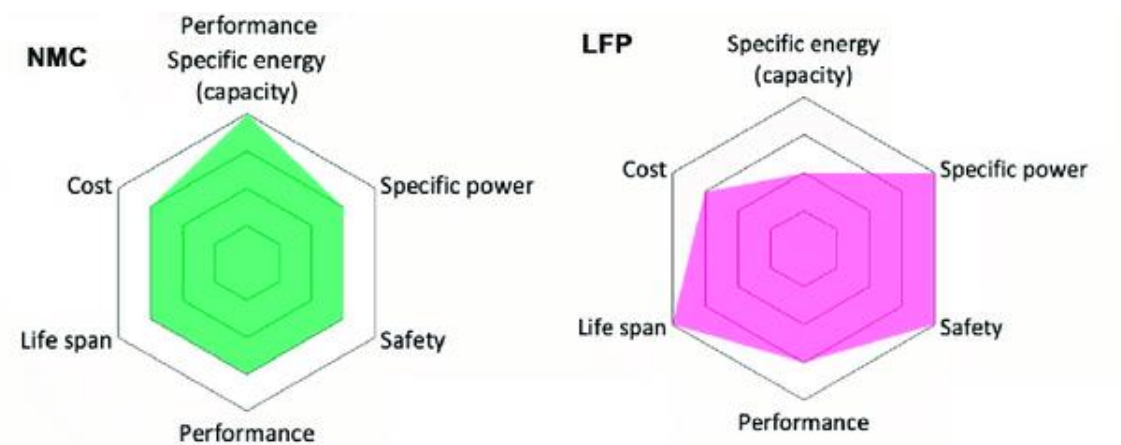


Figura 9 - Comparação entre baterias de lítio NMC e LiFePO_4 [35]

Para um sistema de armazenamento de energia, existem certas prioridades, sendo estas o custo das baterias, a segurança e a durabilidade, prioridades estas que a bateria LiFePO_4 realça comparativamente com as baterias NMC, que possui um custo superior, devido aos componentes que a constituem, uma segurança inferior e uma durabilidade bastante inferior às baterias LiFePO_4 . Por outro lado, a menor densidade de energia das baterias LiFePO_4 . Não é uma desvantagem em aplicações fixas, onde exista um maior espaço disponível.

2.3.3. Baterias de iões de sódio (SIBs)

As baterias de iões de lítio (LIBs) despertaram grande interesse devido à sua elevada densidade de energia e longa vida útil, no entanto a disponibilidade limitada e a distribuição desigual dos recursos de lítio dificultam a aplicação em larga escala, e uma constante produção. Por isso, é essencial desenvolver baterias alternativas para substituir as LIBs no futuro. Devido a existirem grandes reservas de sódio (Na) na crosta terrestre e às propriedades físico-químicas semelhantes entre o sódio e o lítio, o armazenamento de energia eletroquímica utilizando o sódio apresenta um grande potencial para o armazenamento de energia em grande escala e para o desenvolvimento de redes elétricas [12][36].

Os componentes da célula e os mecanismos de reação eletroquímica das SIBs são essencialmente idênticos aos das LIBs, exceto o portador de carga, que é o Na^+ nas baterias de iões de sódio e o Li^+ nas baterias de iões de lítio. A principal razão para

a rápida expansão da química dos materiais das *SIBs* deve-se às semelhanças nas propriedades físico-químicas entre os dois metais alcalinos.

Uma bateria de íons de sódio típica, é composta por quatro componentes principais: um cátodo (geralmente um composto que contém sódio), um ânodo, um eletrólito (em estado líquido ou sólido) e um separador. Durante o processo de carregamento, os íons de sódio são extraídos dos cátodos, e transferidos para os ânodos, enquanto a corrente elétrica percorre um circuito externo na direção oposta. Durante a descarga, os íons Na^+ saem dos ânodos e retornam aos cátodos [12] [36].

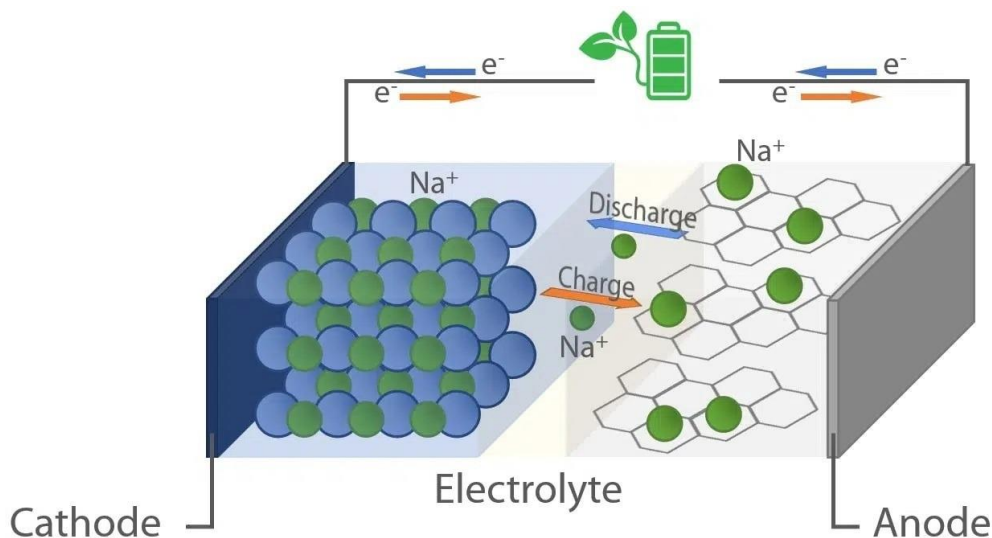


Figura 10 - Diagrama esquemático de uma SIB [37]

As baterias de íons de sódio (*SIBs*) podem alcançar densidades energéticas comparáveis às de íons de lítio (*LIBs*), contrariando a ideia de que seriam inferiores. A densidade energética das *SIBs* depende dos materiais dos elétrodos e da tensão da célula, não apenas da massa atômica do sódio. Embora as *SIBs* geralmente apresentem tensões mais baixas devido à escolha dos cátodos utilizados, a adoção de novos materiais, como os condutor super iônico de sódio (NaSICON), já demonstrou tensões superiores a 4,0 V, evidenciando o potencial para a fabricação de baterias com tensões mais elevadas. Além disso, o uso de folha de alumínio leve como coletor de corrente ajuda a aumentar a densidade energética, tornando-as uma alternativa promissora às *LIBs* [12].

Uma das grandes diferenças entre as baterias de íons de sódio e as baterias LiFePO_4 , é a variação da tensão durante a carga e a descarga, como se pode ver na figura 11. Nas baterias LiFePO_4 a tensão mantém-se praticamente constante ao longo do seu SoC, apenas diminuindo rapidamente em valores perto de 10%, nas SIBs a tensão varia linearmente com o seu SoC, possuindo o seu valor de tensão máxima em 100% SoC.

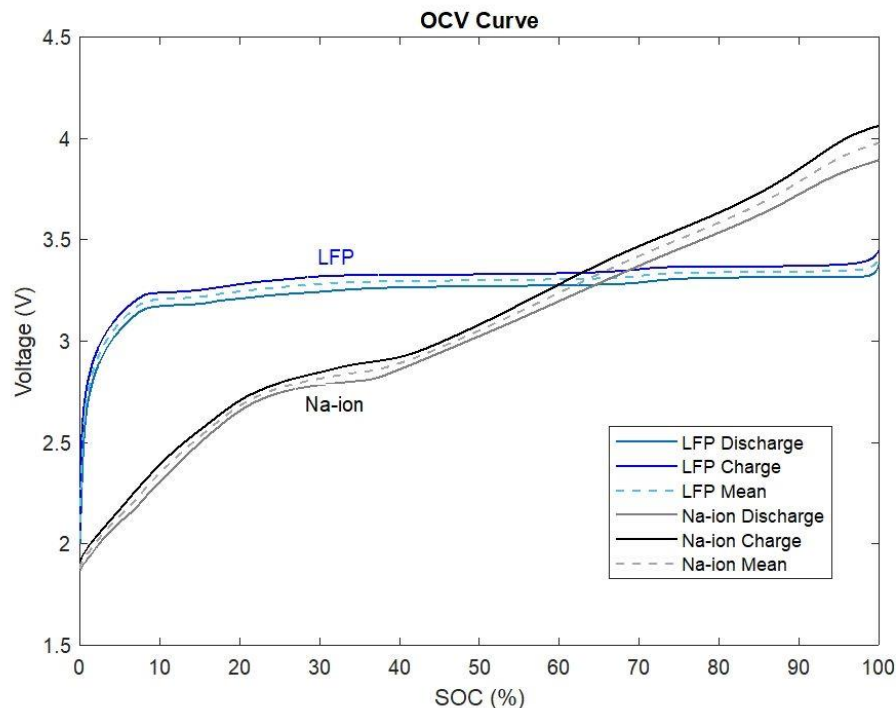


Figura 11 - Comparação da tensão em circuito aberto (OCV) em função do SoC (%) entre bateria Na-Ion e LiFePO_4 [38]

Os pontos positivos das SIBs são:

- Variação da tensão em função do estado de carga, do ponto de vista de monitorização do SoC;
- Materiais abundantes, o que causa menor custo dos materiais;
- Menor impacto ambiental;
- Evolução rápida devido a semelhança com baterias LIB;
- Melhor comportamento em temperaturas negativas.

Os pontos negativos das SIBs são:

- Densidade de energia inferior;
- Capacidades de carregamento rápido limitado;
- Tecnologia ainda em fase inicial de desenvolvimento.

2.3.4. Baterias de níquel-hidrogénio (Ni-H₂).

Desde meados da década de 1970, a maioria das aeronaves lançadas para operações em órbitas geoestacionárias (GEO) e terrestres baixas (LEO) tem recorrido a sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias de gás níquel-hidrogénio (Ni-H₂). Destacam-se pela elevada densidade de energia e pela capacidade de funcionar sob condições extremas, o que as torna ideais para aplicações espaciais [39].

A estrutura robusta do cátodo de níquel e do ânodo de hidrogénio, em conjunto com a rapidez das reações de evolução e oxidação do hidrogénio (HER/HOR), permite que as baterias aquosas de níquel-hidrogénio satisfaçam os requisitos exigentes do armazenamento de energia no setor aeroespacial. Contudo, apesar das suas vantagens, estas baterias mantiveram-se limitadas ao uso espacial devido ao seu custo extremamente elevado [39].

Em [40], sugeriu-se que, caso o custo das baterias de níquel-hidrogénio fosse reduzido, estas poderiam revelar-se uma solução altamente promissora para o armazenamento de energia em larga escala na rede elétrica, devido às baterias de níquel-hidrogénio serem capazes de atingir pelo menos 30.000 ciclos ao longo da sua vida útil. Para alcançar esse objetivo, a otimização dos catalisadores desempenha um papel essencial e a melhoria da atividade intrínseca de cada sítio ativo, bem como o aumento do seu número, pode permitir uma redução significativa do custo das baterias de níquel-hidrogénio [39][40][41].

Já em [39], foi lançada uma solução para estas baterias com a composição de um cátodo de Ni(OH)₂, envolvido em reações de conversão Ni(OH)₂/NiOOH, e um ânodo de hidrogénio, onde ocorrem as reações catalíticas HER/HOR em eletrólitos fortemente alcalinos. Nesse artigo mostram também a utilização de vários catalisadores de forma a evoluir estas baterias e esta tecnologia [39].

Na última década, vários grupos de investigação e *start-ups*, como é o caso da EnerVenue, Inc., na Califórnia, têm vindo a dedicar-se significativamente ao desenvolvimento de baterias de níquel-hidrogénio para o armazenamento de energia em larga escala na rede elétrica. Estes esforços têm permitido progressos notáveis na compreensão da química destas baterias e na otimização dos processos de fabrico das células de níquel-hidrogénio. Assim, esta tecnologia apresenta um forte potencial para ser adaptada a aplicações na gestão energética da rede elétrica, beneficiando do desenvolvimento de eletrocatalisadores de hidrogénio mais acessíveis, eficientes e duradouros [39].

Em 2022, a empresa EnerVenue lançou para o mercado as baterias de Níquel-Hidrogénio, com base na tecnologia utilizada em missões espaciais, com uma capacidade de 1.2kWh, que poderia se conectar em série ou paralelo para obter a capacidade e as tensões desejadas. Em 2023, lançaram a bateria ESV-4.0, com a capacidade de 3kWh, figura 12.



Figura 12 - Bateria ESV-4.0. [42]

Com as características expostas na figura 13, a bateria ESV-4.0 é uma das baterias de Níquel-Hidrogénio mais avançada para comercialização e utilização em sistemas de armazenamento de energia em baterias, atualmente. Com vários sistemas já instalados em alguns Estados dos EUA e em rápida expansão, já conta com mais de 1,5GWh de capacidade de armazenamento em 2024 [42].

Model: Energy Storage Vessel ESV-4.0 PRELIMINARY

TYPE	DESCRIPTION	SPECIFICATION
Mechanical	Dimensions (Diameter x Length)	168mm x 1800mm
	Format	Tubular
	Type	Large Format Battery
	Weight	62 Kg / 136 lbs
	Operating Temperature	-10C to 45C
	Storage Temperature	-15 to 60 C
	Cooling Type (Pending)	Convection, Forced Air
Electrical	Nominal Amp-hour Charge/Discharge	137 Ah
	Nominal Energy Capacity	3.0 kWh @ 25 °C
	Voltage Range	23-30 Vdc across full range of SOC (0-100%) @ 25 °C
	Nominal Power	1500 W
	C-Rates	C/2 - C/12
	Peak RTE	>90% @ 25 °C
	Expected Capacity Retention	86% after 30,000 cycles
	Chemistry	Ni-H ₂
	Modes	Constant Current, Constant Power
	BMS	EnerVenue BMS 1000 V / 1500 V
Performance	Warranty	3-years standard, extendable to 20 years
Regulatory	Certifications Pending	UL1973* and applicable CE standards
	Tests Pending	UL 9540A
	Product Name	ESV-4

*UL 1973, Annex E

Figura 13 - Especificações das células ESV 4.0 da empresa EnerVenue [42]

Os pontos positivos das baterias Ni-H₂ são:

- Durabilidade;
- Elevada densidade energética;
- Grande resistência a temperaturas extremas;
- Alta eficiência de carga e descarga, cerca de 90% a 25°C;
- Potencial de crescimento.

Os pontos negativos das baterias Ni-H₂ são:

- Custo elevado de fabrico e manutenção;
- Devido ao tamanho, difícil aplicação em espaços limitados;
- Tecnologia ainda em fase inicial a nível de comercialização.

Com base na análise comparativa entre os vários tipos de baterias, *LiFePO₄*, *NMC*, *Ni-H₂* e *SIB*, no momento atual, a tecnologia adotada para a testagem deste presente projeto, em um BESS foi a *LiFePO₄*, por apresentar o melhor compromisso entre densidade energética, durabilidade, segurança, estabilidade térmica, facilidade de aquisição e por ser uma tecnologia bastante bem estabelecida, com ampla base de fornecedores e documentação técnica.

Além disso, a integração de um BMS contribui significativamente para otimizar o desempenho e a vida útil das baterias, pois, este monitoriza continuamente parâmetros críticos, garantido que o sistema opera dentro dos limites seguros.

No entanto, considerando a rápida evolução no desenvolvimento da tecnologia das baterias eletroquímicas, é plausível que, num futuro próximo, surjam alternativas mais competitivas, o que poderá alterar a escolha da tecnologia mais adequada para aplicações semelhantes.

2.4. Sistemas de Gestão e Monitorização de Energia

Com o crescimento das energias renováveis e a crescente utilização de sistemas de armazenamento em baterias, torna-se essencial garantir não só a eficiência energética, mas também a segurança e durabilidade dos equipamentos. Neste contexto, surgem os sistemas de gestão e monitorização de energia, cuja função é monitorizar, controlar e melhorar o desempenho energético.

Estes sistemas são compostos por equipamentos que recolhem dados em tempo real, analisam parâmetros operacionais e executam ações. Ao fazê-lo, tornam possível a gestão inteligente do fluxo de energia entre diferentes componentes, como painéis fotovoltaicos, inversores, baterias, cargas e a rede elétrica.

Dois dos elementos mais relevantes neste âmbito são o BMS, que atua ao nível da segurança e controlo das baterias, e o EMS, que assegura uma operação energética

otimizada. A integração destes dois sistemas é fundamental para eficiência do desempenho global das instalações com armazenamento energético.

2.4.1. BMS - *Battery Management System*

O BMS é um elemento fundamental nos sistemas de armazenamento de energia em baterias, e tem como principais objetivos garantir o funcionamento seguro do conjunto de células e maximizar a sua vida útil [43].

Este sistema integra sensores, atuadores e controladores que permitem monitorizar e controlar, em tempo real, os principais parâmetros de funcionamento da bateria, como a tensão, corrente, temperatura, estado de carga (SoC) e estado de saúde (SoH). A partir da análise desses dados, o BMS assegura o equilíbrio entre as diferentes células do conjunto, evitando situações de sobrecarga, descarga excessiva ou desequilíbrios que poderiam comprometer a integridade, o desempenho ou a segurança do sistema [44].

A diferença de tensão ou capacidade entre células pode reduzir a capacidade de armazenamento útil e acelerar a degradação do sistema, sendo, por isso, essencial a funcionalidade de balanceamento de células. Adicionalmente, o BMS desempenha um papel fundamental a manter a temperatura das baterias dentro de limites operacionais seguros, geralmente entre 15 °C e 35 °C. Mas em situações extremas, como temperaturas superiores a 100 °C, especialmente em baterias de iões de lítio, podem ocorrer falhas graves e para evitar tais eventos, o BMS pode recorrer a diferentes métodos de refrigeração, como circulação de ar ou refrigeração líquida [43] [44].

Outra função importante do BMS é a estimativa precisa do SoC e do SoH, parâmetros que não podem ser medidos diretamente, exigindo algoritmos avançados para garantir fiabilidade na supervisão e controlo do sistema. O estado de carga (SoC) costuma ser determinado por técnicas como a contagem de coulombs, enquanto o estado de saúde (SoH) está relacionado à degradação gradual da capacidade da bateria, influenciada por fatores como envelhecimento cíclico e envelhecimento pelo tempo de uso [44].

2.4.2. EMS - *Energy Management System*

O EMS é responsável por coordenar e otimizar o fluxo energético entre os diferentes elementos de um sistema de armazenamento de energia, como baterias, fontes renováveis, cargas e a rede elétrica [45].

O EMS toma decisões estratégicas sobre quando carregar ou descarregar as baterias, quando consumir energia da rede, ou quando injetar energia excedente. Estas decisões têm como base múltiplos critérios, como o perfil de consumo, a produção prevista de energia (por exemplo, solar ou eólica), os preços da eletricidade, o estado de carga da bateria e as condições operacionais da rede, e o seu principal objetivo é maximizar a eficiência energética e a rentabilidade do sistema, assegurando ao mesmo tempo a estabilidade do fornecimento de energia [45], nunca comprometendo a segurança do mesmo.

Em instalações ligadas à rede, o EMS pode implementar estratégias como o *load shifting* (deslocação do consumo para períodos de menor custo) e *peak shaving* (redução dos picos de consumo) contribuindo para a redução da fatura energética e para o alívio do sistema elétrico em períodos críticos. Além disso, o EMS pode atuar em conjunto com o BMS, fornecendo-lhe instruções de operação, sempre com base em dados em tempo real recolhidos por sensores e medidores inteligentes. Esta integração entre os dois sistemas permite que o EMS mantenha um equilíbrio entre a energia armazenada, a energia consumida e a energia gerada, promovendo uma gestão inteligente dos recursos energéticos disponíveis [45].

Além disso, o EMS pode identificar áreas de alto consumo e desenvolver planos de economia de energia específicos para essas ocasiões. A arquitetura do EMS é um sistema altamente coordenado e integrado, permitindo a monitorização de energia em tempo real, analisando os dados e atuando de forma a realizar uma otimização inteligente do sistema [46].

2.5. Comunicação e Integração em Sistemas de Energia

Após a análise das tecnologias das baterias, é necessário entender como estas se integram nos BESS. Começando por um dos principais componentes, o inversor híbrido, e como pode ser feita a comunicação entre componentes, através do protocolo Modbus.

2.5.1. Papel do Inversor Híbrido

Um sistema híbrido combina as vantagens dos sistemas conectados à rede e dos sistemas autónomos, pois está ligado à rede elétrica e inclui armazenamento de energia. Esse tipo de sistema utiliza um inversor híbrido, que integra a energia gerada por fontes renováveis, como painéis solares fotovoltaicos, ou outros meios, com a energia proveniente da rede [47].

Os inversores híbridos são especialmente vantajosos para aplicações de autoconsumo, permitindo que o utilizador aproveite a energia gerada para cobrir as suas próprias necessidades, reduzindo ou até eliminando a dependência da rede elétrica. Nestes sistemas se a energia gerada disponível for insuficiente para cobrir o consumo, o inversor híbrido permite que se vá buscar energia à rede elétrica. Mas caso houver um excedente da produção, esse excesso pode ser armazenado em baterias e/ou injetado de volta na rede elétrica [47].

Um exemplo de um inversor híbrido é o Hybrid inverter Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4, sendo um inversor híbrido trifásico de 50 kW, projetado para sistemas fotovoltaicos de grande escala. Este inversor destaca-se pela sua alta eficiência energética, segurança e facilidade de monitoramento remoto. Possui 4 MPPTs (*Maximum Power Point Tracking*), conectividade Wi-Fi para acompanhar o desempenho em tempo real, capacidade de gestão de cargas críticas, que permite alimentar circuitos prioritários, entre outras funções.

Seguindo o exemplo anterior dos quatro MPPTs, cada MPPT atua de forma independente e permite, neste caso, ligar quatro *strings* de painéis fotovoltaicos diferentes. O principal objetivo do MPPT é ajustar continuamente o ponto de operação elétrica do sistema fotovoltaico, de forma a maximizar a potência extraída dos painéis fotovoltaicos, independentemente das condições ambientais ou de funcionamento [48].

A gestão de cargas críticas ou prioritárias significa que, em caso de *blackout* da rede elétrica, o fluxo de energia será direcionado apenas para as cargas prioritárias. Esta função pode variar entre diferentes inversores, no entanto para este exemplo, as cargas prioritárias vão ser conectadas ao *Output Load*, estas são referidas no *datasheet* como *Backup Load*. Estas cargas diferenciam-se das cargas não prioritárias ou *Home Load*, pois em caso da desconexão do inversor com a rede elétrica, a energia dos painéis fotovoltaicos ou das baterias, será direcionada exclusivamente para a *Backup Load*, não alimentando a *Home Load*. De forma a garantir esta funcionalidade, as cargas prioritárias necessitam de estar ligadas a um circuito elétrico isolado das cargas não prioritárias [49].



Figura 14 - Inversor híbrido, Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 [50]

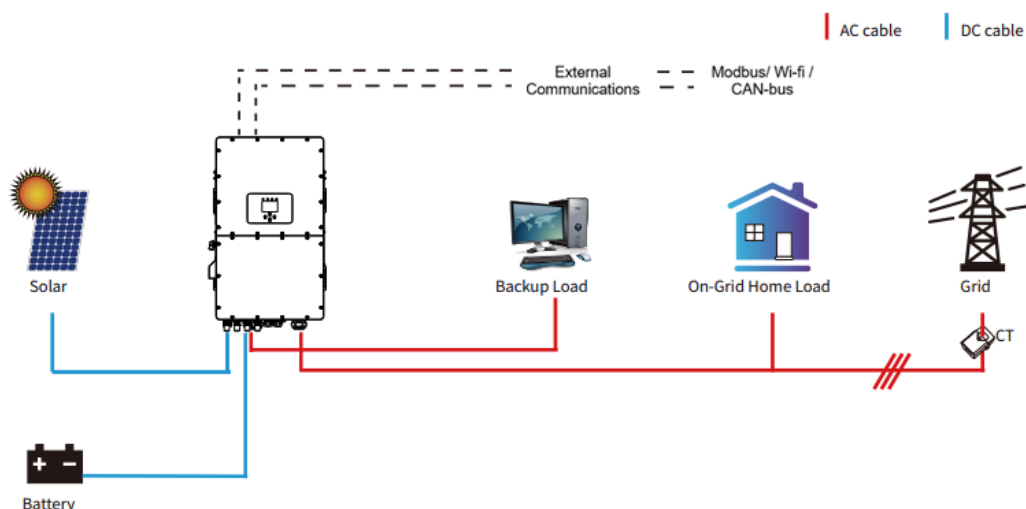


Figura 15 - Diagrama ilustrativo simplificado do funcionamento de um inversor híbrido adaptado de [49]

De forma a ajudar a compreensão destes sistemas, o diagrama apresentado na figura 15, mostra o funcionamento geral do inversor híbrido mencionado no exemplo anterior, bem como alguns dos diferentes protocolos de comunicação disponíveis. Entre estes, destaca-se o protocolo de comunicação Modbus, pela sua simplicidade e ampla utilização em ambientes industriais e energéticos.

2.5.2. Protocolo de comunicação Modbus

O protocolo Modbus foi desenvolvido em 1979, pela empresa *Modicon Inc*, atualmente pertence ao grupo francês *Schneider Electric*. Este protocolo aberto é um dos mais antigos e amplamente utilizado no ambiente industrial, sendo reconhecido pela sua simplicidade e fiabilidade na troca de informações entre dispositivos [51].

O Modbus utiliza uma arquitetura de comunicação mestre-escravo, em que apenas um dispositivo (mestre) pode iniciar transações denominado de "*queries*". Os outros dispositivos (escravos), respondem fornecendo os dados solicitados ao mestre ou realizando a ação solicitada na consulta [52].

O pacote de dados utilizado no Modbus pode ser dividido em duas partes, PDU (*Protocol Data Unit*) e ADU (*Application Data Unit*):

- O PDU é sempre igual independentemente da camada de aplicação. Contém a função a executar, no campo *Function Code*, e os dados utilizados para essa função, no campo *Data*.

- O ADU (*Application Data Unit*): varia consoante o modo de transmissão utilizado e é constituído pelo PDU, pelo endereço do dispositivo e pelo campo de verificação de erros.

Por exemplo, no esquema representado na figura 16, é possível observar, no Modbus RTU, o ADU é constituído pelo PDU, pelo campo *Slave ID* ou *Adress* e pelo campo CRC. Já no Modbus TCP, o ADU é formado pelo PDU e pelo MBAP Header (*Modbus Application Protocol Header*).

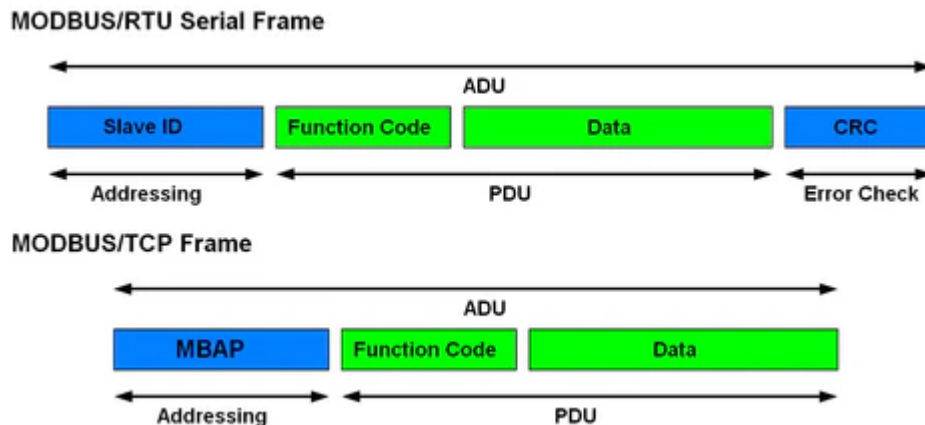


Figura 16 - Estrutura de dados ADU e PDU para Modbus RTU e TCP/IP [53].

2.5.2.1. Modbus RTU

O Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) é uma das variantes mais utilizadas do protocolo Modbus, especialmente em ambientes industriais. Tal como referido anteriormente, este protocolo utiliza uma arquitetura de comunicação mestre-escravo, onde o mestre inicia as comunicações e os escravos apenas respondem às mensagens que lhes são destinadas. As mensagens podem ser enviadas individualmente ou para todos os escravos em simultâneo (*broadcast*) [54].

Este modo funciona sobre meio físico série, como RS-232 ou RS-485, sendo este último o mais comum devido à sua robustez, alcance e capacidade de comunicação multiponto. O RS-485 permite ligar vários escravos ao mesmo barramento, sendo ideal para aplicações industriais com distâncias até 1200 metros.

As mensagens Modbus RTU seguem um formato específico, como se pode ver na figura 17.

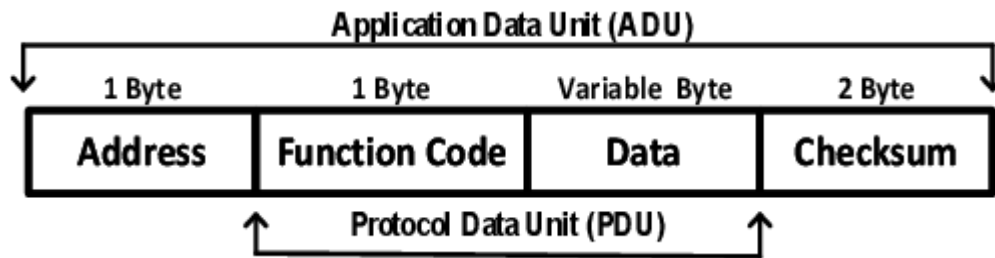


Figura 17 - Modelo de mensagem Modbus RTU [55]

➤ **Endereço do escravo (*Address*)**

É o endereço do escravo que vai receber a mensagem. Ele deve variar de '1' a '247', os números restantes (248-255) são reservados para outras aplicações. O endereço '0' é para comunicar com todos os escravos ao mesmo tempo (*broadcast*).

➤ **Código da função (*Function code*)**

É o código que define o objetivo da mensagem. Existem códigos de escrita e códigos de leitura:

▪ **Códigos de Função de Leitura**

- (0x01) - Leitura das saídas digitais (*Read Coil Status*);
- (0x02) - Leitura das entradas digitais (*Read Input Status*);
- (0x03) - Leitura dos registos de saída analógica (*Read Holding Registers*);
- (0x04) - Leitura dos registos de entrada analógica (*Read Input Registers*).

▪ **Códigos de Função de Escrita**

- (0x05) - Escrita de uma única saída digital (*Force Single Coil*);
- (0x06) - Escrita de um único registo de saída analógica (*Preset Single Register*);
- (0x0F) - Escrita de várias saídas digitais (*Force Multiple Coils*);
- (0x10) - Escrita de vários registos de saída analógica (*Preset Multiple Registers*).

➤ **Dados (Data)**

O formato depende do código da função. Mas é neste campo onde os dados específicos da função são enviados. A quantidade de bytes não é fixa e varia consoante a mensagem.

➤ **Verificação Cíclica de Redundância (CRC)**

O CRC, é um método de deteção de erros usado em transmissões de dados. No Modbus RTU, ele garante que a mensagem enviada não foi corrompida durante a transmissão.

2.5.2.2. Modbus TCP/IP

O Modbus TCP/IP (*Transmission Control Protocol & Internet Protocol*) é outra variante do protocolo Modbus, sendo utilizado principalmente em redes locais (LAN) e em sistemas que requerem comunicação baseada em Ethernet. Ao contrário do Modbus RTU, que utiliza meios físicos seriais, o Modbus TCP/IP funciona sobre redes Ethernet e utiliza o protocolo TCP como meio de transporte [55].

Tal como no RTU, o Modbus TCP/IP segue uma arquitetura mestre-escravo, onde o mestre corresponde a um cliente e inicia as comunicações e o escravo é um servidor. A grande vantagem do Modbus TCP/IP reside na facilidade de integração em infraestruturas de redes modernas e na maior velocidade de comunicação [55].

As mensagens seguem um formato específico adaptado ao protocolo TCP/IP, conforme ilustrado na figura 18.

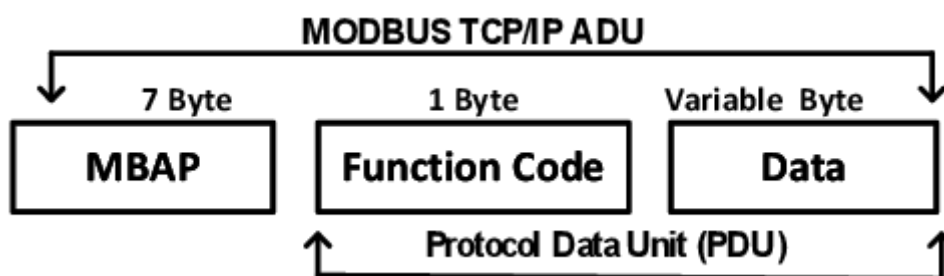


Figura 18 - Modelo de mensagem Modbus TCP/IP [55]

O cabeçalho MBAP possui 7 bytes e é composto por quatro campos:

➤ **Identificador da transação (Transaction Identifier) - 2 bytes**

Este campo funciona como um número de identificação único, é atribuído pelo cliente (mestre) em cada requisição enviada. O seu principal objetivo é permitir que o cliente associe de forma inequívoca a resposta recebida ao respetivo pedido. Esta funcionalidade é especialmente útil em sistemas que processam múltiplas requisições simultaneamente ou em paralelo.

➤ **Identificador do protocolo (*Protocol Identifier*) - 2 bytes**

Este campo serve para indicar o protocolo de comunicação utilizado. No caso do Modbus, o valor deste campo é sempre '0', o que permite distinguir mensagens Modbus de outros protocolos que possam partilhar a mesma infraestrutura de rede.

➤ **Comprimento (*Length*) - 2 bytes**

Indica o número de bytes restantes na mensagem a seguir a este campo, ou seja, inclui o *Unit Identifier*, o *Function Code* e os dados (*Data*). Não inclui o próprio cabeçalho MBAP. Este campo permite ao dispositivo recetor saber quantos bytes deve esperar para completar a receção da mensagem Modbus.

➤ **Identificador do dispositivo (*Unit Identifier*) - 1 byte**

Este campo identifica o dispositivo escravo Modbus a que a mensagem se destina. O *Unit Identifier* é muito importante em arquiteturas que envolvem *gateways* Modbus TCP/Serie, onde este campo é utilizado para identificar o dispositivo escravo num barramento serie (por exemplo, RS-485) ligado a esse *gateway*.

O PDU é semelhante em todos os protocolos Modbus e corresponde a dois campos:

➤ **Código da Função (*Function Code*) - 1 byte**

Define a ação a ser realizada (leitura, escrita, etc.). Utiliza os mesmos códigos definidos no Modbus RTU.

➤ **Dados (*Data*) - n bytes**

O formato depende do código da função. Mas é nessa parte onde os dados específicos da função são enviados. A quantidade de bytes não é fixa e varia consoante a mensagem.

Em suma, é essencial compreender os fundamentos do protocolo Modbus para o poder implementar nas comunicações industriais de forma correta. O conhecimento da estrutura das mensagens e das diferenças entre os modos Modbus RTU e Modbus TCP/IP permite configurar diferentes dispositivos, sendo que é indispensável ter este conhecimento para o desenvolvimento de sistemas de controlo e monitorização.

Capítulo 3

3. Metodologia e Desenvolvimento do Sistema

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para cumprir os objetivos e desenvolver o sistema, detalhando a integração de hardware e software, as ferramentas utilizadas e a arquitetura implementada para garantir a comunicação Modbus RTU, Modbus TCP/IP e MQTT. Inclui também o desenvolvimento do sistema, abordando a arquitetura, os componentes utilizados e a implementação da comunicação entre o microcontrolador ESP32-C3 e o inversor híbrido. Por fim, são descritos os esquemas de ligação, as etapas de configuração, a comutação automática entre protocolos e a integração com o MQTT, que possibilita a monitorização e o controlo remoto do sistema.

3.1. Integração de Hardware e Software

Neste projeto, com o objetivo de desenvolver um sistema de aquisição e manipulação de dados suportado pelos protocolos Modbus RTU e Modbus TCP/IP, foi necessário integrar componentes de hardware e software.

A nível de hardware, a solução adotada baseia-se num microcontrolador ESP32, responsável pela comunicação e processamento de dados. Para a comunicação física com dispositivos que utilizam o protocolo Modbus RTU, foi necessário a utilização de um módulo TTL-RS485, que converte os sinais seriais do ESP32 para o padrão RS485, mais adequado à comunicação em ambientes industriais. Para a comunicação via Modbus TCP/IP, foi utilizada uma ligação por Wi-fi, no entanto é possível ser por cabo de rede CAT 5/6 através de uma porta RJ45. O sistema é alimentado e programado através de um cabo USB-A / USB-C.

Do ponto de vista de software, recorreu-se ao Arduino IDE, onde foram utilizadas bibliotecas específicas para implementar a comunicação Modbus RTU e Modbus TCP/IP. O sistema atua como mestre Modbus, sendo capaz de ler registos (monitorização de dados) e escrever registos (controlo de dispositivos). A comunicação com os dispositivos é realizada de forma adaptativa: o sistema tenta inicialmente comunicar via Modbus TCP/IP e, em caso de falha, comuta automaticamente para Modbus RTU. Os dados adquiridos, são publicados num *broker* MQTT, que atua como intermediário na comunicação entre os dispositivos. Este *broker* gere a distribuição das mensagens entre quem publica, por exemplo, o ESP32 e quem subscreve os tópicos deste, por exemplo, aplicações de monitorização.

Complementarmente, foi desenvolvido um script em Python no Visual Studio Code (VSC), com o objetivo de recolher, armazenar e processar os dados publicados no *broker* MQTT, possibilitando a análise posterior dos dados.

3.2. Microcontrolador ESP32

O microcontrolador ESP32 foi introduzido pela *Espressif Systems* como sucessor do microcontrolador ESP8266. Trata-se de um microcontrolador de baixo custo e baixo consumo de energia, com base num sistema com um único chip, com Wi-Fi 802.11 b/g/n integrado, Bluetooth 5.0 LE e funcionalidades de poupança de energia, o que o torna mais versátil. Comparado ao seu antecessor, ESP8266, além dessas funcionalidades, o número de canais PWM dependendo da versão pode ir até 16 canais e está equipado com 4 MB de memória flash [56][57].

O ESP32 é compatível com dispositivos móveis e aplicações de *IoT* (Internet das Coisas) e revela-se uma opção fiável em ambientes industriais devido à sua ampla gama de temperaturas de operação. Este microcontrolador pode funcionar como um sistema autónomo completo ou como um dispositivo *slave* de um microcontrolador *master* [56].

O grande sucesso destes dispositivos deve-se ao seu baixo custo, ao seu formato compacto, às suas capacidades, muita documentação disponível e o facto de existir um suporte criado pela comunidade de utilizadores [57].

3.3. Ferramentas utilizadas

3.3.1. Ambiente de Desenvolvimento - Arduino

Neste projeto, foi utilizado o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) Arduino, uma plataforma de desenvolvimento *open-source* compatível com o ESP32. A utilização do Arduino IDE para a programação do ESP32 deve-se ao facto da facilidade de utilização, pois o Arduino IDE apresenta uma interface simples e intuitiva, permitindo uma curva de aprendizagem reduzida devido à vasta gama de bibliotecas compatíveis com o ESP32, incluindo suporte a comunicação serie, protocolos industriais como o Modbus e à comunidade ativa que disponibiliza inúmeros exemplos, tutoriais e fóruns de discussão, facilitando a resolução de problemas e a partilha de boas práticas [58].

3.3.2. Ambiente de Desenvolvimento - Python

Para o desenvolvimento de um script complementar à comunicação e tratamento de dados foi utilizada a linguagem de programação Python, em conjunto com o editor de código *Visual Studio Code* (*VS Code*). O *VS Code* foi escolhido como ambiente de desenvolvimento devido à sua interface simples e personalizável, e à compatibilidade com Python.

3.3.3. Estrutura dos Programas Desenvolvidos

Neste projeto, o Arduino IDE foi utilizado para a programação de um microcontrolador, com o objetivo de estabelecer comunicação serie com um equipamento externo. Foi implementado o protocolo Modbus RTU e o protocolo Modbus

TCP de forma a permitir a leitura de registos e a escrita de comandos, assim como a recolha e armazenamento local de dados.

O Visual Studio Code (VS Code) foi utilizado como ambiente de desenvolvimento para a linguagem Python, no qual foi desenvolvido um script responsável pela leitura dos dados enviados pelo microcontrolador para um MQTT broker, e pelo respetivo armazenamento local em formato CSV. Esta abordagem permite criar um histórico de dados caso se queira fazer uma análise posterior.

3.3.4. Principais bibliotecas do Arduino IDE utilizadas:

- ***Wifi***

A biblioteca “WiFi.h” foi utilizada para estabelecer a ligação do ESP32 a uma rede sem fios. Esta biblioteca, nativa do ESP32 no Arduino IDE, permite configurar o dispositivo como cliente Wi-Fi, possibilitando a comunicação com outros sistemas ou servidores na mesma rede.

Com funções como *WiFi.begin()*, para iniciar a ligação com um SSID e senha, e *WiFi.status()*, para verificar o estado da ligação, tornou-se possível garantir a conectividade constante para a comunicação via protocolo Modbus TCP ou envio de dados por MQTT.

- ***ModbusTCP***

Para implementar comunicação Modbus TCP/IP, foi utilizada a biblioteca “ModbusTCP.h”, que permite ao ESP32 atuar como mestre ou escravo Modbus TCP. Esta biblioteca facilita a criação de uma interface Ethernet ou Wi-Fi para ler e escrever registos em dispositivos remotos que suportem Modbus TCP.

Com funções como *ModbusTCPClient.readHoldingRegisters()* e *ModbusTCPClient.writeSingleRegister()*, foi possível interagir com equipamentos tanto a nível de leitura e escrita, respetivamente. Foi possível manter a estrutura típica do protocolo Modbus, mas sobre uma camada de transporte IP.

- ***ModbusMaster***

Para estabelecer comunicação Modbus RTU entre o ESP32 e dispositivos externos, foi utilizada a biblioteca “ModbusMaster.h”, compatível com o Arduino IDE. Esta biblioteca permite configurar o ESP32 como mestre Modbus e facilita a leitura e escrita de registos em dispositivos escravos.

Entre as funções disponíveis, destacam-se *readHoldingRegisters()*, utilizada para ler registos, e *writeSingleRegister()*, utilizada para escrever valores em registos individuais. Estas funções foram fundamentais para a troca de dados via RS485 de forma fiável e simples [59].

- **PubSubClient**

Para estabelecer comunicação MQTT entre o ESP32 e um broker externo (HiveMQ Cloud), foi utilizada a biblioteca “PubSubClient.h”, compatível com o Arduino IDE. Esta biblioteca permite configurar o ESP32 como cliente MQTT e facilita o envio e recepção de mensagens através de tópicos, integrando o dispositivo num sistema IoT.

Entre as funções disponíveis, destacam-se *publish()*, utilizada para publicar mensagens em tópicos específicos, e *subscribe()*, que permite subscrever tópicos para receber mensagens. Estas funções foram fundamentais para a troca de dados com o servidor central [60].

- **WiFiClientSecure**

Para estabelecer comunicações seguras via protocolo MQTT sobre TLS, foi utilizada a biblioteca “WiFiClientSecure.h”, compatível com o Arduino IDE e o ESP32. Esta biblioteca permite ao ESP32 criar conexões com servidores externos, garantindo a confidencialidade e integridade dos dados transmitidos.

Quando integrada com a biblioteca “PubSubClient.h”, o “WiFiClientSecure.h” permite ao ESP32 conectar-se a brokers MQTT que utilizam conexões seguras (porta 8883).

Entre as funções disponíveis e utilizadas, destaca-se *setInsecure()*, que permite desativar a verificação do certificado em ambientes de teste. A função *connect()* permite estabelecer a ligação segura com o servidor remoto [61].

3.3.5. Limitações do Arduino IDE

Apesar das suas vantagens, o Arduino IDE apresenta a limitação de menor capacidade de personalização e acesso detalhado ao funcionamento interno do ESP32, em comparação com outras ferramentas como o ESP-IDF, que permitem ajustar com mais precisão o comportamento do microcontrolador [62].

Contudo, para os objetivos desta dissertação, mais centrado na integração de sistemas Modbus e gestão de energia com um microcontrolador, o Arduino IDE revelou-se uma solução eficiente, prática e suficientemente robusta.

3.4 Arquitetura do Sistema

3.4.1. Diagrama de blocos

Para facilitar a compreensão da arquitetura do sistema, vão ser apresentados uns diagramas de blocos que ilustram de forma esquemática os principais componentes e a sua comunicação. Estes diagramas permitem visualizar como os dispositivos se interligam, os protocolos utilizados e os caminhos de transmissão de dados, servindo como base para a descrição do funcionamento do sistema.

3.4.1.1. Comunicação Modbus RTU

Este sistema desenvolvido tem como principal objetivo realizar a comunicação entre o microcontrolador, neste caso ESP32 e um inversor híbrido, de modo a monitorizar e controlar parâmetros específicos tanto localmente como remotamente. Pretende-se recolher em tempo real variáveis como tensão, corrente, SoC das baterias, entre outros, e manipular registos tanto localmente como remotamente.

Para realizar esta comunicação, o sistema utiliza o protocolo de comunicação Modbus RTU através da interface RS485, utilizando um conversor TTL-RS485, para converter os sinais seriais ponto a ponto (TTL) em sinais seriais diferencial (RS485), permitindo a comunicação com o inversor.

O computador é utilizado para programar e alimentar o ESP32 através de uma ligação USB-A/USB-C. A comunicação entre o ESP32 e o inversor ocorre fisicamente por meio de cabos jumper (*Dupont*) que conectam o ESP32 ao módulo conversor TTL-RS485, de modo a permitir a comunicação Modbus RTU com o inversor.

Os dados recolhidos do inversor pelo ESP32 (como tensão, corrente, SoC da bateria, etc.), podem ser recolhidos localmente ou então enviados via Wi-Fi utilizando o protocolo MQTT para um servidor (cloud ou local), onde podem ser visualizados, armazenados ou utilizados por outros sistemas.

Além disso, o sistema permite enviar comandos de escrita ao ESP32 através do servidor via MQTT, possibilitando o controlo remoto em tempo real. Estes dados do server podem ainda ser partilhados com qualquer computador desde que tenha conexão Wi-fi, onde pode armazená-los localmente em ficheiros CSV através de um pequeno script em Python (Anexo A).

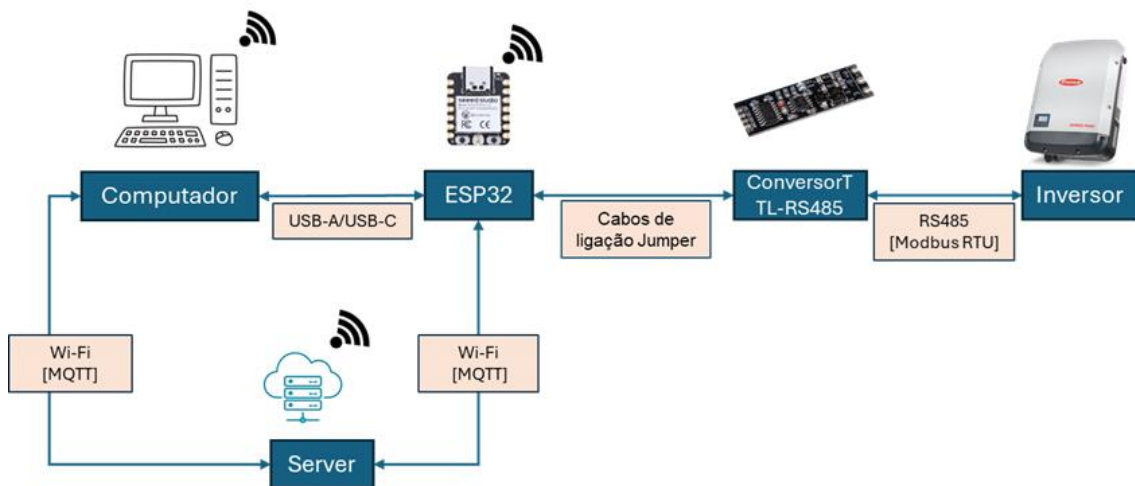


Figura 19 - Esquema em blocos do sistema com comunicação Modbus RTU

3.4.1.2. Comunicação Modbus TCP/IP

Este sistema desenvolvido tem como principal objetivo realizar a comunicação entre um microcontrolador, neste caso o ESP32, e um inversor híbrido, de modo a monitorizar e controlar alguns parâmetros específicos tanto localmente como remotamente. Pretende-se recolher em tempo real variáveis como tensão, corrente, potência e estado de carga (SoC) das baterias, permitindo a visualização e manipulação destes dados tanto localmente como via servidor remoto.

Para realizar esta comunicação, o sistema utiliza o protocolo de comunicação Modbus TCP/IP através de rede Ethernet ou Wi-Fi, dispensando a necessidade de conversores físicos. O computador é utilizado para programar e alimentar o ESP32 através de uma ligação USB-A/USB-C, mas não participa diretamente na comunicação com o inversor. O ESP32 liga-se diretamente ao inversor através da rede, utilizando o protocolo Modbus TCP/IP para efetuar a leitura e escrita dos registos necessários ao controlo do sistema.

Os dados recolhidos do inversor pelo ESP32 podem ser enviados via Wi-Fi para um servidor MQTT, seja local ou na *cloud*, permitindo a visualização remota das leituras. Além disso, o servidor também pode enviar comandos de escrita via MQTT para o ESP32, permitindo o controlo remoto do sistema em tempo real.

Tal como no sistema Modbus RTU, o servidor pode comunicar com o computador para guardar os dados localmente em ficheiros CSV, através de um pequeno script em Python.

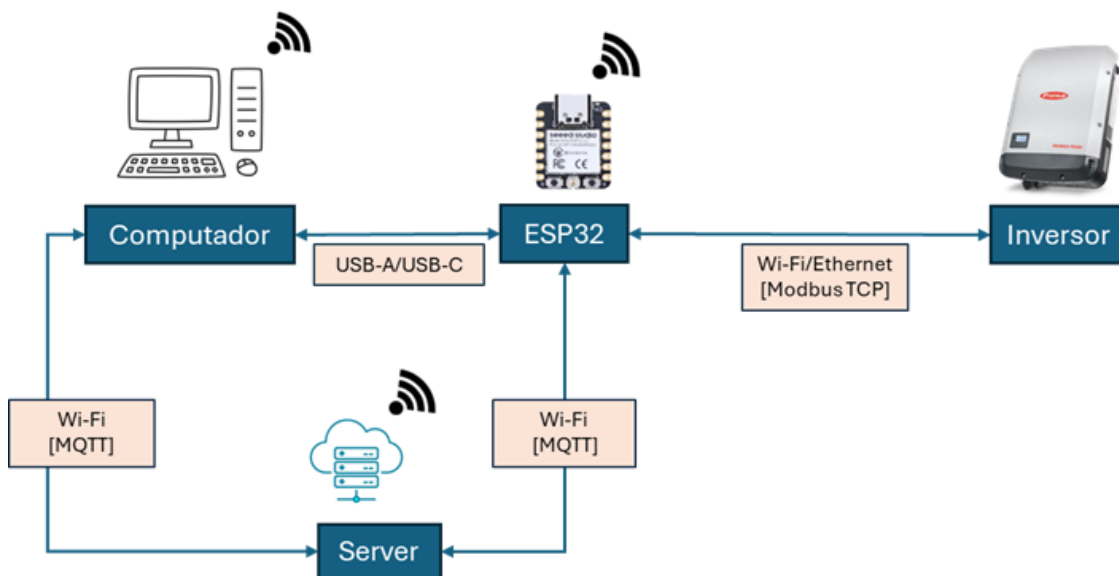


Figura 20 - Esquema em blocos do sistema com comunicação Modbus TCP

Em suma, ambos os sistemas representados na figura 19 e figura 20, têm como objetivo monitorizar e controlar o inversor híbrido, permitindo a recolha de dados em tempo real, visualização local e remota, bem como o controlo remoto através de MQTT.

A principal diferença reside no meio físico de comunicação: enquanto o Modbus RTU utiliza sinais seriais via RS485 com conversor TTL-RS485, o Modbus TCP/IP opera diretamente sobre redes Ethernet ou Wi-Fi, dispensando conversores físicos. Apesar desta diferença, a lógica de funcionamento e as funcionalidades do sistema são equivalentes, permitindo que os dados recolhidos pelo ESP32 sejam armazenados, analisados e utilizados posteriormente em ambos os casos.

3.4.2. Principais componentes

3.4.2.1. ESP32-C3

Neste trabalho foi utilizado o microcontrolador ESP32-C3 da Seeed Studio, versão XIAO, um módulo compacto e versátil especialmente indicado para aplicações em sistemas integrados. Este microcontrolador combina conectividade Wi-Fi com uma arquitetura baseada em RISC-V de 32 bits, apresentando um excelente equilíbrio entre desempenho, baixo consumo energético e reduzidas dimensões físicas [63].

A sua interface USB-C permite a programação e alimentação através do computador, enquanto os seus pinos de I/O facilitam a ligação a periféricos externos e módulos de comunicação. Estas características tornam o ESP32-C3 XIAO particularmente adequado para este projeto.

A figura 21, representa uma tabela onde resume as principais especificações do modelo Seeed Studio XIAO ESP32C3, permitindo uma visão geral das suas capacidades e funcionalidades enquanto placa de desenvolvimento.

Item	Seeed Seeed Studio ESP32C3
Processor	ESP32-C3 32-bit RISC-V @160MHz
Wireless Connectivity	WiFi and Bluetooth 5 (LE)
Memory	400KB SRAM, 4MB onboard Flash
Built-in Sensors	N/A
Interfaces	I2C/UART/SPI/I2S
PWM/Analog Pins	11/4
Onboard Buttons	Reset and Boot Button
Onboard LEDs	Charge LED
Battery Charge Chip	Built-in
Programming Languages	Arduino

Figura 21 - Especificações do XIAO ESP32C3 [56]

3.4.2.2. Módulo conversor TTL - RS485

O conversor utilizado para permitir a comunicação entre o microcontrolador ESP32-C3 e o inversor, através do protocolo Modbus RTU, foi o módulo JZK TTL para RS485, apresentado na figura 22. Este módulo permite a conversão de sinais seriais UART para o padrão RS485, compatível com sistemas industriais. Suporta tensões de operação de 3,3 V e 5 V, o que o torna compatível com microcontroladores como o ESP32.

Uma das suas vantagens é a funcionalidade de controlo de fluxo automático por hardware, que simplifica a comunicação bidirecional sem necessidade de controlo manual dos pinos de direção (DE/RE). O módulo foi ligado ao ESP32 através de cabos jumper (*Dupont*), utilizando a interface UART para envio e receção de dados com o inversor.

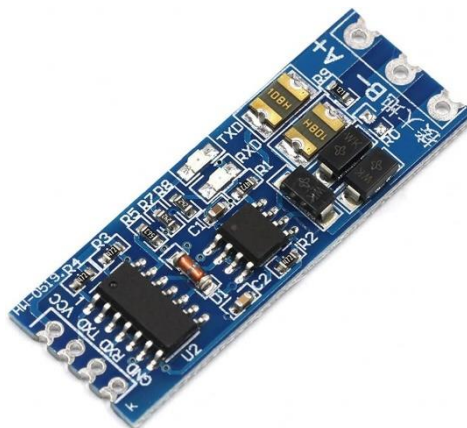


Figura 22 - Módulo conversor TTL-RS485 JZK [64]

3.4.3. Ligações da montagem

A comunicação por Modbus RTU, tal como mencionado anteriormente, requer a utilização do módulo TTL-RS485. A figura 23, apresenta o esquema da ligação entre um ESP32-C3, um conversor TTL-RS485 e um conector RJ45.

O ESP32-C3 é responsável pela comunicação série (UART), enviando e recebendo os dados através dos pinos TX e RX. Estes pinos estão ligados respetivamente aos pinos RXD e TXD do conversor TTL-RS485, representados pelos fios amarelo e verde (figura 23), que faz a conversão dos níveis lógicos TTL (utilizados pelo ESP32) para o padrão diferencial RS485.

A alimentação do conversor é fornecida pelo ESP32-C3, utilizando o pino 5V e GND, representados pelo fio vermelho e preto. No lado RS485, os fios A+ e B- do conversor são ligados aos pinos correspondentes do conector RJ45, que permite a comunicação Modbus RTU com dispositivos externos.

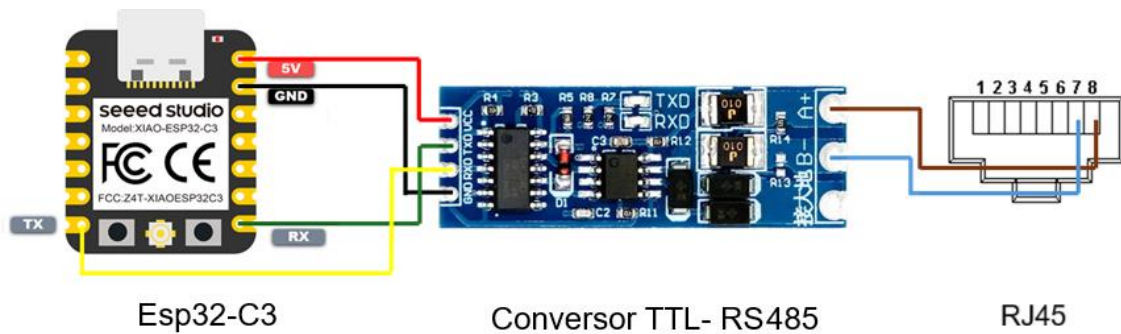


Figura 23 - Esquema das ligações para comunicação Modbus RTU

3.5. Comunicação Modbus RTU e TCP

Este firmware implementa a comunicação entre um microcontrolador ESP32 e dispositivos industriais via protocolos Modbus RTU e Modbus TCP. O objetivo principal é permitir a leitura e escrita de registos, com capacidade para alternar automaticamente entre os dois modos de comunicação, conforme o dispositivo ao qual foi conectado. De notar que as figuras seguintes são de carácter exemplificativo, de modo a ilustrar alguma das funções e configurações do sistema desenvolvido, não representando a totalidade do código.

➤ Bibliotecas utilizadas no projeto

A implementação foi realizada em C++, em ambiente Arduino, utilizando as bibliotecas *Wifi.h*; *WifiClientSecure.h*; *PubSubClient.h*; *ModbusMaster.h*; *ModbusTCP.h*; tal como demonstrado na figura 24.

```
#include <WiFi.h>           // Comunicação WiFi
#include <WifiClientSecure.h> // Cliente MQTT seguro
#include <PubSubClient.h>   // Protocolo MQTT
#include <ModbusMaster.h>   // Protocolo Modbus RTU
#include <ModbusTCP.h>      // Protocolo Modbus TCP
```

Figura 24 - Bibliotecas utilizadas no projeto

➤ Configuração dos modos Modbus TCP e RTU

A comunicação Modbus é configurada para operar em dois modos: Modbus TCP e Modbus RTU. A Figura 25 apresenta um exemplo de código responsável pela inicialização de ambos os modos de comunicação.

Para a comunicação Modbus TCP, a configuração requer a definição do endereço IP do dispositivo com `IPAddress slaveIP(.,.,.);` seguida da criação de uma instância do objeto `ModbusTCP mb;`. Para a comunicação Modbus RTU, a configuração foca-se na especificação dos pinos de recepção (`RX_PIN`) e transmissão (`TX_PIN`), bem como a velocidade de comunicação (`BAUD`), utilizando o objeto `ModbusMaster node;`.

```
// MODBUS TCP
IPAddress slaveIP(192,168,1,●); // IP do equipamento Modbus TCP
ModbusTCP mb; // Objeto Modbus TCP

// MODBUS RTU
#define RX_PIN 20
#define TX_PIN 21
#define BAUD 115200
ModbusMaster node; // Objeto Modbus RTU
```

Figura 25 - Configuração dos modos Modbus TCP e RTU

➤ Comutação automática entre Modbus TCP e RTU

A comutação automática entre Modbus TCP e RTU é implementada na função de inicialização `setup()`, conforme ilustrado na figura 26.

O sistema inicia tentando estabelecer uma conexão com o dispositivo *slave* via Modbus TCP com o comando `mb.connect(slaveIP)`. Se a conexão falhar, o sistema altera a variável de estado para `ModoRTU = true`, e inicia a comunicação serie com `Serial1.begin(BAUD, SERIAL_8N1, RX_PIN, TX_PIN)` e `node.begin(1, Serial1);`.

```
if (mb.connect(slaveIP)) { //Em caso de sucesso continua a utilizar ModBus TCP
    ModoRTU = false;
    Serial.println("Conectado Modbus TCP com sucesso!");
} else { //Se TCP falhar, muda ModoRTU para true e usa RTU
    Serial.println("Falha na conexão Modbus TCP, iniciando RTU...");
    ModoRTU = true;
    Serial1.begin(BAUD, SERIAL_8N1, RX_PIN, TX_PIN);
    node.begin(1, Serial1);
}
```

Figura 26 - Comutação automática entre Modbus TCP e RTU

➤ Operações de leitura e escrita nos registos via Modbus TCP e RTU

Em ambos os modos, o sistema realiza operações de escrita e leitura nos registos do escravo Modbus.

No modo TCP, a escrita é realizada através do comando `mb.writeHreg(slaveIP, registo, valor)`, enquanto no modo RTU utiliza-se `node.writeSingleRegister(registo, valor)`.

Para a leitura de registos, o modo TCP recorre à função `mb.readHreg(slaveIP, registo, &variável)` e, no modo RTU, a leitura é feita em duas fases, utilizando-se `node.readHoldingRegisters(registo, quantidade)` seguido de `node.getResponseBuffer(0)` para obter o valor lido.

Este processo demonstrado na figura 27 garante que, independentemente do protocolo ativo, os mesmos registos podem ser escritos e lidos.

```
// Escrita Modbus TCP
uint16_t reg = 5;
uint16_t val = 1500;
mb.writeHreg(slaveIP, reg, val);

// Escrita Modbus RTU
node.writeSingleRegister(reg, val);

// Leitura Modbus TCP
uint16_t valor;
mb.readHreg(slaveIP, 6, &valor);

// Leitura Modbus RTU
node.readHoldingRegisters(6, 1);
valor = node.getResponseBuffer(0);
```

Figura 27 - Leitura e escrita nos registos via ModBus TCP e RTU.

➤ Definição e publicação de tópicos MQTT

A Figura 28 ilustra o mecanismo de definição do tópico MQTT e a subsequente publicação de dados. O código define o tópico MQTT `"esp32/valor"` que será utilizado para publicar os dados lidos. Independentemente do modo de comunicação, seja Modbus TCP ou Modbus RTU, o valor numérico lido do registo do dispositivo escravo é convertido para uma `string` utilizando a função `String(valor).c_str()`. Esta conversão garante a compatibilidade com o método `publish()` da biblioteca MQTT.

A função *client.publish()* envia o valor ao broker MQTT, permitindo que qualquer cliente inscrito nesse tópico receba os valores atualizados em tempo real. Dessa forma, o ESP32 funciona como um intermediário, recolhendo dados via Modbus e os disponibilizando globalmente através de um servidor MQTT, facilitando o acesso remoto aos dados de qualquer local com conexão à internet.

```
//Definir tópico
const char* mqtt_topic_publicar = "esp32/valor";

//ModBus TCP
if (mb.readHreg(slaveIP, 6, &valor)) {
    client.publish(mqtt_topic_publicar, String(valor).c_str());
}

//ModBus RTU
uint8_t result = node.readHoldingRegisters(6, 1);
if (result == node.ku8MBSuccess) {
    uint16_t valor = node.getResponseBuffer(0);
    client.publish(mqtt_topic_publicar, String(valor).c_str());
}
```

Figura 28 - Definição e publicação de registos lidos por ModBus RTU e TCP

➤ Utilização do protocolo MQTT para acesso remoto

Para garantir o acesso remoto e em tempo real dos dados recolhidos localmente pelo ESP32, utiliza-se o protocolo MQTT. Como referido anteriormente, o protocolo MQTT permite que o ESP32 publique os valores lidos num *broker*, que atua como intermediário, facilitando o acesso a esses dados a partir de qualquer dispositivo com acesso à internet. Desta forma, é possível monitorizar e controlar o equipamento remotamente.

Como a ligação à rede e ao broker MQTT pode ser instável, é fundamental implementar uma função de reconexão automática. A função *reconnect()* tenta reestabelecer continuamente a ligação ao *broker* caso esta seja perdida, garantindo que o dispositivo mantenha sempre a comunicação ativa para enviar e receber dados sem interrupções, figura 29.

```
void reconnect() { //RECONEXÃO MQTT
    while (!client.connected()) {
        Serial.print("A ligar ao MQTT...");
        if (client.connect("ESP32Client", mqtt_user, mqtt_pass)) {
            Serial.println(" Ligado!");
            client.subscribe(mqtt_topic_receber);
        } else {
            Serial.print(" Falhou. rc=");
            Serial.print(client.state());
            delay(5000); // Espera antes de tentar de novo
        }
    }
}
```

Figura 29 - Função de reconexão automática

➤ Recepção e processamento de comandos externos

Sendo este uma das principais funções deste sistema, para controlar remotamente o dispositivo via MQTT, é necessário receber comandos externos enviados pelo utilizador ou por outro sistema. A função *callback* permite processar essas mensagens recebidas no tópico MQTT ao qual o ESP32 está subscrito.

Sempre que o ESP32 recebe uma mensagem no tópico “esp32/comando”, o código converte o *payload* recebido (em *bytes*) numa *string* para facilitar o processamento. Depois, extrai os dois valores separados por uma vírgula: o número do registo Modbus e o valor a escrever nesse registo. Este formato “*registo,valor*” é obrigatório para que o comando seja válido.

Se o formato estiver correto, a função converte os valores para inteiros (*reg* e *val*) e verifica o modo de comunicação ativo (TCP ou RTU). Conforme o modo, utiliza o comando apropriado para escrever o valor no registo do escravo Modbus. Este funcionamento está esquematizado na figura 30.

```
//Tópico para receber comandos MQTT
const char* mqtt_topic_receber = "esp32/comando";

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
    // Esta função é chamada quando chega uma mensagem no tópico
    "esp32/comando"
    String msg;
    for (unsigned int i = 0; i < length; i++) msg +=
(char)payload[i];
    Serial.print("Mensagem recebida: "); Serial.println(msg);

    int sep = msg.indexOf(','); // Separar dados do registo e do
valor / Espera-se o formato "registo,valor"
    if (sep > 0) {
        int reg = msg.substring(0, sep).toInt();
        int val = msg.substring(sep + 1).toInt();

        if (ModoRTU) {
            uint8_t result = node.writeSingleRegister(reg, val);
            if (result == node.ku8MBSuccess) Serial.println("(RTU)
Comando escrito com sucesso!");
            else Serial.print("(RTU) Erro no comando de escrita.");
        } else {
            if (mb.writeHreg(slaveIP, reg, val)) Serial.println("(TCP)
Comando escrito com sucesso!");
            else Serial.println("(TCP) Erro no comando de escrita.");
        }
    } else {
        Serial.println("Formato inválido. Use: registo,valor");
    }
}
```

Figura 30 - Recepção e processamento de comandos externos via MQTT

O sistema desenvolvido neste capítulo estabelece a infraestrutura necessária para a recolha, processamento e comunicação de dados entre o microcontrolador e o inversor, tanto a nível de hardware como de software. Esta base permite a integração das funcionalidades de monitorização e controlo que serão aplicadas no capítulo seguinte, dedicado à gestão de energia, onde vão ser exploradas as estratégias de utilização destas ferramentas para otimizar o funcionamento do sistema.

Capítulo 4

4. Gestão de Energia

Este capítulo aborda os principais aspetos da gestão e monitorização de energia em sistemas com armazenamento em baterias, nomeadamente alguns dos fatores que influenciam a vida útil e o desempenho das baterias, bem como as principais estratégias de gestão de energia, nomeadamente o *peak shaving*, *load shifting* e *valley filling*, que permitem otimizar e reduzir custos.

Por fim, é realizada uma análise prática dos parâmetros Modbus de um inversor híbrido, demonstrando as várias funções associadas aos diferentes parâmetros, bem como estes podem ser utilizados para monitorizar, otimizar e garantir a segurança do sistema.

4.1. Gestão dos Principais Fatores que Influenciam a Vida Útil e a Eficiência Energética das Baterias

O desempenho e a eficiência energética das baterias de íões de lítio são fortemente influenciados por vários fatores operacionais, como a corrente de carga e descarga, a temperatura e a profundidade de descarga. A adequada monitorização e controlo desses fatores permite reduzir perdas, prolongar a vida útil e manter um elevado desempenho energético mesmo após envelhecimento parcial [65].

4.1.1. Correntes de carga e descarga controladas

Um dos aspetos mais determinantes é a corrente de descarga, expressa em C-rate. Correntes elevadas, como 2C ou 5C, provocam uma redução significativa da eficiência energética e da capacidade da bateria. Por outro lado, descargas com correntes mais baixas, como 0,2C ou 0,5C, permitem obter eficiências superiores a 85%. Esta diferença deve-se às perdas internas, que aumentam com correntes elevadas, originando maior geração de calor e aumento da resistência interna da célula. Por isso, controlar as correntes de carga e descarga em função da capacidade da bateria é essencial para garantir maior eficiência global e reduzir o envelhecimento acelerado da bateria [65].

Correntes elevadas de descarga promovem uma degradação mais acentuada da bateria, tanto em termos de eficiência energética como de estado de saúde (SoH), comprometendo a sua vida útil. O controlo da corrente é, portanto, um dos principais fatores na gestão da durabilidade de sistemas de armazenamento de energia [65].

Na figura 31, retirado de um *datasheet* de uma bateria de íons de lítio, consegue-se visualizar como as correntes de descarga afetam a eficiência e capacidade das baterias.

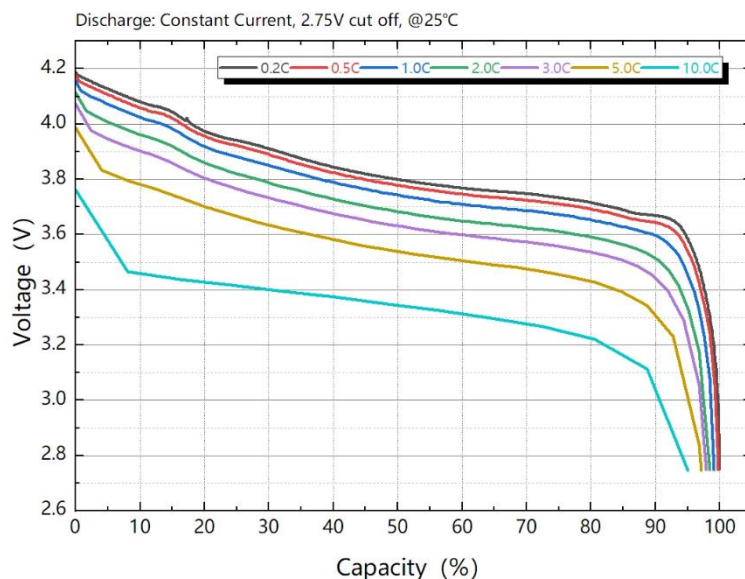


Figura 31- Curvas de descarga de uma bateria LCO a diferentes taxas de descarga (C-rate) a 25°C. (Adaptado de [66]).

4.1.2. Temperatura de Operação

A temperatura de operação é outro parâmetro crucial. Temperaturas mais elevadas, ligeiramente acima dos 50 °C, podem aumentar a eficiência energética da bateria, resultando num ganho de rendimento comparativamente a temperaturas mais baixas. Contudo, o aumento térmico acelera a degradação da capacidade útil (SoH) [65].

Por outro lado, temperaturas muito baixas reduzem a eficiência da bateria, principalmente em descargas profundas, devido ao aumento da resistência interna. O desempenho ótimo das baterias de íons de lítio ocorre geralmente entre 20 °C e 45 °C, que equilibra eficiência, segurança e longevidade.

Além da temperatura de operação, a velocidade de carga / descarga (C-rate) tem um papel determinante na temperatura interna da célula. Taxas de carga / descarga mais elevadas (como 2 C ou 3 C) provocam maior geração de calor devido às perdas resistivas internas, o que conduz a um aumento da temperatura de operação e, consequentemente, a uma degradação mais acelerada da capacidade útil.

Este comportamento é evidenciado na figura 32, que ilustra a redução da longevidade da bateria de íons de lítio em função da temperatura e da taxa de descarga, quanto maior a corrente de descarga, menor o número de ciclos de vida alcançado.

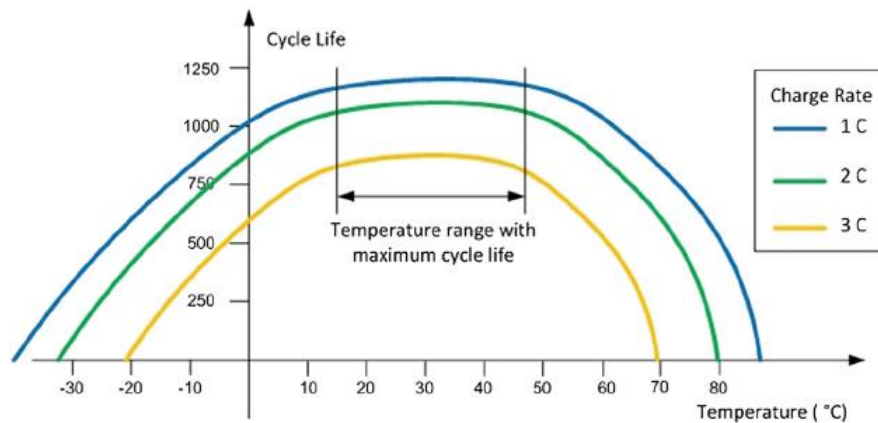


Figura 32 - Longevidade de uma bateria de íões de lítio em função da temperatura de operação para diferentes taxas de descarga (C-rate) (1 C, 2 C e 3 C) [67]

4.1.3. Profundidade de descarga (DoD- Depth of Discharge)

A profundidade de descarga, é igualmente um fator crítico. Descargas muito profundas, até tensões muito baixas, como 2.0 V, tendem a diminuir a eficiência para valores próximos dos 75%, especialmente em condições de baixa temperatura. Limitar a descarga a tensões mais elevadas, tais como 2.5 V ou 2.7 V, dependendo da bateria, contribui para aumentar a eficiência para valores superiores a 86%. Esta melhoria deve-se à redução das perdas internas associadas às fases finais da descarga, que são mais exigentes para as células.

Por outro lado, manter a DoD em níveis moderados (descargas parciais, por exemplo entre 20% e 50%) ajuda a preservar a integridade química e estrutural da bateria, prolongando a sua vida útil e garantindo maior estabilidade no desempenho ao longo do tempo [66].

Na figura 33, retirado de uma *datasheet* de uma bateria de íões de lítio, consegue-se visualizar como diferentes profundidades de descarga afeta o número de ciclos e a capacidade.

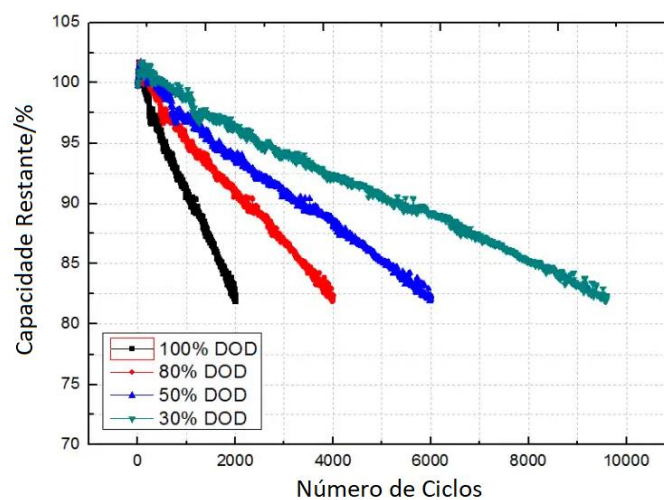


Figura 33 - Influência de diferentes DoD na capacidade e número de ciclos de uma bateria de LiFePO₄. (Adaptado de [30])

4.1.4. Sistemas de equilíbrio de células de baterias

Para garantir a uniformidade do estado de carga entre as células de uma bateria, são utilizados sistemas de equilíbrio que evitam desequilíbrios prejudiciais ao desempenho e à vida útil do sistema. Estes métodos dividem-se em passivos e ativos, consoante o método como a energia é gerida entre as células.

4.1.4.1. Sistema Ativo

Os métodos ativos são os mais recomendados para baterias de iões de lítio, uma vez que permitem uma gestão mais eficiente da energia e minimizam o impacto na vida útil das células. Ao contrário dos métodos passivos, que dissipam o excesso de energia sob a forma de calor, os métodos ativos transferem energia entre células, promovendo um equilíbrio mais eficaz e com menores perdas [68].

Este processo é realizado através da transferência de energia das células com maior carga para aquelas com menor carga. Para tal, são utilizados condensadores, bobinas ou indutores, ou ainda transformadores, dependendo da arquitetura do sistema. Estes componentes permitem a circulação controlada da energia dentro do conjunto de baterias, assegurando um desempenho equilibrado entre as células [68].

Existem várias abordagens de balanceamento ativo, que podem ser agrupadas nas seguintes cinco categorias principais:

- **Cell bypass** - isola temporariamente a célula mais carregada, permitindo que as restantes se equilibrem.
- **Cell to cell** - transfere diretamente energia de uma célula para outra, utilizando conversores eletrónicos dedicados.
- **Cell to pack** - a energia excedente de uma célula é redirecionada para o conjunto (pack) de baterias.
- **Pack to cell** - energia do pack é direcionada para uma ou mais células com menor carga.
- **Cell to pack to cell** - sistema híbrido, em que a energia de uma célula é transferida para o pack e depois redistribuída para outra célula necessitada.

4.1.4.2. Sistema Passivo

O método passivo pode ser dividido em dois sub-métodos principais: sobrecarga controlada e *shunt* com resistência fixa. No primeiro, todas as células do sistema são carregadas até atingirem o seu nível máximo de carga. A partir desse ponto, a energia adicional fornecida é dissipada em forma de calor através de elementos resistivos conectados ao sistema [68].

No segundo método, são utilizadas resistências ligadas em paralelo com as células. Estas resistências descarregam continuamente uma pequena corrente, permitindo que todas as células mantenham níveis de tensão semelhantes.

Este tipo de balanceamento é principalmente adequado em equipamentos onde o custo e a simplicidade do sistema são prioridades. Apesar de ser associado a baterias que toleram sobrecarga, como chumbo-ácido, o método passivo também pode ser utilizado em baterias de íões de lítio, desde que acompanhado de BMS adequado, que evite sobrecargas ou descargas excessivas [63] [69] .

Além disso, o uso repetido deste método pode acelerar ligeiramente a degradação da bateria, reduzindo a sua vida útil, no entanto com um BMS adequado este impacto é bastante reduzido [68].

4.2. Estratégias de utilização das baterias na gestão de energia

As estratégias de utilização das baterias no contexto da gestão de energia têm como principal objetivo otimizar o desempenho energético e económico do sistema. A gestão da energia elétrica tornou-se cada vez mais complexa devido à variabilidade da procura e à crescente penetração de fontes renováveis intermitentes.

Nesse contexto, as baterias desempenham um papel fundamental ao permitir diferentes estratégias para gerir e solucionar este problema, como o *peak shaving*, *load shifting* e *valley filling*. Estas técnicas, além de melhorarem a eficiência do sistema, promovem benefícios económicos e técnicos, como redução de perdas e integração de energias renováveis [70].

4.2.1. Peak Shaving

Entre as estratégias mais relevantes destaca-se o *peak shaving*, figura 34, consistindo na utilização de baterias para fornecer energia durante os períodos de maior consumo, reduzindo os picos de carga solicitado à rede que, em muitos casos, estão associados a penalizações na fatura energética. Além da poupança económica, o *peak shaving* contribui para a estabilidade da rede elétrica, ao suavizar a curva de carga e evitar a necessidade de reforço de infraestruturas apenas para responder a picos temporários de consumo. Esta técnica tem maior sucesso em ambientes comerciais e industriais, onde a potência contratada tem um peso significativo nos custos de eletricidade [71].

Em [70], é exemplo um caso prático com integração de um BESS de 3.61 MWh, onde foi possível reduzir o pico de carga de 10.13 MW para 9 MW.

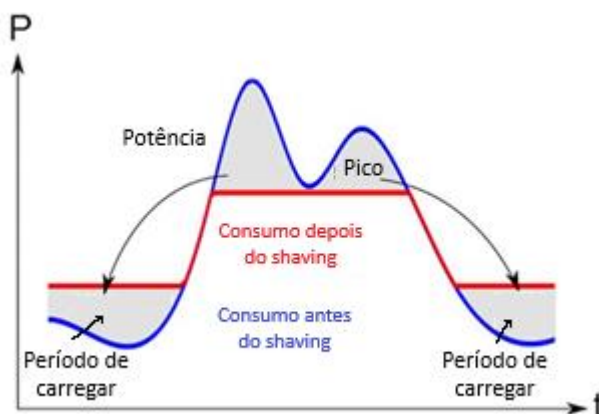


Figura 34 - Gráfico representativo da estratégia Peak shaving. (Adaptado de [72])

4.2.2. Load Shifting

Outra abordagem comum é o *load shifting*, figura 35, com o objetivo de deslocar o período de carga das baterias do utilizador para períodos com preços mais baixos, como horas fora de ponta. Neste caso, a bateria é carregada quando a energia é mais barata (ou quando há excedente renovável) e descarregada nos momentos em que o preço sobe. Esta estratégia permite reduzir os encargos financeiros e aumentar a utilização da energia localmente produzida.

Além da poupança económica, o *load shifting* contribui para um melhor equilíbrio da rede elétrica, pois ajuda a reduzir a diferença entre os períodos de maior e menor consumo (pico e vale). Esta técnica é especialmente útil em sistemas com produção renovável intermitente, como a energia eólica ou fotovoltaica, onde a carga das baterias pode ser feita em momentos de elevada produção e baixa procura [71][73].

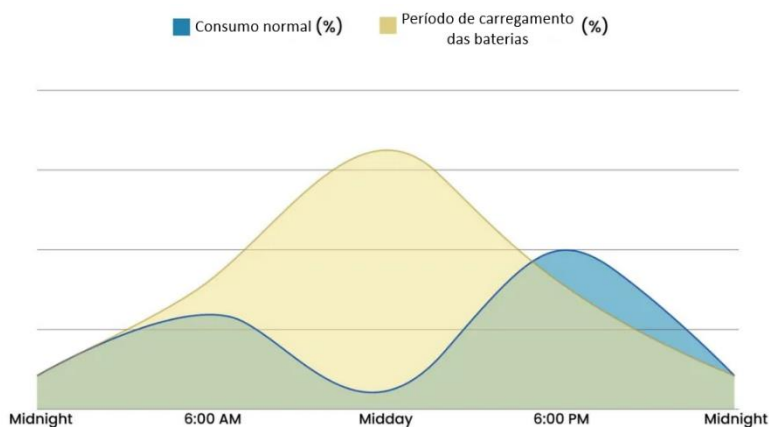


Figura 35 - Gráfico representativo da estratégia load shifting. (Adaptado de [74])

4.2.3. Valley Filling

Uma técnica complementar é o *valley filling*, figura 36, que consiste em aumentar o consumo das cargas em períodos de baixa utilização (off-peak), aproveitando que o preço médio a longo prazo é inferior ao custo associado ao aumento da carga nestas horas. Esta prática ajuda a equilibrar a curva de consumo e a maximizar a utilização eficiente dos recursos energéticos disponíveis. Esta técnica funciona em conjunto com *load shifting* ou *peak shaving* [71].

De acordo com [73], o carregamento das baterias durante os períodos de menor procura é uma forma eficaz de realizar o *valley filling*, especialmente quando há produção renovável disponível, como a energia eólica ou fotovoltaica. Ao utilizar as baterias como carga nesses momentos, evita-se o desperdício de energia (como o corte de produção) e melhora-se o aproveitamento global dos recursos.

Simulações apresentadas nesse estudo demonstraram que, ao adotar estratégias combinadas de *peak shaving* e *valley filling* com baterias, a curva de carga da rede torna-se significativamente mais uniforme, reduzindo a diferença entre os valores de pico e de vale em mais de 39% [73].

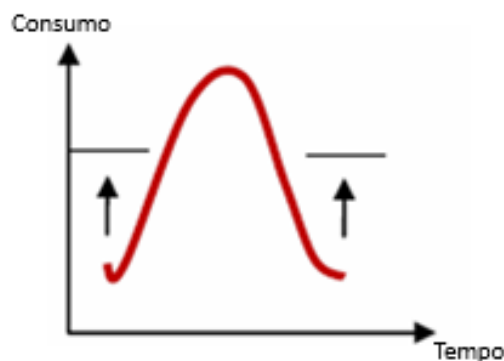


Figura 36 - Gráfico representativo da estratégia valley filling (Adaptado de [75]).

Um exemplo prático desta técnica é o projeto do BESS instalada na Ilha Terceira, Açores, anteriormente mencionado, com 15 MW de potência e 10,5 MWh de capacidade de armazenamento. Este sistema permite otimizar o consumo energético da rede, armazenando energia renovável quando a produção excede a procura e libertando-a nos períodos de maior consumo, funcionando como um mecanismo de *valley filling*. Para além de estabilizar a frequência e a tensão da rede, contribui para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e aumentar a eficiência no aproveitamento da energia gerada localmente [14].

4.3. Parâmetros Modbus nas Estratégias de Gestão de Energia

Esta secção apresenta uma análise detalhada de alguns registos Modbus RTU do inversor híbrido *Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4*, com o objetivo de demonstrar a sua relevância na monitorização, controlo e gestão de energia.

Tabela 1 - Parâmetros Modbus RTU do inversor híbrido Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4.

Categoria	Parâmetro	Endereço (decimal)	Unidade	Tipo	Aplicação
Monitorização	<i>Active Power Generation of Today</i>	501	kWh	R	Energia ativa gerada pelo sistema no dia atual
Monitorização	<i>Reactive Power Generation of Today</i>	502	kvarh	R	Energia reativa gerada pelo sistema no dia atual
Monitorização	<i>Heat Sink Temperature</i>	541	°C	R	Temperatura do dissipador de calor do inversor, utilizada para monitorizar o aquecimento interno do equipamento
Monitorização	<i>Battery1 Voltage</i>	587	V	R	Tensão instantânea do banco de baterias 1
Monitorização	<i>Battery1 SoC</i>	588	%	R	Estado de carga do banco de baterias 1 (<i>State of Charge</i>)
Monitorização	<i>Battery1 Current</i>	591	A	R	Corrente instantânea do banco de baterias 1, podendo assumir valores positivos (carga) ou negativos (descarga)
Monitorização	<i>Grid Voltage (A, B, C)</i>	598–600	V	R	Tensões de linha das fases A, B e C da rede elétrica, utilizadas para monitorização trifásica e verificação de equilíbrio entre fases
Monitorização	<i>Grid Frequency</i>	609	Hz	R	Frequência medida na rede elétrica, utilizada para verificação da estabilidade e sincronismo do sistema com a rede elétrica
Monitorização	<i>Inverter Frequency</i>	638	Hz	R	Frequência de saída do inversor, utilizada para garantir a sincronização com a frequência da rede elétrica

Controlo	<i>Max Battery Charge Current</i>	108	A	R/W	Define o limite máximo de corrente de carregamento das baterias, protegendo o sistema e prolongando a vida útil da bateria
Controlo	<i>Max Battery Discharge Current</i>	109	A	R/W	Define o limite máximo de corrente de descarga do banco de baterias, evitando sobrecorrentes e garantindo uma operação segura e estável do sistema
Controlo	<i>Grid Mode</i>	182	-	R/W	Define o padrão de ligação à rede elétrica (IEEE1547, AS4777_NewZealand, RULE21...)
Controlo	<i>Grid Frequency Setting</i>	183	Hz	R/W	Permite ajustar a frequência de operação do inversor para garantir a sincronização e compatibilidade com a rede elétrica.
Controlo	<i>Output Power Factor</i>	193	%	R/W	Define o fator de potência de saída (cos ϕ)
Segurança	<i>Warning Word 1–2</i>	553–554	-	R	Deteção de alarmes de aviso não críticos
Segurança	<i>Fault Word 1–4</i>	555–558	-	R	Registos que indicam falhas críticas do inversor, responsáveis por acionar proteções e paragens de segurança do sistema
Segurança	<i>Battery Faults 1–2</i>	10019–10020	-	R	Identifica falhas específicas no pack de baterias 1 e 2
Segurança	<i>Battery Alarms 1–2</i>	10021–10022	-	R	Sinaliza condições de aviso relacionadas com temperatura ou tensão das baterias 1 e 2
Otimização/Gestão Energética	<i>Smart Load OFF Voltage</i>	134	V	R/W	Define a tensão mínima para desligar cargas (<i>Load Disable</i>)
Otimização/Gestão Energética	<i>Smart Load ON Voltage</i>	136	V	R/W	Define a tensão mínima para ativar cargas (<i>Load Enable</i>)
Otimização/Gestão Energética	<i>Energy Management Mode</i>	141	-	R/W	Seleciona o modo de gestão energética (<i>Battery/Load priority</i>)
Otimização/Gestão Energética	<i>Time-of-Use Selling Enable</i>	146	-	R/W	Ativa o modo de operação com base em períodos tarifários, permitindo carregar ou descarregar a bateria conforme os preços da eletricidade
Otimização/Gestão Energética	<i>Grid Peak Shaving Power</i>	191	W	R/W	Limita a potência consumida da rede elétrica para evitar picos de carga (<i>Peak Shaving</i>)

Legenda: R- Registo de leitura W- Registo de escrita

O inversor híbrido *Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4* é muito utilizado em aplicações industriais e comerciais que combinam produção fotovoltaica, armazenamento em baterias e ligação à rede elétrica. Este equipamento possui várias funcionalidades de monitorização, controlo e gestão energética, permitindo uma grande flexibilidade para diferentes configurações de sistemas.

Para informar estas funcionalidades, o inversor disponibiliza uma extensa tabela de registos Modbus RTU, composta por centenas de endereços. Cada endereço possui uma função específica, e pode representar diferentes tipos de informação ou funcionalidades, como parâmetros de configuração, medições elétricas, alarmes, eventos de falha, comandos de controlo, entre outros.

A Tabela 1 apresenta uma seleção de alguns destes endereços, com o objetivo de ilustrar algumas variáveis disponíveis e demonstrar de que forma podem ser utilizadas nas diferentes áreas de operação do inversor. Nesta tabela os registos são divididos em quatro categorias, Monitorização, Controlo, Segurança e Otimização/Gestão Energética. Cada parâmetro possui um endereço específico, uma unidade de medida (quando aplicável), o tipo de registo (leitura *R* ou escrita *W*) e uma breve descrição da sua função.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do inversor, apresentam-se de seguida alguns dos parâmetros mais relevantes da Tabela 1, exemplificando de que forma podem ser utilizados na monitorização, controlo, segurança e otimização/gestão energética:

➤ **Monitorização**

Um dos principais parâmetros de monitorização é o “*Battery1 SoC*” (endereço 588), que indica o estado de carga do banco de baterias “1”, expresso em percentagem. Este parâmetro é essencial para o acompanhamento da quantidade de energia disponível, no entanto, embora se trate de um registo de apenas leitura, quando complementado com outros registos de controlo permite implementar estratégias de gestão energética. Por exemplo, é possível definir a interrupção do carregamento das baterias para não ultrapassar 90% de SoC e que a descarga não ocorra abaixo de 20%, prevenindo assim a degradação prematura e prolongando a vida útil das baterias.

Outros parâmetros relevantes são “*Grid Voltage (A, B, C)*” (endereços 598–600) e “*Grid Frequency*” (endereço 609), que fornecem, respetivamente, as tensões de linha das três fases da rede elétrica e a frequência da rede. A monitorização destes parâmetros é essencial para garantir a estabilidade e sincronização do inversor com a rede elétrica. A análise das tensões permite verificar o equilíbrio entre fases e detetar anomalias como subtensões ou sobretensões, enquanto a medição da frequência assegura que o inversor opera em conformidade com os limites definidos pelas normas de ligação à rede, para que possa ocorrer tanto exportação como importação de energia.

➤ **Segurança**

No domínio da segurança, destaca-se os parâmetros “*Warning Word*” (endereços 553–554), que contém registos associados a falhas não críticas do inversor, como aumentos de temperatura, pequenas variações de tensão ou falhas temporárias de comunicação. Embora não representem avarias graves, estes avisos funcionam como indicadores de condição, permitindo aos utilizadores ou ao sistema de supervisão antecipar potenciais problemas e atuar antes que ocorra o agravamento da situação.

De igual modo, os parâmetros “*Fault Word*” (endereços 555–558) contém registos associados a falhas críticas do inversor, como sobreaquecimento, falha de isolamento, erros de comunicação mais graves, entre outros. A leitura destes registos é fundamental para a deteção precoce de anomalias e para a ativação de mecanismos de proteção, uma vez que estes valores podem ser utilizados para gerar alertas automáticos ou comandos de paragem de emergência, de modo a garantir a segurança do sistema.

Por exemplo, no BESS analisado, existe um sistema de deteção e supressão de incêndio, que atua em comunicação com o inversor.

➤ **Controlo**

Na categoria de controlo, um dos parâmetros mais relevantes é o “*Max Battery Charge Current*” (endereço 108), que define o limite máximo de corrente de carregamento do banco de baterias, onde o utilizador pode limitar ou aumentar a corrente de carga de acordo com as condições de funcionamento. Tal como referido anteriormente, correntes de carga mais reduzidas, prolongam a vida útil das baterias, uma vez que diminuem o desgaste químico e térmico durante o processo de carregamento. Por outro lado, em situações de elevada produção de energia fotovoltaica, pode ser conveniente aumentar temporariamente a corrente de carga para aproveitar melhor a energia gerada.

De forma semelhante, o parâmetro “*Max Battery Discharge Current*” (endereço 109) permite controlar o valor máximo de corrente de descarga das baterias. O controlo deste parâmetro é essencial para evitar o sobreaquecimento interno da bateria, uma vez que este pode danificar as células e reduzir a vida útil destas. Por outro lado, a variação deste parâmetro possibilita também testar diferentes estratégias de fornecimento de potência às cargas, de modo a alcançar o equilíbrio entre desempenho e durabilidade do sistema de armazenamento.

➤ **Otimização/Gestão Energética**

Como destaque na categoria de otimização/gestão energética, o parâmetro “*Time-of-Use Selling Enable*” (endereço 146) ativa o modo de operação com base em períodos tarifários. Através deste registo, o inversor pode ser configurado para carregar ou descarregar as baterias conforme os preços da eletricidade, maximizando a rentabilidade do sistema. Por exemplo, durante períodos de tarifa reduzida, o sistema pode priorizar o carregamento das baterias a partir da rede, enquanto em horários de

tarifa elevada é possível descarregar a energia armazenada para alimentar as cargas locais ou injetar o excedente na rede. Esta funcionalidade permite assim uma gestão económica e inteligente da energia.

De igual modo, o parâmetro “*Grid Peak Shaving Power*” (endereço 191) tem um papel importante na otimização do consumo energético, ao permitir limitar a potência máxima retirada da rede elétrica. Tal como mencionado anteriormente, este parâmetro, *Peak Shaving*, evita picos de carga que possam provocar penalizações tarifárias ou sobrecarga dos equipamentos. Ao definir um valor máximo de potência vinda da rede elétrica, o sistema utiliza a energia das baterias para compensar os momentos de maior consumo, contribuindo assim para uma utilização mais equilibrada dos recursos energéticos.

Capítulo 5

5. Testes e Resultados

Neste capítulo vão ser apresentados e analisados os testes realizados, com o objetivo de validar o funcionamento do sistema desenvolvido, bem como as funcionalidades implementadas. Os testes realizados foram escolhidos de forma a avaliar o desempenho da comunicação em Modbus, tanto nos modos RTU como TCP, e a integração com o protocolo MQTT para envio e receção de dados.

Os testes foram realizados em diferentes equipamentos, de modo a garantir a segurança e não comprometer sistemas de maior importância. Inicialmente, os testes de comunicação com Modbus RTU ocorreram em ambiente laboratorial, no Instituto Politécnico de Setúbal, como mostra a figura 37, utilizando um conversor de frequências, *SEW Eurodrive Movitrac LTE-B+*, devido à sua compatibilidade com o protocolo Modbus RTU e à facilidade de acesso ao equipamento. Após esta fase, testou-se o sistema em um BESS utilizando um inversor híbrido, *DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4*, de forma a avaliar o desempenho em condições mais próximas de uma aplicação prática.

Nos testes de comunicação com Modbus TCP utilizou-se o *software Modbus Slave 9.5.0*, simulando um dispositivo slave com capacidade de comunicação via Modbus TCP.

Com base nestes ensaios, vão ser apresentados os resultados obtidos, destacando a sua importância para os objetivos deste trabalho.

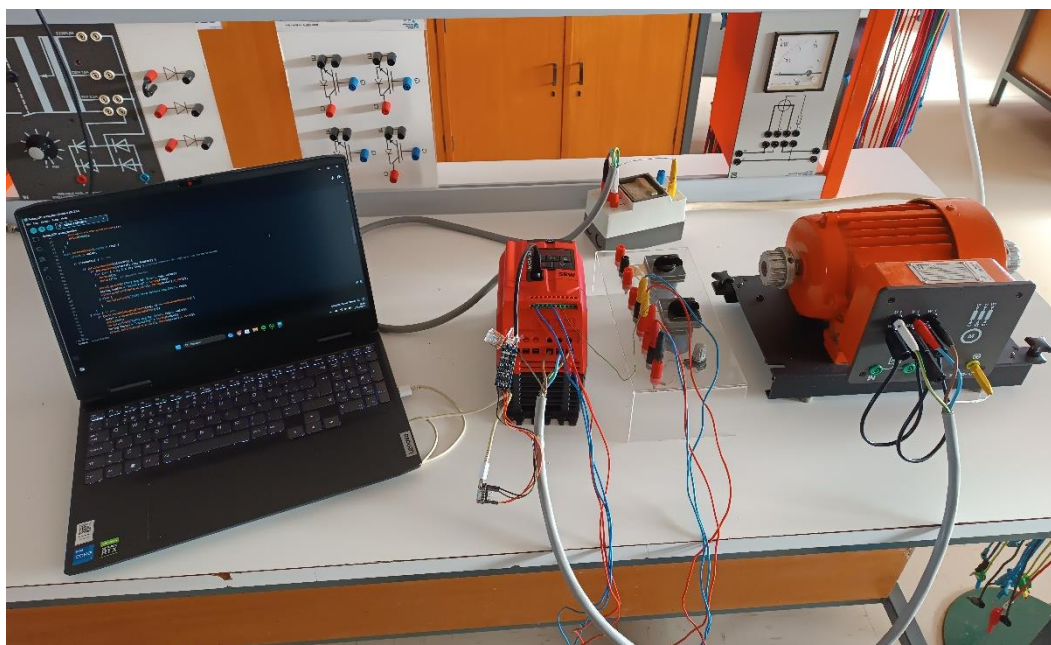


Figura 37 – Fotografia da montagem, utilizando o conversor de frequências, *SEW Eurodrive Movitrac LTE-B+*, acoplado a um motor assíncrono trifásico.

5.1. Teste - Leitura Modbus RTU

De forma a testar a leitura de dados via Modbus RTU foram realizados 2 ensaios.

➤ O primeiro ensaio foi realizado em ambiente laboratorial, utilizando um microcontrolador XIAO ESP32C3 como *master*, conectado a um conversor de frequências SEW Eurodrive Movitrac LTE-B+, atuando como *slave*.

O objetivo consistiu em estabelecer comunicação com o conversor de frequências e ler os registos interno pré-definidos via Modbus RTU.

A comunicação foi feita utilizando um conversor TTL → RS485, tal como descrito na secção 4 deste trabalho.

Neste ensaio foram lidos 2 registos Modbus:

Registo 7 - Velocidade atual do motor (variando entre -16384 e +16384, correspondendo a -100% e +100% da velocidade nominal do motor);

Registo 135 - Tensão nominal do motor (V);

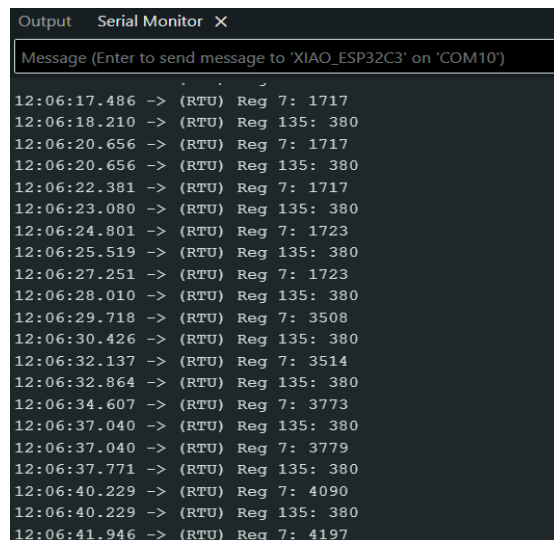


Figura 38 - Resultados obtidos da leitura via Modbus RTU, do registo 7 e 135.

O teste foi concluído com sucesso, permitindo visualizar em tempo real a velocidade de rotação do motor acoplado ao conversor, bem como a variação do seu valor em função da alteração da frequência de funcionamento, tal como se consegue visualizar na figura 38, onde o valor do Registo 7 varia entre “1717” e “4197”, correspondendo aproximadamente a 10% e 25% da velocidade nominal do motor, respetivamente. Foi também possível confirmar o valor da tensão nominal, “registo 135 = 380”, cujo valor corresponde à tensão nominal de 380 V, sendo que este tinha sido previamente programado diretamente no conversor.

➤ O segundo ensaio foi realizado com um BESS, utilizando novamente um microcontrolador XIAO ESP32C3 como *master*, desta vez conectado a um inversor híbrido *DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4*, atuando como *slave*. A comunicação foi feita utilizando um conversor TTL → RS485, tal como descrito na secção 4 deste trabalho.

Este teste tinha como objetivo ler 23 *Holding registers* Modbus, nomeadamente os registos 520–535, 541, 548, 549, 586–588 e 591. Estes valores foram seleccionados devido à sua importância no contexto da gestão de energia aplicado a um BESS, onde inclui parâmetros de natureza variável e parâmetros de configuração, com valores constantes.



Figura 39 - Fotografia de alguns resultados da leitura de dados via Modbus RTU em ambiente real.

O segundo ensaio foi também um sucesso, tendo sido possível alcançar a comunicação e visualizar todos os 23 registos. Ao contrário do primeiro ensaio, que teve um carácter exploratório, este segundo ensaio envolveu registos de maior importância a nível de controlo e gestão de sistemas de armazenamento de energia.

Entre os parâmetros seleccionados destacam-se, por exemplo, *Day PV Power*; *Day Grid Buy Power*; *Day Grid Sell Power*; *Battery Temperature*; *Battery Voltage*; *Battery SoC*, cuja monitorização é essencial para avaliar o estado operacional do sistema e suportar futuras estratégias, tanto a nível de monitorização como de controlo de BESS.

5.3. Teste - Escrita Modbus RTU

Neste teste de escrita via Modbus RTU, tal como no teste de leitura, foram realizados dois ensaios.

➤ O primeiro ensaio, foi realizado em ambiente laboratorial utilizando um microcontrolador XIAO ESP32C3 como *master*, conectado a um conversor de frequências SEW Eurodrive Movitrac LTE-B+, atuando como *slave*. A comunicação foi feita via conversor TTL → RS485, tal como descrito na secção 4 deste trabalho.

O teste consistiu na alteração do registo 138 (*Rotação nominal do motor*), alterando o seu valor de 3000 para 2900 rpm, comprovando assim a capacidade do microcontrolador de manipular registos via Modbus RTU.

```
12:17:59.639 -> (RTU) Reg 138: 3000
12:18:01.368 -> (RTU) Reg 138: 3000
12:18:03.084 -> (RTU) Reg 138: 3000
12:18:04.788 -> (RTU) Reg 138: 3000
12:18:08.232 -> (RTU) Reg 138: 3000
12:18:08.232 -> (RTU) Reg 138: 3000
12:18:36.158 -> ..
12:18:36.759 -> Wi-Fi ligado com IP: 10.14.158.63
12:18:36.759 -> Tentando conectar Modbus TCP...
12:18:41.789 -> Falha TCP, iniciando RTU...
12:18:43.778 -> Alteração do registo com sucesso!
12:18:45.804 -> A ligar ao MQTT... Ligado!
12:18:47.243 -> (RTU) Reg 138: 2900
12:18:48.998 -> (RTU) Reg 138: 2900
12:18:50.712 -> (RTU) Reg 138: 2900
12:18:52.400 -> (RTU) Reg 138: 2900
12:18:54.161 -> (RTU) Reg 138: 2900
```

Figura 41 - Resultados do teste de escrita, alterando o valor do registo 138 de 3000 para 2900 utilizando comunicação por Modbus RTU.

O ensaio conforme demonstrado na figura 41, foi realizado com sucesso. Apesar de se tratar de uma alteração de pequena relevância, este teste demonstra a capacidade do microcontrolador XIAO ESP32C3 em manipular registos via Modbus RTU, abrindo caminho para futuras aplicações de controlo em sistemas de maior importância.

➤ O segundo ensaio foi realizado com um BESS, utilizando novamente o microcontrolador XIAO ESP32C3 como *master*, desta vez conectado a um inversor híbrido DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4, atuando como *slave*.

A comunicação foi feita via conversor TTL → RS485, tal como descrito na secção 4 deste trabalho.

Devido à sensibilidade e ao risco associado à alteração de registos, foi escolhido um registo menos crítico para este ensaio, o registo 137 (*Smart Load On*), alterando o seu valor de 20% para 25%.

Embora não tenham sido recolhidas imagens no ensaio em ambiente real, foi realizado com sucesso. Este teste mostrou não só a capacidade do microcontrolador XIAO ESP32C3 em manipular registos via Modbus RTU, mas também abre a possibilidade de, em aplicações futuras, alterar registos críticos nas áreas de interesse. No contexto da gestão de energia, estes registos podem incluir parâmetros associados à carga e descarga das baterias (como *Max Battery Charge Current* e *Max Battery Discharge Current*), à configuração da operação com a rede (*Grid Mode* e *Grid Frequency Setting*), e à otimização energética (*Energy Management Mode*, *Smart Load ON/OFF Voltage* e *Grid Peak Shaving Power*). A escrita destes parâmetros possibilita a implementação de estratégias de operações dinâmicas, ajustando limites, modos e prioridades.

Esta capacidade permite um controlo mais avançado, permitindo ajustar o seu funcionamento em tempo real conforme as condições de operação e os objetivos energéticos definidos.

5.4. Teste - Escrita Modbus TCP

De forma a testar a escrita via Modbus TCP realizou-se um único ensaio em ambiente laboratorial, recorrendo novamente a um computador para validar a comunicação. Para tal, utilizou-se novamente o software *Modbus Slave 9.5.0* como dispositivo escravo, simulando um dispositivo com capacidade de comunicação via Modbus TCP.

O microcontrolador XIAO ESP32C3 atuou como *master Modbus TCP*, estabelecendo comunicação com o dispositivo escravo através de ligação Wi-Fi.

Neste ensaio de forma a validar esta capacidade de manipulação de registos, foi escolhido o registo 5 com o valor de 10 e alterar o valor desse registo para 50.

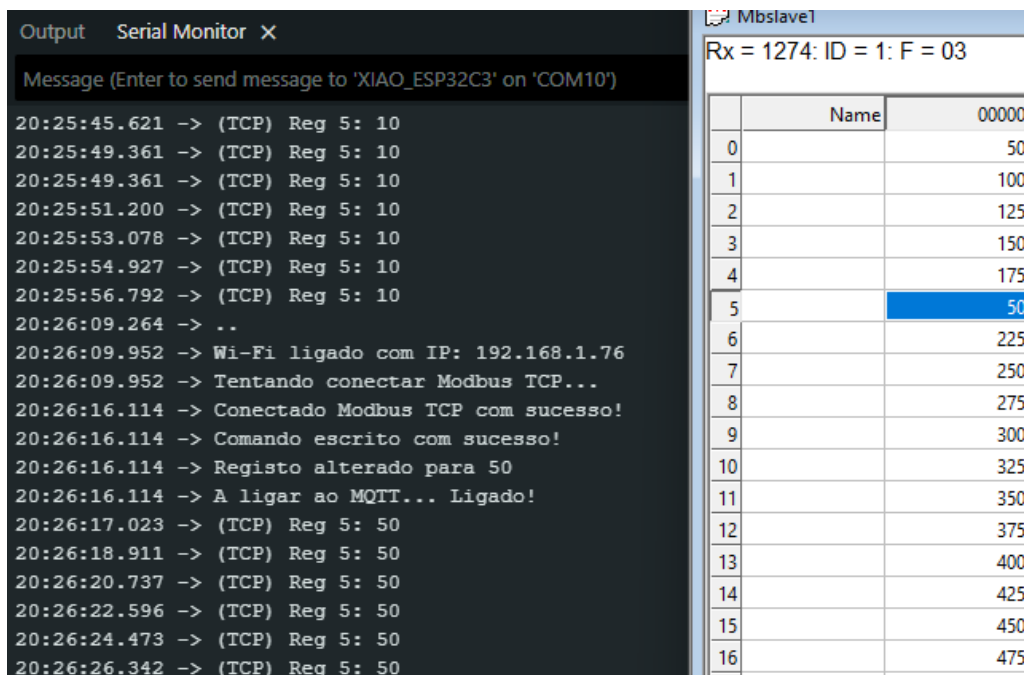


Figura 42 - Resultados do teste de escrita utilizando Modbus TCP e o software Modbus Slave.

Tal como ilustrado na figura 42, o ensaio foi concluído com sucesso. Apesar novamente de se tratar de uma alteração de pequena relevância, este teste demonstra a capacidade do microcontrolador XIAO ESP32C3 em manipular registos via Modbus TCP, abrindo caminho para futuras aplicações de controlo em sistemas de maior importância, que possuam comunicação por Modbus TCP.

5.5. Teste - Envio de dados recolhidos via Modbus RTU e Modbus TCP para *broker* MQTT

Com o objetivo de testar a capacidade de envio de dados recolhidos via Modbus RTU e Modbus TCP, foi desenvolvida uma funcionalidade neste microcontrolador que permite publicar os dados recolhidos num *broker* MQTT em tempo real, sendo que para estes ensaios, foi utilizado o *broker* MQTT HiveMQ Cloud.

Estes ensaios foram integrados complementariamente nos ensaios de leitura e escrita em Modbus RTU e Modbus TCP, realizados em todos os ambientes (laboratorial, com o inversor híbrido e via software *Modbus Slave*).

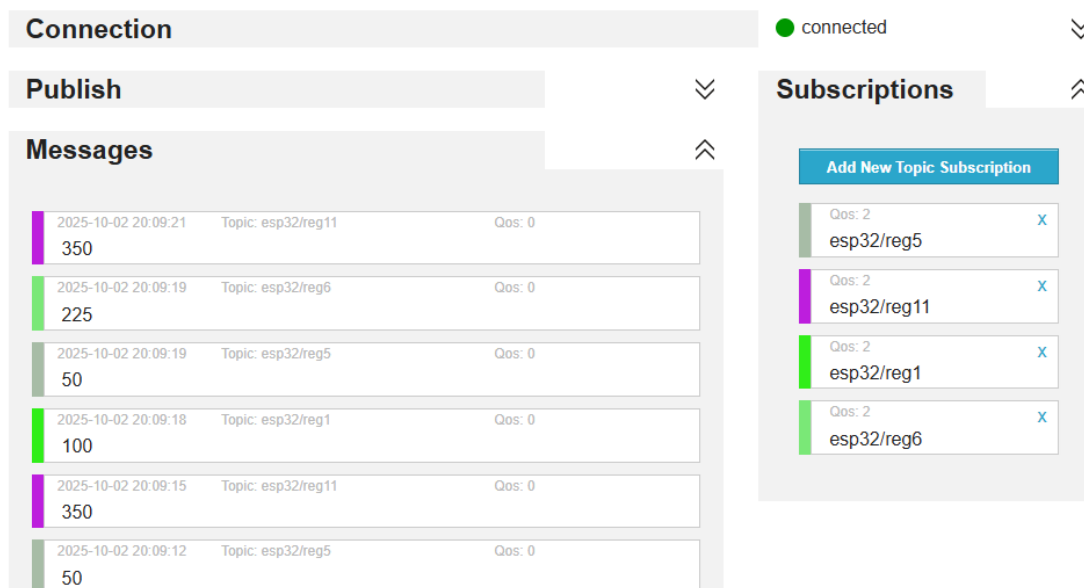


Figura 43 - Imagem dos resultados no broker MQTT, capturados por Modbus TCP.

A figura 43, sendo representativa dos restantes ensaios realizados, confirmou a capacidade destas funcionalidades de recolher dados via Modbus RTU e Modbus TCP e enviá-los com sucesso para um *broker* MQTT. Esta funcionalidade que teve sucesso em ambos os modos, abre a possibilidade de monitorizar remotamente sistemas como inversores híbridos em tempo real, e a sua integração com plataformas de controlo e monitorização como é o caso do *Home Assistant*.

5.6. Teste - Envio de comandos de escrita via broker MQTT para equipamento via Modbus TCP e Modbus RTU

Este teste, sendo um dos principais objetivos deste dispositivo, tem como objetivo validar a capacidade do microcontrolador XIAO ESP32C3 de receber comandos externos, publicados num *broker* MQTT, e traduzi-los em comandos de escrita em equipamentos escravos Modbus, tanto em modo RTU como em TCP.

Para a realização do ensaio, foram definidos tópicos MQTT específicos para receção de comandos de escrita. O formato da mensagem inclui o número do registo Modbus e o valor pretendido para escrita (reg,valor). O microcontrolador, atuando como cliente MQTT, subscreve esses tópicos e, ao receber os comandos, executa a escrita nos dispositivos Modbus correspondentes.

De forma a validar esta funcionalidade foram realizados dois ensaios:

- O primeiro ensaio para testar a função de escrita via Modbus RTU, utilizando novamente o conversor de frequências *SEW Eurodrive Movitrac LTE-B+* ligado ao ESP32C3 por intermédio do conversor TTL → RS485.

O comando de escrita enviado pelo broker MQTT tenta alterar o registo 138 (Rotação nominal do motor), ajustando o seu valor de 2900 rpm para 2950 rpm.

De notar que, devido à diferença na base de endereçamento dos registos Modbus (que pode começar em 0 ou em 1, consoante o dispositivo), o comando de escrita pode variar. Por exemplo, neste ensaio, o registo 138 no dispositivo corresponde ao registo 137 no *broker*.

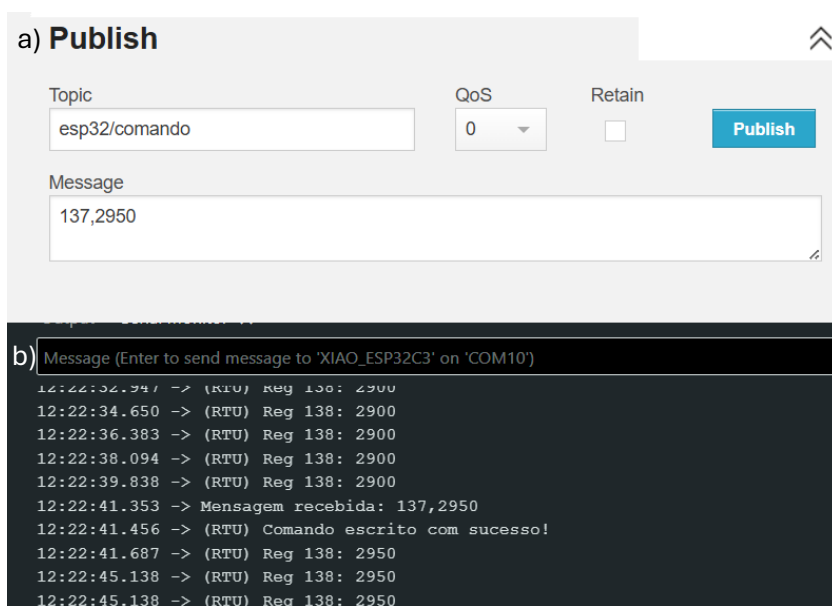


Figura 44 - a) Comando de escrita via MQTT para escrita em Modbus RTU. b) Resultado do comando de escrita.

- O Segundo ensaio de forma a testar a função de escrita via Modbus TCP, recorreu-se novamente ao software Modbus Slave 9.5.0, atuando como dispositivo escravo. O comando de escrita recebido via MQTT teve como destino o registo 5, alterando o valor previamente definido de 50 para 75.

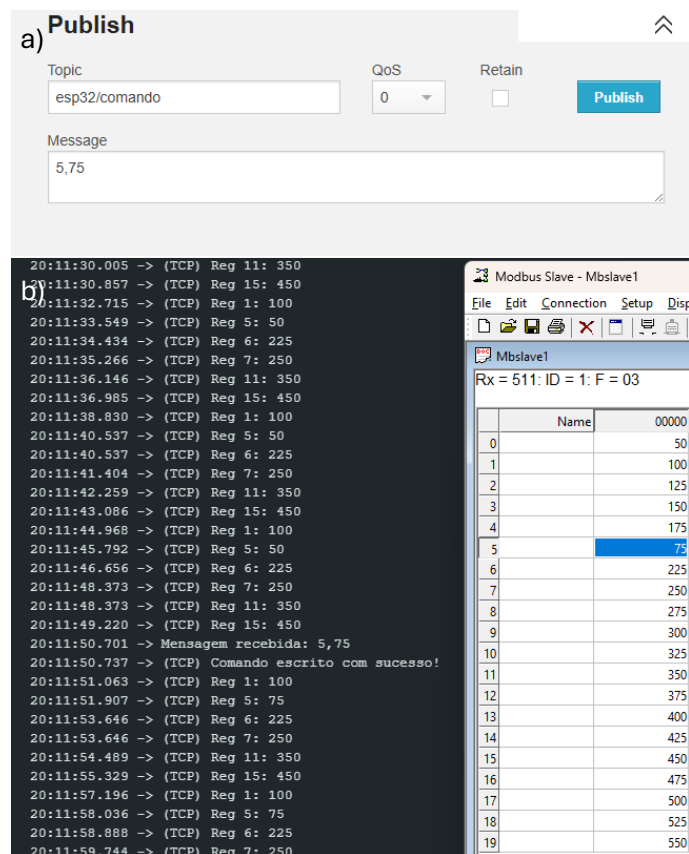


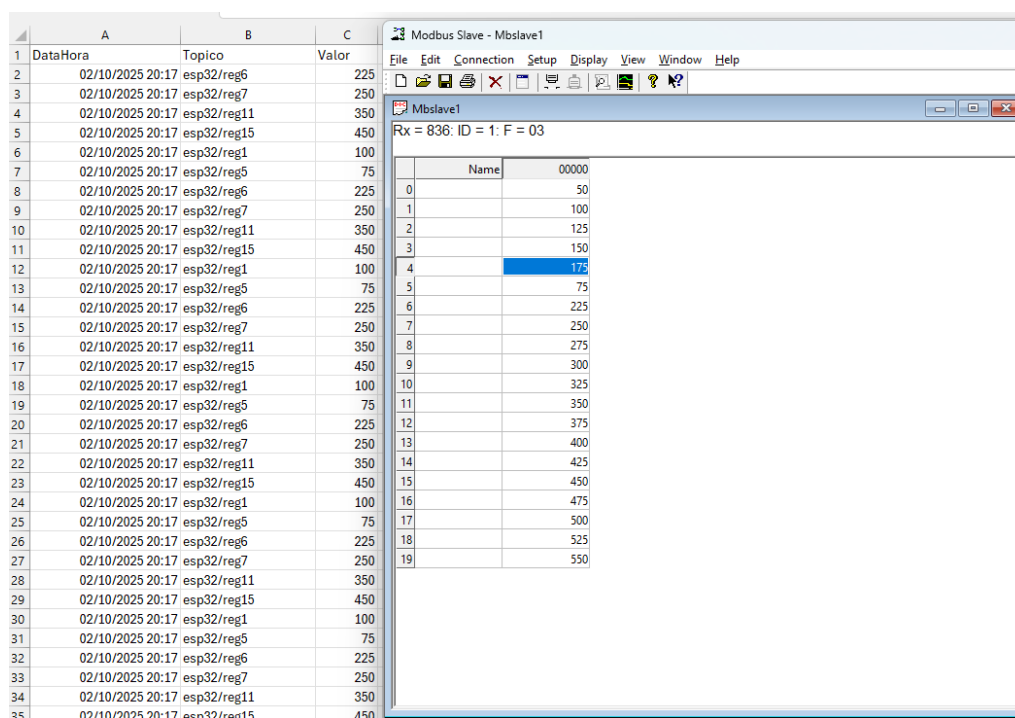
Figura 45 - a) Comando de escrita via MQTT para escrita em Modbus TCP. b) Resultado do comando de escrita.

O ensaio foi concluído com sucesso em ambos os casos, confirmando que o microcontrolador ESP32C3 consegue receber instruções remotas de escrita via MQTT e executá-las corretamente em dispositivos com comunicação Modbus, tanto Modbus TCP como Modbus RTU.

Este teste comprovou que o dispositivo desenvolvido possui a capacidade de controlo remoto, permitindo que comandos enviados através de um broker MQTT sejam interpretados e executados em praticamente tempo real. Esta funcionalidade quando aplicada a sistemas que não se encontram em localizações de fácil acesso, ou estejam em locais remotos é uma solução muito prática e acessível desde que possuam acesso à internet.

5.7. Teste - Download de dados de broker MQTT para CSV

De modo a testar o script em Python desenvolvido para exportar dados recebidos no *broker* MQTT para formato CSV, realizou-se vários ensaios em simultâneo com os testes de leitura e escrita em Modbus RTU e TCP, em ambiente laboratorial.



The screenshot displays the 'Modbus Slave - Mbslave1' application. On the left, a table lists data points with columns 'DataHora', 'Topico', and 'Valor'. On the right, a window titled 'Mbslave1' shows a register table with 'Name' and 'Value' columns. The register table shows values ranging from 50 to 550.

DataHora	Topico	Valor
02/10/2025 20:17	esp32/reg6	225
02/10/2025 20:17	esp32/reg7	250
02/10/2025 20:17	esp32/reg11	350
02/10/2025 20:17	esp32/reg15	450
02/10/2025 20:17	esp32/reg1	100
02/10/2025 20:17	esp32/reg5	75
02/10/2025 20:17	esp32/reg6	225
02/10/2025 20:17	esp32/reg7	250
02/10/2025 20:17	esp32/reg11	350
02/10/2025 20:17	esp32/reg15	450
02/10/2025 20:17	esp32/reg1	100
02/10/2025 20:17	esp32/reg5	75
02/10/2025 20:17	esp32/reg6	225
02/10/2025 20:17	esp32/reg7	250
02/10/2025 20:17	esp32/reg11	350
02/10/2025 20:17	esp32/reg15	450
02/10/2025 20:17	esp32/reg1	100
02/10/2025 20:17	esp32/reg5	75
02/10/2025 20:17	esp32/reg6	225
02/10/2025 20:17	esp32/reg7	250
02/10/2025 20:17	esp32/reg11	350
02/10/2025 20:17	esp32/reg15	450
02/10/2025 20:17	esp32/reg1	100
02/10/2025 20:17	esp32/reg5	75
02/10/2025 20:17	esp32/reg6	225
02/10/2025 20:17	esp32/reg7	250
02/10/2025 20:17	esp32/reg11	350
02/10/2025 20:17	esp32/reg15	450
02/10/2025 20:17	esp32/reg1	100
02/10/2025 20:17	esp32/reg5	75
02/10/2025 20:17	esp32/reg6	225
02/10/2025 20:17	esp32/reg7	250
02/10/2025 20:17	esp32/reg11	350
02/10/2025 20:17	esp32/reg15	450
02/10/2025 20:17	esp32/reg1	100
02/10/2025 20:17	esp32/reg5	75
02/10/2025 20:17	esp32/reg6	225
02/10/2025 20:17	esp32/reg7	250
02/10/2025 20:17	esp32/reg11	350
02/10/2025 20:17	esp32/reg15	450

Name	Value
0	50
1	100
2	125
3	150
4	175
5	200
6	225
7	250
8	275
9	300
10	325
11	350
12	375
13	400
14	425
15	450
16	475
17	500
18	525
19	550

Figura 46 - Resultados do teste de download de dados para CSV, durante o ensaio de leitura de dados no Modbus TCP.

O ensaio foi concluído com sucesso, demonstrando que este script desenvolvido, executa corretamente a funcionalidade de exportação automática para formato CSV, em ambos os modos de atuação.

Na figura 46, apresenta-se o histórico das leituras efetuadas de um ensaio realizado em Modbus TCP, cujos valores foram devidamente verificados e confirmados. Esta funcionalidade assegura o armazenamento de dados, possibilitando futuras análises e servindo como base para o desenvolvimento de algoritmos de detecção e prevenção de futuras avarias de equipamentos.

Em síntese, os ensaios realizados permitiram validar o bom funcionamento do sistema desenvolvido, confirmando a capacidade de comunicação Modbus, tanto nos modos RTU como TCP, e a integração com o protocolo MQTT para envio e receção de dados. A realização dos testes em ambiente laboratorial, nomeadamente com conversor de frequências *SEW Eurodrive Movitrac LTE-B+*, foi fundamental para o desenvolvimento do sistema e preparou a testagem posterior no BESS, com o inversor híbrido, permitindo avaliar o desempenho e a integração do sistema em condições próximas das reais.

Capítulo 6

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta uma reflexão global sobre os objetivos definidos e os resultados obtidos, destacando os principais contributos do trabalho desenvolvido. São também discutidas as principais limitações identificadas durante o processo de desenvolvimento e apresentadas sugestões para trabalhos futuros que poderão dar continuidade e aprofundar os temas aqui abordados.

6.1. Conclusão

Este trabalho demonstrou o sucesso no desenvolvimento de um sistema de baixo custo para monitorização e gestão de energia, capaz de comunicar através de dois protocolos de comunicação com dispositivos industriais. O gateway, baseado no microcontrolador ESP32, demonstrou ser uma solução, permitindo a comunicação através dos protocolos Modbus RTU e Modbus TCP/IP, bem como a transmissão de dados via MQTT para plataformas de monitorização e análise.

Os resultados dos testes obtidos confirmam que o sistema desenvolvido cumpre com os objetivos propostos para este trabalho, responde às principais limitações identificadas nos sistemas BESS, nomeadamente ao nível da compatibilidade entre equipamentos. A solução proposta fornece as ferramentas necessárias para a implementação de algoritmos e estratégias de gestão de energia, consoante o objetivos definidos para cada sistema.

Desta forma, o trabalho desenvolvido contribui para a melhoria da integração e monitorização de sistemas de armazenamento de energia, evidenciando o potencial de soluções baseadas em microcontroladores de baixo custo no contexto da transição energética.

6.2. Limitações do trabalho

Apesar dos resultados alcançados, o sistema desenvolvido apresenta algumas limitações que é importante reconhecer. Uma das principais limitações está relacionada com a pouca seletividade de dispositivo na testagem e escalabilidade do *gateway*, uma vez que o *gateway* foi testado num número restrito de dispositivos e com um relativo pequeno número de registos Modbus.

Outra limitação é relacionada com a segurança das comunicações, sendo que não foram introduzidos mecanismos de encriptação complexos, o que em contextos industriais é imprescindível.

Por fim, o sistema ainda não integra funcionalidades avançadas de gestão de energia ou algoritmos de otimização, sendo essa uma das áreas mais promissoras para trabalhos futuros.

6.3. Trabalhos futuros

Como continuação deste trabalho, existem várias vertentes que podem ser desenvolvidas de forma a expandir o potencial do sistema desenvolvido e aumentar a sua aplicabilidade.

Uma das vertentes mais relevantes é a aplicação do *gateway* com algoritmos avançados de gestão e otimização energética, utilizando os dados recolhidos para implementar estratégias de controlo a um equipamento em tempo real. Estes dados podem ser usados para melhorar o controlo e a gestão energética de sistemas, permitindo equilibrar as cargas, otimizar o uso da energia e prever o estado de carga e de saúde das baterias (SOC e SOH).

Outro ponto importante consiste na integração do *gateway* no auxílio da recolha e transmissão de dados aplicado a gémeos digitais (*digital twins*), permitindo simular o comportamento dos BESS em diferentes condições de operação. Esta abordagem possibilita testar estratégias de controlo, prever o impacto de alterações nos parâmetros sem necessidade de correr riscos nos equipamentos físicos.

Capítulo 7

7. Bibliografia

- [1] European Commission, "*State of the Union: Commission raises climate ambition and proposes 55% cut in emissions by 2030*", Press Release, Sep. 16, 2020.
- [2] Comissão Europeia, Plano para atingir a Meta Climática em 2030, COM(2020) 562 final, 2020.
- [3] "*Recorde de produção de renováveis abastece 71% do consumo de eletricidade em 2024*", REN. Disponível em: <https://www.ren.pt/pt-pt/media/noticias/recorde-de-producao-de-renovaveis-abastece-71-do-consumo-de-eletricidade-em-2024> (Acedido: 11 de fevereiro de 2025).
- [4] "*Renewable energy statistics – Statistics Explained*", Eurostat. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics&oldid=587845 (Acedido: 11 de fevereiro de 2025).
- [5] "Balanço diário de eletricidade — 3 Fevereiro 2025", REN – Redes Energéticas Nacionais Data Hub. Disponível em: <https://datahub.ren.pt/pt/eletricidade/balanco-diario/?date=2025-02-03> (Acedido: 11 de fevereiro de 2025)
- [6] "OMIE – Mercado de eletricidade", OMIE. Disponível em: <https://www.omie.es/pt/> (Acedido: 11 de novembro de 2025)
- [7] Observatório da Energia – ADENE, ESTUDO-ARMAZENAMENTO-DE-ENERGIA_Texto_Final_revisto-OBS-v2, 2021. Disponível em: https://www.observatoriodaenergia.pt/wp-content/uploads/2021/03/ESTUDO-ARMAZENAMENTO-DE-ENERGIA_Texto_Final_revisto-OBS-v2.pdf.
- [8] "*Conheça os poderes do hidrogénio*", EDP. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/os-superpoderes-do-hidrogenio> (Acedido: 14 de fevereiro de 2025).
- [9] I. Werneck, L. Borges, e R. Pereira, "*Supercapacitores: Revisão*", Research, Society and Development, vol. 11, Art. e226111537069, 2022, doi: 10.33448/rsd-v11i15.37069.
- [10] J. Conzen, S. Lakshmipathy, A. Kapahi, S. Kraft, e M. DiDomizio, "*Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards*", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 81, p. 104932, fev. 2023, doi: 10.1016/j.jlp.2022.104932.
- [11] F. Baldasso, "*Feasibility Analysis of a Battery Energy Storage System combined with a Utility-Scale Solar PV Power Plant in the Atacama Desert*", Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2021.
- [12] L. Zhao et al., "*Engineering of Sodium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges*", *Engineering*, vol. 24, pp. 172–183, mai. 2023, doi: 10.1016/j.eng.2021.08.032.
- [13] "*Galp e Powin instalam sistema de baterias de energia de grande escala em Portugal*", Galp. Disponível em: <https://www.galp.com/corp/pt/media/comunicados-de-imprensa/comunicado/id/1515/galp-e-powin-instalam-sistema-de-baterias-de-energia-de-grande-escala-em-portugal> (Acedido: 13 de fevereiro de 2025).
- [14] "*Um dos mais inovadores sistemas de baterias em redes isoladas*", Siemens. Disponível em: <https://press.siemens.com/pt/pt/comunicadodeimprensa/um-dos->

- mais-inovadores-sistemas-de-baterias-em-redes-isoladas (Acedido: 13 de outubro de 2025).
- [15] "Preço da eletricidade no mercado ibérico cai para um mínimo de 10 anos", Expresso. Disponível em: https://expresso.pt/economia/economia_energia/2024-03-08-Preco-da-eletricidade-no-mercado-iberico-cai-para-um-minimo-de-10-anos-3ac8b92e (Acedido: 14 de outubro de 2025).
- [16] J. L. Silva Neto, "*Desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Baterias para Veículos Elétricos*", Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2023.
- [17] S. A. C. Andrade, "*Battery Degradation Modelling for Off-Grid Energy System Sizing: Methodology and Case Study in the African Context*", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2023.
- [18] Neutro à Terra, nº 24, 2º semestre 2019. Revista Científica.
- [19] R. L. M. Gonçalves, "*Sistemas Híbridos de Armazenamento e Produção de Energia*", Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2023.
- [20] K. Wang, "*Study on Low Temperature Performance of Li Ion Battery*", OALib, vol. 04, n.º 11, pp. 1–12, 2017, doi: 10.4236/oalib.1104036.
- [21] M. Javadi, X. Liang, Y. Gong, e C. Y. Chung, "*Battery Energy Storage Technology in Renewable Energy Integration: a Review*", em *2022 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Halifax, NS, Canada: IEEE, set. 2022, pp. 435–440. doi: 10.1109/CCECE49351.2022.9918504.
- [22] H. Niu et al., "*Strategies toward the development of high-energy-density lithium batteries*", *J. Energy Storage*, vol. 88, p. 111666, mai. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111666.
- [23] N. V. Ferraz, "*Conceção de Sistema de Baixo Custo para Avaliação do Comportamento e Monitorização dos Estados de Carga e de Saúde de Baterias LiFePO₄*", Tese de Mestrado, Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação Industrial, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu, Portugal, 2013.
- [24] Z. Li, D. Zhang, e F. Yang, "*Developments of lithium-ion batteries and challenges of LiFePO₄ as one promising cathode material*", *J. Mater. Sci.*, vol. 44, n.º 10, pp. 2435–2443, mai. 2009, doi: 10.1007/s10853-009-3316-z.
- [25] R. Liu, "*Comparative analysis of ternary lithium batteries and lithium iron phosphate*", *E3S Web Conf.*, vol. 606, p. 05001, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202560605001.
- [26] "*Baterias de lítio íon - fosfato de lítio ferro (LiFePO₄) – LFP*", STA Eletrônica. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-lifepo4/baterias-de-litio-ion-fosfato-de-litio-ferro-lifepo4-lfp> (Acedido: 14 de agosto de 2025).
- [27] F. Gatta et al., "*Application of a LiFePO₄ Battery Energy Storage System to Primary Frequency Control: Simulations and Experimental Results*", *Energies*, vol. 9, n.º 11, p. 887, out. 2016, doi: 10.3390/en9110887.
- [28] K. K. Rasentharah, M. K. Hassan, M. A. Hoque, e A. Hajjo, "*Lithium Iron Phosphate (LiFePo₄) Batteries Health Prognosis via Plateau Identification During High-Rate Charging and Discharging*", em *2023 IEEE 13th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, Shah Alam, Malaysia: IEEE, out. 2023, pp. 182–187. doi: 10.1109/ICSET59111.2023.10295097.

- [29] "6.4V 3000mAh 19.2Wh LiFePO4 IFR18650 Pack", APP Battery. Disponível em: <https://www.appbattery.com/product/6-4v-3000mah-19-2wh-lifepo4-ifr18650-pack/> (Acedido: 14 de agosto de 2025).
- [30] "LiFePO4 Battery Discharge and Charge Curve", BRAVA. Disponível em: <https://www.bravabatteries.com/lifepo4-battery-discharge-and-charge-curve/> (Acedido: 14 de agosto de 2025).
- [31] Y. Su, "Comparative Analysis of Lithium Iron Phosphate Battery and Ternary Lithium Battery", *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2152, n.º 1, p. 012056, jan. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2152/1/012056.
- [32] L. Ma, "Studies of the Effects of Electrolyte Additives on the Reactivity between Charged Electrodes and Electrolytes in Li-Ion Batteries Using Accelerating Rate Calorimetry", Dissertação de Mestrado, 2014, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia
- [33] S. Evro, A. Ajumobi, D. Mayon, e O. S. Tomomewo, "Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies", *Future Batter.*, vol. 4, p. 100007, dez. 2024, doi: 10.1016/j.fub.2024.100007.
- [34] "153Ah Lithium NMC Battery", EV Lithium. Disponível em: <https://www.evlithium.com/nmc-battery/153ah-lithium-nmc-battery.html> (Acedido: 15 de agosto de 2025).
- [35] "6 Chemical Types Of Lithium-ion Batteries That You Can Choose From", GYCX Solar Smart Energy Solutions. [Online]. Disponível em: <https://gycxsolar.com/six-chemical-types-of-lithium-ion-batteries-choose/> (Acedido: 15 de agosto de 2025).
- [36] H. Lai, Y. Li, J. Wang, W. Li, X. Wu, e Z. Wen, "Design of solid-state sodium-ion batteries with high mass-loading cathode by porous-dense bilayer electrolyte", *J. Materiomics*, vol. 7, n.º 6, pp. 1352–1357, nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmat.2021.03.010.
- [37] "Sodium Ion Batteries Anode Pore Structure Studied by SAXS", Xenocs. Disponível em: <https://www.xenocs.com/how-can-the-smart-design-of-carbon-anodes-improve-the-performance-of-sodium-ion-batteries/> (Acedido: 17 de agosto de 2025).
- [38] "Are Sodium-ion Batteries the Future?", OGSolarStore. Disponível em: <https://ogsolarstore.com/blogs/news/are-sodium-ion-batteries-the-future> (Acedido: 17 de agosto de 2025).
- [39] T. Jiang e W. Chen, "Nickel hydrogen gas batteries: From aerospace to grid-scale energy storage applications", *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 30, p. 100859, dez. 2021, doi: 10.1016/j.coelec.2021.100859.
- [40] W. Chen, Y. Jin, J. Zhao, N. Liu, e Y. Cui, "Nickel-hydrogen batteries for large-scale energy storage", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 115, n.º 46, pp. 11694–11699, nov. 2018, doi: 10.1073/pnas.1809344115.
- [41] Ara Ake, "Stationary Battery Energy Storage Systems Analysis", Ara Ake, 2023. Disponível em: https://cdn.prod.website-files.com/670669f4e6068197aafd0771/6750b9c8bb7ac69536fd95d2_March-2023_Ara-Ake-Battery-Report_.pdf
- [42] C. Spring, "©2020-2023 EnerVenue, All rights reserved. Confidential and proprietary."
- [43] S. Chavhan, V. Mohale, e M. Kumbhar, "A Review of Recent Advancements and Challenges in Battery Energy Storage System (BESS)", em *2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and*

- Smart Systems (ISTEMS)*, Dehradun, India: IEEE, abr. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/istems60181.2024.10560221.
- [44] M. T. Lawder et al., "Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications", in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2317451
- [45] M. Stecca, L. Ramirez Elizondo, T. Batista Soeiro, P. Bauer, e P. Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems into Distribution Networks", *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/ojies.2020.2981832.
- [46] J. Zhang, «Energy Management System: The Engine for Sustainable Development and Resource Optimization», *Highlights Sci. Eng. Technol.*, vol. 76, pp. 618–624, dez. 2023, doi: 10.54097/cvfd9m83.
- [47] A. Nasir, "Implementation and Fabrication of Hybrid Solar Inverter", *Queue*, jan. 2023, doi: 10.57041/jaic.v1i1.888.
- [48] M. S. M. Nasir, M. Z. A. Ab-Kadir, M. A. M. Radzi, M. Izadi, e N. I. Ahmad, "Lightning performance analysis of a rooftop grid-connected solar photovoltaic without external lightning protection system," *PLOS ONE*, vol. 14, no. 7, p. e0219326, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0219326.
- [49] Deye Inverter, User Manual SUN-(29.9-50)K-SG01HP3-EU-BM4. Disponível em: https://www.deyeinverter.com/deyeinverter/2025/08/19/rand/9071/%E3%80%90b%E3%80%91manual_sun-29.9-50k-sg01hp3-eu-bm4_20250819_en.pdf (Acedido: 20 de agosto de 2025).
- [50] "Investidor híbrido Triphasic Deye 50kW SUN-50K-SG01HP3-UE-BM4", Suministros del Sol. Disponível em: <https://suministrodelsol.com/pt/investidores-por-marca/2114-investidor-hibrido-triphasic-deye-50kw-sun-50k-sg01hp3-ue-bm4.html> (Acedido: 18 de agosto de 2025).
- [51] "Modbus FAQ", Modbus Organization. Disponível em: <https://www.modbus.org/faq.php> (Acedido: 23 de junho de 2025).
- [52] E. L. da Costa, "Sistema supervisorio para dispositivos Modbus TCP/IP via aplicação web", Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2022.
- [53] "MODBUS in a Nutshell", Grid Connect. Disponível em: <https://www.gridconnect.com/blogs/news/modbus-in-a-nutshell> (Acedido: 23 de junho de 2025).
- [54] Modbus Organization, "MODBUS over Serial Line Specification & Implementation Guide", V1.02, 2006.
- [55] A. Shahzad et al., "Real Time MODBUS Transmissions and Cryptography Security Designs and Enhancements of Protocol Sensitive Information", *Symmetry*, vol. 7, n.º 3, pp. 1176–1210, jul. 2015, doi: 10.3390/sym7031176.
- [56] "Seed Studio XIAO Series SOM Datasheet", Seeed Studio. Disponível em: <https://files.seeedstudio.com/wiki/XIAO/Seeed-Studio-XIAO-Series-SOM-Datasheet.pdf> (Acedido: 24 de junho de 2025).
- [57] S. Bipasha Biswas e M. Tariq Iqbal, "Solar Water Pumping System Control Using a Low Cost ESP32 Microcontroller", em *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, Quebec, QC, Canada: IEEE, mai. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/CCECE.2018.8447749.

- [58] espressif/arduino-esp32, "C++", Espressif Systems, 23 de junho de 2025. Disponível em: <https://github.com/espressif/arduino-esp32> (Acedido: 24 de junho de 2025).
- [59] D. Walker, 4-20ma/ModbusMaster, C++, 2 de junho de 2025. Disponível em: <https://github.com/4-20ma/ModbusMaster> (Acedido: 24 de junho de 2025).
- [60] "Arduino Client for MQTT", PubSubClient. Disponível em: <https://pubsubclient.knolleary.net/api> (Acedido: 24 de junho de 2025).
- [61] N. A. Tuan, tuan-karma/ESP32_WiFiClientSecure, C++, 2 de maio de 2025. Disponível em: https://github.com/tuan-karma/ESP32_WiFiClientSecure (Acedido: 24 de junho de 2025).
- [62] "ESP-IDF Programming Guide - ESP32", ESP-IDF Programming Guide. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/> (Acedido: 24 de junho de 2025).
- [63] "Seeed Studio XIAO Series SOM Datasheet", Seeed Studio. Disponível em: <https://files.seeedstudio.com/wiki/XIAO/Seeed-Studio-XIAO-Series-SOM-Datasheet.pdf> (Acedido: 24 de junho de 2025).
- [64] "JZK 5 módulos TTL para RS485", Amazon.es - Computadores. Disponível em: <https://www.amazon.es/JZK-TTL-RS485-conversi%C3%B3n-autom%C3%A1tico/dp/B09VGJCKQ> (Acedido: 14 de agosto de 2025).
- [65] Z. Lin, D. Li, e Y. Zou, "Energy efficiency of lithium-ion batteries: Influential factors and long-term degradation", *J. Energy Storage*, vol. 74, p. 109386, dez. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.109386.
- [66] "3.7 V 180mAh High Rate Discharge Battery 601430-10C". Disponível em: <https://www.ufinebattery.com/products/3-7-v-180mah-high-rate-discharge-battery-601430-10c/> (Acedido: 15 de outubro de 2025).
- [67] Rezvanizani S. M., Liu Z., Chen Y., & Lee J., "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility" *Journal of Power Sources*, vol. 256, pp. 110-124, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.085.
- [68] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanes-Montero, e M. A. Guerrero-Martinez, "Battery equalization active methods", *J. Power Sources*, vol. 246, pp. 934–949, jan. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.026.
- [69] A. Safari, H. Sorouri, A. Oshnoei, e F. Blaabjerg, "A state-of-the-art review on battery cell balancing strategies", *Discov. Energy*, vol. 5, n.º 1, p. 31, out. 2025, doi: 10.1007/s43937-025-00086-4.
- [70] S. M. S. Danish, M. Ahmadi, M. S. S. Danish, P. Mandal, A. Yona, e T. Senjyu, "A coherent strategy for peak load shaving using energy storage systems", *J. Energy Storage*, vol. 32, p. 101823, dez. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101823.
- [71] N. G. Chatzigeorgiou, S. Theocharides, G. Makrides, e G. E. Georghiou, "A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector", *J. Energy Storage*, vol. 86, p. 111192, mai. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111192.
- [72] "batteryblokk". Disponível em: <https://www.batteryblokk.com/peak-shaving/> (Acedido: 14 de agosto de 2025).
- [73] Y. Liu e M. Peng, "Research on peak load shifting for hybrid energy system with wind power and energy storage based on situation awareness", *J. Energy Storage*, vol. 82, p. 110472, mar. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.110472.

- [74]"*Load shifting solar - How to maximise your solar savings*". Disponível em: <https://www.gosunny.com.au/blog/maximise-solar-savings-load-shifting> (Acedido: 14 de agosto de 2025).
- [75]M. H. Hashemi, M. Moradlou, and M. Bigdeli, "*Simultaneous Demand Side Management of Residential, Commercial and Industrial Loads in a Smart Grid Using PSO Algorithm*", 2016 31st Power System Conference (PSC), Tehran, Iran, 2016.

Capítulo 8

8. Anexos

Anexo A - Exemplo de Código para guardar dados de *broker* MQTT para CSV

```
import csv
import time
import paho.mqtt.client as mqtt

#MQTT
broker = "_____.eu.hivemq.cloud"
port = 8883
username = "####"
password = "####"

csv_file = "Teste_TCP.csv"

# Criação do ficheiro CSV com cabeçalho
with open(csv_file, "w", newline="") as file:
    writer = csv.writer(file, delimiter=',')
    writer.writerow(["DataHora", "Topico", "Valor"])

# Função chamada quando o cliente se liga com sucesso ao broker
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc == 0: # return code 0 é sucesso
        print("Ligado ao broker MQTT!")
        client.subscribe("#") # "#" subscreve todos os tópicos
    else:
        print("Erro na ligação:", rc)

# Função chamada sempre que chega uma nova mensagem
def on_message(client, userdata, msg):
    mensagem = msg.payload.decode() # Converte bytes para texto
    datahora = time.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S') # Data e hora atual
    topico = msg.topic # Tópico da mensagem

    # Guardar os dados no CSV
    with open(csv_file, "a", newline="") as file:
        writer = csv.writer(file, delimiter=',')
        writer.writerow([datahora, topico, mensagem])

    print(f"[{datahora}] {topico} : {mensagem}")

# Criação e configuração do cliente MQTT
client = mqtt.Client()
client.username_pw_set(username, password)
client.tls_set() # ligação segura(TLS), é obrigatorio para se ligar á porta 8883
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message

# Liga ao broker e entra em loop para receber mensagens continuamente
client.connect(broker, port)
client.loop_forever()
```