

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

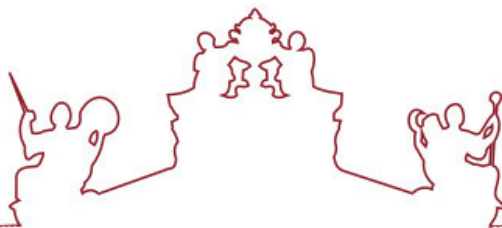
Dissertação

**Estudo da Aplicação de Supercondensadores em Irrigação
Solar Fotovoltaica de Alta Potência**

Márcia Alexandra Rodrigues Horta

Orientador(es) | Luís Fialho

Évora 2024



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

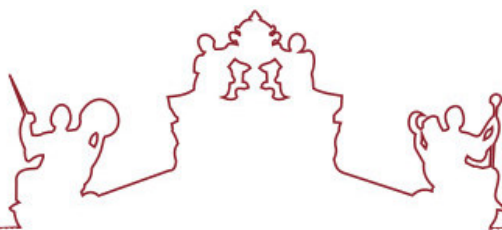
Dissertação

**Estudo da Aplicação de Supercondensadores em Irrigação
Solar Fotovoltaica de Alta Potência**

Márcia Alexandra Rodrigues Horta

Orientador(es) | Luís Fialho

Évora 2024



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Paulo Canhoto (Universidade de Évora)

Vogais | José Almeida Silva (Universidade de Évora) (Arguente)
Luís Fialho (Universidade de Évora) (Orientador)

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostava de agradecer à minha família, especialmente aos meus pais, António e Maria João, à minha irmã Camila, pelo apoio incondicional e por todos os esforços que fizeram por mim para chegar até onde cheguei hoje e por me tornarem na pessoa que sou hoje. Agradeço também aos meus avós maternos e tios por todo o apoio e encorajamento prestado ao longo desta jornada pela Universidade. Aos meus familiares que infelizmente já partiram, tenho a certeza de que também estarão muito orgulhosos de mim.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que de uma forma ou de outra cruzaram o seu percurso comigo ao longo desta jornada pela Universidade ajudando a viver cada momento de forma única e intensa. Ao Danio, por todo o apoio, pela compreensão e por todo o carinho prestado ao longo desta longa jornada. À Inês e à Liliana que me acompanharam na fase final de elaboração desta dissertação.

À minha colega, Ana Catarina Foles, pela ajuda incansável, por todos conhecimentos transmitidos e pelas experiências partilhadas. Deixar também um agradecimento aos meus colegas de trabalho, por me terem ajudado no processo de instalação deste supercondensador na microrrede da Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora. Agradecer também ao meu orientador, professor Doutor Luís Fialho pelo seu acompanhamento, disponibilidade e apoio prestado ao longo desta etapa.

Não poderia deixar de agradecer à Cátedra Energias Renováveis da Universidade de Évora por me ter oferecido todas as condições necessárias para o desenvolvimento do meu projeto de dissertação.

Por último, não podia deixar de dedicar o meu projeto de dissertação à minha querida e adorada Inês que tão cedo partiu e sempre me inspirou para fazer mais e melhor, acreditando sempre que um dia conseguiria chegar tão longe quanto ela chegou. Tenho a certeza que estará muito orgulhosa onde quer que esteja neste momento.



“Para conseguir a amizade de uma pessoa digna é preciso desenvolvermos em nós mesmos as qualidades que naquela admiramos.”

Sócrates

Resumo

A bombagem fotovoltaica com recurso à energia solar fotovoltaica para pequenas a grandes potências é uma técnica que está a ser cada vez mais utilizada no mercado agrícola, uma vez que pretende levar à substituição do gerador a diesel comum, devido às emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Uma vez que o nosso país dispõe de um potencial elevado de recurso solar, esta técnica acaba por apresentar uma grande viabilidade. Um dos obstáculos da aplicação desta tecnologia prende-se com passagem de nuvens sobre o campo fotovoltaico, causando variações rápidas de potência nos equipamentos.

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo o estudo de uma tecnologia de armazenamento, que pode apresentar-se como solução a este obstáculo - aplicação de supercondensadores na bombagem fotovoltaica - uma vez que estes têm uma elevada capacidade de armazenamento e poderão minimizar os efeitos causados pela passagem de nuvens e respetivas rampas de potência fotovoltaica disponível nesses momentos.

Palavras-Chave: Energia Solar, Fotovoltaico, Irrigação, Supercondensadores, Bombagem

Study of the Application of Supercapacitors in High Power Solar Photovoltaic Irrigation

Abstract

Photovoltaic pumping using solar photovoltaic energy for small to large powers is a technique that is being increasingly used in the agricultural market, as it aims to lead to the replacement of the common diesel generator, due to the emissions of greenhouse gases into the atmosphere. Since Portugal has a high potential of solar resource, this technique has great viability. The only problem of this technique is related to the passing of clouds over the photovoltaic area, causing serious problems in the equipment.

This master's thesis proposes to solve the problem of cloud passing in the photovoltaic area, through the study of the application of supercapacitors in photovoltaic pumping, since they have a high storage capacity and can mitigate the effects of cloud passing, decreasing the ramps of photovoltaic power available at the time.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic, Irrigation, Supercapacitors, Pumping

Índice

Agradecimentos	1
Resumo	2
Abstract	3
Índice de Figuras	6
Índice de Tabelas.....	9
Nomenclatura	10
Abreviaturas	11
1. Objetivos e Estrutura da Dissertação.....	13
1.1 Objetivos	13
1.2 Estrutura da Dissertação.....	13
2. Introdução e Estado da Arte	15
2.1 Enquadramento	15
2.2 História da Bombagem Fotovoltaica	15
2.3 Relação com a Bombagem Fotovoltaica de Alta Potência.....	18
2.4 Estado da Arte do Controlo de Rampas de Potência Fotovoltaica	19
2.5 Tecnologias de Armazenamento de Energia	23
2.6 Princípio de Funcionamento do Campo Elétrico	26
2.7 Condensadores	26
2.8 Supercondensadores	28
2.8.1 Tipos de Supercondensadores	28
2.9 Comparação das Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	33
2.9.1 Energia Específica e Potência Específica.....	34
2.9.2 Custos das tecnologias de armazenamento de eletricidade	35
3. Instalação do Supercondensador Híbrido na CERUÉ.....	39
3.1 Especificações Técnicas do Supercondensador e Inversores	41
3.1.1 Supercondensador Híbrido.....	41
3.1.2 Inversor Bidirecional.....	44
3.2 Equipamentos e instrumentos utilizados na instalação do Supercondensador	49
3.3 Instalação do Supercondensador e dos Inversores na microrrede	51
3.4 Custos Totais da Instalação	55
4. O <i>Software</i> de Controlo.....	61
4.1 Comunicação com Protocolo Modbus TCP/IP	61
4.2 Introdução ao <i>LabVIEW</i>	61

4.2.1 Ferramentas do <i>LabVIEW</i>	62
5. Comissionamento da Instalação na Microrrede	65
5.1 Desenvolvimento do <i>Software</i> de Comunicação em <i>LabVIEW</i>	65
5.2 Processo de Comunicação com os Equipamentos Instalados.....	66
5.3 Configuração dos Inversores	76
6. Discussão e Apresentação dos Resultados dos Ensaios do Supercondensador na Microrrede	83
6.1 Eficiências de Carga e Descarga dos Inversores	87
6.2 Capacidades e Curvas de Carga e Descarga do Supercondensador	89
6.3 Eficiência Energética do Supercondensador	92
6.4 Análise dos Tempos de Resposta para as Potências Ensaçadas.....	93
6.4 Discussão dos Resultados obtidos.....	95
7. Conclusões	99
8. Trabalhos Futuros.....	101
Referências	102
Anexo	111

Índice de Figuras

Figura 1 – Levadas no Arquipélago da Madeira (Box).....	16
Figura 2 – a) Rega por Aspersão (Chamsa, Rega por aspersão, s.d.) e b) Rega por Gotejamento (Chamsa, Irrigação por Gotejamento , s.d.)	16
Figura 3 – Esquema Típico de um Sistema de Bombagem Fotovoltaica (Almeida, et al.).....	17
Figura 4 – Algoritmo de Detecção da Passagem de Nuvens (Francisco Jesús Guillén-Arenas, 2022)	18
Figura 5 – Exemplo de uma influência típica da passagem de nuvens na irradiância e na frequência de funcionamento do conversor de frequência (Almeida, et al.).....	19
Figura 6 – Funcionamento do algoritmo de controlo PID (Concepts, s.d.).....	20
Figura 7 – Autómatos instalados nos demonstradores reais construídos ao abrigo do projeto SolaQua (Universidade Politécnica de Madrid, s.d.)	21
Figura 8 – Representação do esquema de ligação da bateria de fluxo redox de Vanádio à microrrede da Cátedra Energias Renováveis da UÉvora e dos seus fluxos de energia.....	22
Figura 9 – Sistema de Bombagem Fotovoltaica da Associação de Beneficiários do Roxo (O Instalador, 2020)	23
Figura 10 – Tipos de tecnologias para Armazenamento de Energia (Commission, 2011)	25
Figura 11 – Sentido das linhas do campo elétrico.....	26
Figura 12 - Constituição e Funcionamento de um Condensador (ELPROCUS, s.d.).....	27
Figura 13 - a) Condensador Cerâmico e b) Condensador Eletrolítico (KEMET, 2019)	27
Figura 14 - Constituição e Funcionamento de um Supercondensador (Correia, 2015)	28
Figura 15 - Estrutura eletroquímica dos tipos de Supercondensadores (Subasinghage, Gunawardane, Padmawansa, Kularatna, & Moradian, 2022)	29
Figura 16 - Tipos de Supercondensadores: a) EDLC; b) Híbrido; c) Pseudocondensador (Thirumurugan, et al., 2023)	31
Figura 17 - Enquadramento das Tecnologias de Armazenamento de Energia de acordo com o seu campo de aplicação, adaptado de (Lopes, 2015).....	34
Figura 18 - Posicionamento das Tecnologias de Armazenamento de Energia relativamente à sua Energia e Potência Específica, adaptado de (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015).....	35
Figura 19 - Custos de Energia Vs. Custos de Potência, adaptado de (Izzati, Ariffin, Zain, Nordin, & Saad, 2021)	36
Figura 20 - a) Bateria de sais fundidos de Sódio Níquel (7,6 kWh); b) Sistema de Geração Fotovoltaica com 4 tecnologias e seguimento solar a um eixo, ligado à microrrede (80 kWp); c) Supercondensadores Híbridos de base de Carbono; d) Bateria de 2ª vida de iões Lítio (18 kWh); e) Bateria de 2ª vida de iões Lítio modulares (6 kWh); f) Bateria de fluxo redox de Vanádio 60 kWh; g) Bateria de iões Lítio (9,8 kWh).....	39
Figura 21 - Circuito de Bombagem real construído na CERUÉ	40
Figura 22 - Esquema Simplificado das Tecnologias Instaladas na SolGrid da CERUÉ	40
Figura 23 - Esquema ilustrativo da aplicação dos Supercondensadores Híbridos na Bombagem Fotovoltaica.....	41
Figura 24 - a) Vista de topo do Supercondensador; b) Vista Frontal do Supercondensador.....	42
Figura 25 - a) Vista Frontal do Fusível Manual; b) Aparência Interior do Fusível Manual.....	43
Figura 26 - a) Primeiro contacto com o Supercondensador; b) Primeiras Leituras feitas com Voltímetro	43
Figura 27 - Fusível Manual Inserido no Supercondensador.....	44
Figura 28 - a) Vista Frontal de um dos inversores; b) Vista Lateral de um dos inversores utilizados na instalação.....	45

Figura 29 - Painel Principal do Inversor Carregador Quattro 48/10000/140-100 da Victron Energy	46
Figura 30 - Etapas de Carga de uma Bateria, esquema adaptado de (AutoSolar, s.d.)	47
Figura 31 - Variação dos parâmetros de tensão, corrente, temperatura, capacidades de carga e descarga para o Supercondensador Híbrido de base Carbono. Adaptado de (Kurt Energy, s.d.)	48
Figura 32 - Equipamentos de aquisição, instrumentação e comunicação utilizados na instalação do Supercondensador, no circuito de corrente contínua e alternada. a) Datalogger Keysight 34972A; b) Interruptor de desconexão do Supercondensador; c) Resistência de precisão; d) Cerbo GX da Victron Energy	50
Figura 33 - a) Tratamento da Estrutura Metálica; b) Disposição dos Equipamentos na Estrutura	51
Figura 34 - a) 1ª Fase de Disposição dos Fusíveis no Quadro Elétrico; b) 2ª Fase de Disposição dos Fusíveis nos porta-fusíveis e Terminais de Olhal no Quadro Elétrico; c) Ligação dos cabos elétricos na platina isolante da caixa de transição; d) Finalização da instalação da caixa de transição.	52
Figura 35 - a) Ligação de Cabos a cada um dos inversores; b) Ligação dos Cabos do quadro elétrico até ao Supercondensador	53
Figura 36 - Instalação de sensores. a) Sensor instalado na resistência de precisão; b) Multiplexer do datalogger da Keysight (Keysight); c) Sensor de Tensão instalado em cada inversor; d) Termopar instalado para medir a temperatura ambiente em volta da estrutura.....	54
Figura 37 - Custos de Energia Vs. Custos de Potência considerando os Supercondensadores Híbridos de base Carbono, adaptado de (Izzati, Ariffin, Zain, Nordin, & Saad, 2021)	58
Figura 38 - Peak Shaving, adaptado de (EVESCO, s.d.)	59
Figura 39 - Funcionamento da Relação de Comunicação Mestre-Escravo, adaptado de (Pinto, 2021)	61
Figura 40 - a) Diagrama de Blocos; b) Painel Frontal	62
Figura 41 - Ferramentas Disponíveis no diagrama de blocos e painel frontal	63
Figura 42 - Esquema Equivalente à da configuração de comunicação da instalação.....	66
Figura 43 - Lista de endereços fornecida pelo fabricante da Victron Energy, disponível em (Energy V. , CCGX Modbus TCP Register List).....	67
Figura 44 - Exemplo comando de escrita.....	68
Figura 45 – Exemplo de um comando de leitura.....	69
Figura 46 - Comando de Carga desenvolvido através de LabVIEW	71
Figura 47 - Comando de Descarga desenvolvido através de LabVIEW	72
Figura 48 - Esquema Equivalente ao princípio básico de funcionamento do software de controlo do sistema EES.....	73
Figura 49 - Interface Gráfica de controlo criada para o Supercondensador Híbrido de base Carbono.....	74
Figura 50 - Interface MK3 - USB. Adaptado de (Victron Energy, s.d.)	76
Figura 51 - Esquema de ligação para programação dos inversores.....	76
Figura 52 - Atualização de Firmware na aplicação VictronConnect, adaptado de (Victron Energy, s.d.)	77
Figura 53 - Página Inicial da aplicação da VictronConnect	77
Figura 54 - Página Inicial da aplicação VE Configure.....	78
Figura 55 - Menu da aplicação VE Configure: a) Menu "Grid"	79
Figura 56 - Menu da aplicação VE Configure: b) Menu "Inverter"	80
Figura 57 - Menu da aplicação VE Configure: c) Menu "Charge"	81

Figura 58 - Definição e Configuração do Assistente Virtual na aplicação do VE Configure. a) Sustain Voltage; b) Battery Capacity; c) Dynamic cut-off; d) Restart offset; e) Battery System; f) PV Inverters.....	82
Figura 59 - Diagrama Esquemático das diferentes potências ensaiadas considerando os estados de carga e descarga do Supercondensador	84
Figura 60 - Eficiência média de Carga dos inversores para os diferentes níveis de potência ensaiadas	88
Figura 61 - Eficiência média de Descarga dos inversores para os diferentes níveis de potência ensaiadas	88
Figura 62 - Curva de Tensão DC em função do tempo para o estado de descarga do Supercondensador	90
Figura 63 - Curva de Corrente DC em função do tempo para o estado de descarga do supercondensador	90
Figura 64 - Curva de Tensão DC em função do tempo para o estado de carga do Supercondensador	91
Figura 65 - Curva de Corrente DC em função do tempo para o estado de carga do supercondensador	91
Figura 66 - Tempo de resposta médio para atingir a potência de carga alvo dos Inversores	93
Figura 67 - Tempo de resposta médio para a corrente de carga objetivo ao Supercondensador.	94
Figura 68 - Tempo de resposta médio para atingir a potência de descarga alvo dos Inversores.	94
Figura 69 - Tempo de resposta médio para a corrente de descarga objetivo do Supercondensador	95

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Caracterização dos conceitos associados às Tecnologias de Armazenamento de Energia	24
Tabela 2 - Comparação das Características de um Supercondensador Elétrico de Dupla Camada (EDLC) e um Pseudocondensador (Eknath,, Chavan, & Pandey;, 2020)	30
Tabela 3 - Características dos tipos de Supercondensadores, adaptado de (Subasinghage, Gunawardane, Padmawansa, Kularatna, & Moradian, 2022) e (Eknath,, Chavan, & Pandey;, 2020)	31
Tabela 4 - Vantagens da utilização de Supercondensadores Híbridos e Baterias de Lítio. Adaptado de (What are the advantages and disadvantages of supercapacitors compared to batteries?, s.d.).....	32
Tabela 5 - Vantagens da utilização de Supercondensadores Híbridos e Baterias de Lítio (continuação). Adaptado de (What are the advantages and disadvantages of supercapacitors compared to batteries?, s.d.).....	32
Tabela 6 - Desvantagens da utilização de Supercondensadores Híbridos e Baterias de Lítio. Adaptado de (What are the advantages and disadvantages of supercapacitors compared to batteries?, s.d.).....	33
Tabela 7 - Principais Características das Tecnologias de Armazenamento de Energia, adaptado de (Costa, 2019), (Lopes, 2015) e (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015).....	37
Tabela 8 - Especificações Técnicas do Supercondensador de modelo de célula 18650, 22S 36P de 792 células instalado na CERUÉ.....	42
Tabela 9 - Especificações Técnicas do inversor Quattro 48/10000/140-100 da Victron Energy (Energy V. , Inversor/Carregador: Quattro, s.d.).....	45
Tabela 10 - Lista de Equipamentos e Materiais Necessários para a instalação do Supercondensador	55
Tabela 11 - Lista de Equipamentos e Materiais Necessários para a instalação do Supercondensador (continuação)	56
Tabela 12 – Descrição das leituras do starting adress nº31	69
Tabela 13 – Starting Adress’s para comandos de carga e descarga	70
Tabela 14 - Cálculo dos parâmetros utilizados no ensaio da C-rate de 1C	85
Tabela 15 - Potências AC e DC utilizadas nos ensaios de obtenção das curvas de carga do Supercondensador	86
Tabela 16 – Resultados das Eficiências Médias de Carga e Descarga obtidas nos ensaios aos Inversores	87
Tabela 17 - Capacidades Médias de Carga e Descarga do Supercondensador e Desvio Padrão associado	89
Tabela 18 - Desvios-Padrão obtidos para os parâmetros da Corrente e Tensão de acordo com os estados de carga e descarga do Supercondensador	92
Tabela 19 - Eficiência Média de Energia para cada C-Rate ensaiada.....	92
Tabela 20 - Eficiência Média de Energia do Supercondensador.....	92

Nomenclatura

P_{DC}	Potência DC do sistema	[W]
P_{AC}	Potência AC do sistema	[W]
I_{DC}	Corrente DC do sistema	[A]
V_{DC}	Tensão DC do sistema	[V]
t	Tempo	[s]
$\eta_{Descarga (DC-AC)}$	Eficiência do estado de descarga dos inversores	[-]
$\eta_{Carga (AC-DC)}$	Eficiência do estado de carga dos inversores	[-]
E_{AC}	Energia AC do sistema	[Wh]
E_{DC}	Energia DC do sistema	[Wh]
C_C	Capacidade de Carga	[Wh]
C_D	Capacidade de Descarga	[Wh]
$\eta_{Energia}$	Eficiência de Energia	[-]

Abreviaturas

APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
PV	Energia Solar Fotovoltaica
DC	Corrente Contínua
AC	Corrente Alternada
EES	Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica
CERUÉ	Cátedra Energias Renováveis da Universidade de Évora
SolGrid	Rede experimental de Baterias e Sistemas Fotovoltaicos
CAES	Armazenamento de Ar Comprimido
PHS	Aproveitamento Hídrico Reversível
EDLC	Supercondensadores Elétricos de Dupla Camada
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
VRFB	Bateria de Fluxo Redox de Vanádio
IP	Protocolo de Internet
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
UÉVORA	Universidade de Évora
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i> (Despesas de Capital)
OPEX	<i>Operational Expenditures</i> (Despesas Operacionais)

1. Objetivos e Estrutura da Dissertação.

1.1 Objetivos

O interesse pelo tópico da bombagem fotovoltaica tem vindo a aumentar nos últimos tempos e, por isso, este projeto de dissertação pretende abordar as questões técnicas que se encontram relacionadas com esta tecnologia, controlo e operação das bombas. Neste trabalho será feito o comissionamento de um novo sistema de supercondensadores híbridos integrados na microrrede experimental existente na CERUÉ (Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora).

Os principais objetivos deste trabalho serão:

- O *procurement* e aquisição do sistema de Supercondensadores;
- A sua instalação e configuração inicial;
- Comissionamento e testes iniciais;
- Desenvolvimento de programação em *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)* implementando:
 - Possibilidade de Carga/Descarga automatizada do Supercondensador;
 - Possibilidade de Carga/Descarga Cíclica (n ciclos) a potência constante;
 - Interface de utilizador, com todas as variáveis de controlo e exibição de gráficos em tempo real;
 - *Datalogging* automático em ficheiro estruturado com resultados dos ensaios realizados;
 - Controlo e exibição de alarmes, *flags*, temperaturas de operação, dos sistemas em teste em tempo real;
 - Possibilidade de execução de ensaios de caracterização dos sistemas;
 - Controlo e aquisição de comunicação com todos os sistemas e equipamentos instalados, em tempo real;
- Estudo da tecnologia de Supercondensadores Híbridos de base de Carbono, comparativamente às tecnologias de armazenamento existentes, com análise dos resultados experimentais dos testes iniciais.
- Realização do controlo e gestão de rampas de potência fotovoltaica causadas pela passagem das nuvens sobre o campo solar controlando a duração de cada ciclo quando aplicado posteriormente o tempo de passagem de nuvens.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida por capítulos. No presente capítulo são apresentados os objetivos que conduziram à elaboração desta dissertação.

No capítulo 2, de carácter introdutório é feita uma abordagem sobre a história e a evolução da bombagem fotovoltaica, de que forma é que esta se relaciona com a bombagem fotovoltaica de alta potência, naquilo em que esta tecnologia se baseia, quais os principais desafios no mundo atual e aquilo que já existe feito atualmente no mundo relativamente a este tópico.

É ainda feita uma abordagem acerca da evolução das tecnologias de armazenamento de energia, das suas possíveis aplicações e do seu custo financeiro.

No capítulo 3, é feita uma apresentação e descrição da instalação bem como dos equipamentos utilizados para a mesma. Essa descrição é feita de forma mais detalhada e cuidadosa para os inversores e supercondensador híbrido, uma vez que são os principais equipamentos da instalação. É neste capítulo que são apresentados os custos totais da instalação.

Nos capítulos 4 e 5, com principal foco na programação em *LabVIEW*, é feita uma apresentação e contextualização acerca da utilização desta programação bem como as razões que levaram à escolha deste tipo de linguagem de programação. É ainda apresentada a programação desenvolvida para o controlo da instalação.

O capítulo 6, de carácter experimental, diz respeito à apresentação dos dados relativos aos ensaios de controlo do sistema do Supercondensador híbrido que foi integrado na SolGrid (Rede experimental de Baterias e Sistemas Fotovoltaicos) bem como uma análise dos dados obtidos. Em seguida, no capítulo 8, é feita uma relação com o tópico da bombagem fotovoltaica tendo em conta a aplicação da tecnologia explorada.

Por fim, nos capítulos 7 e 8, são apresentadas as conclusões finais deste projeto de dissertação bem como os possíveis trabalhos a serem realizados numa próxima fase de testes.

Ao longo de toda a dissertação, escolheu-se manter a utilização de alguns termos na sua versão inglesa de forma a simplificar a compreensão da linguagem para o meio académico e sectores da bombagem e fotovoltaico, uma vez que as utilizações destes termos em português são pouco comuns na cadeia de valor dos mesmos.

2. Introdução e Estado da Arte

2.1 Enquadramento

Em Portugal, o consumo de eletricidade para a agricultura aumentou cerca de 233% (DGEG, 2022) desde 1994 até 2014, sendo que este aumento do consumo de eletricidade tem sido acompanhado do aumento dos preços da eletricidade, acabando por afetar a viabilidade da agricultura no sul da Europa.

Desta forma, os agricultores têm vindo a procurar alternativas às suas fontes de energia convencionais, que satisfaçam igualmente as suas necessidades de grande potência/energia a custos acessíveis. É então necessário o desenvolvimento de outras tecnologias de forma a diminuir os custos associados à bombagem ou pressurização de águas subterrâneas ou superficiais, uma vez que requerem o uso intensivo de energia.

Neste momento, Portugal produz energia Eólica, Hídrica, Bioenergia e Solar, sendo que de acordo com os dados fornecidos pela APREN (Associação Portuguesa de Energias Renováveis) em 2021, foram produzidos 1,74 TWh de energia solar (APREN - Associação Portuguesa de Energias Renováveis, s.d.), um valor que tem vindo a aumentar anualmente de forma significativa, devido ao crescimento de novas instalações solares. Apesar de se ter verificado alguma instabilidade no mercado fotovoltaico nos últimos anos, neste momento tem-se vindo a verificar uma descida acentuada de preços e um crescente interesse na tecnologia bem como nos seus ganhos, verificando-se um crescimento saudável.

Nesse contexto, a aplicação da tecnologia solar fotovoltaica na área da bombagem fotovoltaica em explorações de média a grandes dimensões tem sido cada vez mais notável, uma vez que se tem desenvolvido e melhorado a sua integração nos sistemas de energia renovável para os sistemas de bombagem de médias a grandes potências.

2.2 História da Bombagem Fotovoltaica

A descoberta da Agricultura e a domesticação de animais remonta ao período Neolítico, aproximadamente entre 10 000 AC a 6 000 AC, onde foram criadas condições para o aparecimento dos primeiros aglomerados populacionais sedentários que estavam localizados próximos de rios ou nascentes, de forma que pudessem obter água para as suas culturas agrícolas e para os seus animais, tendo ocorrido a Revolução Agrícola (Coletivo Saberes, 2020).

Com o passar dos anos, a melhoria da alimentação foi acompanhada de uma evolução em termos de aspetos sociais, como foi o caso da sedentarização que levou ao aumento populacional. Consequentemente, ocorreu uma expansão dos campos de cultivo afastando-os para locais desprovidos de fontes de água, isto é, para terrenos mais secos, onde o regime de precipitações era escasso para garantir a sobrevivência das culturas agrícolas. Este problema foi resolvido através do desenvolvimento de técnicas de irrigação, ou seja, fornecimento artificial de água aos campos agrícolas, através de processos de engenharia (Porto Editora, s.d.).

Desta forma, a irrigação provocou uma autêntica revolução na eficiência agrícola, aumentando não só a quantidade, mas também a qualidade dos alimentos produzidos, permitindo a cultura de terrenos até ao momento não aproveitados, uma vez que eram bastante pobres no que diz respeito à existência de água, levando a uma enorme expansão da população (Porto Editora, s.d.).

Ao longo dos tempos, foram criadas diversas técnicas e instrumentos para aperfeiçoar a rega das culturas agrícolas. O séc. XIX ficou marcado pelo ponto de viragem nos sistemas de irrigação devido à sucessiva invenção do motor a vapor, do motor elétrico e do motor de combustão interna. Após a 2ª guerra mundial, os sistemas de irrigação foram generalizados para tubos de alumínio resistentes, leves e fáceis de transportar (Porto Editora, s.d.).

Em Portugal, existem vários vestígios ancestrais acerca da existência de irrigação agrícola, denotando influências do povo Árabe e Romano, que ocuparam a Península Ibérica em diversas alturas. Destaca-se a construção do séc. XV de sistemas de irrigação, as levadas, no arquipélago da Madeira que permitiram tornar este arquipélago muito produtivo do ponto de vista agrícola (Porto Editora, s.d.).



Figura 1 – Levadas no Arquipélago da Madeira (Box)

Os métodos de irrigação pretendem ensinar ao ser humano de que forma a água pode ser aplicada às culturas agrícolas, estando dependente de diversos fatores tais como: topografia, tipo de solo, cultura e o clima. Os métodos mais conhecidos de irrigação de precisão e que perduram nos dias de hoje são: rega por gotejamento e rega por aspersão (Rodrigues, 2022).



a)



b)

Figura 2 – a) Rega por Aspersão (Chamsa, Rega por aspersão, s.d.) e b) Rega por Gotejamento (Chamsa, Irrigação por Gotejamento, s.d.)

Os sistemas de irrigação por aspersão disparam um jato de água para o ar, que cai no chão sob a forma de gotas, como se fosse chuva. A água é transportada sob pressão através de uma rede de tubagens até chegar aos aspersores que a distribuem a vários metros de distância, sendo que essa distância pode ser ajustada através da variação da pressão (Chamsa, Rega por aspersão, s.d.).

Por sua vez, os sistemas de irrigação por gotejamento funcionam através da aplicação lenta da água diretamente no solo. A elevada eficiência da irrigação por gotejamento permite que a água penetre no solo antes de ocorrer a sua evaporação, sendo que esta apenas é aplicada onde é realmente necessário ao invés de ser pulverizada por todo o lado (Chamsa, Irrigação por Gotejamento , s.d.).

Embora estes métodos sejam eficientes, nem sempre satisfazem as necessidades de rega de certos campos agrícolas, uma vez que para as populações que vivem nas proximidades de rios ou de barragens, é utilizada outra técnica bem mais eficiente do que qualquer outra, que consiste no bombeamento de água através de um gerador a combustível. É certo, que nos dias de hoje este método é considerado pouco sustentável pois para a rega ser eficiente é necessária a queima de combustível para manter o gerador em funcionamento.

Uma vez que a energia solar fotovoltaica tem vindo a ganhar cada vez mais destaque na atualidade (Away, 2023) e o problema da escassez de água se encontra a afetar cada vez mais o ser humano (DN/Lusa, 2022), a energia solar quando aplicada à bombagem fotovoltaica é apontada como sendo uma das resoluções para este problema.

Dois dos fatores que contribuíram para a junção da energia solar fotovoltaica ao bombeamento de água, foi o decréscimo do preço dos painéis fotovoltaicos, caso contrário nada disto faria sentido, pois tratar-se-ia de um enorme investimento e, o outro fator bastante crucial nesta junção, está relacionado com a abundância da energia solar e a deficiência de água em certas regiões de Portugal.

A bombagem fotovoltaica consiste no bombeamento de um determinado volume de água proveniente de reservatórios de água ou através extração de água oriunda de furos, ocorrendo uma substituição na forma de alimentação do motor, por um conjunto de painéis fotovoltaicos.

Um sistema deste género é constituído por: módulos fotovoltaicos, um variador de frequência, uma moto-bomba (também designada eletro-bomba) e um reservatório de água (Almeida, et al.).

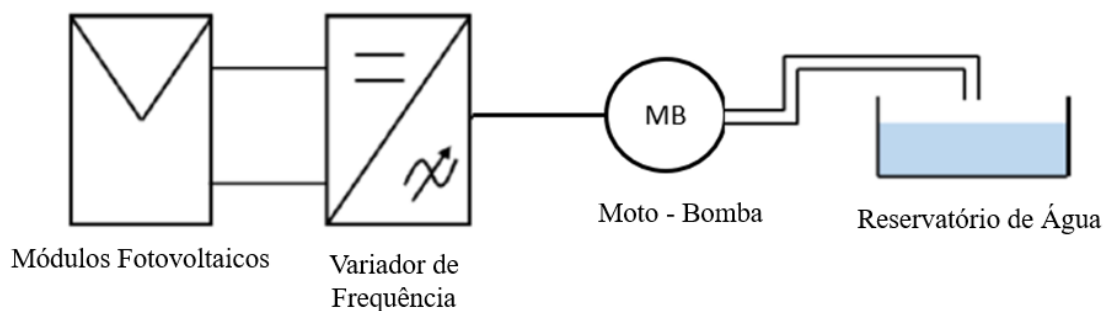


Figura 3 – Esquema Típico de um Sistema de Bombagem Fotovoltaica (Almeida, et al.)

Este tipo de sistemas apresenta algumas vantagens, nomeadamente: a independência de combustíveis fósseis no funcionamento da moto-bomba, a integração no sistema de irrigação pré-existente, a existência de uma combinação da produção PV (Energia Solar Fotovoltaica) face às necessidades de irrigação e existência de uma garantia de 25 anos (Almeida, et al.).

Em contrapartida, este tipo de sistemas deverá ser robusto contra as flutuações de potência PV existentes devido à passagem de nuvens, pois é algo inevitável e incerto que o ser humano não consegue controlar. Nos dias de hoje, têm vindo a ser desenvolvidos algoritmos que permitam controlar estas flutuações de potência PV, de forma a que o conversor de frequência não tenha

quedas abruptas de frequência, preservando assim o normal funcionamento dos equipamentos (Almeida, et al.).

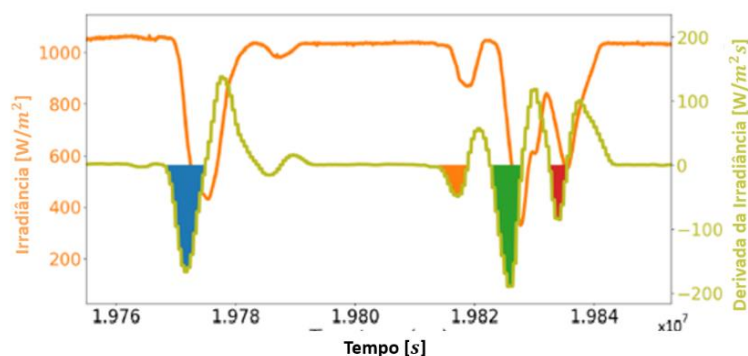


Figura 4 – Algoritmo de Detecção da Passagem de Nuvens (Francisco Jesús Guillén-Arenas, 2022)

No funcionamento normal de uma bomba de irrigação, existem sempre rampas de aceleração e desaceleração que podem provocar o aumento ou a diminuição do caudal gradualmente, não havendo paragens nem arranques súbitos. Ocorrendo uma paragem súbita da bomba, a coluna de água que se encontra no interior da bomba, provoca a ocorrência do martelo hidráulico, que por sua vez irá impactar contra o corpo da bomba, diminuindo assim o tempo de vida útil da mesma.

Com a implementação do Supercondensador Híbrido neste sistema, a energia que é necessária para que não se verifique uma paragem súbita da bomba, poderá ser fornecida por esta tecnologia, passando assim, o caudal de água a desacelerar com a diminuição em rampa de potência gradual, até se verificar um caudal cada vez menor e parar a bomba de forma controlada.

2.3 Relação com a Bombagem Fotovoltaica de Alta Potência

Embora sejam vistos como sistemas mais sustentáveis para a agricultura, os sistemas de irrigação fotovoltaica de alta potência estão sempre sujeitos a flutuações de energia devido à passagem de nuvens sobre os campos fotovoltaicos. Desta forma, as tecnologias de armazenamento de energia são vistas como sendo possíveis soluções para se resolver este problema de forma a estabilizar as taxas de rampas de alta potência.

O gráfico da figura que se apresenta em seguida, representa uma resposta típica de um sistema de bombagem fotovoltaica de alta potência quando ocorre passagem de nuvens. Verificou-se uma diminuição de cerca de 80% da radiação solar global, ocorrendo a mesma num intervalo de tempo de 20s. É lógico que o controlo inteligente por algoritmo pode constituir uma solução adequada para um número elevado de ocorrências de passagem de nuvens, bem como uma tecnologia de armazenamento de energia, capaz de fornecer um tempo de resposta rápido com uma densidade de potência elevada e tempo de vida (Márcia Horta, 2023).

O módulo do supercondensador híbrido ensaiado tem capacidade em fornecer um tempo de resposta $< 200ms$ (para uma descarga pulso de 3600 A) e uma potência máxima de 29,7 kW, tendo uma densidade de potência de $1000 W/dm^3$ (Márcia Horta, 2023), (Kurt Energy, s.d.). No modo de standby, o sistema pode atingir tempos de resposta $< 2s$ (para uma rede de baixa latência). Para uma passagem típica de nuvens como é apresentado no gráfico da Figura 4 com

uma duração de 20s, o sistema demonstra ter um tempo de resposta adequado para controlar a taxa de rampa de potência.

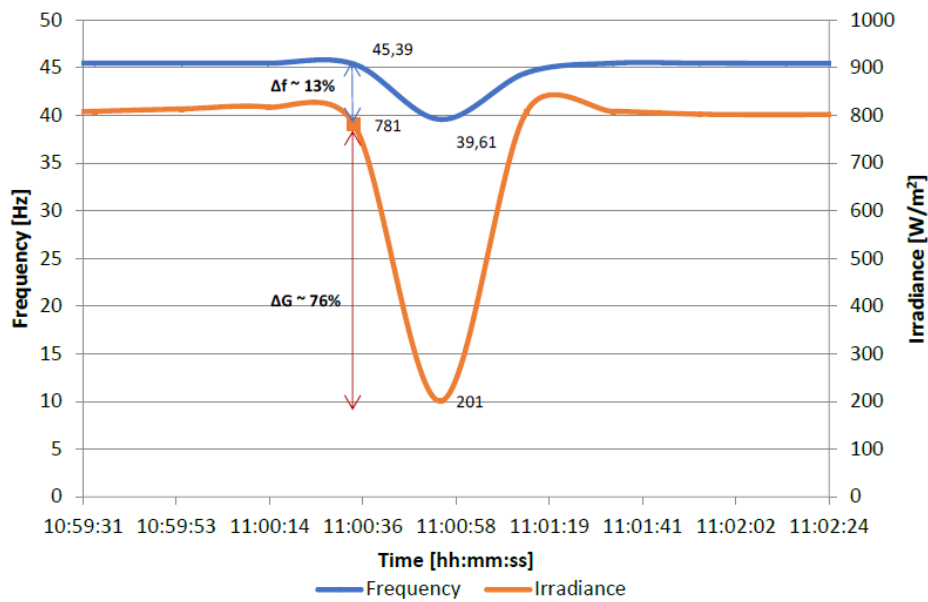


Figura 5 – Exemplo de uma influência típica da passagem de nuvens na irradiância e na frequência de funcionamento do conversor de frequência (Almeida, et al.)

2.4 Estado da Arte do Controle de Rampas de Potência Fotovoltaica

Considerando toda a evolução dos mecanismos para armazenamento de energia, atualmente o ser humano possui várias tecnologias capazes de dar resposta às suas necessidades. Uma estão mais desenvolvidas que outras devido a diversos fatores, sendo o de maior importância, o fator económico. De entre as diversas tecnologias de armazenamento de energia disponíveis no mercado atual, a tecnologia dos supercondensadores tem sido alvo de grande desenvolvimento em vários níveis: a nível de materiais constituintes (Guihua Yu, 2013), (Lei Zhou, 2019), (Dillip Kumar Subudhi, 2022), (Arun Thirumurugan, 2023) a nível estrutural (Vraj Shah, 2023), (Dan Gao, 2023) e a nível de aplicações (Lalit Goswami, 2021), (Kwadwo Mensah-Darkwa, 2022), (S. Charis Caroline, 2022).

Dado os supercondensadores serem sistemas que prezam pela qualidade de energia, pois possuem níveis de potência baixos e tempos de descarga mais reduzidos, a sua integração em sistemas de armazenamento de energia acaba por se tornar viável uma vez que esta tecnologia permite resolver problemas de intermitência de potência através da implementação de algoritmos. A intermitência da potência nos sistemas de armazenamento de energia pode ser causada devido a diversos fatores, como por exemplo: falha de energia na rede ou passagem de nuvens.

Dos inúmeros trabalhos desenvolvidos no âmbito da implementação de algoritmos que permitam resolver problemas de intermitência de potência, destaca-se a Universidade Politécnica de Madrid, pelo trabalho desenvolvido em algoritmos de controlo, resultando a sua implementação à escala real em autómatos capazes de detetar a variação da potência, prevenindo assim essa instabilidade, evitando a paragem abrupta do variador de frequência, porque, por norma, os variadores de frequência estão equipados com controlo PID (*Proportional Integral Derivative*)

mas acontece que estes nem sempre são suficientemente rápidos, daí a instalação dos algoritmos nos autómatos (Francisco Jesús Guillén-Arenas, 2022).

O controlo PID é o algoritmo de controlo mais utilizado no setor da indústria e que tem vindo a ser aceite cada vez mais no mundo do controlo industrial. A popularidade do controlo PID pode ser atribuída, em particular, ao facto de possuir um desempenho robusto nas mais diversas condições de funcionamento e, em parte, à sua simplicidade funcional, que permite aos seus utilizadores operá-los de uma forma simples e direta (Ni, s.d.). Tal como o seu nome sugere, o algoritmo PID consiste em três coeficientes básicos: proporcional, integral e derivativo, que são variados de forma a obter uma resposta ótima. A ideia base que está por detrás de um algoritmo de controlo PID é fazer a leitura de um sensor ao longo do tempo e, em seguida, calcular a saída pretendida do atuador através da soma do cálculo das respostas proporcional, integral e derivativa ao longo do tempo (ELPROCUS, s.d.).

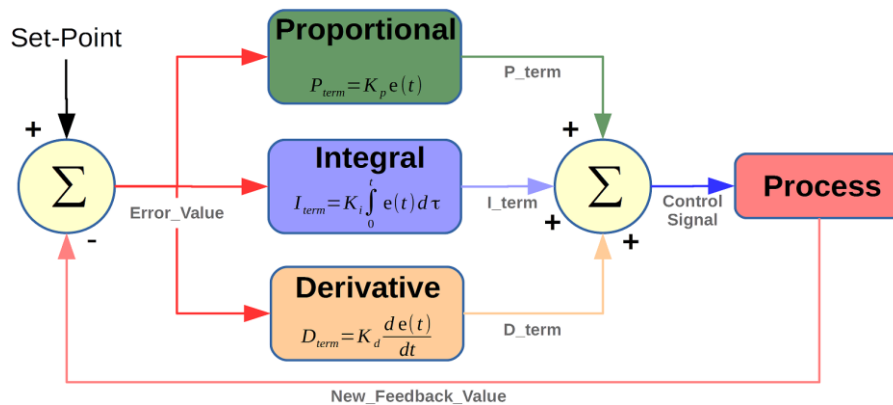


Figura 6 – Funcionamento do algoritmo de controlo PID (Concepts, s.d.)

A vantagem da instalação desses algoritmos em autómatos prende-se com o facto da existência de uma monitorização da tensão da corrente contínua que ao detetar uma flutuação, que pode vir a colocar em causa do funcionamento do variador de frequência, faz com que o controlo do PID seja desligado, reduzindo a frequência da bomba para regenerar a energia no interior da mesma. Isto acaba por eliminar a ocorrência de subtensões, evitando paragens abruptas do variador de frequência. Uma vez ajustada a frequência, o controlo do PID é reiniciado em operação normal, permitindo concluir que o sistema tem capacidade de suportar variações súbitas de potência PV causadas pela passagem de nuvens.

Graças ao projeto SolaQua (Universidade Politécnica de Madrid, s.d.) que nasceu da união de dois antigos projetos, o Maslowaten (Maslowaten, s.d.) e o Resfarm (Resfarm, s.d.), que tem como objetivo o aumento da quota de consumo de energias renováveis na Europa, facilitando a aceitação do mercado da irrigação solar no setor agrícola que já foram instalados vários autómatos em vários demonstradores à escala real construídos ao abrigo deste projeto onde foram implementados os algoritmos mencionados anteriormente.



Figura 7 – Autómatos instalados nos demonstradores reais construídos ao abrigo do projeto SolaQua (*Universidad Politécnica de Madrid, s.d.*)

Face, ao controlo das taxas de rampas de potência, a Universidade de Évora desenvolveu um algoritmo que permite fazer esse controlo das rampas de potência quando inseridas em instalações fotovoltaicas para autoconsumo, através do armazenamento de energia, neste caso, com recurso a uma bateria de fluxo *redox* de Vanádio instalada na microrrede da Cátedra Energias Renováveis (Ana Foles, 2022), tendo sempre o cuidado de não violar os limites do estado de carga da referida bateria. Essa bateria foi instalada na rede trifásica da Cátedra que se encontra em operação desde 2012.

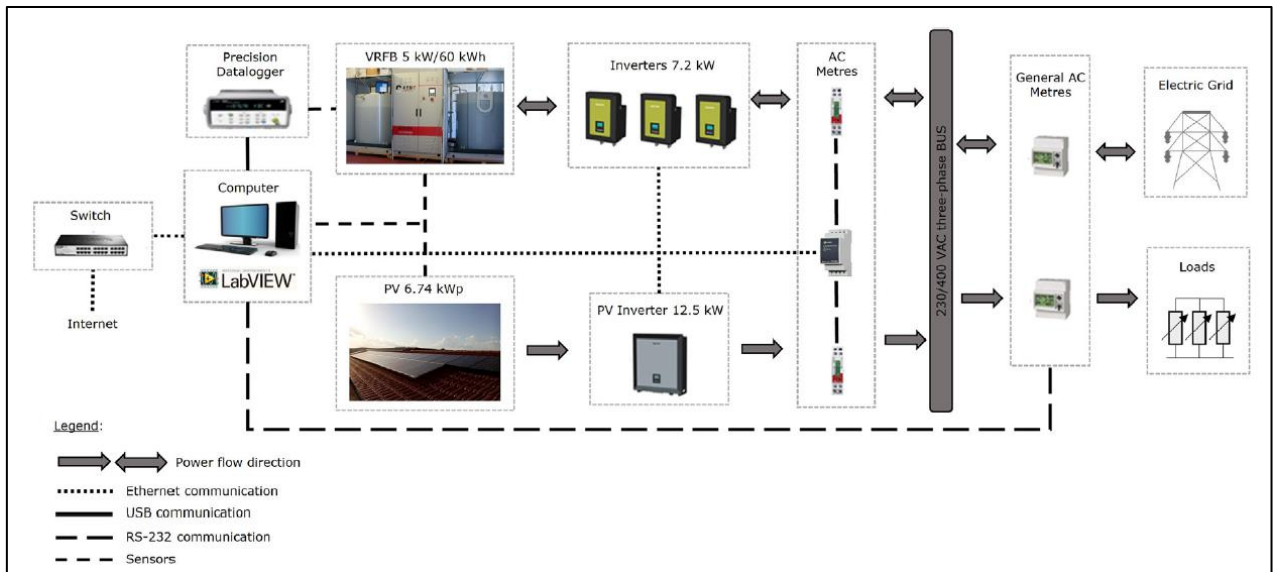


Figura 8 – Representação do esquema de ligação da bateria de fluxo *redox* de Vanádio à microrrede da Cátedra Energias Renováveis da UÉvora e dos seus fluxos de energia

Como já fora referido em capítulos anteriores, atualmente, o mercado dispõe das mais variadas ofertas para o armazenamento de energia e, é neste sentido, que surgiu a possibilidade de comissionar e instalar uma nova tecnologia na microrrede da CERUÉ.

Nos dias de hoje, a tecnologia dos supercondensadores híbridos já não é tão desconhecida como era há uns anos, pois a crescente investigação desta mesma tecnologia disputou o desenvolvimento de vários pontos capazes de melhorar esta tecnologia a vários níveis como se mostra nestes artigos (Guihua Yu, 2013), (Lei Zhou, 2019), (Dillip Kumar Subudhi, 2022), (Arun Thirumurugan, 2023). A tecnologia dos supercondensadores é conhecida pela sua rápida resposta em caso de existência de uma falha de energia na rede.

Desta forma, considerando o mercado da irrigação solar direccionado ao setor agrícola que sofre com alguns problemas, sendo um deles, a intermitência da potência devido à passagem das nuvens nos campos fotovoltaicos, investigou-se a possibilidade de introduzir um supercondensador híbrido num sistema de bombagem fotovoltaica para dar resposta às rampas de potência que as nuvens induzem (Márcia Horta, 2023).

Assim, foi feito o comissionamento e a instalação de um supercondensador híbrido de base carbono nas instalações da CERUÉ para estudar o problema da intermitência de potência quando aplicada ao setor da irrigação solar fotovoltaica

Atualmente, em Portugal, especialmente na região do Baixo Alentejo, já existe um número significativo de sistemas de bombagem fotovoltaica, sendo a maior parte para a cultura de olivais intensivos. Até ao momento, no distrito de Portalegre, já se encontram instalados dois sistemas de bombagem fotovoltaica para a irrigação de olivais intensivos, estando um deles localizado em Alter do Chão, com 140 kW_p de potência instalada (Agricultura e Mar, 2021) e outro localizado em Elvas, com $26,4 \text{ kW}_p$ de potência instalada (O Instalador, 2020). No distrito de Beja, em Montes Velhos, a Associação de Beneficiários do Roxo possui a maior potência instalada num sistema para bombagem fotovoltaica com 360 kW_p , que tem permitido reduzir as emissões de carbono em cerca de 235 toneladas de CO_2 por ano, poupando também em média 26% do valor da fatura da eletricidade (Sul Informação, 2022).



Figura 9 – Sistema de Bombagem Fotovoltaica da Associação de Beneficiários do Roxo (*O Instalador, 2020*)

2.5 Tecnologias de Armazenamento de Energia

O crescimento da população a nível mundial bem como o processo de industrialização aumentaram o consumo de energia nas últimas décadas, sendo que de acordo com os dados da Agência Internacional de Energia, verificou-se um crescimento do consumo de energia em cerca de 36%, nos últimos 20 anos. A procura diária de uma demanda de energia acaba por não ser uniforme, tornando-se um problema grave para a indústria energética (Rogalev, Rogalev, Kindra, & Maksimov, 2022).

Como tal, nas últimas décadas tem-se vindo a observar uma tendência crescente no uso de energias provenientes de fontes renováveis, estando estas dependentes do tempo e das condições diárias. São estes fatores que acabam por determinar a urgência na investigação e no desenvolvimento de tecnologias para o armazenamento de energia, sendo que a presença de uma grande variedade de mecanismos de armazenamento de energia leva à necessidade de uma classificação, comparação e consideração de possíveis opções para as suas aplicações nas grandes unidades de potência (Rogalev, Rogalev, Kindra, & Maksimov, 2022).

Um sistema de armazenamento de energia, tem como objetivo armazenar a energia excedente, isto é, sempre que a produção de energia seja maior do que aquela que está de facto a ser consumida. Em contrapartida, a energia é injetada na rede quando a demanda de energia é superior à quantidade de energia que se consegue produzir (Costa, 2019). A diferença que existe entre as tecnologias de armazenamento de energia assenta na quantidade de energia que cada uma delas consegue armazenar bem como no tipo de aplicação que as mesmas poderão ter (Lopes, 2015).

Antes de se iniciar a caracterização e descrição das diferentes aplicações das tecnologias de armazenamento de energia, é importante clarificar os principais conceitos que lhes estão associados, estando estes descritos na tabela apresentada em seguida.

Tabela 1 – Caracterização dos conceitos associados às Tecnologias de Armazenamento de Energia

Parâmetro	Descrição
Tempo de Resposta	É o tempo que o sistema demora a responder ao estímulo de iniciação (Lopes, 2015);
Tempo de Descarga	É o tempo que o sistema demora a libertar toda a energia armazenada (Lopes, 2015);
Capacidade de Armazenamento	Diz respeito a toda a energia que é armazenada e que é aproveitada na descarga do sistema (Lopes, 2015);
Período de Armazenamento	É o tempo que decorre desde o início da descarga até ao final da carga, sendo este definido de acordo com a utilidade da tecnologia (Lopes, 2015);
Potência Específica [W/kg]	Relaciona a potência contida nesse sistema por unidade de massa. Normalmente, as baterias possuem a desvantagem de apresentarem potências específicas reduzidas, porque para armazenarem energia, é necessário a ocorrência de reações químicas, verificando-se uma libertação de eletrões (Subasinghage, Gunawardane, Padmawansa, Kularatna, & Moradian, 2022), (KEMET, 2019), (Odero, Wekesa, & Irungu, 2022).
Energia Específica [Wh/kg]	É a quantidade de energia contida nesse sistema por unidade de massa ou volume. Quanto maior for a energia específica de uma determinada tecnologia, maior quantidade de energia pode ser armazenada nela (Lopes, 2015).
Tempo de Vida Útil	É o período em que o sistema está em funcionamento, ou seja, é o período que decorre desde a aquisição do sistema até à sua substituição (Lopes, 2015). Este tempo varia muito consoante a utilização que se faça do sistema.
Custo	É influenciado pela quantidade de energia que o sistema pode armazenar bem como pela potência do mesmo, sendo ainda influenciado pelo custo de construção do próprio sistema.

As tecnologias de armazenamento de energia podem ser agrupadas em quatro grupos de acordo com a sua forma de armazenamento de energia, tendo por base o tipo de energia que armazenam, pelo que se distinguem as seguintes categorias:

- Armazenamento de Energia Mecânica;
- Armazenamento de Energia Elétrica;
- Armazenamento de Energia Térmica;
- Armazenamento de Energia Eletroquímica;
- Armazenamento de Energia Química.

Eletroquímica	Térmica	Mecânica	Química	Elétrica
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baterias de Fluxo ➤ Baterias Secundárias 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sistemas de Calor Latente ➤ Sistemas de Calor Sensível 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bombagem hidroelétrica ➤ Ar comprimido ➤ Volantes de Inércia 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gás Natural Sintético ➤ Hidrogénio 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Energia Eletromagnética ➤ Condensadores ➤ Supercondensadores

Figura 10 – Tipos de tecnologias para Armazenamento de Energia (*Commission, 2011*)

O propósito do armazenamento de energia mecânica é armazenar energia sob a forma de energia cinética e/ou potencial (Costa, 2019). O movimento de veios rotativos, o funcionamento de turbinas para aproveitamento hidroelétrico e a expansão e compressão de ar estão inseridos neste tipo de armazenamento. Destacando-se o aproveitamento hidroelétrico, uma vez que é a tecnologia de armazenamento mais desenvolvida e implementada a larga escala (Copco, s.d.).

Os sistemas de armazenamento de energia térmica armazenam calor que pode estar sob duas formas: sensível e latente. O calor pode ser armazenado a temperaturas inferiores à temperatura ambiente, quando se trata de aplicações para arrefecimento ou pode estar armazenado a temperaturas superiores à temperatura ambiente quando se trata de aplicações de aquecimento (Vranas, 2017).

O armazenamento de energia elétrica é feito através da acumulação de energia sob a forma de cargas eletrostáticas, como é o caso dos condensadores e supercondensadores que acabam muitas das vezes por funcionar como geradores de energia quando ocorrem picos de energia inesperados ou quando o fornecimento de energia elétrica é interrompido (HITACHI, s.d.). Por sua vez, o armazenamento de energia eletromagnética é uma tecnologia que utiliza princípios magnéticos para armazenar energia através de campos magnéticos criados por correntes elétricas (Electricity Magnetism, s.d.).

O armazenamento de energia eletroquímica armazena a energia que é criada através de reações eletroquímicas que ocorrem em baterias. As baterias são um conjunto de células eletroquímicas onde ocorrem reações de oxidação-redução, dando origem a correntes elétricas. Na constituição de uma bateria, existe um ânodo (polo negativo) e um cátodo (polo positivo), estando ambos em contacto com um eletrólito (Andrews, 2017). Distinguem-se dois tipos de baterias: as secundárias e as de fluxo. No primeiro tipo de baterias, o eletrólito é o meio através do qual é feita a transferência de iões e no segundo tipo de baterias o eletrólito é o meio onde se armazena a energia (Helsingen, 2015). As baterias secundárias mais comuns são: iões de lítio, níquel-cádmio e chumbo-ácido (Chen, et al., 2009). Por sua vez, as baterias de fluxo mais conhecidas são: vanádio e bromo de zinco (Chen, et al., 2009). Um dos problemas que advém da utilização de baterias é o perigo de fuga térmica que consiste no sobreaquecimento da bateria, causando uma falha química no eletrólito, acabando por originar uma explosão ou num incêndio (Joyce, s.d.).

O armazenamento de energia química encontra-se ligado aos sistemas para armazenamento de hidrogénio e de gás natural sintético. O método mais conhecido e “limpo” para produzir hidrogénio ocorre através da eletrólise da água em que são utilizadas células de combustível (Helsingen, 2015). Por sua vez, o armazenamento de gás natural sintético ocorre devido à reação que origina este gás, a reação de Sabatier (Leonzio, 2016). Esta reação ocorre entre o dióxido de carbono e o hidrogénio com a presença de um catalisador de níquel, originando metano e água.

2.6 Princípio de Funcionamento do Campo Elétrico

O campo elétrico é o campo de força provocado pela ação de cargas elétricas. Este campo é representado através de linhas imaginárias, as linhas de campo que existem em torno de qualquer corpo que possua uma carga elétrica, sendo estas traçadas para indicar a intensidade do campo elétrico, isto é, quanto maior for a densidade das linhas, mais intenso será o campo elétrico (Silva, 2013).



Figura 11 – Sentido das linhas do campo elétrico.

Se uma carga q for abandonada nas proximidades de um corpo com uma carga Q , esta pode ser atraída ou repelida por Q sob a ação de uma força F , designada por força elétrica, criando-se assim um campo elétrico em torno das cargas (Silva, 2013).

A fórmula utilizada para calcular a intensidade de um campo elétrico E , produzido por uma carga Q , define-se através da seguinte equação matemática:

$$E = \frac{F \text{ [Newton]}}{q \text{ [Coulomb]}} = N/C$$

De acordo com a equação apresentada, se a carga q estiver carregada positivamente, então F e E terão o mesmo sentido, que será de afastamento. Para o caso em que q esteja carregado negativamente F e E terão sentidos opostos, isto é, o campo elétrico terá um sentido de aproximação (Silva, 2013).

2.7 Condensadores

Os condensadores constituem sistemas de armazenamento de energia eletrostática, e o seu princípio de funcionamento tem por base o campo elétrico que é criado entre duas placas metálicas ou eletrodos, constituídas por cargas opostas, sendo essas placas separadas por um material dielétrico. A capacidade de armazenamento dos condensadores é calculada através da distância entre as duas placas metálicas e a área das mesmas, ou seja, quanto maior for a área das placas, maior será a capacidade de armazenamento do condensador, variando inversamente com a distância entre essas placas metálicas (Evans, Strezov, & Evans, 2012).

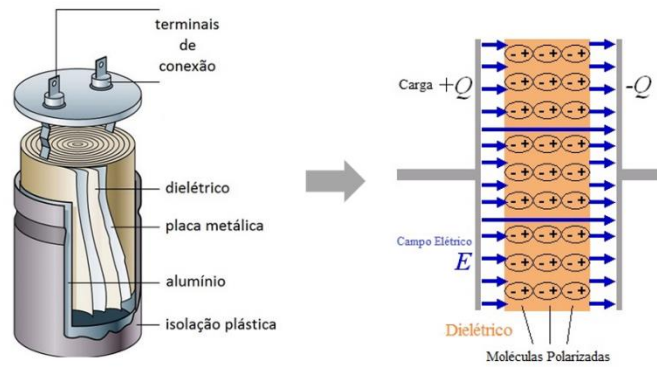


Figura 12 - Constituição e Funcionamento de um Condensador (*ELPROCUS, s.d.*)

Atualmente, os condensadores possuem diversas aplicações relacionadas sobretudo com o armazenamento de energia e aplicações em circuitos eletrônicos para correção do fator de potência. Existem diversos tipos de condensadores no mercado, sendo os mais conhecidos os condensadores eletrolíticos e cerâmicos.

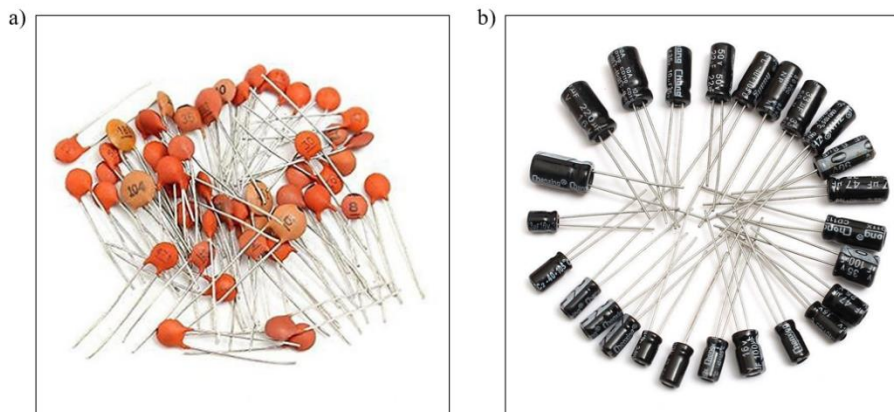


Figura 13 - a) Condensador Cerâmico e b) Condensador Eletrolítico (*KEMET, 2019*)

A vantagem da utilização de condensadores deve-se ao facto do processo de carga e descarga ser muito mais rápido do que o de uma bateria convencional, podendo este ser recarregado mais vezes com uma eficiência elevada (Chen, et al., 2009), (Costa, 2019). No entanto, os valores reduzidos de energia específica (Chen, et al., 2009), (Costa, 2019) a elevada dissipação de energia devido às perdas por auto-descarga e, os seus custos serem elevados (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015), (Costa, 2019) fazem com que estes apenas sejam utilizados em pequenos sistemas com o propósito de regular a tensão.

Embora os condensadores tradicionais sejam considerados uma tecnologia madura para armazenar energia, ainda não são capazes atuar a larga escala (Chen, et al., 2009), surgindo assim os supercondensadores.

2.8 Supercondensadores

Os supercondensadores, também conhecidos como condensadores elétricos de dupla camada (EDLC), são constituídos por dois elétrodos condutores, normalmente à base de carbono, um eletrólito e um separador de membrana porosa entre o elétrodo e o eletrólito. Devido à existência de uma dupla camada e ao desenvolvimento de materiais de carbono altamente que constituem o eletrólito, é possível diminuir a distância entre os elétrodos condutores aumentando a capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, a energia específica (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015).

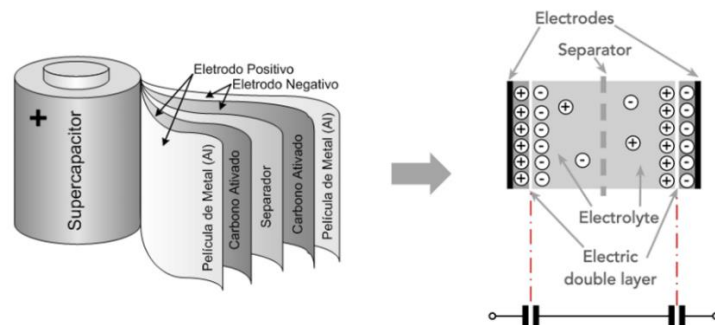


Figura 14 - Constituição e Funcionamento de um Supercondensador (Correia, 2015)

Os supercondensadores tem capacidade para armazenar um milhão de vezes mais de energia por unidade de massa, comparativamente aos condensadores eletrolíticos. Devido à sua baixa resistência interna são capazes de conduzir ou de absorver correntes bastante elevadas. Nos últimos anos, os fabricantes de supercondensadores têm desenvolvido diversos tipos destes componentes em grande escala, com elevada energia específica e uma vida útil mais longa, suportando um maior número de ciclos de carga-descarga, auxiliando os utilizadores finais a melhorar os seus sistemas de armazenamento de energia (Subasinghage, Gunawardane, Padmawansa, Kularatna, & Moradian, 2022).

Um dos pontos mais fortes face à utilização desta tecnologia prende-se com o facto da mesma ter capacidade de resolver os problemas de intermitência de variáveis relacionadas com a disponibilidade de potência, que é o caso de um sistema de bombagem fotovoltaica, aquando da passagem de nuvens sobre o campo fotovoltaico.

Uma das desvantagens do uso desta tecnologia é a sua viabilidade económica, porque o fabrico de supercondensadores envolve sistemas bastante complexos, tornando-os muito dispendiosos no mercado.

2.8.1 Tipos de Supercondensadores

Atualmente, dentro da família dos supercondensadores é possível distinguir três tipos diferentes, sendo eles: supercondensadores elétricos de dupla camada (EDLC), supercondensadores híbridos e pseudocondensadores (Subasinghage, Gunawardane, Padmawansa, Kularatna, & Moradian, 2022).

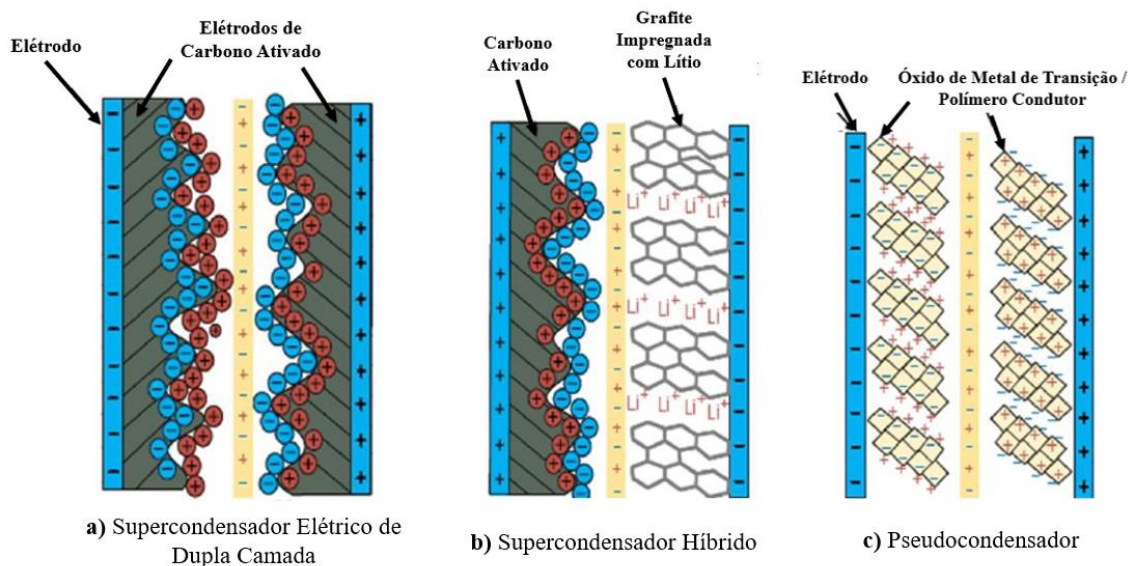


Figura 15 - Estrutura eletroquímica dos tipos de Supercondensadores (Subasinghage, Gunawardane, Padmawansa, Kularatna, & Moradian, 2022)

Os EDLC, são constituídos por dois eletrodos de carbono, um material dielétrico que funciona como uma membrana que os separa e um eletrólito. Os eletrodos são de carbono ativo, permitindo aumentar a sua área de superfície, oferecendo custos mais baixos bem como melhores técnicas de fabrico (Green & Jehoulet). A existência da referida membrana é responsável pelo aumento da capacidade dos supercondensadores, uma vez que a saída de elétrons a partir do eletrodo é compensada pela entrada de íões através do eletrólito. Para além disso, essa membrana deve ser permeável à passagem de íões ao mesmo tempo que mantém o isolamento físico entre os dois eletrodos (Jayalakshmi & Balasubramanian, 2008). A intensidade do campo elétrico no supercondensador determina a distribuição dos íões, o que faz com que uma tensão maior origine uma capacidade maior. O termo “dupla camada” provém do facto de existirem duas camadas de íões em cada um dos eletrodos, entre o carbono e os íões do eletrólito (Johansson & Andersson, 2008).

Uma vez que não existem transferências de cargas entre os eletrodos e o eletrólito, também não se verifica a ocorrência de reações químicas ou mudanças de composição associadas a fenómenos químicos, pois trata-se de fenómenos eletrostáticos. É por esta razão que o armazenamento de energia neste tipo de supercondensadores é considerado altamente reversível, pois é possível alcançar-se uma estabilidade cíclica muito elevada, traduzindo-se num elevado número de ciclos carga-descarga comparativamente aos de uma bateria comum (Maxwell Technologies).

Os pseudocondensadores armazenam energia que é gerada através de fenómenos eletroquímicos, isto é, através de fenómenos em que se verifica uma transferência de carga entre os eletrodos e o eletrólito devido à ocorrência de reações de oxidação-redução, a processos de eletroreabsorção e intercalação química, o que resulta em valores de capacidades que podem ser dez a cem vezes superiores aos supercondensadores elétricos de camada dupla (Johansson & Andersson, 2008). Na maioria das vezes os eletrodos dos pseudocondensadores são constituídos por óxidos metálicos ou polímeros condutores uma vez que ambos são materiais que possuem um comportamento bastante reversível durante as reações de oxidação-redução (Correia, 2015).

Ao longo das reações de oxidação-redução destes materiais, a inserção e a remoção de íons do eletrólito para a superfície do eletrodo faz com que a carga no pseudocondensador se mantenha neutra (Scognamillo, et al., 2012).

De acordo com as descrições apresentadas anteriormente acerca destes dois tipos de supercondensadores, a tabela que se segue apresenta os parâmetros característicos das mesmas, de forma que se possa fazer uma comparação entre estas duas tecnologias já apresentadas.

Tabela 2 - Comparação das Características de um Supercondensador Elétrico de Dupla Camada (EDLC) e um Pseudocondensador (Eknath,, Chavan, & Pandey,; 2020)

Parâmetro	Supercondensador elétrico de dupla camada (EDLC)	Pseudocondensador
Material	Materiais à base de Carbono (ex. Carbono Ativado, Nanotubos de Carbono)	Óxidos Metálicos e Polímeros Condutores (ex. <i>NiO, MgO</i>)
Mecanismo de armazenamento de energia	Fenómenos Eletrostáticos	Fenómenos Eletroquímicos/Reações de Oxidação-Redução
Energia Específica	Baixa	Elevada
Densidade de Potência	Muito elevada	Elevada
Nº de Ciclos de Vida/Estabilidade	Elevada	Baixa
Custo por unidade de energia	Elevado	Médio (Metade dos EDLC)

Da análise da tabela anterior, verifica-se que os pseudocondensadores tem capacidade para armazenar mais energia que os EDLC devido às reações eletroquímicas que neles ocorrem. Contudo, esta densidade de potência é limitada pela baixa condutividade dos seus materiais e pela resposta lenta em termos de duração das reações de oxidação-redução. A ocorrência destas reações acaba por danificar a sua estrutura, resultando numa baixa estabilidade e num menor número de ciclos de vida comparativamente aos EDLC (Pu, 2014).

A tecnologia dos supercondensadores híbridos surge na tentativa de agregar o melhor que os pseudocondensadores e os EDLC oferecem, aproveitando as vantagens destas duas tecnologias e reduzindo as desvantagens que as mesmas possuem, promovendo um aumento do desempenho para esta tecnologia (Correia, 2015).

O funcionamento dos supercondensadores híbridos é baseado em processos eletrostáticos e eletroquímicos, atingindo-se valores superiores em termos de densidade de potência e de energia específica comparativamente aos EDLC, sem colocar em causa a estabilidade cíclica e a aquisição dos mesmos devido ao preço que na maior parte das vezes impede a sua aquisição (Eknath,, Chavan, & Pandey,; 2020). Os eletrodos destes supercondensadores são feitos de materiais compósitos, derivados de carbono, polímeros condutores e óxidos metálicos, de onde se aproveitam os benefícios de armazenamento físico e químico de carga.

Desta forma, esta nova tecnologia de supercondensadores tem vindo a ganhar cada vez mais importância e destaque pois é possível alcançarem-se valores cada vez maiores de densidade de

potência e de energia específica, devido à utilização de novos materiais com propriedades cada vez mais interessantes de se aplicarem neste setor, como é o caso dos materiais híbridos nanoestruturados (Yu, Xie, Pan, Bao, & Cui, 2013) que promovem ciclos de vida cada vez mais longos e estáveis (Eknath., Chavan, & Pandey;, 2020).

Para finalizar a distinção entre os três tipos de supercondensadores mencionados, segue-se a tabela onde são resumidos os principais parâmetros característicos de cada um destes supercondensadores.

Tabela 3 - Características dos tipos de Supercondensadores, adaptado de (Subasinghage, Gunawardane, Padmawansa, Kularatna, & Moradian, 2022) e (Eknath., Chavan, & Pandey;, 2020)

Parâmetro	Supercondensadores Elétricos de Dupla Camada (EDLC)	Supercondensador Híbrido	Pseudocondensador
Mecanismo de Armazenamento	Fenómenos Eletrostáticos	Fenómenos Eletrostáticos e Eletroquímicos	Fenómenos Eletroquímicos/Reações de Oxidação-Redução
Potência Específica Máxima [W/kg]	10 000	5 000	4 000
Energia Específica [Wh/kg]	1 – 20	7 – 12	20 – 60
Nº de Ciclos em Tempo de Vida Útil	50 000 – 1 000 000	50 000 – 40 000	15 000 – 20 000
Material Constituinte	Materiais à base de Carbono (ex. Carbono Ativado, Nanotubos de Carbono)	Óxidos Metálicos/Materiais à Base de Carbono/Polímeros Condutores	Óxidos Metálicos e Polímeros Condutores (ex. NiO , MgO)
Intervalo de Temperatura de Funcionamento [$^{\circ}C$]	-40 até 70	-20 até 60	-20 até 50

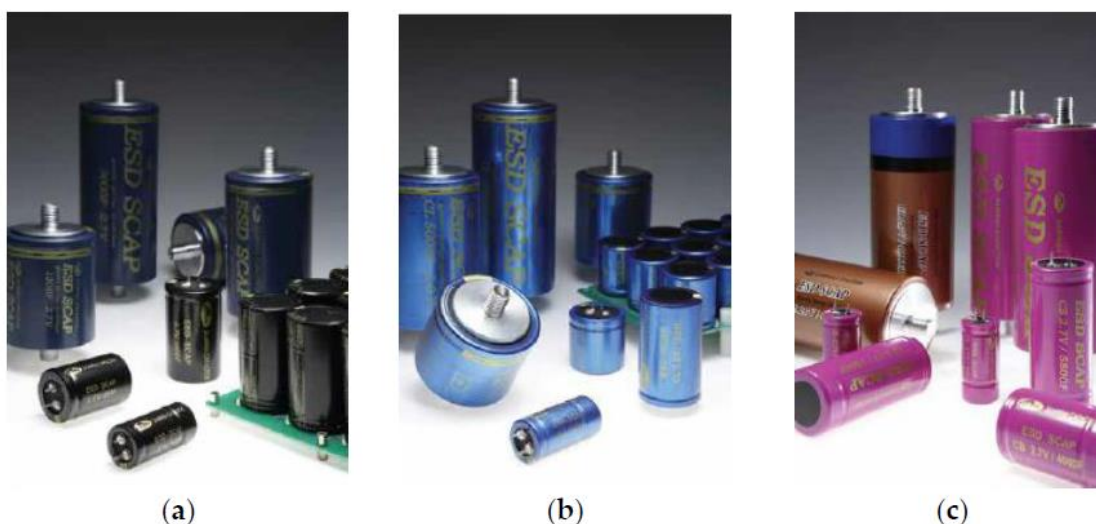


Figura 16 - Tipos de Supercondensadores: a) EDLC; b) Híbrido; c) Pseudocondensador (Thirumurugan, et al., 2023)

Sintetizadas as principais tecnologias de armazenamento de energia, surge então a questão acerca das diferenças existentes entre as baterias de íons lítio e os supercondensadores híbridos, bem como as vantagens e desvantagens que cada um deles pode oferecer ao utilizador.

Como referido anteriormente, o setor das baterias pertence ao armazenamento de energia eletroquímica, que armazena a energia que é criada através de reações eletroquímicas ocorridas nas mesmas. Nas baterias de íons lítio, também classificadas como baterias secundárias, o eletrólito é o meio através do qual é feita a transferência de íons lítio entre o cátodo e o ânodo. Também mencionado nos parágrafos anteriores, o funcionamento dos supercondensadores híbridos é baseado em processos eletrostáticos e eletroquímicos, tornando-o mais vantajoso relativamente às demais tecnologias existentes no mercado.

Em seguida apresentam-se algumas das vantagens e desvantagens existentes entre as baterias de lítio e os supercondensadores híbridos.

Tabela 4 - Vantagens da utilização de Supercondensadores Híbridos e Baterias de Lítio. Adaptado de (*What are the advantages and disadvantages of supercapacitors compared to batteries?*, s.d.)

Vantagens	
Ciclos de Carga e Descarga Rápidos:	Os supercondensadores híbridos podem ser carregados e descarregados muito mais rápido do que as baterias de lítio, tornando-os adequados para aplicações que exijam um rápido fornecimento de energia e uma elevada densidade de potência.
Vida Útil:	Os supercondensadores híbridos têm ciclos de vida significativamente mais longos do que as baterias de lítio, uma vez que podem suportar ciclos de carga-descarga na ordem dos milhares, sem apresentarem uma degradação significativa.

Tabela 5 - Vantagens da utilização de Supercondensadores Híbridos e Baterias de Lítio (continuação). Adaptado de (*What are the advantages and disadvantages of supercapacitors compared to batteries?*, s.d.)

Vantagens	
Intervalo Amplo de Temperatura de Operação:	Os supercondensadores híbridos podem funcionar em temperaturas extremas, tanto elevadas como baixas, tornando-os adequados para aplicações em ambientes agressivos. Em contrapartida as baterias de lítio devem funcionar em ambientes com temperaturas mais controladas.
Manutenção Reduzida:	Os supercondensadores requerem manutenções mínimas, uma vez que não sofrem do efeito de memória ou de outros mecanismos de degradação que normalmente estão associados às baterias em geral.

Tabela 6 - Desvantagens da utilização de Supercondensadores Híbridos e Baterias de Lítio. Adaptado de (*What are the advantages and disadvantages of supercapacitors compared to batteries?, s.d.*)

Desvantagens	
Baixa Energia Especifica:	Os supercondensadores híbridos tem uma energia especifica mais baixa do que as baterias de lítio, o que significa que podem armazenar menos energia por unidade de volume ou de peso
Elevadas Taxas de Auto-Descarga:	Os supercondensadores híbridos têm uma taxa de auto-descarga mais elevada do que as baterias de lítio, o que se traduz numa perda de energia mais rápida quando não estão em utilização.
Custo:	Normalmente, os supercondensadores híbridos são mais caros do que as baterias de lítio, o que acaba por ser um fator que limita a sua aquisição.
Variação da Tensão:	Os valores de tensão de um supercondensador híbrido diminuem linearmente à medida que se descarregam, ao contrário do que acontece nas baterias de lítio que mantém uma tensão relativamente constante. Para determinadas aplicações, isto pode exigir circuitos de regulação de tensão adicionais.

2.9 Comparação das Tecnologias de Armazenamento de Energia

Como referido anteriormente, as tecnologias de armazenamento de energia podem ser utilizadas para diferentes funcionalidades. A capacitância ou capacidade elétrica, C , medida em farads (F) é a grandeza escalar que mede a capacidade de armazenamento de energia em equipamentos/componentes elétricos, relacionando a carga com a diferença de potencial (Wikipédia, Capacitância, s.d.).

Esta grandeza é calculada através da razão entre a carga elétrica, q , armazenada nesse componente e a diferença de potencial, ΔV , aplicada aos elétrodos desse componente.

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \frac{[C]}{[V]} = [F]$$

A aplicação de uma determinada tecnologia de armazenamento de energia está relacionada com o seu nível de potência e, como tal, os seus campos de aplicação tornam-se mais generalizados, dividindo-se em:

- Qualidade de Energia: a energia armazenada é aplicada num curto período de tempo (na ordem dos segundos) para assegurar a qualidade da prestação de serviço;
- Potência de ligação: a energia armazenada é aplicada num intervalo de tempo na ordem dos segundos e minutos de forma a assegurar a continuidade do serviço, ou seja, quando existe comutação de energia;
- Gestão de energia: ocorre sempre que o armazenamento seja utilizado para desacoplar a geração de energia do consumo, nomeadamente, para ocorrer o nivelamento de cargas.

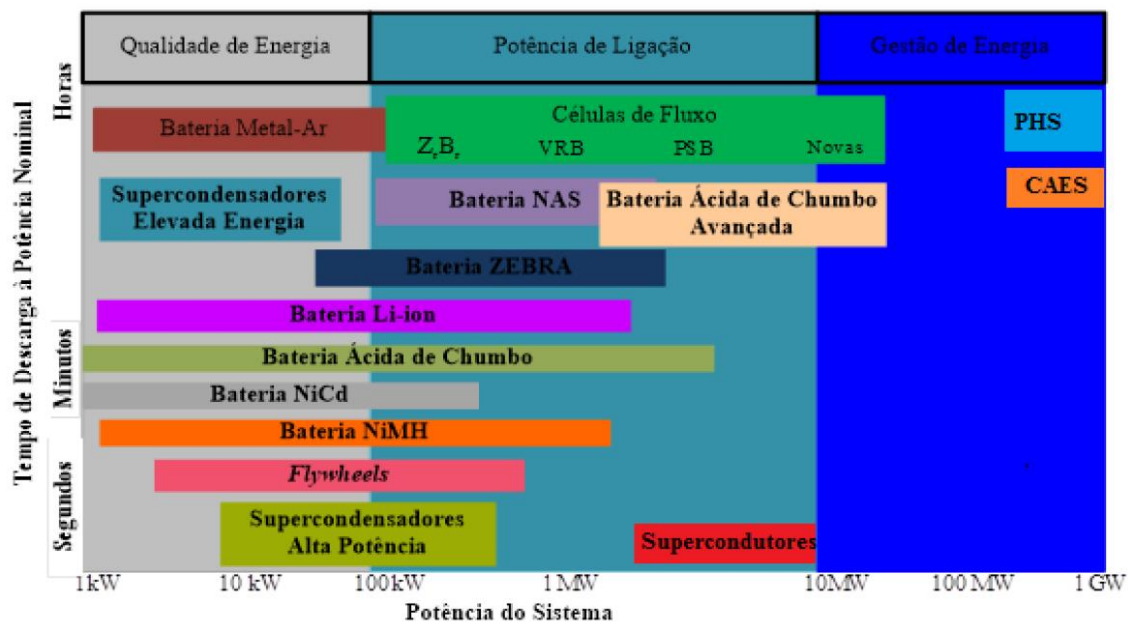


Figura 17 - Enquadramento das Tecnologias de Armazenamento de Energia de acordo com o seu campo de aplicação, adaptado de (Lopes, 2015)

Através da figura anterior verifica-se que os campos de aplicação das diferentes tecnologias se encontram relacionados com o nível de potência do sistema de armazenamento de energia. As aplicações que prezam pela qualidade de energia são aquelas que possuem os níveis de potência mais baixos e os tempos de descarga mais reduzidos, tratando-se assim dos supercondensadores, volantes de inércia (*Flywheels*) e de algumas baterias. Por sua vez, as baterias que possuem tempos de descarga mais elevados, são aquelas que são indicadas para aplicações de potência de ligação, enquanto que o armazenamento de ar comprimido (CAES) e o armazenamento hidroelétrico reversível (PHS), dada a sua dimensão, potência e tempo de descarga, acabam por ser os mais indicados para os campos de aplicações de gestão de energia (Lopes, 2015).

2.9.1 Energia Específica e Potência Específica

A energia específica e potência específica são parâmetros cruciais a ter em conta na comparação entre as tecnologias de armazenamento de energia, pois dependendo da sua função, os valores requisitados para tal serão alterados.

Desta forma, no gráfico da figura que se segue é apresentada a comparação entre energia específica e potência específica de diversas tecnologias para armazenamento de energia.

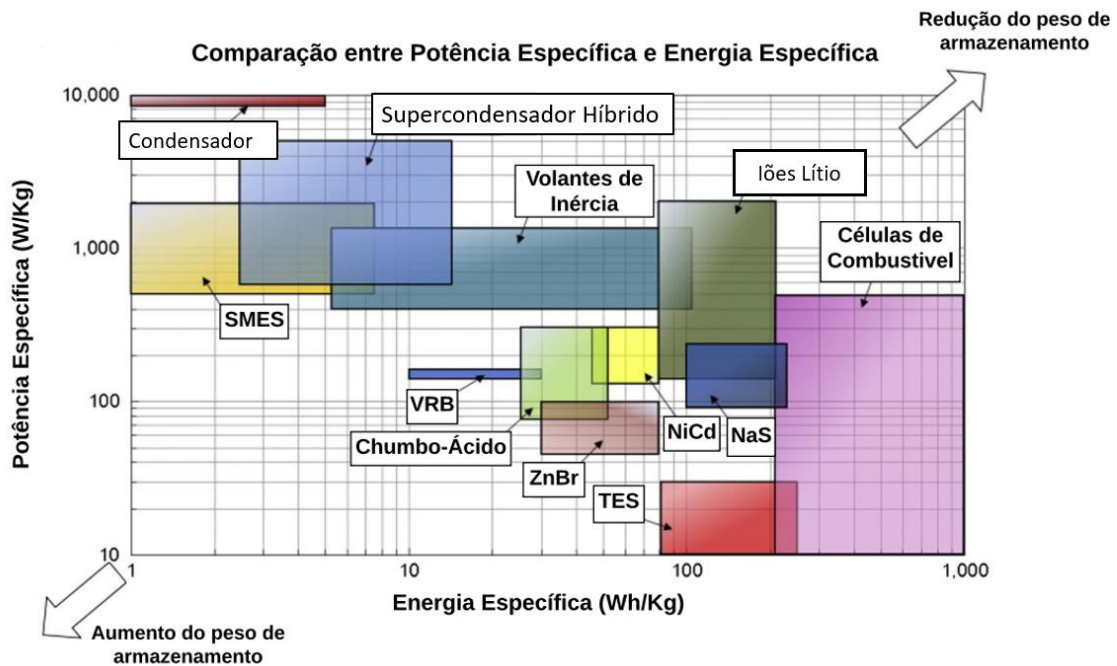


Figura 18 - Posicionamento das Tecnologias de Armazenamento de Energia relativamente à sua Energia e Potência Específica, adaptado de (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015)

Do gráfico da figura anterior, resulta que para obter uma determinada quantidade de energia, quanto maior for a sua potência específica bem como a energia específica, menor será o peso do sistema de armazenamento de energia. Desta forma, as aplicações de menor peso encontram-se no canto superior direito do gráfico e as aplicações de maior peso no canto inferior esquerdo.

Os condensadores e supercondensadores possuem valores de potência específica elevada, pelo que apresentam um tempo de resposta relativamente rápido, comparativamente às demais tecnologias, sendo por isso, mais direcionadas para aplicações que prezam pela qualidade de energia, isto é, rapidez no fornecimento de energia (Aneke & Wang, 2016), (Leal, Hartmann, Gehrke, & Salvadori).

Os volantes de inércia, as baterias de fluxo e a maioria das baterias secundárias apresentam valores médios de energia e potência específicas, o que justifica as diversas aplicações das baterias em diferentes áreas. Focando ainda a nossa atenção nas baterias, as baterias de iões lítio apresentam valores elevados de energia específica bem como de potência específica, o que promove o desenvolvimento e aplicações para baterias de iões lítio bastante diversificada (Aneke & Wang, 2016), (Leal, Hartmann, Gehrke, & Salvadori).

2.9.2 Custos das tecnologias de armazenamento de eletricidade

À semelhança de qualquer aplicação, o fator económico também é considerado bastante relevante no setor do armazenamento de energia. Este custo é influenciado pela quantidade de energia que esse sistema pode armazenar bem como pela potência máxima do mesmo, sendo ainda influenciado pelo custo de construção como já fora referido anteriormente.

A comparação de custos é feita com base no preço por unidade de energia armazenada (kWh) e por potência (kW), estando apresentada na figura que se segue.

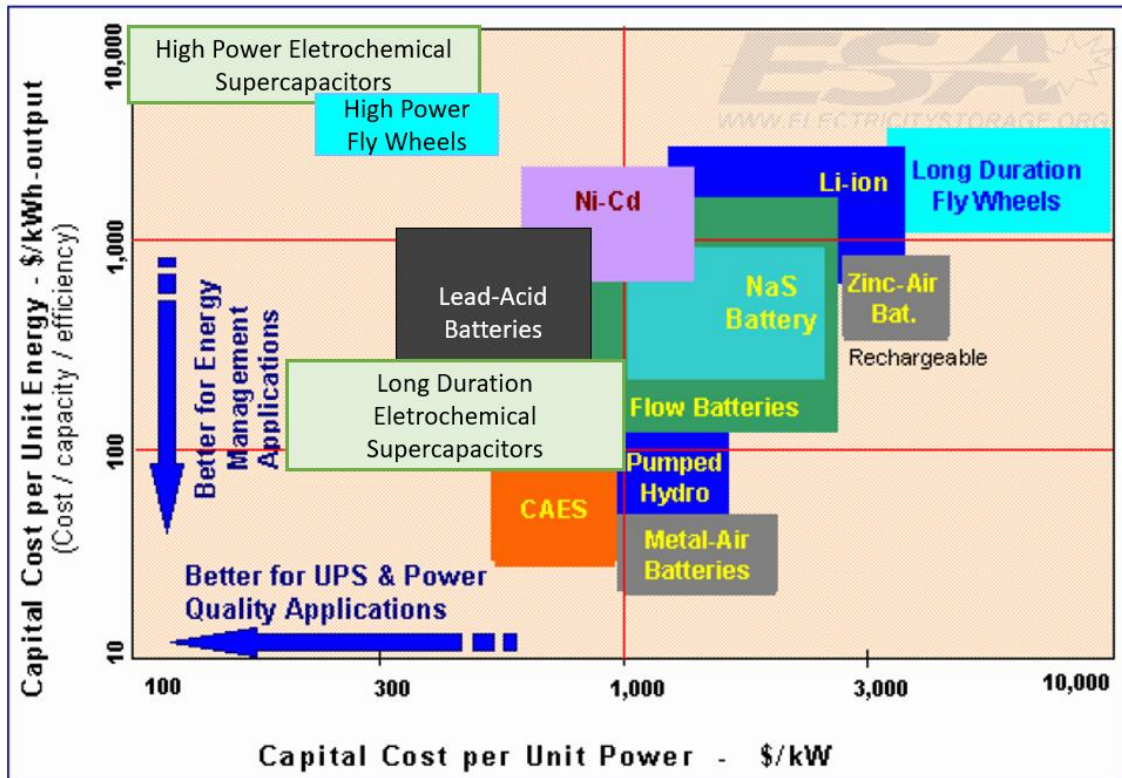


Figura 19 - Custos de Energia Vs. Custos de Potência, adaptado de (Izzati, Ariffin, Zain, Nordin, & Saad, 2021)

Dentro da gama de preços apresentada, verifica-se que a maioria das baterias apresentam valores médios em termos de custos de energia na ordem das centenas de €/kWh e, valores médios/elevados para o custo de capital (valores que podem alcançar os 300€/kWh no caso das baterias de chumbo-ácido, podendo ir até aos 3 000€/kWh no caso de se tratar de baterias de iões-lítio).

Quando se trata de supercondensadores e volantes de inércia (*flywheels*) de elevada potência, o seu custo de energia aumenta significativamente, podendo alcançar valores na ordem dos 8 000€/kWh e 5 000€/kWh no caso de se tratar de supercondensadores e volantes de inércia (*flywheels*) de longa duração.

A tabela que se apresenta em seguida concentra todas as informações acerca dos parâmetros característicos de cada uma das tecnologias de armazenamento de energia mencionadas ao longo dos tópicos apresentados nas páginas anteriores.

Tabela 7 - Principais Características das Tecnologias de Armazenamento de Energia, adaptado de (Costa, 2019), (Lopes, 2015) e (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015)

Energia Armazenada	Tecnologia	Potência	Ordem Tempo de Resposta	Vida Útil	Potência Específica	Energia Específica	Custo		Eficiência
		(MW)		(anos)	[W/kg]	[Wh/kg]	[€/kWh]	[€/kW]	[%]
Mecânica	Aproveitamento Hidroelétrico (PHS)	100 -1 000	Minutos	40-60	0,1-0,4	0,5-1,5	70-150	600-1500	75-85
	Ar comprimido (CAES)	10 – 1 000	Minutos	20-40	1,5-3	2-6	50-80	400-1200	40-75
	Volantes de Inércia (Flywheels)	0,1-20	Segundos	15-20	500-5 000	5-130	1000-3500	100-300	90-95
Eletroquímica	Bateria Iões-Lítio	1-100	Milissegundos	5-15	230-340	75-250	200-1800	700-3000	75-90
	Bateria Chumbo-Ácido	0-40	Milissegundos	5-15	75-300	30-50	50-300	300-650	70-90
	Bateria Redox de Vanádio (VRFB)	2-50	Milissegundos	10-20	-	10-75	100-1000	2500	75-85
	Bateria de Brômio-Zinco	1-10	Milissegundos	5-10	50-150	60-85	100-700	500-180	60-70
Elétrica	Bobinas Supercondutoras	0,2-2,5	Milissegundos	>20	1000-4000	0,5-5	8000-10000	250-400	95-98
	Condensadores	2-10	Milissegundos	1-10	>3000	0,05-5	460-930	190-370	60-70
	Supercondensadores	0,1-10	Milissegundos	10-30	500-5000	0,05-30	300-4000	100-400	84-95
Química	Hidrogénio	0,01-50	Segundos	5-15	0,2-20	600	-	9000	20-50
	Células de Combustível	0-10	-	-	-	800-100000	-	-	-
Térmica		0,05-1	-	15-30	10-30	80-120	20-50	190-280	30-60

3. Instalação do Supercondensador Híbrido na CERUÉ

A Cátedra Energias Renováveis da Universidade de Évora foi criada em 2010 e tem como principal objetivo o desenvolvimento de soluções tecnológicas e aplicações da energia solar para a descarbonização de diferentes setores da economia. Atualmente possui um conjunto de infraestruturas experimentais que possibilitam a investigação no setor da energia solar, em áreas como o solar térmico, energia solar de concentração, calor de processo, fotovoltaico ou armazenamento de energia. Uma das suas infraestruturas, a SolGrid, designada também de microrrede, constitui uma rede experimental de baterias e de sistemas fotovoltaicos para a geração e armazenamento de energia.

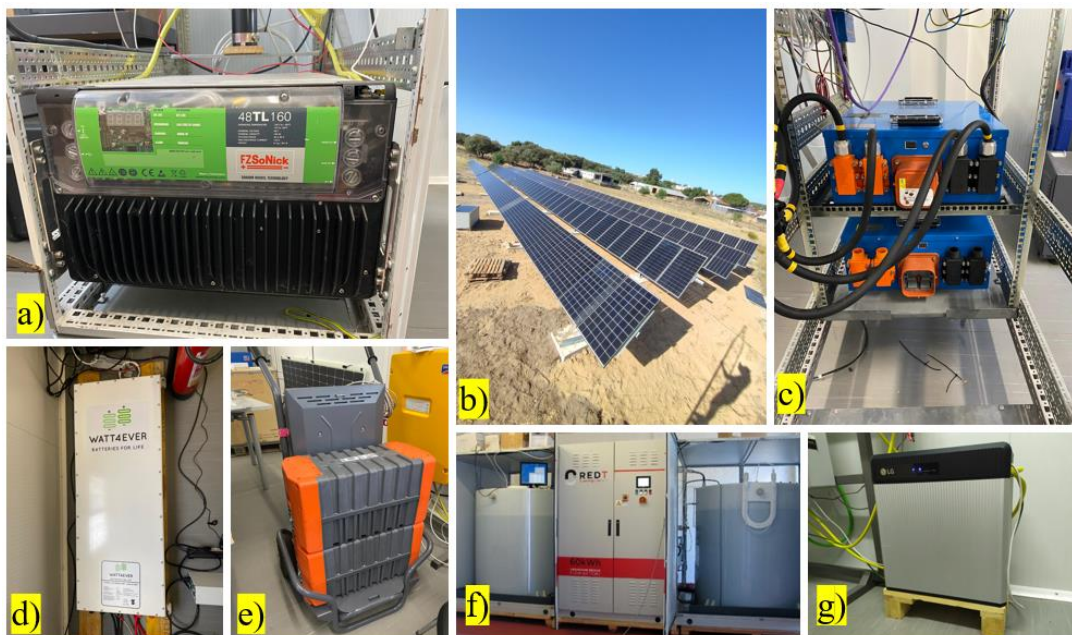


Figura 20 - a) Bateria de sais fundidos de Sódio Níquel (7,6 kWh); b) Sistema de Geração Fotovoltaica com 4 tecnologias e seguimento solar a um eixo, ligado à microrrede (80 kWp); c) Supercondensadores Híbridos de base de Carbono; d) Bateria de 2ª vida de iões Lítio (18 kWh); e) Bateria de 2ª vida de iões Lítio modulares (6 kWh); f) Bateria de fluxo redox de Vanádio (60 kWh); g) Bateria de iões Lítio (9,8 kWh)

Para além destas tecnologias instaladas, está ainda em fase final de construção um circuito de bombagem fotovoltaica à escala real.



Figura 21 - Circuito de Bombagem real construído na CERUÉ

O esquema de todas as tecnologias instaladas na SolGrid apresenta-se em seguida.

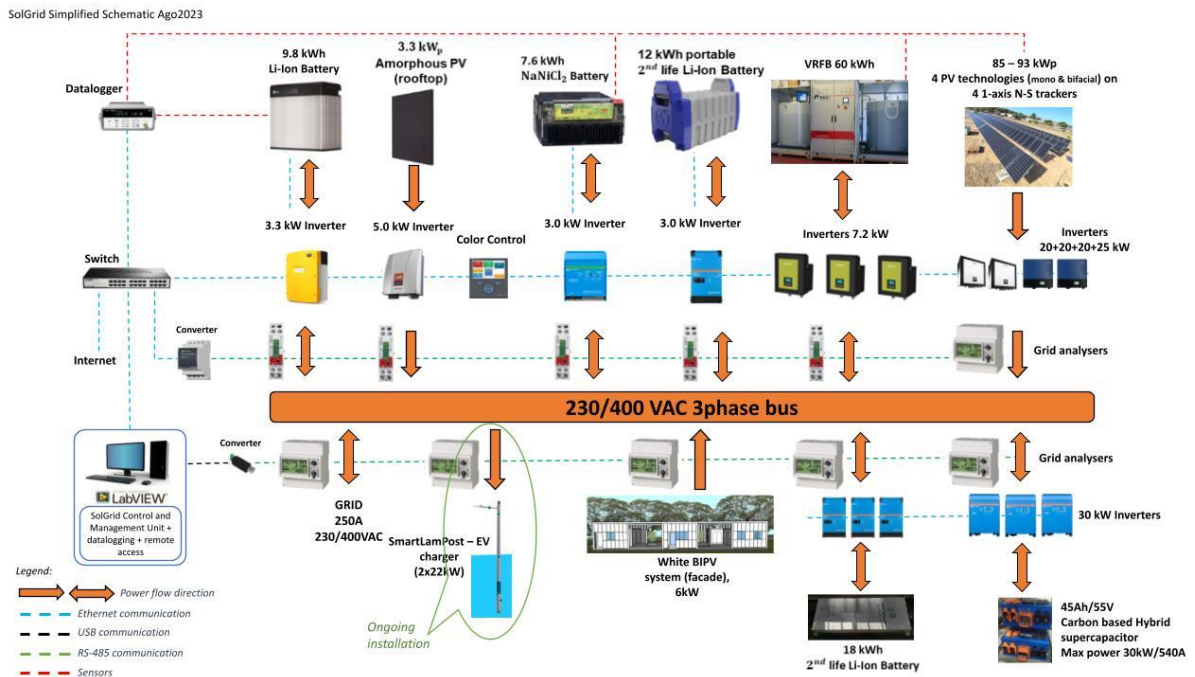


Figura 22 - Esquema Simplificado das Tecnologias Instaladas na SolGrid da CERUÉ

O esquema que se apresenta em seguida pretende ilustrar o controlo a ser realizado com a instalação dos supercondensadores híbridos na SolGrid, quando aplicado à bombagem fotovoltaica.

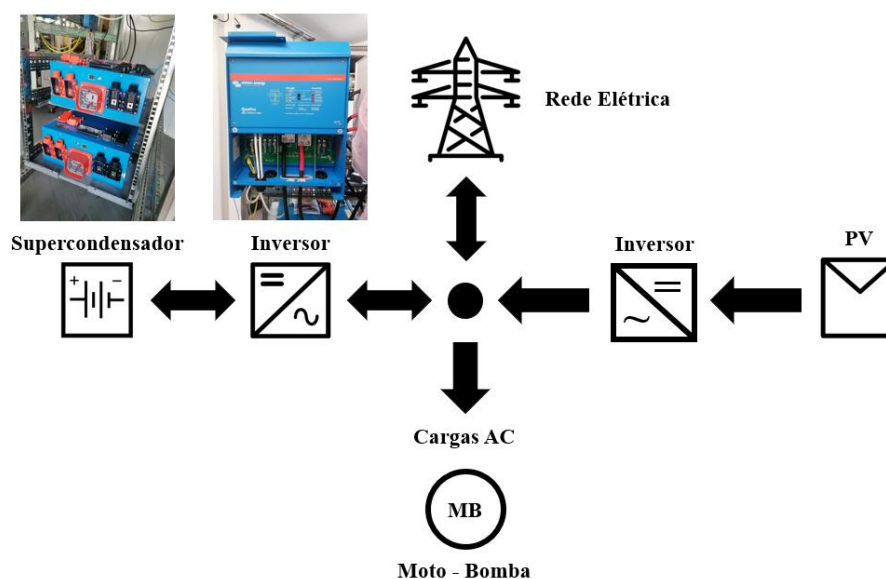


Figura 23 - Esquema ilustrativo da aplicação dos Supercondensadores Híbridos na Bombagem Fotovoltaica

A instalação do supercondensador e dos respetivos inversores na microrrede seguiu as regras técnicas de instalações elétricas de baixa tensão (Gold Energy, s.d.), (Lojaluz, s.d.). As referidas regras técnicas de instalação estão publicadas no decreto-lei nº252/2015 de 19 de agosto (Eletrónico, s.d.) e seguem o regulamento de segurança das redes de distribuição de baixa tensão, publicado no decreto-lei nº90/84 de 26 de dezembro (Diário da República Eletrónico, 1984).

3.1 Especificações Técnicas do Supercondensador e Inversores

3.1.1 Supercondensador Híbrido

O supercondensador instalado na microrrede foi adquirido à empresa belga, Kurt Energy (Kurt Energy, s.d.), é híbrido e possui uma tecnologia baseada em carbono, que oferece algum destaque e algumas vantagens, atualmente. Esta tecnologia possui uma Energia Especifica muito elevada, tendo a possibilidade de armazenar uma grande quantidade de energia, podendo fornecê-la 20 vezes mais rápido do que as baterias tradicionais à base de lítio (Kurt Energy, s.d.).

Vantagens do uso de supercondensadores à base de carbono:

- Elevada Energia Especifica;
- Potência específica elevada;
- Não existe risco de fuga térmica;
- Tempo vida útil mais longo;
- Inexistência de Manutenção;
- Carregamento Rápido permite reduzir o tempo improdutivo;
- Tecnologia segura e fiável para todas as temperaturas (Kurt Energy, s.d.).

O modelo de células que constituem este supercondensador é o *cell type 18650, 22S 36P* contando na sua totalidade com 792 células, em que 22 células se encontram dispostas em série e as restantes 36 células dispostas em paralelo, estando as suas principais características apresentadas na tabela que se segue.

O modelo de célula utilizado é o modelo mais comum nas baterias de íões-lítio, em que o termo 18650 se refere ao seu tamanho em milímetros, que neste caso é de, $18\text{ mm} \times 65\text{ mm}$, um pouco maior do que uma pilha AA. Este modelo de célula é normalmente utilizado em lanternas, computadores portáteis e dispositivos de grande consumo devido à sua elevada capacidade e elevadas taxas de descarga (BatteryJunction.com, s.d.).

Tabela 8 - Especificações Técnicas do Supercondensador de modelo de célula 18650, 22S 36P de 792 células instalado na CERUÉ

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
Capacidade Nominal [Ah] @1C	45,0 ($\pm 5\%$)	Capacitância [F]	5400
Energia Nominal [kWh]	2,61	Tensão Nominal [V]	55
Temperaturas de Operação [$^{\circ}\text{C}$]	-40 a 80	Temperaturas de Armazenamento [$^{\circ}\text{C}$]	-5 a 35
Densidade de Energia (células) [Wh/kg]	80,0	Potência Específica (células) [W/kg]	1500
Número de Ciclos de Vida	> 20 000	Peso [kg]	57,36
Dimensões [mm]	500 \times 350 \times 180		

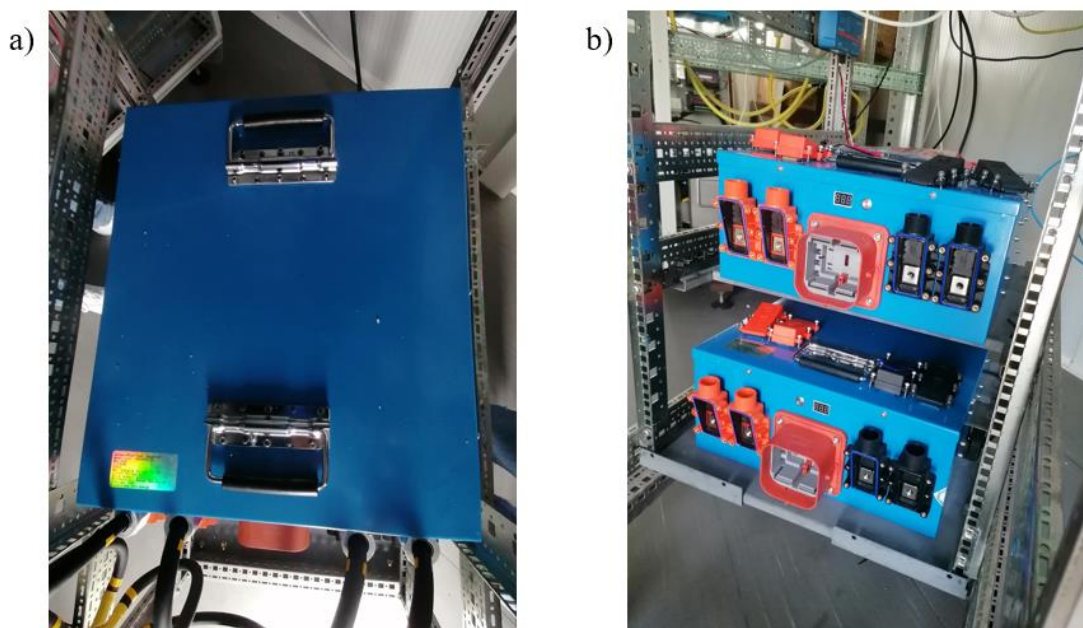


Figura 24 - a) Vista de topo do Supercondensador; b) Vista Frontal do Supercondensador

O supercondensador possui um pequeno *display* que permite visualizar as leituras da tensão aos terminais do componente em tempo real. Para além disso, possui conectores e um fusível manual, que foram fornecidos pelo fornecedor. Quando este fusível é colocado, é feita a ligação interna entre os barramentos, ou seja, é feita a ligação de todo o circuito no interior do supercondensador, sendo que, quando o mesmo é removido não é estabelecida qualquer ligação no seu interior, funcionando como uma proteção.

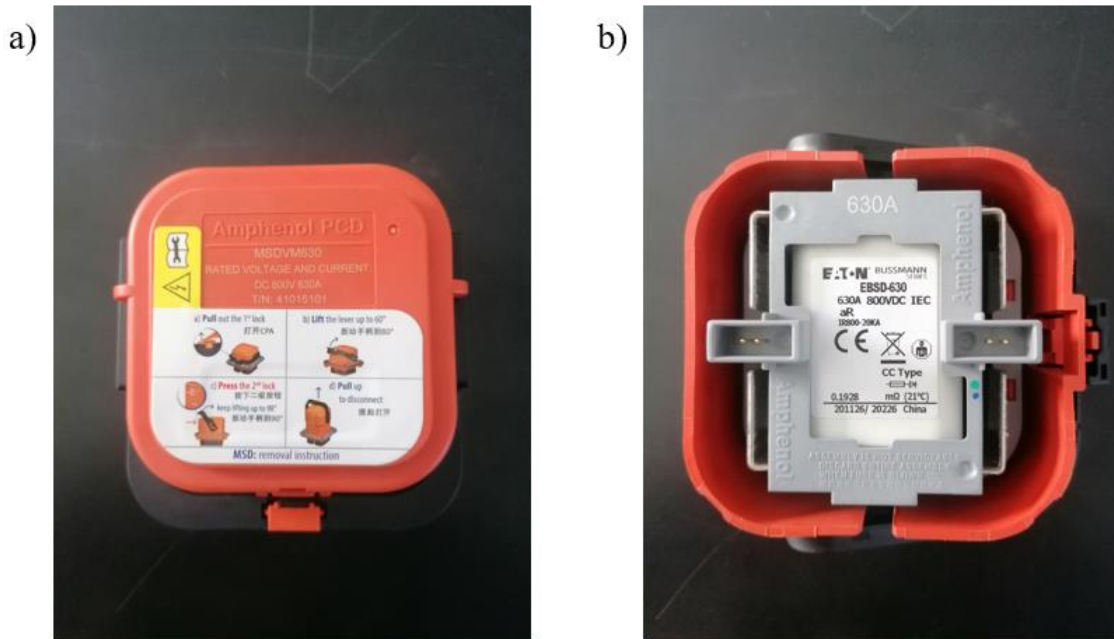


Figura 25 - a) Vista Frontal do Fusível Manual; b) Aparência Interior do Fusível Manual

No primeiro contacto com o supercondensador, o utilizador deve certificar-se que não existe qualquer ligação estabelecida com o mesmo, uma vez que poderá afetar as medições e, deverá ter o cuidado de utilizar luvas isolantes de borracha da classe 00, certificadas ao abrigo da norma IEC 60903 para o manuseio deste componente. A classe 00 ao qual pertencem as referidas luvas, define uma tensão máxima de utilização de 500 V (E-Redes).

Neste primeiro contacto, o fusível não deverá estar colocado, pois o objetivo é medir baixas tensões inferiores a 10 mV, uma vez que tensões baixas se traduzem na ausência de carregamento do supercondensador e, ao colocar-se o fusível no supercondensador, o circuito de células no interior do supercondensador fica fechado, ficando apto para ser carregado.

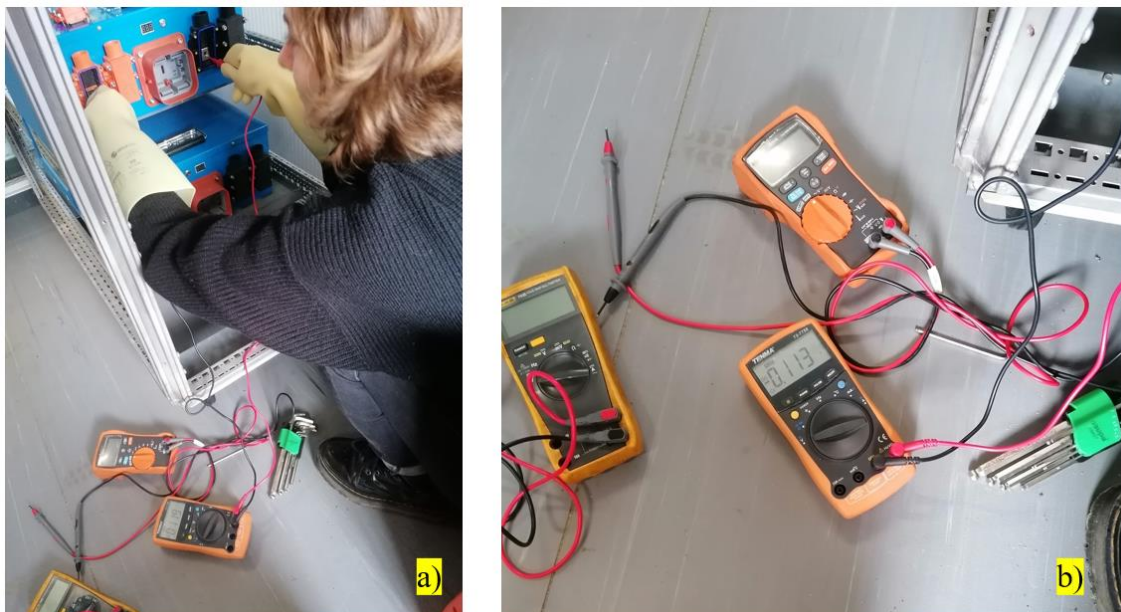


Figura 26 - a) Primeiro contacto com o Supercondensador; b) Primeiras Leituras feitas com Voltímetro

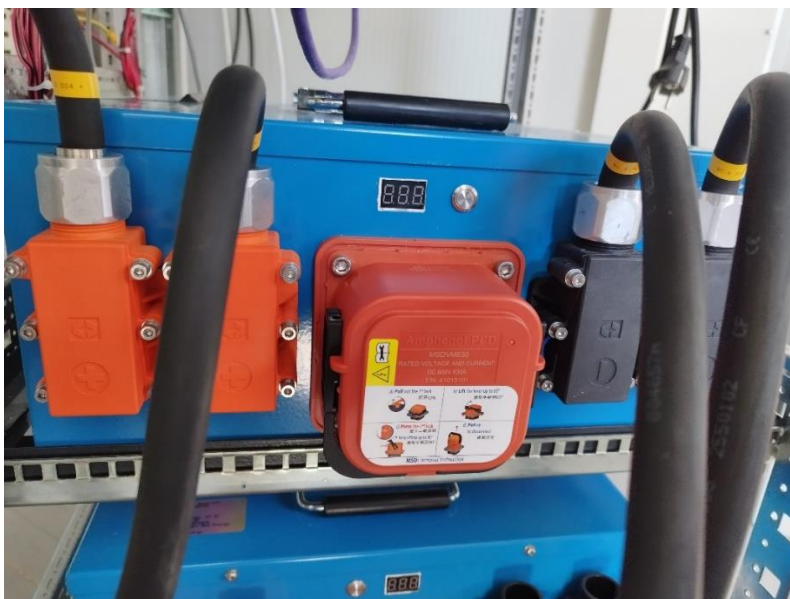


Figura 27 - Fusível Manual Inserido no Supercondensador

3.1.2 Inversor Bidirecional

Em todas as instalações elétricas fotovoltaicas e em instalações elétricas com sistemas de armazenamento, é fundamental a existência de um inversor. Este equipamento permite fazer a conversão de corrente contínua para corrente alternada e vice-versa. Para esta instalação, selecionaram-se três inversores que tivessem as características elétricas compatíveis com as do supercondensador selecionado. O modelo de inversor selecionado é o *Quattro 48/10000/140-100* da *Victron Energy*, que é uma combinação de inversor e carregador que pode aceitar duas entradas AC e ligar-se automaticamente à fonte ativa. Integra diversas funções tais como: inversor de onda sinusoidal verdadeira, carregamento variável, tecnologia híbrida *PowerAssist* e integração do sistema em funcionamento trifásico de fase dissociada e em paralelo (Energy V. , Inversor/Carregador: Quattro, s.d.).

É um equipamento comercial e certificado para instalações dentro do espaço europeu conforme consta na Diretiva de Compatibilidade Eletromagnética (EMC) 2014/30/EU (Europeia, Diretiva 2014/30/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 26 de Fevereiro de 2014 relativa à harmonização da legislação dos Estados-Membros respeitante à compatibilidade eletromagnética (reformulação), 2014) (Diretiva Europeia que garante que um dispositivo elétrico ou eletrónico não emite radiação eletromagnética nem é afetado pela radiação eletromagnética de outros equipamentos), na Diretiva de Baixa Tensão 2014/35/EU (Europeia, Diretiva 2014/30/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 26 de Fevereiro de 2014 , 2014) (Diretiva Europeia que pretende garantir que os equipamentos elétricos comerciais cumprem os requisitos de modo a garantir a segurança pessoal e animal nas instalações domésticas) e na Diretiva 2011/65/EU (Europeia, Diretiva 2011/65/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de Junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrónicos (reformulação), 2011), que restringe o uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrónicos.

A Tabela 9 apresenta algumas das especificações técnicas do inversor utilizado.

Tabela 9 - Especificações Técnicas do inversor Quattro 48/10000/140-100 da Victron Energy (Energy V. , Inversor/Carregador: Quattro, s.d.)

Inversor	
Tensão Nominal DC	48 V (38 – 66 V)
Tensão e Frequência de Saída	120 V AC 60 Hz ($\pm 1\%$)
Potência de Saída Contínua a 25°C	10 000 VA
Pico de Potência Máxima	20 000 W
Eficiência Máxima, η	96 %
Consumo em Vazio	60 W
Carregador	
Tensão de Carga de Absorção	57,6 V
Tensão de Carga de Flutuação	55,2 V
Tensão no Modo de Armazenamento	52,8 V
Corrente Nominal de Carga	140 A
Sensor de Temperatura	Sim



Figura 28 - a) Vista Frontal de um dos inversores; b) Vista Lateral de um dos inversores utilizados na instalação

Relativamente à funcionalidade de carregador neste inversor, é necessária a compreensão das diferentes etapas de carga de uma bateria, pois no painel principal deste inversor existem três *led's* que estão associados a cada uma dessas etapas, como é possível observar na figura que se segue.



Figura 29 - Painel Principal do Inversor Carregador Quattro 48/10000/140-100 da Victron Energy

Na primeira etapa da curva de carga de uma bateria tradicional ocorre a fase de “Bulk”, em que é dado o primeiro impulso de carga à bateria, utilizando esta toda a potência possível e máxima do sistema para dar início ao processo. O inversor carregador fornece corrente ao seu nível máximo de forma a aumentar a tensão e alcançar-se a tensão de absorção, ainda que esteja limitada de acordo com os limites específicos estabelecidos no mesmo.

Durante a fase de “Absorção”, o inversor carregador continua a fornecer corrente à bateria, mas não permite que os níveis de tensão ultrapassem os níveis de absorção especificados. Desta forma, à medida que a bateria vai ficando carregada, o inversor carregador fornece cada vez menos corrente à bateria, pelo que esta acaba por ir diminuindo para manter a bateria nos níveis de absorção especificados. Assim, ao atingir-se o tempo de limite estabelecido para a fase de “Absorção”, a carga faz com que o processo de absorção termine, seguindo-se a fase de “float”. A fase de “Absorção” continuará durante tanto tempo quanto necessário, ou até durante um determinado período de tempo consoante assim esteja definido nas definições do inversor carregador, assegurando uma carga completa da bateria sem qualquer sobrecarga (Energy V. , Charging - Bulk, Absorption and Float, s.d.), (Manualslib, s.d.).

Por fim, na fase de “float”, o inversor carregador apenas mantém a tensão da bateria num nível inferior ao que está especificado, atingindo-se os níveis mais baixos de corrente que a bateria consegue suportar, mantendo a carga da bateria a 100% durante algumas horas ou até dias (Energy V. , Charging - Bulk, Absorption and Float, s.d.), (Manualslib, s.d.).

Na figura que se segue, encontram-se esquematizadas as etapas referidas anteriormente.

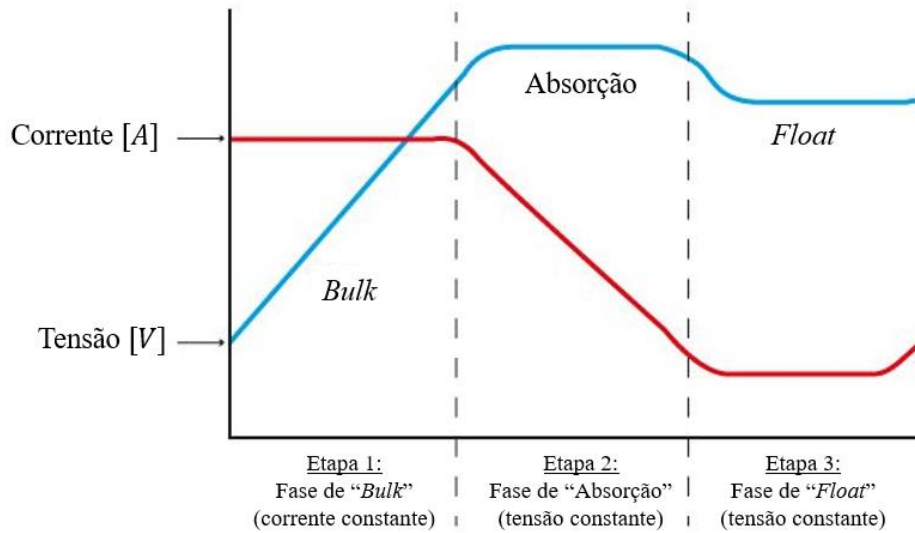


Figura 30 - Etapas de Carga de uma Bateria, esquema adaptado de (AutoSolar, s.d.)

No entanto, de acordo com as especificações que constam no *datasheet* deste supercondensador híbrido de base carbono, os gráficos das variações dos parâmetros de tensão, corrente, temperatura e capacidades de carga e descarga são os seguintes:

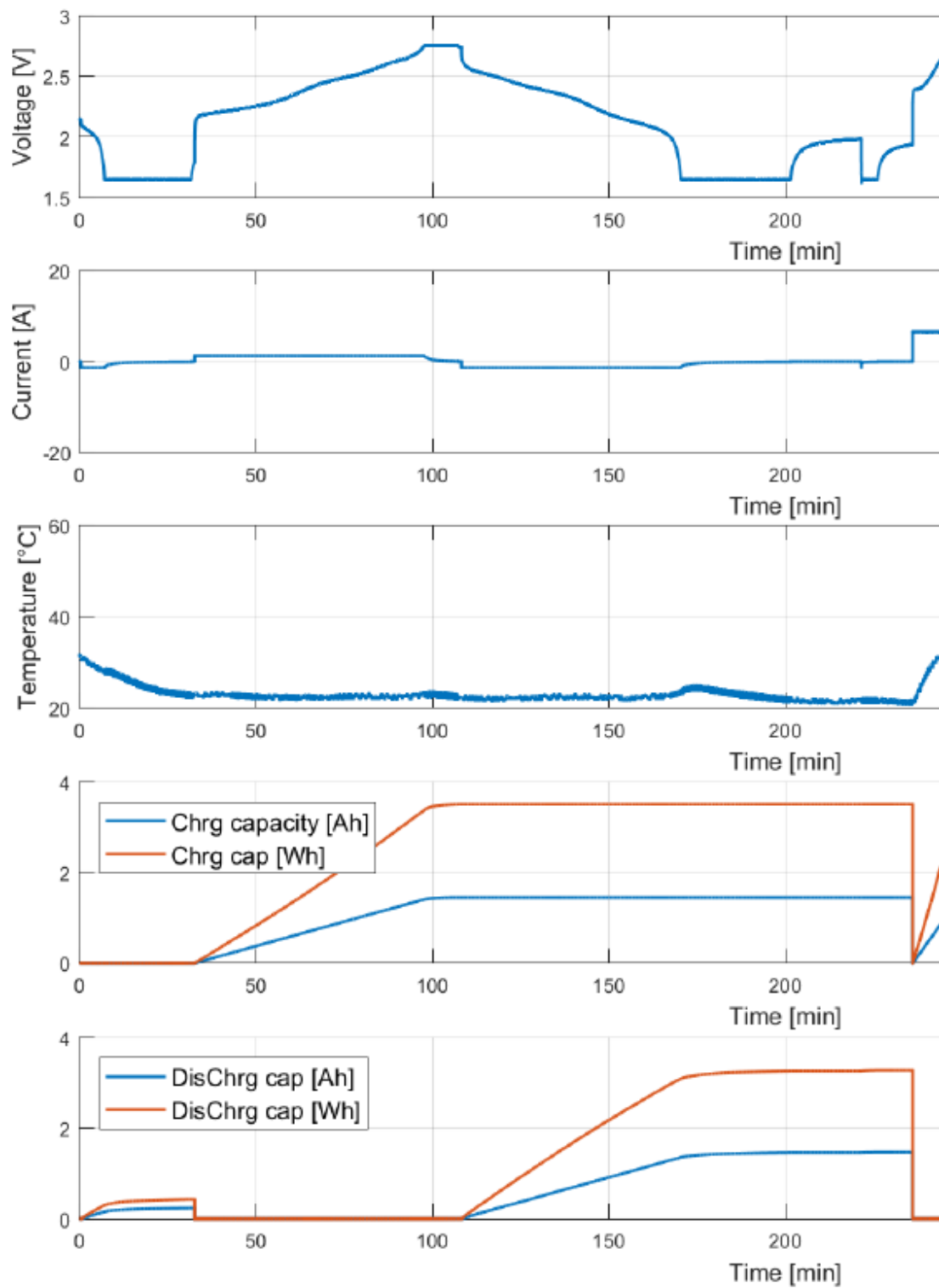


Figura 31 - Variação dos parâmetros de tensão, corrente, temperatura, capacidades de carga e descarga para o Supercondensador Híbrido de base Carbono. Adaptado de (*Kurt Energy, s.d.*)

3.2 Equipamentos e instrumentos utilizados na instalação do Supercondensador

Na instalação desta tecnologia de armazenamento de energia elétrica foram utilizados equipamentos bem como instrumentos de medições digitais, de forma a cumprir os objetivos da presente dissertação. O controlo e a programação da instalação são um dos principais objetivos deste trabalho, sendo de grande importância a otimização da performance de operação do inversor e do supercondensador na instalação elétrica desta microrrede. Para a caracterização e ensaio deste supercondensador é necessária a instalação de um sistema de controlo e de monitorização de todos os parâmetros desta tecnologia, do inversor, da microrrede e do local onde serão instalados os equipamentos que constituem esta instalação de forma a conseguir-se uma monitorização da mesma, através de linguagens de programação.

Os equipamentos e instrumentos de medições que foram utilizados nesta instalação, para além do supercondensador de modelo *cell type 18650, 22S 36P* com 792 células e dos três inversores *Quattro* da *Victron Energy*, foram os seguintes:

- 1 Interruptor de desconexão do supercondensador 500A e 32V DC (Littelfuse, s.d.) (Littelfuse) (Farnell);
- 16 metros de cabo de 70 mm² de secção para fazer as ligações do lado DC da instalação;
- 16 (8+8) terminais de olhal 16 e 8, respetivamente, para cravar nos cabos de 70 mm²;
- 2 Fusíveis de 500 A (Littelfuse);
- 3 Fusíveis de 160 A (Littelfuse);
- 6 porta-fusíveis de 425 A (Farnell, s.d.);
- 4 porta-fusíveis de 800 A (Farnell, s.d.);
- 20 metros de cabos de 50 mm² de secção para fazer as ligações do lado AC da instalação;
- 28 (20+8) terminais de olhal 8 e 16, respetivamente, para cravar nos cabos de 50 mm²;
- 1 Resistência de precisão de 500 A /60 mV (Circutor, s.d.);
- 30 (15+15) terminais de olhal 8 e 10, respetivamente, para cravar nos cabos de 6 mm²;
- 35 metros de cabo de 6 mm² para ligações à terra, neutros e fases;
- Disjuntor de 4 portas 50 A 6KA;
- 1 *Datalogger Keysight 34972A* (Keysight);
- 1 Cerbo GX da *Victron Energy* (Energy V. , Cerbo GX Manual);
- Cabos de Rede *Ethernet* para comunicação;
- Fichas RJ45 para cravar nos cabos de rede *Ethernet*;
- Caixa de Transição para instalação de cabos (Sonepar, s.d.);
- Platina Isolante para a caixa de transição;
- Estrutura de Acrílico para proteção e segurança da instalação.

O Cerbo GX é um acessório exclusivo da *Victron Energy* (Energy V. , Charging - Bulk, Absorption and Float, s.d.) que permite a comunicação entre todos os inversores da marca, estando por isso no centro de toda a instalação, assegurando o funcionamento correto de todos os componentes do sistema, como é o caso dos inversores carregadores e do supercondensador (Energy V. , Cerbo GX Manual). Este acessório é um adaptador de comunicação que funciona através do protocolo Modbus *RTU* e *TCP IP*.

A resistência de precisão é um componente importante na ligação entre o supercondensador e os inversores, pois será utilizada para fazer a medição dos parâmetros elétricos através da lei de *Ohm* (Eletronica PT, s.d.), sendo que neste caso será calculada a corrente em cada fase da ligação trifásica.

O *datalogger* é um dos equipamentos mais importantes nesta instalação, porque todos os equipamentos de leitura analógica estão ligados a este. Este equipamento possui a funcionalidade ADC (*Analogic Digital Converter*) de alta resolução, sendo por isso de extrema importância (Sanches, 2020). Os parâmetros elétricos da resistência de precisão, a temperatura na superfície externa do supercondensador bem como a ambiente, a tensão aos terminais do supercondensador, são alguns dos exemplos de medições analógicas convertidas em sinais digitais através do *datalogger*, posteriormente processados no *software* de controlo desenvolvido através da ferramenta *LabVIEW*.

O interruptor de desconexão do supercondensador 500A e 32V DC, desempenha um papel fundamental na proteção de todo o sistema, pois permite desligar o supercondensador de todo o circuito elétrico, protegendo todos os equipamentos instalados. Este tipo de interruptor é utilizado em sistemas cujos períodos de armazenamento de energia sejam prolongados, ocorrendo a remoção de cargas parasitárias e de pequenas correntes de elétricas que possam danificar a bateria ao longo do tempo (Littelfuse). Na prática este interruptor é utilizado em sistemas de veículos elétricos pelo que a sua adaptação num circuito com um supercondensador é inovadora (Littelfuse, s.d.).

Na figura que se segue são apresentados os principais equipamentos utilizados na comunicação e instrumentação da referida instalação.

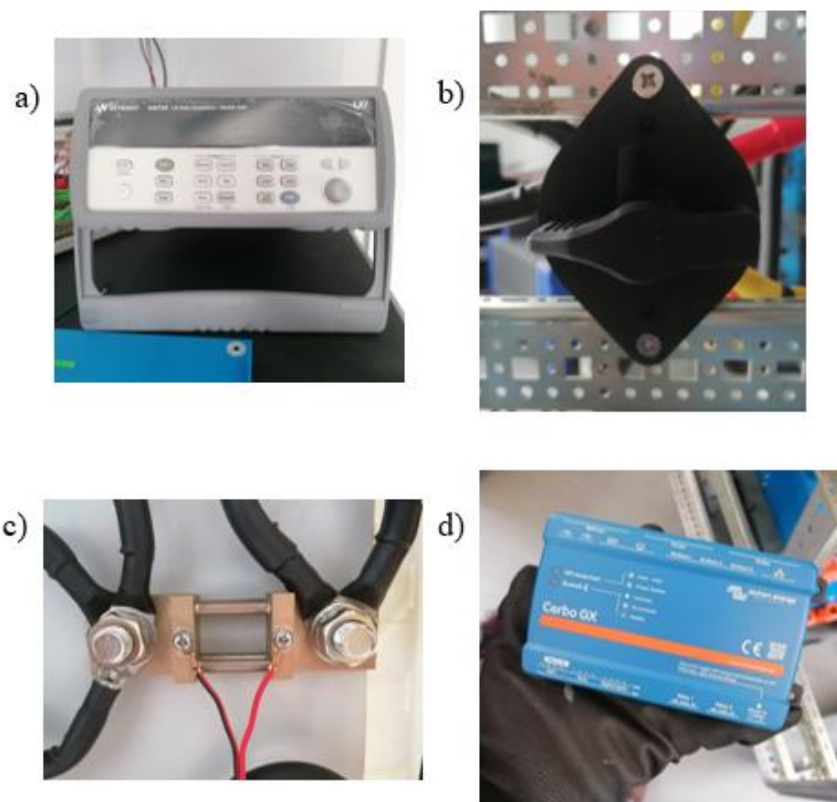


Figura 32 - Equipamentos de aquisição, instrumentação e comunicação utilizados na instalação do Supercondensador, no circuito de corrente contínua e alternada. a) *Datalogger Keysight 34972A*; b) Interruptor de desconexão do Supercondensador; c) Resistência de precisão; d) Cerbo GX da Victron Energy

3.3 Instalação do Supercondensador e dos Inversores na microrrede

Numa primeira fase, foi feita a seleção dos equipamentos necessários para esta instalação, referidos no tópico anterior. Posteriormente, foi feito um dimensionamento da cablagem necessária para toda a instalação ficar a funcionar corretamente, proteções para os equipamentos, isto é, dimensionamento dos fusíveis e quantidades de terminais necessários para cravar nos cabos dimensionados.

Feito o dimensionamento e aquisição dos equipamentos, foi necessário encontrar uma estrutura metálica que permitisse suportar a instalação dos equipamentos. Essa estrutura teve de ser previamente tratada, tendo sido totalmente desmontada, lixada e pintada de novo, de forma que ficasse com boa aparência.

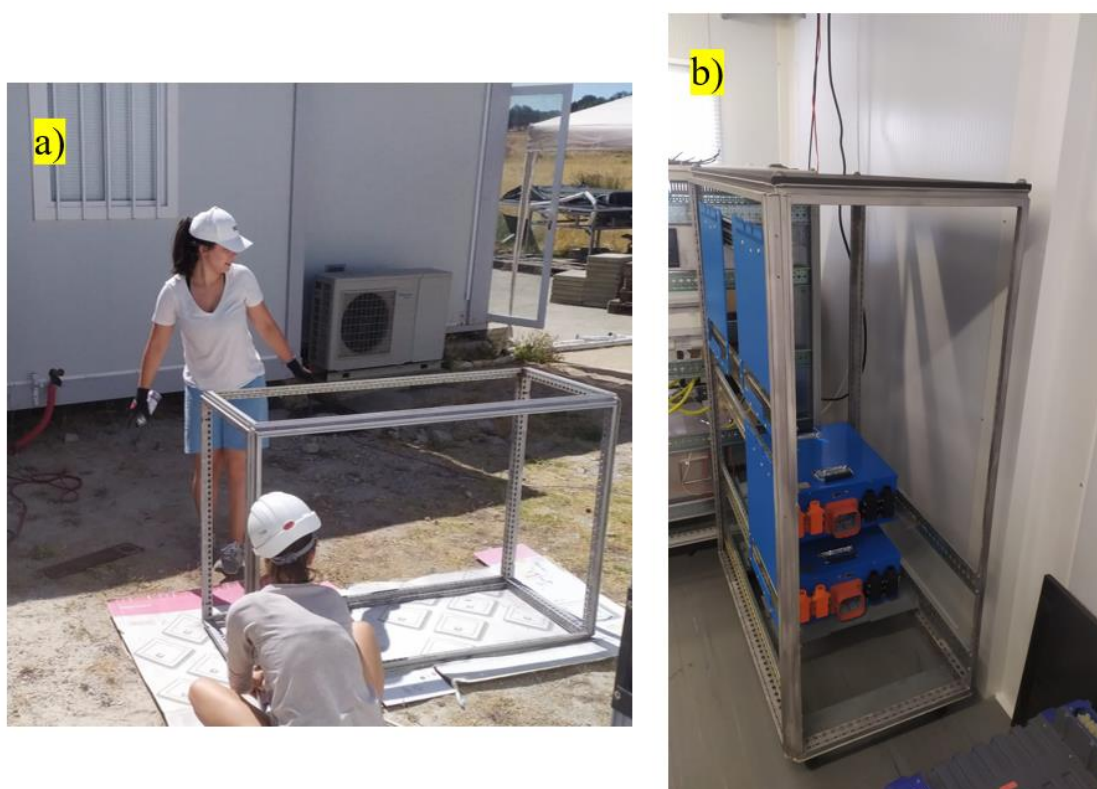


Figura 33 - a) Tratamento da Estrutura Metálica; b) Disposição dos Equipamentos na Estrutura

Deu-se início ao corte dos cabos necessários bem como à cravagem de terminais nos referidos cabos de forma a serem instalados nos equipamentos. Essa cravagem de cabos foi feita nos cabos que ficaram instalados no interior do quadro elétrico, nos cabos que saíram do quadro elétrico para ligar ao interruptor de desconexão, nos cabos partem do interruptor de desconexão para o supercondensador e, nos cabos de fase/neutro/terra que unem cada inversor.

Para além disso, também tiveram de ser cravadas fichas aos cabos de rede *Ethernet*, pois são estes que permitem fazer a comunicação entre os inversores e o Cerbo GX.



Figura 34 - a) 1ª Fase de Disposição dos Fusíveis no Quadro Elétrico; b) 2ª Fase de Disposição dos Fusíveis nos porta-fusíveis e Terminais de Olhal no Quadro Elétrico; c) Ligação dos cabos elétricos na platina isolante da caixa de transição; d) Finalização da instalação da caixa de transição.

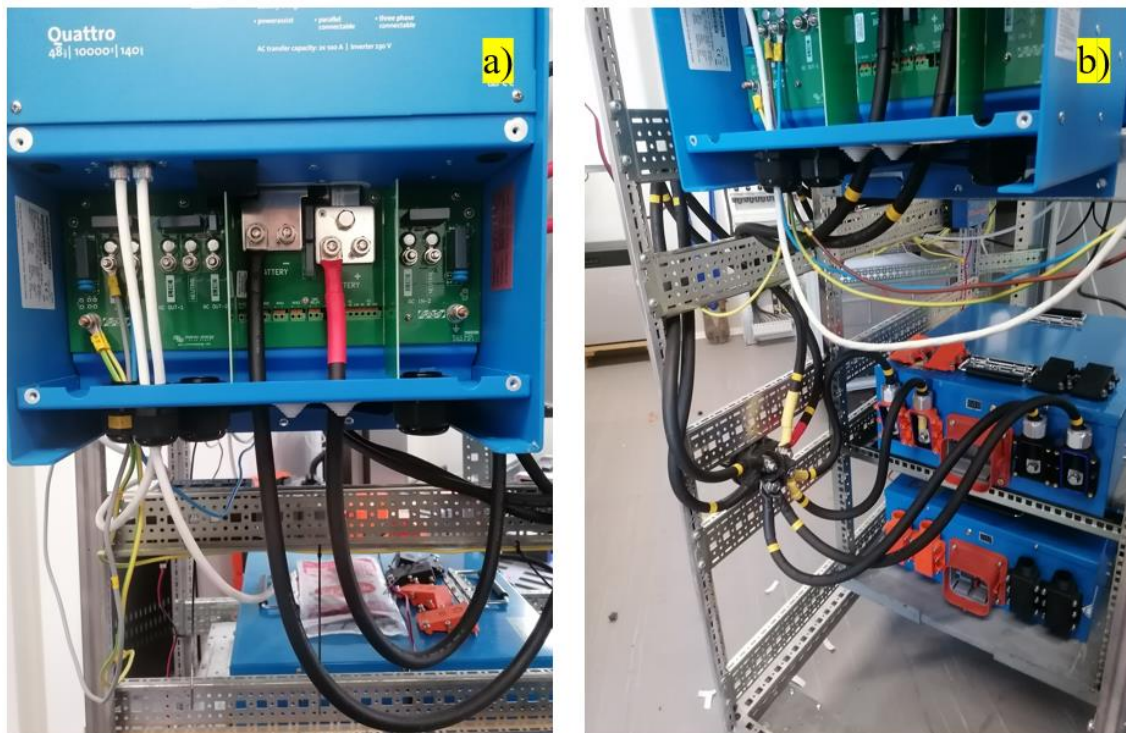


Figura 35 - a) Ligação de Cabos a cada um dos inversores; b) Ligação dos Cabos do quadro elétrico até ao Supercondensador

Todos os cabos de fases, neutro e terras, foram puxados do quadro elétrico principal que está instalado na SolGrid e, que permite o funcionamento de toda esta estrutura.

Finalizado o processo de instalação de cabos nos equipamentos, iniciou-se a instalação de sensores nos equipamentos de forma a fazer um controlo sobre as variáveis a serem lidas. Foram instalados sensores que permitem fazer um controlo das leituras de tensão, de temperaturas e de correntes.

Em cada um dos três inversores foram instalados sensores que permitem fazer a leitura da tensão instantânea que passa em cada um dos terminais. Foram instalados dois termopares, um na superfície do supercondensador para medir a temperatura na superfície do próprio equipamento e outro termopar mais no exterior da estrutura para medir a temperatura ambiente em torno da mesma.

Por fim, foi instalado um sensor na resistência de precisão, para se medir a corrente através da lei de *Ohm*, uma vez que como é conhecido o valor da resistência instalada, este valor acaba sempre por ser estável com a temperatura e, assim, é possível obterem-se os valores da corrente que passam aos terminais da resistência através da medição da tensão nos terminais da mesma.

Todos estes sensores mencionados, foram instalados no *multiplexer* do *datalogger* da Keysight (Keysight) utilizado, que permite fazer e guardar as leituras em tempo real juntamente com as restantes variáveis a serem lidas ao longo de uma carga ou descarga do supercondensador.

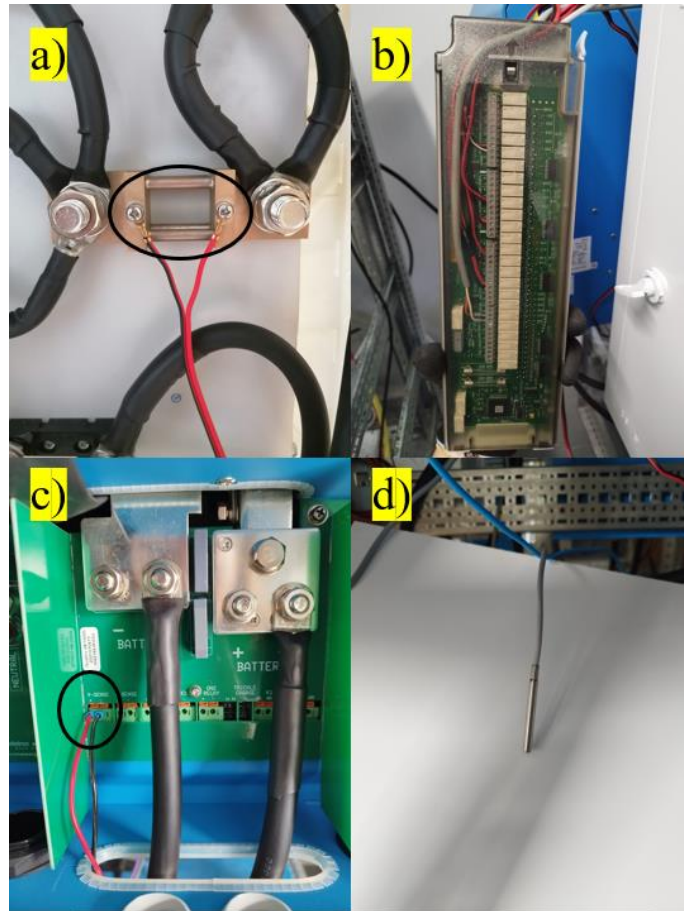


Figura 36 - Instalação de sensores. a) Sensor instalado na resistência de precisão; b) *Multiplexer* do *datalogger* da Keysight (*Keysight*); c) Sensor de Tensão instalado em cada inversor; d) Termopar instalado para medir a temperatura ambiente em volta da estrutura.

Finalizada toda a instalação, foi iniciada a programação em *LabVIEW* assim como a programação de cada inversor, explorada nos tópicos seguintes. Nos Anexos, está representado o esquema elétrico de toda a instalação do supercondensador e inversores na SolGrid.

Referir ainda que a climatização do espaço onde foi feita a instalação é feita através de um ar condicionado com rearme automático, devido à diversidade de tecnologias de EES já presentes na microrrede (Sanches, 2020).

3.4 Custos Totais da Instalação

Como já fora explicado em tópicos anteriores, atualmente, existem diversos tipos de tecnologias que permitem fazer o armazenamento de energia, no entanto, nem todas se encontram desenvolvidas da mesma forma. É neste sentido que surge a oportunidade de se analisar o armazenamento de energia num supercondensador híbrido de base de carbono. Como tal, existe a necessidade de fazer análises económicas nos projetos de armazenamento de energia para diferentes tecnologias, de forma a avaliar a viabilidade económica de projetos antes de ser tomada qualquer decisão (Sanches, 2020).

Na Tabela 10 e Tabela 11 são apresentados os custos totais de instalação de todos os equipamentos necessários para o normal funcionamento desta instalação. Os materiais mencionados no tópico 4.2 e que não constam na tabela apresentada já se encontravam nas instalações da SolGrid.

Tabela 10 - Lista de Equipamentos e Materiais Necessários para a instalação do Supercondensador

Empresa Fornecedora	Quant .	Equipamentos	Custo [€]	Quant .	Equipamentos	Custo [€]
Kurt Energy	1	Supercondensador de Carbono Modelo <i>Cell Type 18650, 22S 36P, 792 células</i>	3 161,98	1	Caixa de Transporte para o Supercondensador	66,73
	1	Design e Engenharia da Tecnologia do Supercondensador	1 000	1	Custo de envio do Supercondensador	1 960
Orduña – Suministros Fotovoltaicos	3	Inversor <i>Quattro 48/10 000/140 – 160</i>	7 933,80	1	Cerbo GX	210
	1	Custo de envio dos Inversores e do Cerbo GX	85,00			
Farnell	1	Interruptor de Desconexão de 500 A	115,68	2	Fusíveis de 500 A	11,84
	3	Fusíveis de 160 A	17,40	4	Porta-Fusíveis de 800 A	121,00
	6	Porta-Fusíveis de 425 A	127,69			
			Total [€]	14 811,12		

Tabela 11 - Lista de Equipamentos e Materiais Necessários para a instalação do Supercondensador (continuação)

Empresa Fornecedora	Quant.	Equipamentos	Custo [€]	Quant.	Equipamentos	Custo [€]
Eletrerequetim	16 m	Cabo de 70 mm ²	261,44	20 m	Cabo de 50 mm ²	174,80
	35 m	Cabo de 6 mm ² (Terra + Neutro + Fases)	110,24	8	Terminal de cravar de Cobre 70/16	6,55
	8	Terminal de cravar de Cobre 70/8	7,19	20	Terminal de cravar de Cobre 50/8	13,60
	8	Terminal de cravar de Cobre 50/16	7,96	15	Terminal de cravar de Cobre 6/8	2,56
	15	Terminal de cravar de Cobre 6/10	1,58	1	Resistência de Precisão 500 A / 60 mV	56,20
	1	Disjuntor de 4 portas 50 A 6kA	52,00	1	Caixa de Transição	117,81
	1	Platina Isolante para Caixa de Transição	46,09	Budget Extra para situações de emergência		30,00
Total [€]					985,69	

Não é possível a realização de uma análise económica para esta instalação uma vez que a mesma não tem uma utilização comercial, contrariamente às instalações fotovoltaicas comuns ou até mesmo instalações para armazenamento de energia com recurso a baterias.

No entanto, é possível obterem-se algumas variáveis que permitem fazer uma comparação com as tecnologias apresentadas na Tabela 7.

Essas variáveis passam pelo cálculo da energia específica, potência específica, custo de energia, custo de potência e custo nivelado de energia para armazenamento de energia ($LCOE_s$) no supercondensador em questão. Os parâmetros que permitem obter estas variáveis encontram-se no manual de especificações técnicas do supercondensador híbrido de base carbono.

➤ Energia Específica:

$$Energia\ Específica\ [Wh/kg] = \frac{E_{nominal} [kWh]}{m [kg]} = \frac{2,61\ kWh}{57,36} \approx 45,50\ Wh/kg$$

➤ Potência Específica:

$$\text{Potência Específica [W/kg]} = \frac{P_{\text{nominal}} [\text{W}]}{m [\text{kg}]} = \frac{29,7 \text{ kW}}{57,36} \approx 517,78 \text{ W/kg}$$

➤ Custo de Energia:

$$\text{Custo de Energia [€/kWh]} = \frac{\text{Custo da Tecnologia}}{E_{\text{nominal}} [\text{kWh}]} = \frac{3\,161,98 \text{ €}}{2,61 \text{ kWh}} \approx 1\,211,49 \text{ €/kWh}$$

➤ Custo de Potência:

$$\text{Custo de Potência [€/kW]} = \frac{\text{Custo da Tecnologia}}{P_{\text{nominal}} [\text{kW}]} = \frac{3\,161,98 \text{ €}}{29,7 \text{ kW}} \approx 106,46 \text{ €/kW}$$

Face aos valores obtidos e de acordo com a Tabela 7, podemos verificar que o valor de energia específica obtido se enquadra dentro dos parâmetros nominais das Baterias de Chumbo-Ácido e Redox de Vanádio, em que as mesmas apresentam valores nominais de [30-50 Wh/kg] e [10-75 Wh/kg], respetivamente, acabando este parâmetro por ficar um pouco distante do valor de energia específica para os Supercondensadores, estando o mesmo no intervalo de [0,05-30 Wh/kg].

Porém, o cálculo do parâmetro da potência específica enquadra-se na tecnologia dos Supercondensadores e dos Volantes de Inércia, conforme se apresenta na referida tabela.

Em termos de custos de energia, este custo é bastante semelhante ao custo associado às tecnologias dos Volantes de Inércia e das Baterias de iões Lítio, uma vez que o mesmo se encontra nos intervalos de [1000-3500 €/kWh] e [200-1800 €/kWh], respetivamente. Para o custo de potência, este custo enquadra-se no custo nominal dos Supercondensadores e dos Volantes de Inércia, conforme se apresenta na tabela. O facto dos custos de energia e de potência obtidos se enquadrarem nos custos associados aos Volantes de Inércia prende-se com o facto desta ser uma tecnologia que apresenta valores de potências nominais muito semelhantes às do Supercondensador bem como os parâmetros de potência e energia específicas, conforme se pode observar na Figura 18.

Assim, os custos de energia e de potência obtidos para este Supercondensador Híbrido de base carbono encontram-se representados graficamente na figura que se segue.

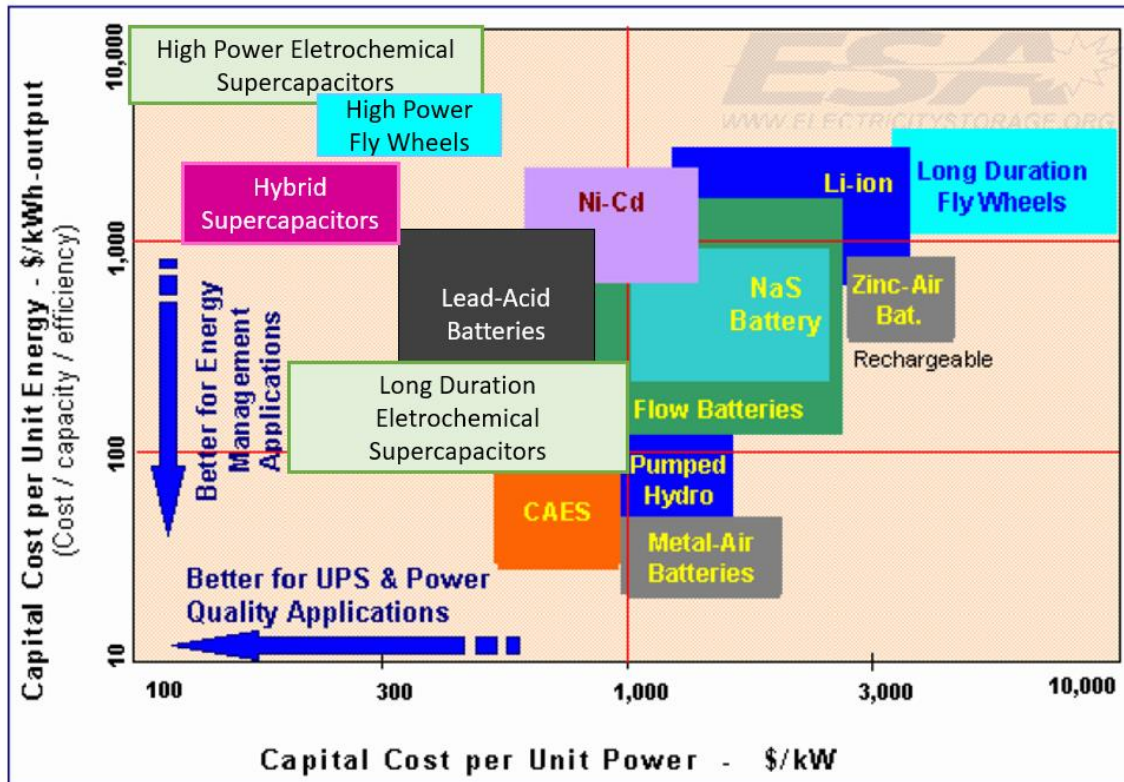


Figura 37 - Custos de Energia Vs. Custos de Potência considerando os Supercondensadores Híbridos de base Carbono, adaptado de (Izzati, Ariffin, Zain, Nordin, & Saad, 2021)

O cálculo do custo nivelado de energia para armazenamento de energia ($LCOE_S$) no supercondensador é obtido, assumindo a existência de três ciclos diários de carga/descarga com o valor da sua capacidade nominal, um tempo de vida de 25 anos e, considerando os custos totais da instalação (CAPEX) e os custos operacionais da instalação (OPEX) ao longo do tempo de vida útil.

O referido $LCOE_S$ é obtido através da seguinte equação:

$$LCOE_S = \frac{E_{total\ ao\ longo\ da\ vida}}{custo\ total\ de\ operação} = \frac{E_{total\ ao\ longo\ da\ vida} \times preço\ energia\ [€/kWh]}{CAPEX + OPEX} \quad Eq.(1)$$

Considerou-se que o valor de OPEX seria 1% do CAPEX e, para além disso, de momento assumiu-se que o preço da energia seria de 0,1610 €/kWh à tarifa simples para o tempo de vida definido (LuzeGas.pt, s.d.).

Da Tabela 10 e Tabela 11e, vêem que os custos totais de instalação são 15 796,81 €, pelo que o valor de OPEX será de 15 638,84 €.

Da análise económica realizada, e tendo em conta o propósito de funcionamento deste supercondensador híbrido de base carbono que é dar resposta aos picos de potência que possam existir na rede, esta prestação de serviços acaba por ser diferente e paga também de forma diferente. Uma vez que o objetivo do supercondensador é fornecer potência em caso de quebra da potência fotovoltaica que permite o funcionamento da bomba de irrigação, esta tecnologia nunca poderá ser vista como se fosse uma bateria, pois uma bateria serve apenas para carregar e descarregar energia. Se assumirmos que este supercondensador híbrido apenas faça o armazenamento de energia, o sistema instalado nunca se irá pagar, não havendo retorno económico do mesmo.

Faz sentido que se obtenham valores negativos porque se o supercondensador for visto como sendo uma bateria, este sistema não é viável pois acaba por ser demasiado caro para o efeito. Se o serviço for pago do ponto de vista de potência, cada vez que se faz o controlo de uma rampa de potência ou se fornece potência para não haver uma quebra da potência fotovoltaica que permite o funcionamento da bomba de irrigação, o sistema é considerado viável existindo um modelo de negócio a aplicar.

Ainda da análise económica realizada, obteve-se um tempo de retorno de 60 anos e um valor de LCOE negativo, pelo que não faz sentido calcular este tipo de indicador para um produto como este supercondensador híbrido porque este não pode ser visto como sendo uma bateria, porque o objetivo dele é prestar serviços, sendo os mesmos remunerados de outra forma. Este supercondensador híbrido de base carbono não encaixa no modelo de negócio de uma bateria, mas para ser financeiramente sustentável deve prestar serviços, neste caso de fornecimento de potência, fazendo por exemplo *peak shaving*.

O *peak shaving* é visto como sendo uma estratégia que permite evitar os picos de consumo na rede elétrica, reduzindo o consumo de energia nos intervalos de grande procura, sendo o principal objetivo eliminar os picos de procura a curto prazo, reduzindo o custo global associado à energia (Exro.com, s.d.).

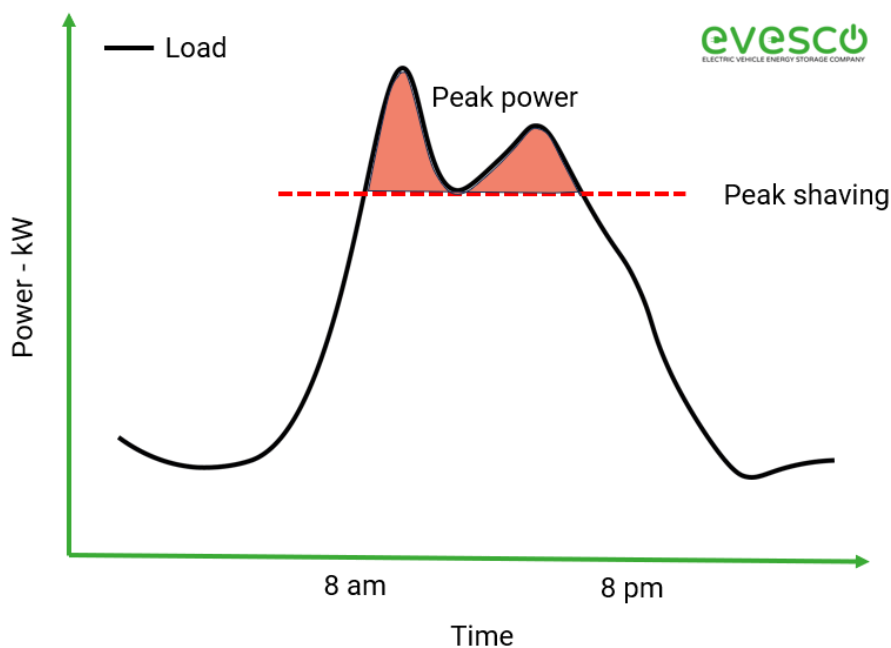


Figura 38 - Peak Shaving, adaptado de (EVESCO, s.d.)

4. O *Software* de Controlo

Para realizar o controlo e comando dos ensaios realizados, foi utilizado o software *LabVIEW* através da comunicação em Modbus TCP/IP.

4.1 Comunicação com Protocolo Modbus TCP/IP

O protocolo Modbus utiliza a camada física da comunicação RS-485 para ligar equipamentos inteligentes, utilizando o conceito simples de mestre/escravo. Neste protocolo apenas pode haver um mestre que comunica com os escravos, havendo um número máximo de 247. As mensagens transmitidas podem ser de escrita ou de leitura de valores binários ou inteiros.

O mestre é o dispositivo que inicia cada pergunta, sendo responsável por cada interação e, normalmente, é uma interface homem-máquina, autómato ou sistema SCADA. Por sua vez, o escravo é um sensor ou um controlador lógico programável (PLC) que permite o envio de dados discretos (entradas e saídas digitais) bem como numéricos (entradas e saídas analógicas), permitindo a comunicação em série de vários equipamentos através de 2 fios ou de um cabo de rede *ethernet*, dependendo do tipo de protocolo de comunicação (Control, s.d.).

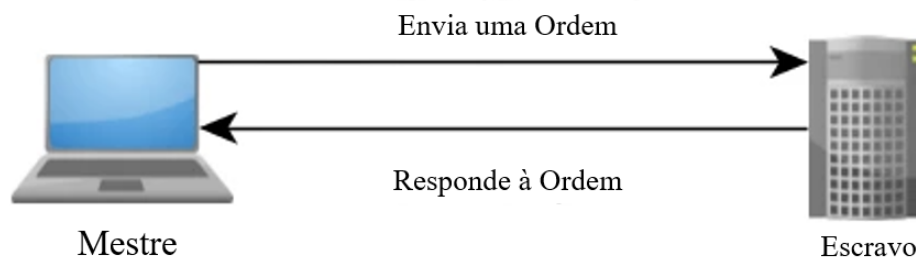


Figura 39 - Funcionamento da Relação de Comunicação Mestre-Escravo, adaptado de (Pinto, 2021)

O protocolo TCP/IP refere-se ao Protocolo de Controlo de Transmissão e ao protocolo de internet, que é o meio de transmissão de mensagens do Modbus TCP/IP, feito através da porta 502 (Pinto, 2021).

4.2 Introdução ao *LabVIEW*

O *LabVIEW* (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) (ni, s.d.) é uma linguagem de programação visual da National Instruments que utiliza ícones ao invés das clássicas linhas de texto, permitindo fazer uma programação visual através da ligação dos vários ícones. Os ficheiros construídos através do *LabVIEW* designam-se de *Vi's* (Instrumentos Virtuais), uma vez que a sua aparência e modo de operação é semelhante à utilização de instrumentos físicos (Aroso, 2017).

Cada ficheiro criado através do *LabVIEW*, isto é, cada *Vi* é formado por duas janelas: o diagrama de blocos e o painel frontal.

O diagrama de blocos é a interface de trabalho do programador, onde é possível encontrar o código gráfico, inserido pelo programador (Aroso, 2017) e o painel frontal é a interface do utilizador, ou seja, é a janela onde o utilizador pode observar os resultados obtidos consoante a programação que tenha sido feita.

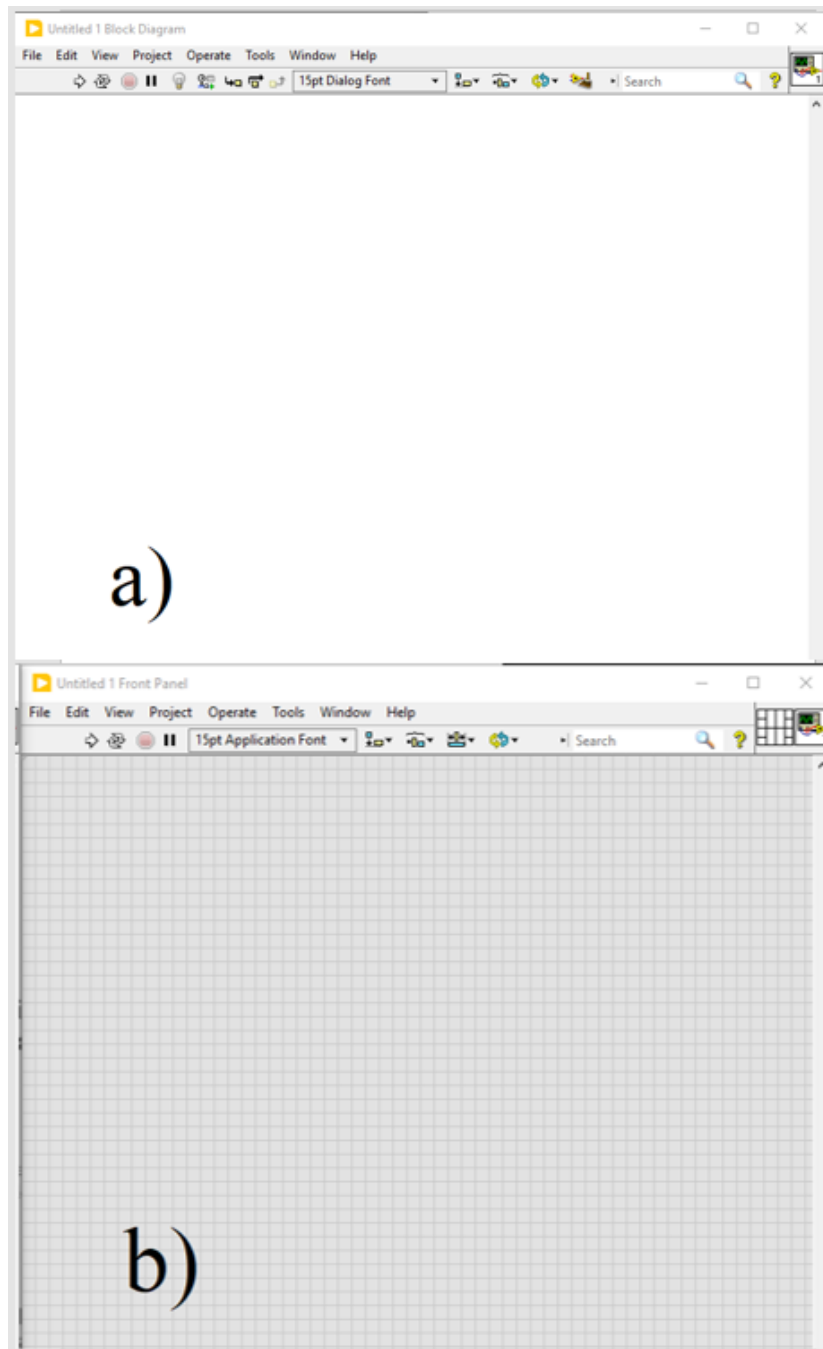


Figura 40 - a) Diagrama de Blocos; b) Painel Frontal

4.2.1 Ferramentas do *LabVIEW*

As ferramentas disponíveis para a criação de um ficheiro *Vi* encontram-se tanto no diagrama de blocos como no painel frontal. É no diagrama de blocos que está disponível a paleta de funções, que permite a construção lógica da programação do ficheiro a ser criado. Por sua vez, no painel frontal está disponível apenas a paleta de comandos de controlo, que contém todos os indicadores numéricos, interruptores de *on/off* e de *stop*.

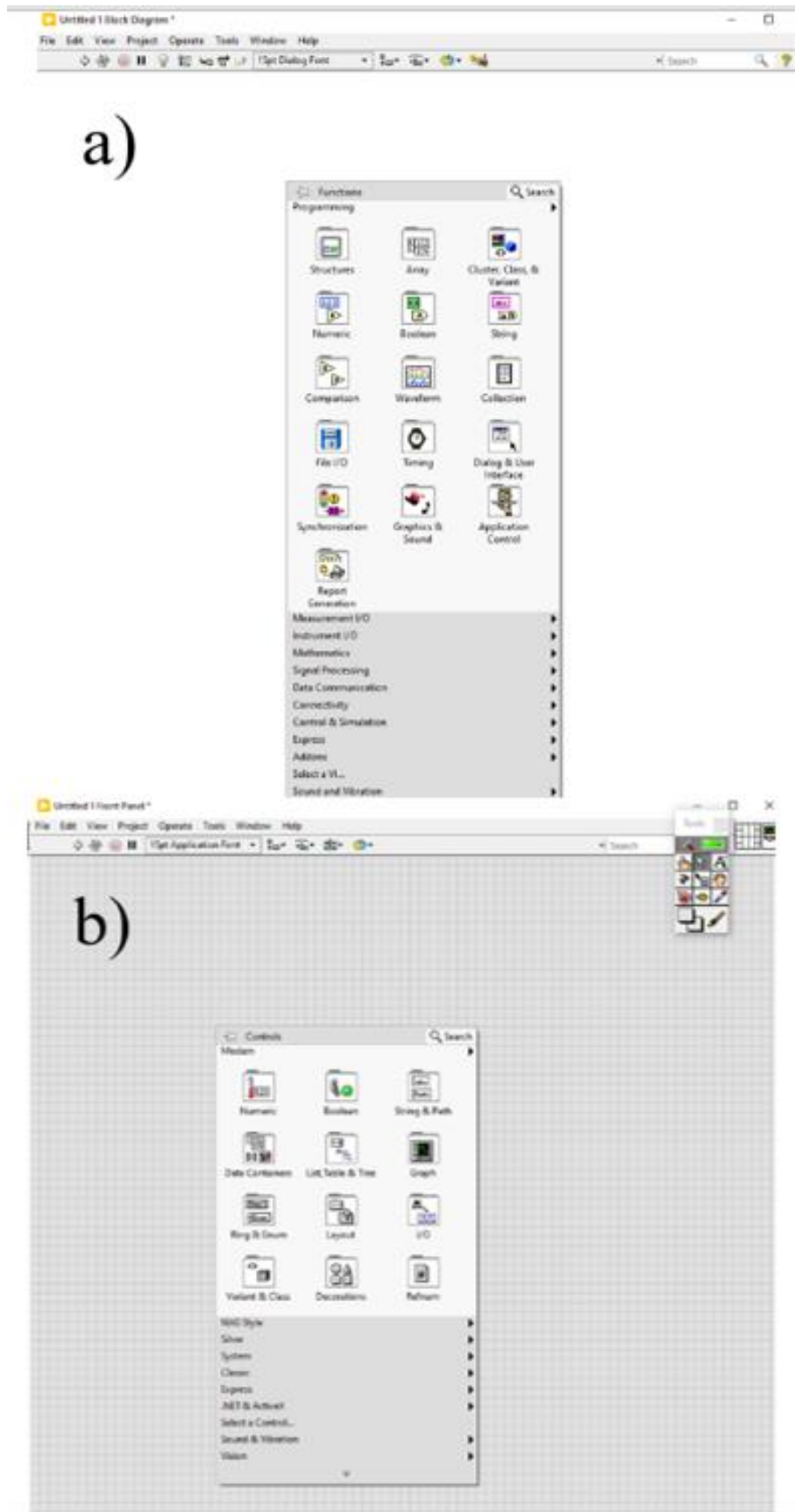


Figura 41 - Ferramentas Disponíveis no diagrama de blocos e painel frontal

5. Comissionamento da Instalação na Microrrede

Este capítulo terá como principal abordagem, o desenvolvimento de um modelo de controlo de operação do sistema de armazenamento de energia eléctrica que foi instalado na microrrede.

O modelo de desenvolvimento, mais precisamente, o desenvolvimento de um *software* de controlo, permite fazer a comunicação entre os equipamentos, a automatização do EES e o controlo do estado de carga do supercondensador em tempo real.

5.1 Desenvolvimento do *Software* de Comunicação em *LabVIEW*

Um dos principais objetivos definidos para este trabalho é o controlo e a automatização do sistema instalado, sendo que a instrumentação da instalação foi dimensionada de forma a otimizar o controlo e a automatizar a operação do supercondensador e dos inversores na microrrede (Sanches, 2020).

Como tal, foi desenvolvido um software de comunicação através da ferramenta *LabVIEW* para se fazer todo o processo de comunicação entre os equipamentos instalados que teve por base o protocolo Modbus TCP/IP, pois para esta aplicação em específico, este protocolo é o mais adequado devido ao facto da ligação à rede *ethernet* permitir uma maior flexibilidade uma vez que a rede principal de comunicação é a da CERUÉ.

Após a conclusão das ligações entre todos os equipamentos e conhecidos os endereços de cada equipamento da instalação, solicitou-se junto dos serviços de informática a fixação do IP de cada um dos equipamentos necessários. A fixação do IP de cada equipamento consiste em reservar um endereço para cada equipamento que se ligue à rede dinâmica da Universidade se ligar unicamente através do endereço que lhe foi atribuído.

Finalizado o processo de fixação do IP dos equipamentos, estes foram ligados ao *switch* da microrrede da CERUÉ, através de um cabo de rede *ethernet*, de forma a criar-se uma comunicação efetiva entre a unidade de controlo e os equipamentos instalados. Este controlo forma uma ligação com estes IP através de determinadas portas, efetuando-se a leitura ou a escrita de informação nos canais, sendo que após estas ações a comunicação é dada como encerrada (Sanches, 2020).

A comunicação entre o Cerbo GX e todo o *software* é feita através do protocolo Modbus TCP/IP, sendo que a comunicação entre os inversores e o Cerbo GX é feita através de cabos de rede *ethernet*, uma vez que são os adaptadores de comunicação entre os inversores.

Por fim, a comunicação entre o *datalogger* e o software desenvolvido é assegurada através da ligação USB a partir do protocolo Visa, sendo que os protocolos RTU e Visa são utilizados para a comunicação entre o BMS do supercondensador, de forma a adquirirem-se informações acerca do mesmo.

Seguidamente, é apresentado o esquema de comunicação do sistema de armazenamento de energia instalado.

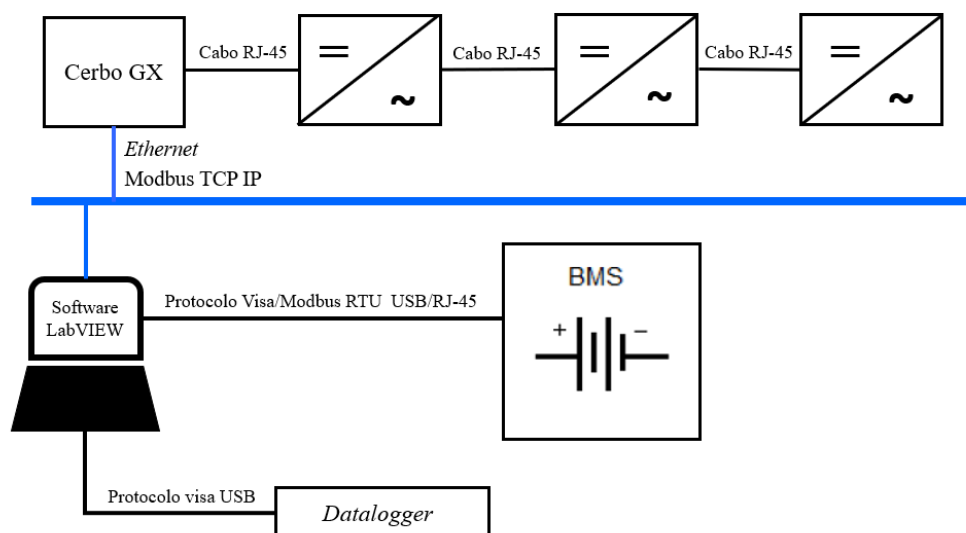


Figura 42 - Esquema Equivalente à da configuração de comunicação da instalação

Com base na Figura 42 verifica-se que não existe qualquer protocolo de comunicação entre o supercondensador e os inversores, à semelhança do que é normalizado nas baterias que se encontram à venda no mercado de armazenamento elétrico, pois estas não comunicam com nenhum inversor existente no mercado. Neste momento, ainda não existe nenhuma configuração *standard* em termos de comunicação para este tipo de tecnologia, pelo facto desta tecnologia de armazenamento ser uma tecnologia inovadora e pouco comercializada ainda no mercado, tendo sido esta um modelo protótipo exclusivo, adquirido à empresa belga, Kurt Energy (Kurt Energy, s.d.).

Desta forma, para este problema que também acabou por ser um desafio adicional ao comissionamento deste supercondensador, foi necessário desenvolver um método eficaz face ao controlo do supercondensador e dos inversores através de uma comunicação independente e externa a cada um destes equipamentos, por intermédio do *software* desenvolvido através do *LabVIEW*, isto é, todas as informações relativas ao estado de operação do supercondensador instalado são lidas e processadas pelo *software* desenvolvido, acompanhado de comandos de forma a que seja possível efetuar qualquer tipo de ação relativamente ao estado do supercondensador de forma automática e em tempo imediato (Sanches, 2020).

Relativamente ao controlo da potência de carga e de descarga do supercondensador, que é uma das condições de fronteira chave, definida inicialmente pelo operador na interface do *software*, é obtido através do protocolo de comunicação externa com as portas programáveis do inversor, em que se define um valor para a potência de entrada ou de saída, numa das portas bidirecionais no lado AC do inversor (Sanches, 2020).

5.2 Processo de Comunicação com os Equipamentos Instalados

Como referido no capítulo 3, uma parte dos equipamentos instalados são da *Victron Energy*, o que a torna exclusiva em termos de comunicação, pois esta marca tem disponível online uma lista correspondente aos endereços de registo de cada variável. Nessa lista o programador deverá seleccionar as variáveis que deseja obter para assim poder desenvolver a sua programação, tendo em atenção algumas especificações:

- O *Unit ID* de cada variável;
- O seu *starting address*, uma vez que para cada variável existe um *starting address* único;
- O seu tipo, pois as variáveis podem ser números inteiros, negativos ou decimais;
- O fator de escala, pois a variável a obter poderá ter de ser multiplicada ou dividida consoante o fator de escala atribuído nessa lista;
- A classificação da variável selecionada, que pode ser de escrita ou de leitura (Energy V. , CCGX Modbus TCP Register List).

dbus-service-name	description	Address	Type
com.victronenergy.system	Serial (System)	800	string[6]
com.victronenergy.system	CCGX Relay 1 state	806	uint16
com.victronenergy.system	CCGX Relay 2 state	807	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on output L1	808	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on output L2	809	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on output L3	810	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on input L1	811	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on input L2	812	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on input L3	813	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on generator L1	814	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on generator L2	815	uint16
com.victronenergy.system	PV - AC-coupled on generator L3	816	uint16
com.victronenergy.system	AC Consumption L1	817	uint16
com.victronenergy.system	AC Consumption L2	818	uint16
com.victronenergy.system	AC Consumption L3	819	uint16
com.victronenergy.system	Grid L1	820	int16
com.victronenergy.system	Grid L2	821	int16
com.victronenergy.system	Grid L3	822	int16

Scalefactor	Range	dbus-obj-path	writable	dbus-unit
1	12 characters	/Serial	no	
1	0 to 1	/Relay/0/State	yes	0=Open;1=Closed
1	0 to 1	/Relay/1/State	yes	0=Open;1=Closed
1	0 to 65536	/Ac/PvOnOutput/L1/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnOutput/L2/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnOutput/L3/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnGrid/L1/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnGrid/L2/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnGrid/L3/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnGenset/L1/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnGenset/L2/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/PvOnGenset/L3/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/Consumption/L1/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/Consumption/L2/Power	no	W
1	0 to 65536	/Ac/Consumption/L3/Power	no	W
1	-32768 to 32767	/Ac/Grid/L1/Power	no	W
1	-32768 to 32767	/Ac/Grid/L2/Power	no	W
1	-32768 to 32767	/Ac/Grid/L3/Power	no	W

Figura 43 - Lista de endereços fornecida pelo fabricante da *Victron Energy*, disponível em (*Energy V. , CCGX Modbus TCP Register List*)

De acordo com a lista de endereços apresentada, foram então selecionadas as variáveis necessárias para a análise do funcionamento deste supercondensador. Destacar o facto de que a escolha das variáveis foi uma escolha triplicada, uma vez que foram selecionadas variáveis para a fase L1, L2 e L3, dada a configuração do sistema ser trifásica.

Tabela 12 – Descrição das leituras do *starting address* nº31

Valor Devolvido	Significado	Valor Devolvido	Significado
0	Off	7	Equalize
1	Lower Power	8	Passthru
2	Fault	9	Inverting
3	Bulk	10	Power Assist
4	Absorption	11	Power Supply
5	Float	252	External Control
6	Storage		

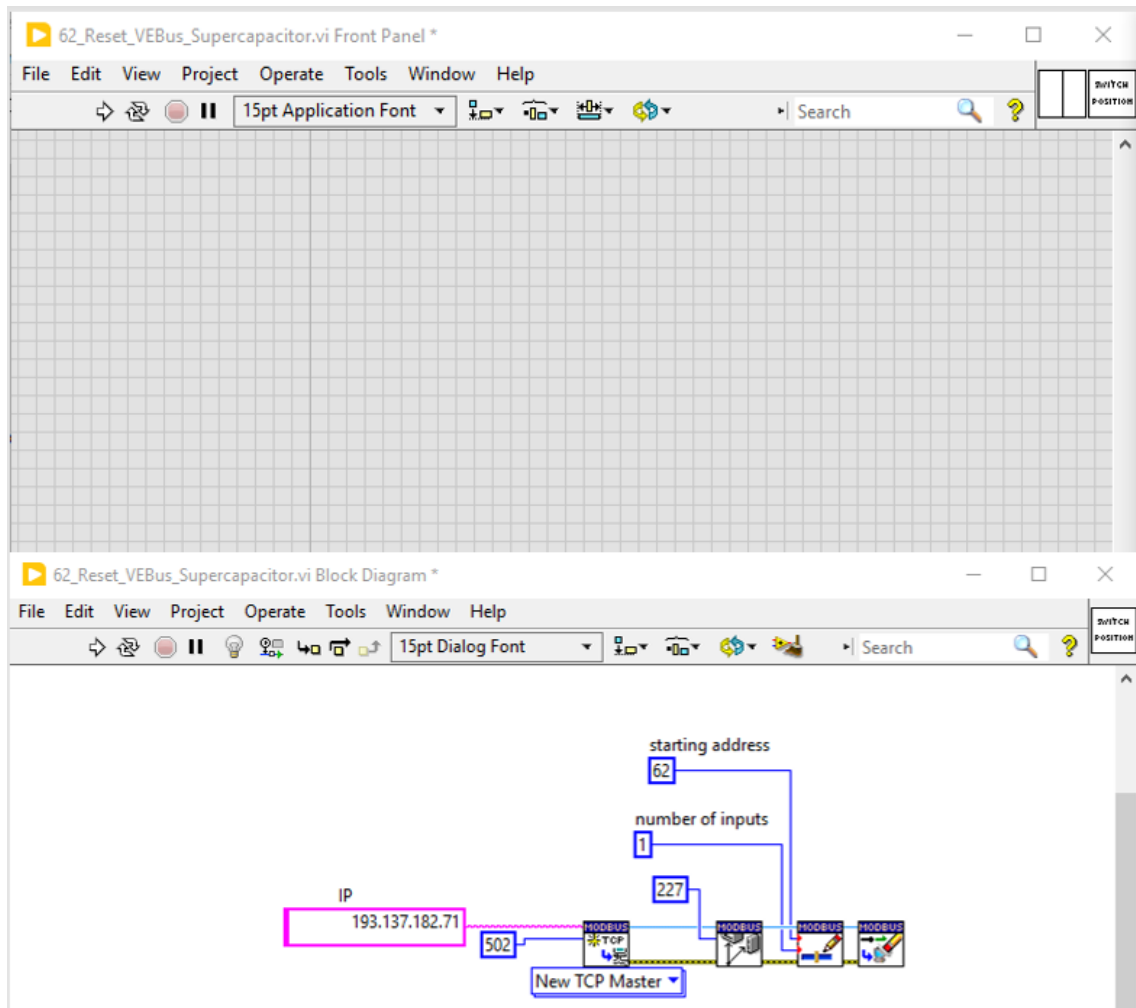


Figura 45 – Exemplo de um comando de leitura

A figura anterior representa o comando de leitura cujo *starting adress* é o nº 62, cuja função é fazer um *reset* ao sistema, caso se verifique a ocorrência de erros. Uma vez que se trata de um comando de escrita não existem variáveis output.

As cargas e descargas do supercondensador são feitas com comandos desenvolvidos também em LabVIEW, diferindo apenas na troca de alguns valores. Para estas duas operações consideram-se os *starting adress*'s 38 e 39, uma vez que permitem desativar a carga e desativar a alimentação (rede), respetivamente.

O que permite realmente distinguir a carga de uma descarga, são os valores que são atribuídos a esses *starting adress*'s, pois os mesmos subdividem-se em duas categorias sendo elas:

Tabela 13 – Starting Adress's para comandos de carga e descarga

Starting Address 38 – Desativar a Carga	
0 – a carga está ativada	1 – a carga está desativada
Starting Address 39 – Desativar a Alimentação (Rede)	
0 – o inversor envia potência para a rede	1 – o inversor não envia nada para a rede

As figuras que se seguem representam o desenvolvimento de um comando de carga e de descarga do sistema.

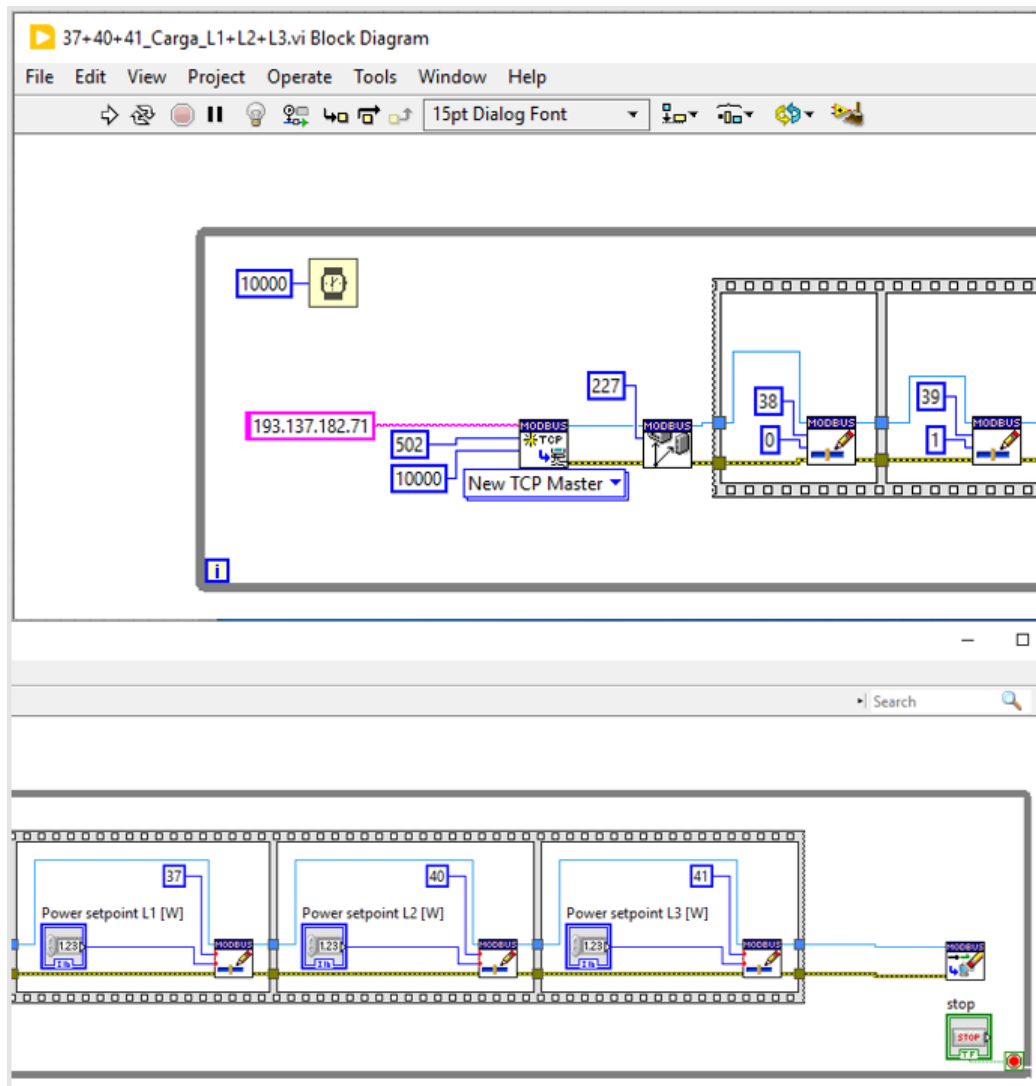


Figura 46 - Comando de Carga desarrollado através de LabVIEW

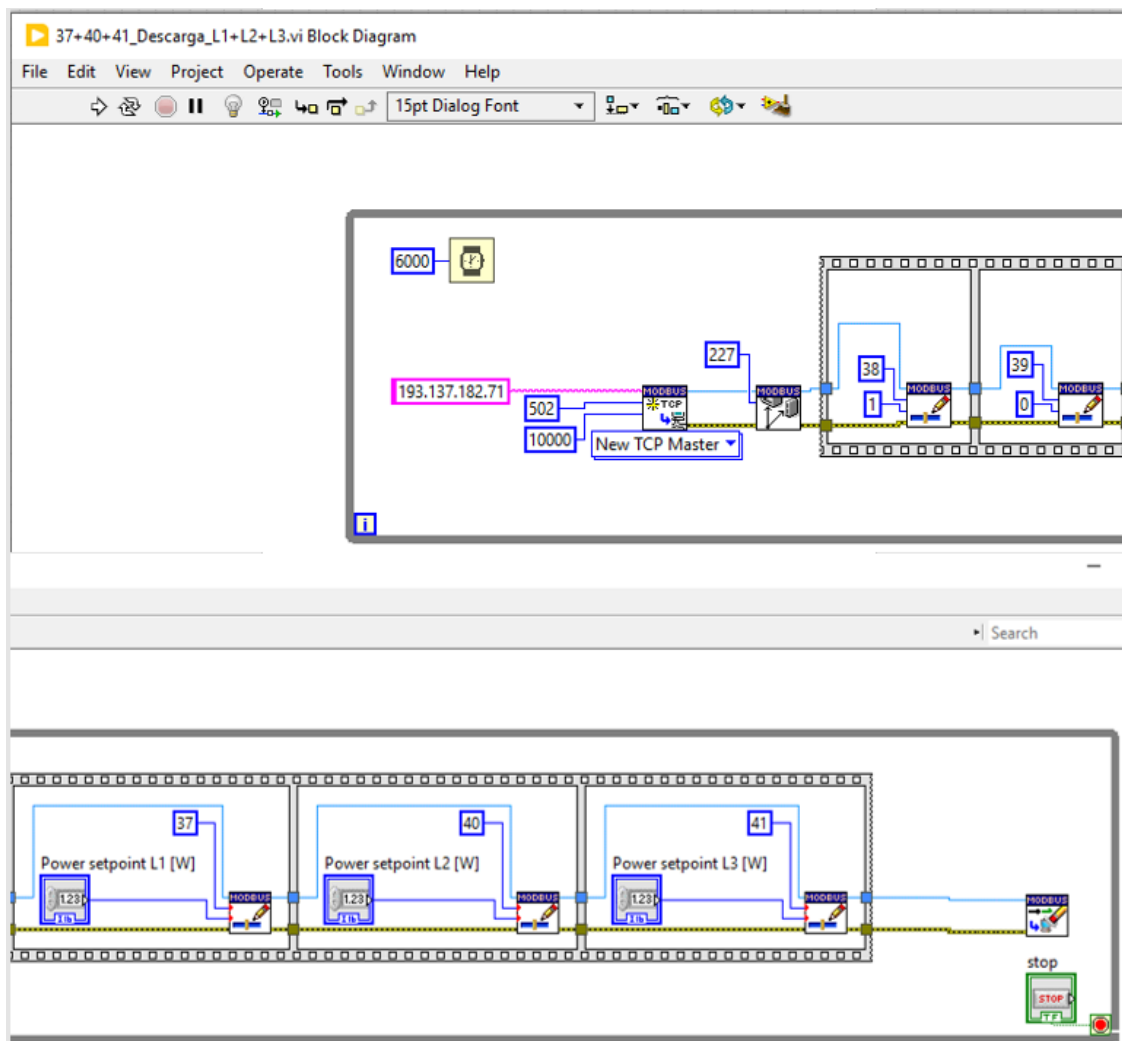


Figura 47 - Comando de Descarga desenvolvido através de LabVIEW

Em ambas as figuras é visível a presença dos *starting adress's* nº 37, 40 e 41 que representam a comunicação do sistema com a fase L1, L2 e L3, respetivamente.

O princípio de funcionamento básico do *software* de controlo e automatização deste sistema EES encontra-se no diagrama apresentado em seguida.

A duração de cada ciclo é definida pelo utilizador na interface gráfica de controlo do sistema, sendo que se deverá ter em consideração o tempo de espera para que várias funções sejam corridas em simultâneo, isto é, dada a grande quantidade de parâmetros a serem recolhidos por cada iteração de ciclo, deverá ser respeitado o tempo mínimo que uma função demora a obter uma informação acerca de um determinado endereço, ou o número mínimo de vezes em que se pode enviar um comando de escrita num determinado período de tempo, de forma a evitar que a comunicação com os inversores seja desgastante e, conseqüentemente, evitar o estado de operação dos inversores em *pass-through* (modo de operação em que o supercondensador não carrega nem descarrega) (Sanches, 2020).

Para além disso, a potência de carga e de descarga do supercondensador é também definida e inserida na interface gráfica de controlo do sistema de forma manual pelo utilizador quando o equipamento não está em funcionamento, isto é, quando o interruptor de desconexão está no modo *off*.

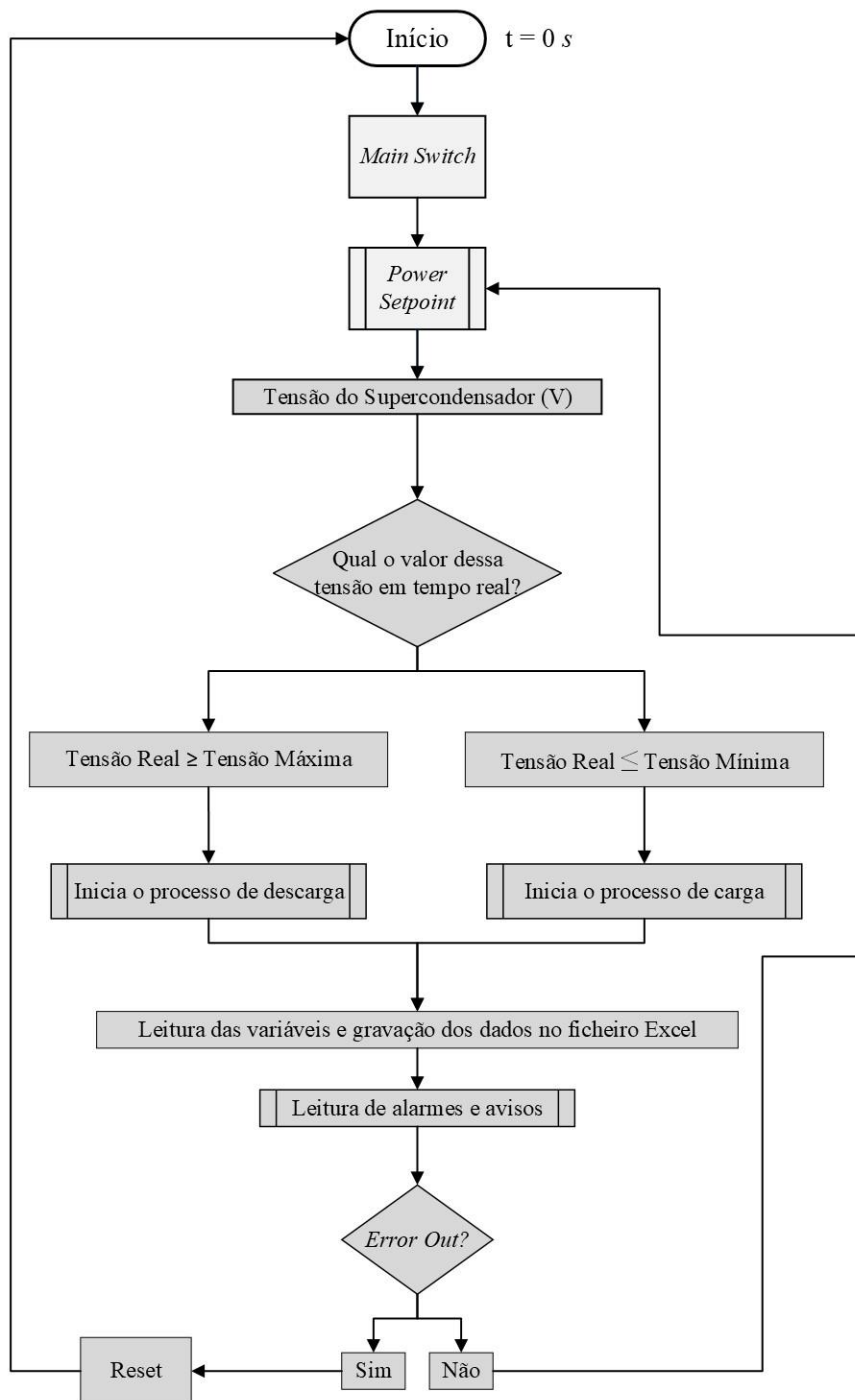


Figura 48 - Esquema Equivalente ao princípio básico de funcionamento do software de controlo do sistema EES.

A figura que se segue ilustra a interface gráfica de controlo do sistema desenvolvida através do *LabVIEW*.

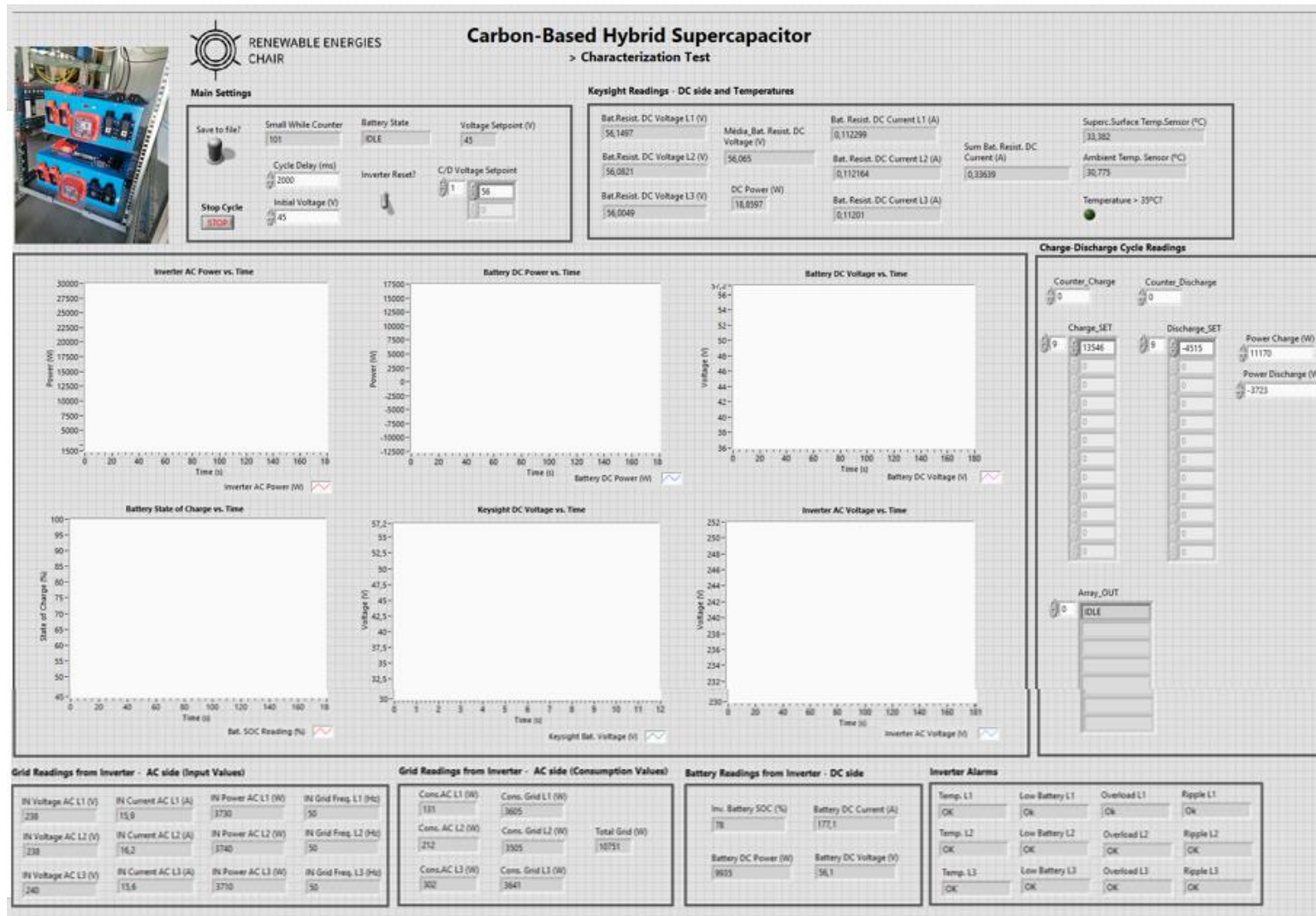


Figura 49 - Interface Gráfica de controlo criada para o Supercapacitor Híbrido de base Carbono

O sistema de controlo desenvolvido é responsável pela operação automática do sistema EES, pela monitorização de todas as variáveis relevantes entre o supercondensador, inversores, sensores e microrrede.

O desenvolvimento desta interface gráfica foi dividido por secções:

- Definições principais: onde existe a opção de guardar o ficheiro em formato Excel com as leituras correspondentes ao ciclo em causa, fazer a contagem das leituras do ciclo, realizar o controlo da duração do ciclo em *ms* (milissegundos), botão de paragem de ciclo, *setpoint* de tensão que permite realizar a carga ou descarga do Supercondensador consoante o valor inserido pelo utilizador e botão de *reset* ao sistema;
- Leituras em tempo real do *datalogger*: onde são apresentadas as leituras dos parâmetros (Tensão, Corrente e Temperaturas) através de sensores instalados nos inversores;
- Gráficos em tempo real das variáveis em estudo: tensão AC dos inversores, potência AC dos inversores, potência DC do Supercondensador, tensão DC do Supercondensador, percentagem do estado de carga do Supercondensador, tensões DC lidas no *datalogger* e tensão AC dos inversores em função do tempo;
- Leituras de Potências dos ciclos de carga-descarga: onde é inserida a potência a ser testada nos ciclos de carga e descarga através da existência de um contador que faz a leitura das potências já testadas;
- Leituras dos valores de *input* do lado AC dos inversores: onde é realizada a leitura das tensões, correntes e frequência em cada uma das fases;
- Leituras dos consumos AC dos inversores: consumo de potência dos inversores e consumos de potência da rede;
- Leituras dos parâmetros do lado do Supercondensador: percentagem do estado de carga do Supercondensador, corrente, potência e tensão do Supercondensador;
- Leituras de alarmes dos inversores: alarmes de temperatura, bateria fraca, *overload* e tensão de *ripple*.

Referir que as leituras de todos os parâmetros mencionados, foram realizadas de forma instantânea.

5.3 Configuração dos Inversores

Dada toda a programação desenvolvida através da ferramenta LabVIEW como referido anteriormente, a mesma só funcionou devido à configuração que foi feita entre os três inversores com recurso aos vários *software's* da Victron Energy (Energy V.), disponibilizado pela própria marca.

Os *software's* utilizados para esta programação foram os seguintes: VictronConnect, VEConfigure e VE Bus Quick Configure, todos disponíveis no site da Victron (Energy V.).

Através dos referidos *software's* foram definidos os parâmetros de funcionamento tendo em conta as especificações dos próprios inversores e do supercondensador. Esta programação é feita através da ligação do computador à interface MK3-USB da Victron que por sua vez se encontra conectada a cada um dos inversores através de um cabo de rede *Ethernet*.



Figura 50 - Interface MK3 - USB. Adaptado de (Victron Energy, s.d.)

O esquema da ligação referida anteriormente é apresentado em seguida.



Figura 51 - Esquema de ligação para programação dos inversores

No primeiro contacto com cada um dos inversores, deverá ser atualizada a sua versão de *firmware* para a versão mais recente, disponibilizada pela marca, pois caso todos os inversores tenham versões diferentes, não é possível fazer a comunicação entre eles. A atualização de *firmware* é feita através da aplicação da Victron Connect.

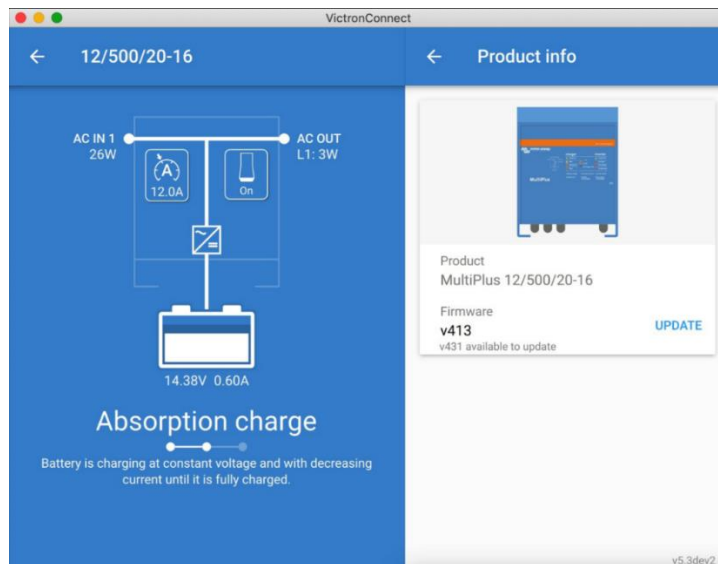


Figura 52 - Atualização de *Firmware* na aplicação VictronConnect, adaptado de (Victron Energy, s.d.).

Terminada a atualização dos *firmware's* de cada um dos inversores, deverá observar-se o seguinte:

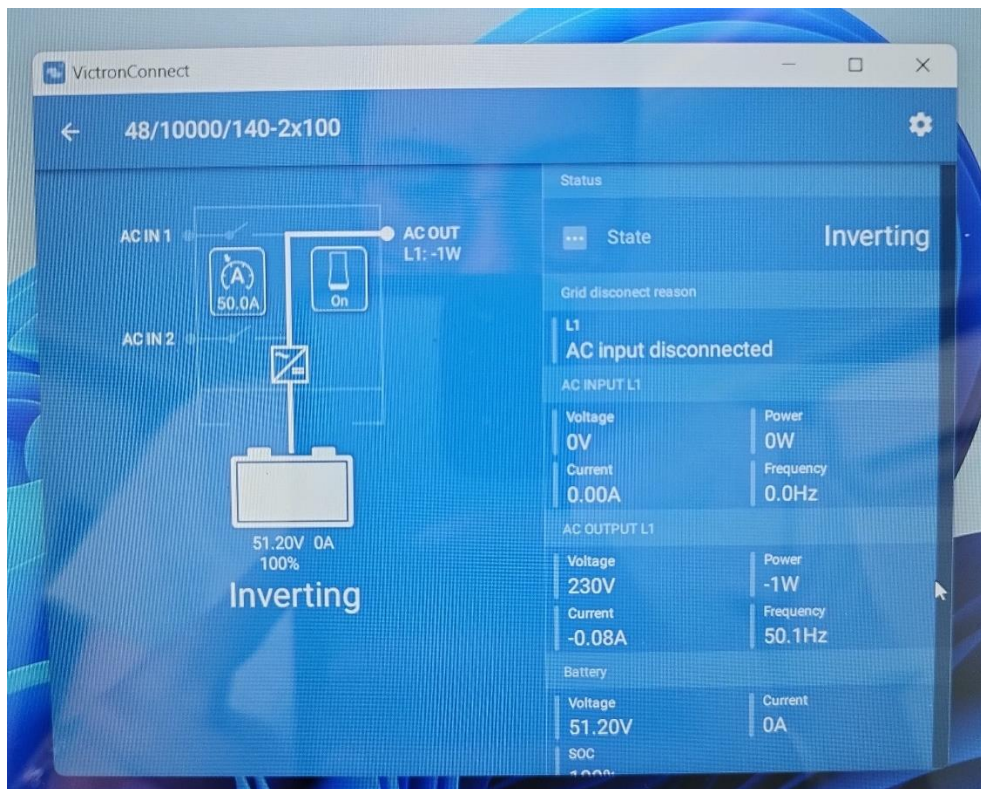


Figura 53 - Página Inicial da aplicação da VictronConnect

Posteriormente, é ligada a interface MK3-USB a cada um dos inversores para se proceder à configuração de alguns parâmetros nos inversores tendo em conta as especificações do supercondensador. Esta configuração de parâmetros é feita através da aplicação do VE Configure.

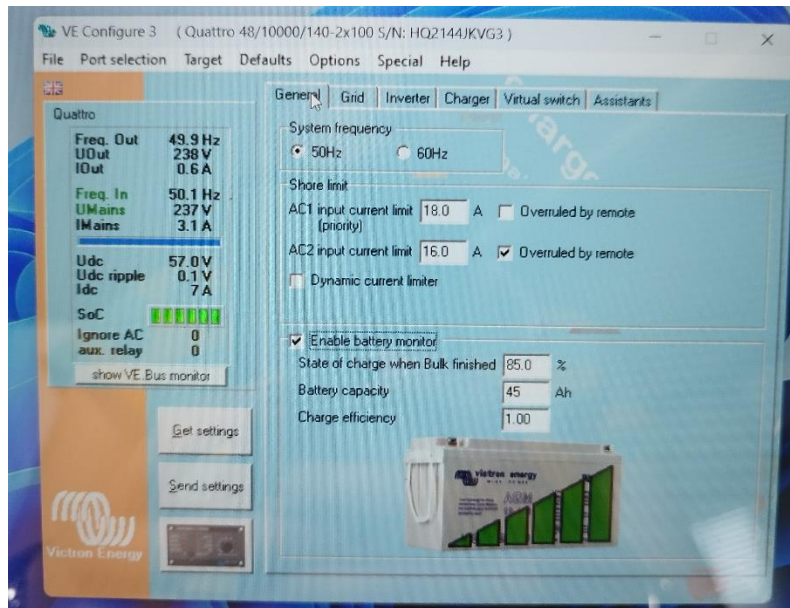


Figura 54 - Página Inicial da aplicação VE Configure

Quando iniciada a aplicação do VE Configure e ligada a interface MK3-USB a cada um dos inversores, a página apresentada inicialmente é a apresentada anterior. É visível a existência de vários menus, como é o caso do menu “Grid”, “Inverter”, “Charger”, “Virtual Switch” e o menu de “Assistants”. Na figura que se apresenta em seguida, são apresentados alguns dos menus disponíveis na aplicação. Referir ainda que todos estes menus foram configurados para cada um dos três inversores de forma que os inversores funcionassem corretamente na instalação.

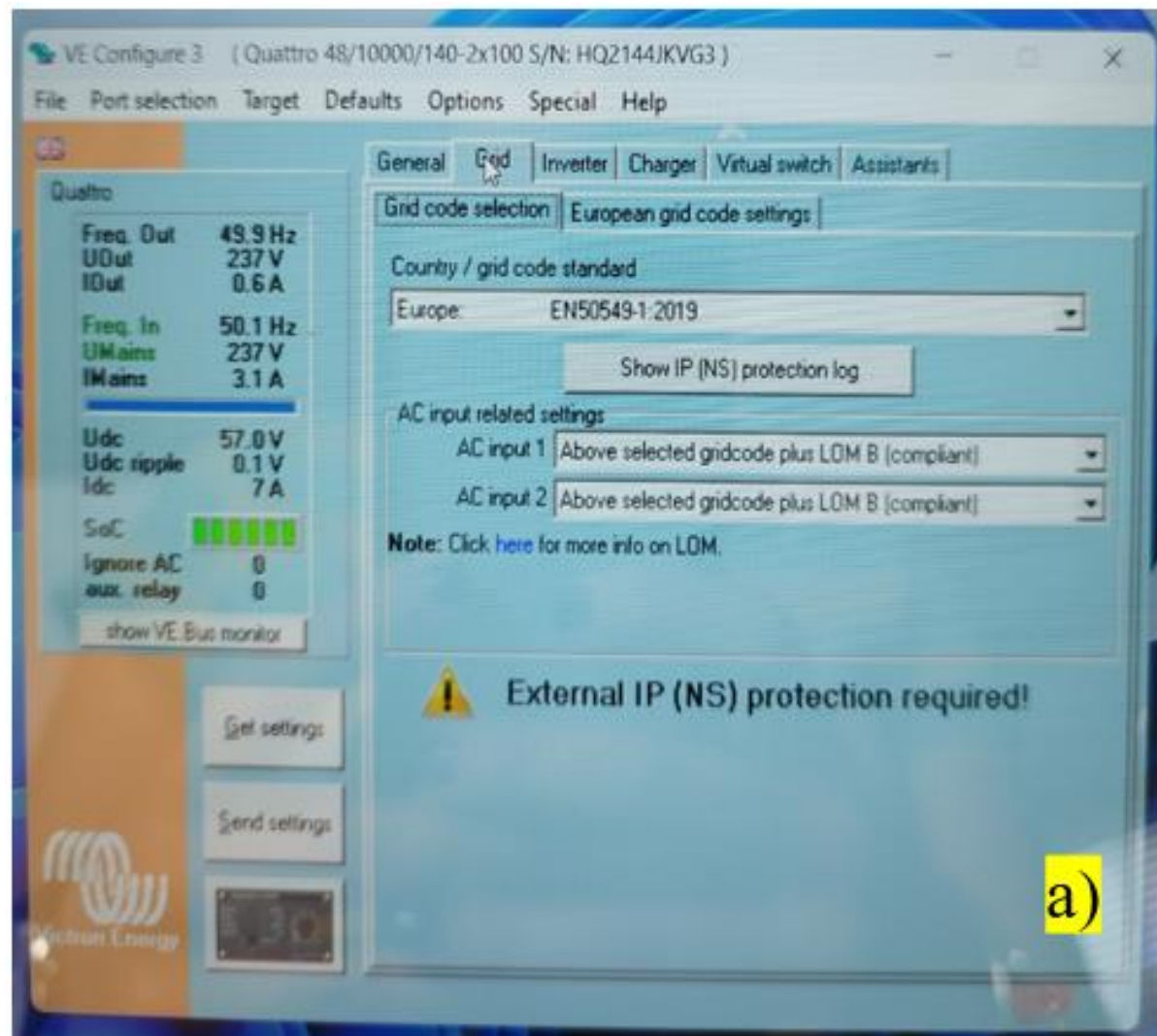


Figura 55 - Menu da aplicação VE Configure: a) Menu "Grid"

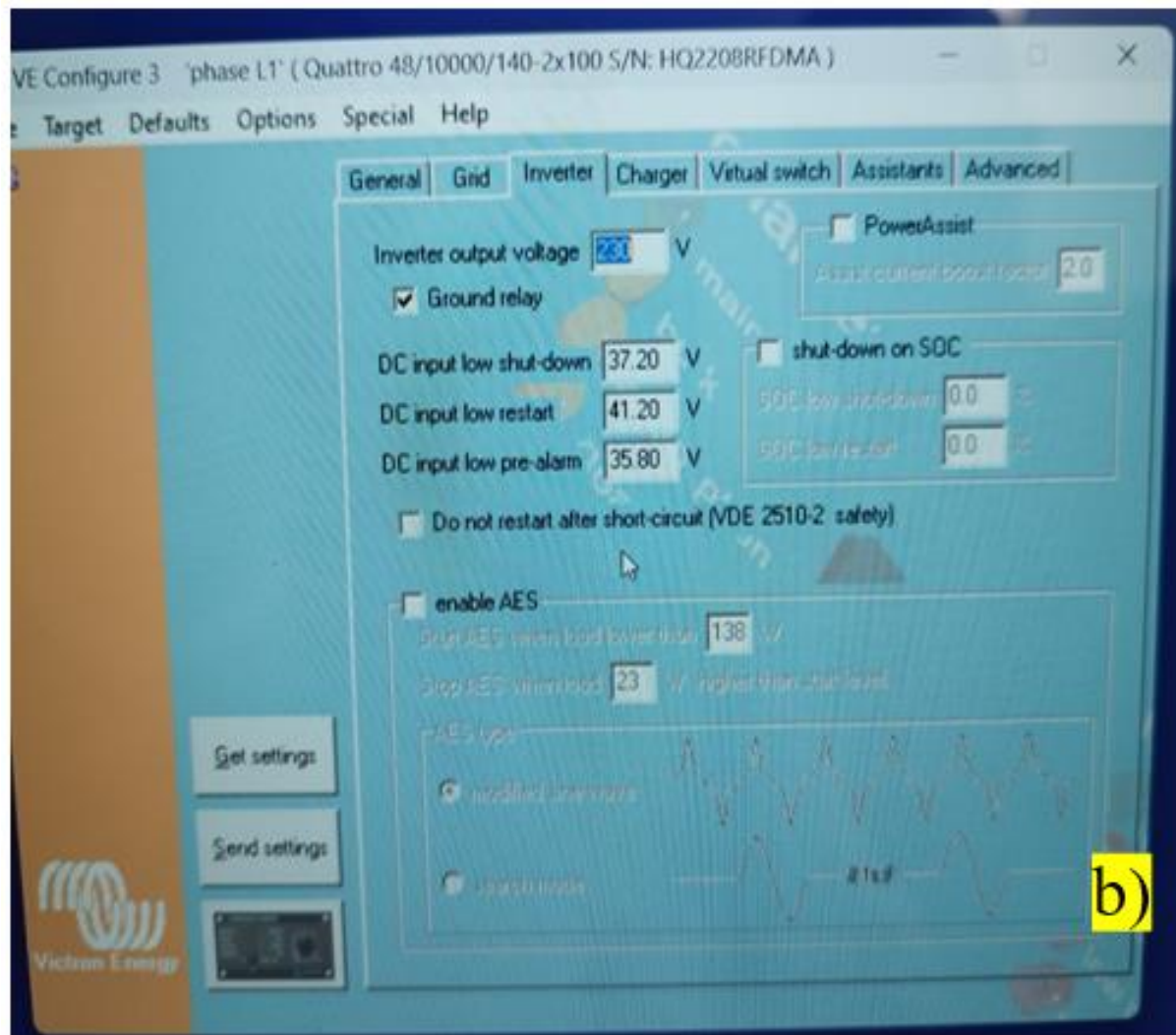


Figura 56 - Menu da aplicação VE Configure: b) Menu "Inverter"

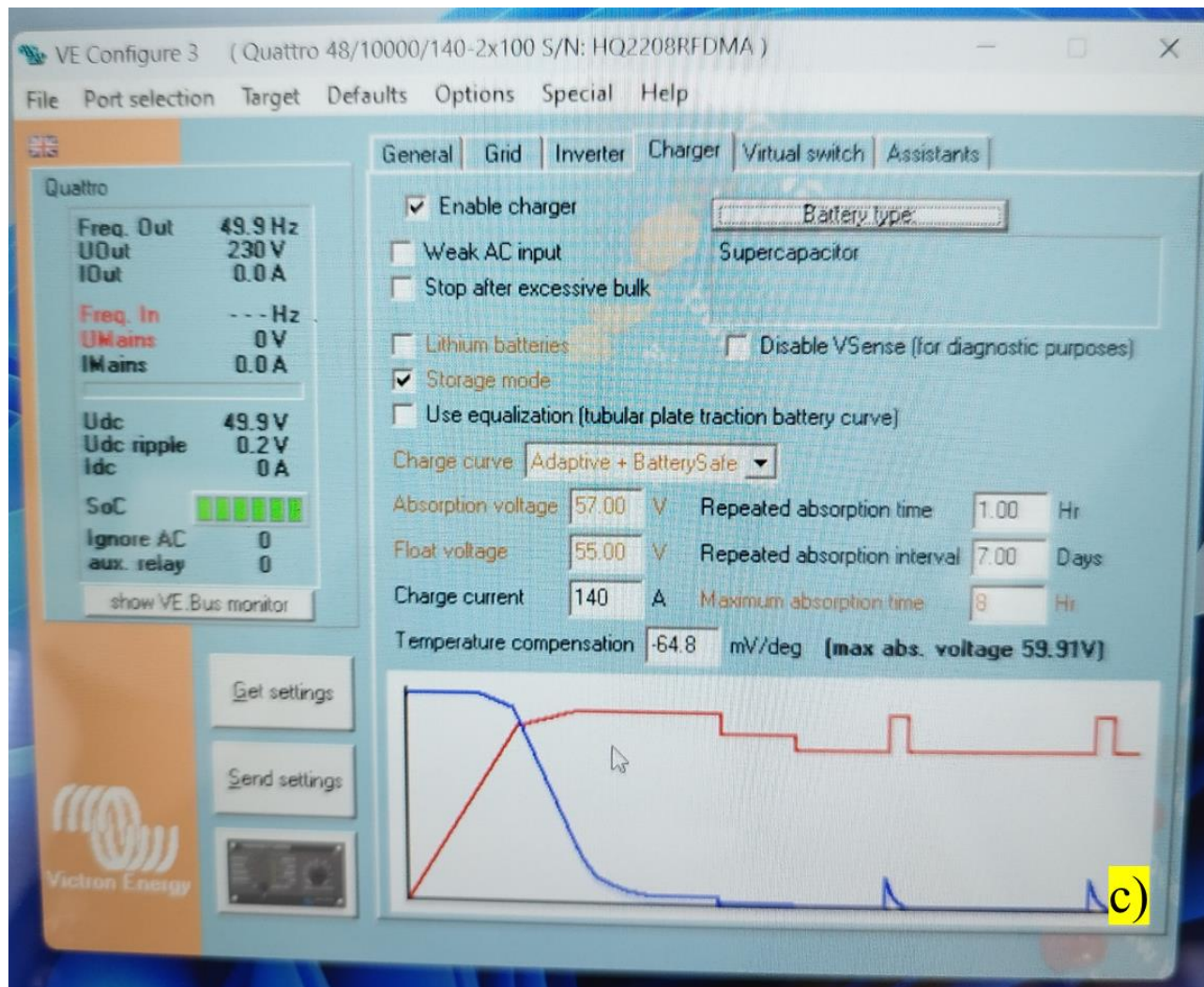


Figura 57 - Menu da aplicação VE Configure: c) Menu "Charge"

No menu “Charger” existe o subtópico “Battery type”, onde é possível escolher o tipo de bateria com o qual estamos a trabalhar, de acordo com a lista disponibilizada. Existe ainda a possibilidade de acrescentarmos outro tipo de bateria, como foi este o caso, em que acrescentámos o supercondensador. Esta seleção serve apenas para modelar da melhor forma possível a curva de carga associada a cada bateria, uma vez que as mesmas se distinguem entre si.

Relativamente aos menus “Virtual Switch” e “Assistants” são configurados através da adição de um assistente virtual para controlar os parâmetros principais de funcionamento do supercondensador. Para esse assistente ser configurado e adicionado a cada um dos inversores, é necessária a definição de alguns parâmetros apresentados na figura seguinte.

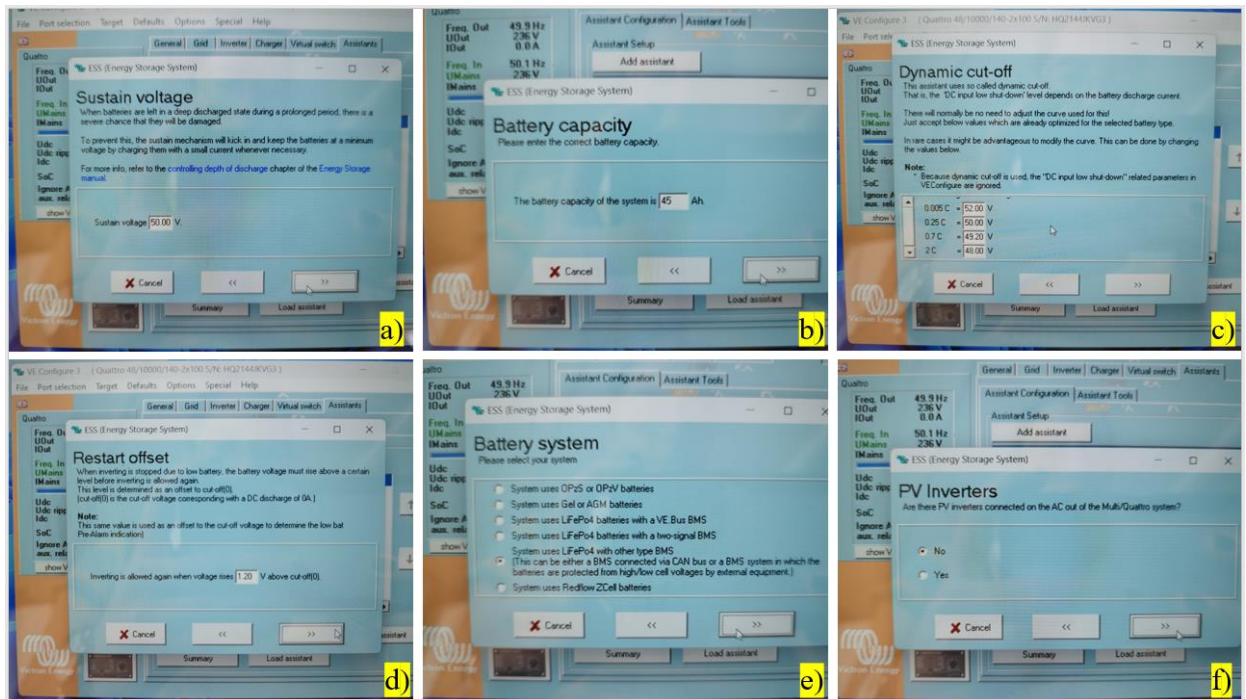


Figura 58 - Definição e Configuração do Assistente Virtual na aplicação do VE Configure. a) Sustain Voltage; b) Battery Capacity; c) Dynamic cut-off; d) Restart offset; e) Battery System; f) PV Inverters

Finalizada a definição e configuração do referido assistente, é guardada toda a informação dessa configuração relativamente a cada inversor para mais tarde ser adicionada, uma vez que quando é feita a configuração trifásica do sistema através da aplicação do VE.Bus Quick Configure, a configuração do assistente anteriormente realizada, tem de ser eliminada para o modo trifásico ser guardado.

Como a configuração do assistente virtual tinha sido anteriormente guardada, a mesma deve ser carregada numa fase final e, assim, o sistema fica pronto a funcionar.

6. Discussão e Apresentação dos Resultados dos Ensaio do Supercondensador na Microrrede

Para a realização destes ensaios foram definidas condições de teste e referência, que constituem as condições reais de operação deste tipo de sistemas. Estas condições passam pelo controlo da temperatura ambiente da sala onde se encontra a instalação variando esta entre os 20 – 40 °C e, pela climatização do ar (Sanches, 2020). Para além disso, a realização destes ensaios encontrou-se limitada a uma potência de ensaio de 25 kVA, porque embora o sistema estivesse dimensionado para uma potência de 30 kVA, os disjuntores de proteção elétrica disparavam para potências superiores a 25 kVA, muito provavelmente devido a picos de corrente pelos inversores, limitando a potência de teste à indicada (Horta, Fialho, Foles, & Horta, 2023).

Os ensaios realizados consistiram na realização de cargas e descargas completas com determinadas potências, nos lados AC e DC do sistema. Para os ensaios realizados nos inversores foram testadas diferentes potências que representam 5, 10, 20, 30 e 50% da potência nominal do sistema em AC. Os ensaios realizados nos inversores tiveram como objetivo o cálculo das eficiências médias de carga e descarga dos inversores, foram obtidas através do cálculo da média das eficiências para cada ensaio realizado, através das seguintes fórmulas:

$$\eta_{Descarga(DC-AC)} = \frac{E_{AC}}{E_{DC}} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\eta_{Carga(AC-DC)} = \frac{E_{DC}}{E_{AC}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que a conversão DC-AC na Eq. (1) representa o estado de descarga do inversor e a conversão AC-DC na Eq. (2) representa o estado de carga do inversor.

As grandezas E_{AC} e E_{DC} representam os somatórios das energias AC do sistema e da energia DC do sistema nos instantes i . Cada uma destas grandezas foi obtida através das seguintes equações:

$$E_{AC} = \int_{t_1}^{t_2} (P_{AC_{L_1}} + P_{AC_{L_2}} + P_{AC_{L_3}}) dt \quad [Wh] \quad \text{Eq. (4)}$$

$$E_{DC} = \int_{t_1}^{t_2} (P_{DC_{Supercondensador}}) dt \quad [Wh] \quad \text{Eq. (5)}$$

Os parâmetros que se encontram nas equações (3) e (4) foram obtidos através do envio de comandos no *LabVIEW* e, os instantes de tempo considerados nos cálculos representam a duração de cada ciclo, sendo esta definida pelo utilizador.

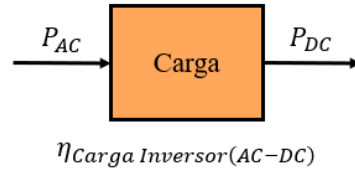
Durante toda a fase de ensaios, foi admitida uma convenção de sinais, sendo esta **negativa** para o processo de descarga do supercondensador, uma vez que nesta fase o inversor cede energia à rede e, **positiva** quando se trata do processo de carga do supercondensador, pois recebe energia através da rede (Sanches, 2020).

Os ensaios realizados no supercondensador tiveram em conta os valores médios das eficiências de carga e descarga dos inversores obtidas anteriormente. Os referidos ensaios permitiram obter as várias curvas de carga-descarga até uma *C-rate* de 8C, sendo que a *C-rate* de 1C corresponde a 45 A, a *C-rate* de 2C corresponde a 90 A e a *C-rate* de 8C corresponde a 360 A. As *C-rate*'s dizem respeito à taxa de carga e descarga de dispositivos que armazenam energia, sendo que um *C-rate* superior a 1C corresponde a uma descarga mais rápida e um *C-rate* menor, corresponde a uma descarga mais lenta (Santos, 2023).

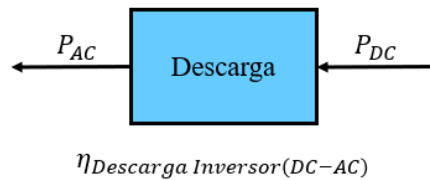
Para além da obtenção das curvas de carga-descarga do supercondensador, foram obtidos outros parâmetros que permitem fazer a caracterização desta nova tecnologia, como é o caso da

eficiência média de energia e das capacidades médias de carga e descarga do supercondensador, correspondentes a cada uma das *C-Rate*'s consideradas.

Os valores das potências do sistema trifásico, que foram ensaiadas no supercondensador foram determinadas através do seguinte digrama esquemático:



$$P_{DC,ensaio} = P_{AC,nominal} \times \eta_{Carga\ Inversor\ (AC-DC)} \quad [W] \quad \text{Eq. (6)}$$



$$P_{AC,ensaio} = P_{DC,ensaio} \times \eta_{Descarga\ Inversor\ (DC-AC)} \quad [W] \quad \text{Eq. (7)}$$

Figura 59 - Diagrama Esquemático das diferentes potências ensaiadas considerando os estados de carga e descarga do Supercondensador

A potência AC considerada na Eq.(5) foi calculada através dos parâmetros fornecidos pelo fabricante do supercondensador, tendo em conta o valor da tensão nominal e da corrente aos terminais do supercondensador, pelo que podemos considerar como sendo uma potência nominal.

Por exemplo, para a curva de carga-descarga com a *C-rate* de 1C, a potência AC foi calculada da seguinte forma:

$$1\ C = \frac{540\ [A]^{(1)}}{12\ [C]^{(2)}} = 45\ A = I_{DC}$$

Em que:

- (1) Representa a corrente máxima de carga e descarga contínua
- (2) Representa a taxa de carga e descarga

Logo,

$$P_{AC,nominal} = V_{nominal} \times I_{DC} = 55 \times 45 = 2\ 475\ W \quad \text{Eq. (8)}$$

Porém, para proceder ao cálculo das potências AC e DC a ensaiar no supercondensador através das Eq.(5) e Eq.(6), é necessário conhecer o valor das eficiências médias de carga e descarga dos ensaios realizados nos inversores. Por exemplo, para os ensaios que correspondem a 5% do valor da potência nominal AC do sistema, foram obtidos cinco valores de eficiências uma vez que se realizaram cinco ensaios para aquela potência, o qual resultou no cálculo de um valor médio para a eficiência de carga e de descarga, à percentagem de 5% da potência nominal.

O mesmo se verificou para as restantes percentagens de potência nominal AC referidas anteriormente.

Feito o cálculo do parâmetro da potência AC com base na Eq.(5), foram obtidas as eficiências médias de carga e descarga para as potências correspondentes através de interpolações de valores, sendo posteriormente obtido o valor da potência DC através da Eq.(6).

Na tabela que se apresenta, são apresentados os cálculo das potências AC e DC utilizadas nos ensaios da C-rate 1C, assim como as eficiências médias de carga e descarga correspondentes a essas potências, de acordo com as Eq.(6), Eq.(7) e Eq.(8).

Tabela 14 - Cálculo dos parâmetros utilizados no ensaio da C-rate de 1C

Cálculo da corrente correspondente:	
$1C = \frac{540 [A]}{12 [C]} = 45 A$	
Cálculo da potência nominal correspondente:	
$P_{AC,nominal} = V_{nominal} \times I_{DC} = 55 \times 45 = 2\,475 W$	
Cálculo das eficiências médias de carga e descarga dos inversores:	
$\frac{0,8609 - 0,8568}{3000 - 1500} =$ $= \frac{0,8609 - \eta_{Carga\ média\ Inversores}}{3000 - 2475} \leftrightarrow$ $\leftrightarrow \eta_{Carga\ média\ Inversores\ (AC-DC)} = 0,8761$	$\frac{1,0139 - 1,0064}{3000 - 1500} =$ $= \frac{1,0139 - \eta_{Descarga\ média\ Inversores}}{3000 - 2475} \leftrightarrow$ $\leftrightarrow \eta_{Descarga\ média\ Inversores\ (DC-AC)} = 1,003$
Cálculo da potência DC:	
$P_{DC} = P_{AC,nominal} \times \eta_{Carga\ Inversor\ (AC-DC)} = 2475 \times 0,8761 = 4337 W$	
Cálculo da potência AC ensaiada:	
$P_{AC} = P_{DC} \times \eta_{Descarga\ Inversor\ (DC-AC)} = P_{AC} = 4337 \times 1,003 = 4338 W$	

Apresentado o método que permitiu obter as potências ensaiadas anteriormente, segue-se agora a tabela que resume os valores ensaiados no supercondensador e, que permitiu obter as curvas de carga-descarga de acordo com as C-rate's que se definiram para se fazerem os ensaios no supercondensador.

Tabela 15 - Potências AC e DC utilizadas nos ensaios de obtenção das curvas de carga do Supercondensador

C-rate	$P_{AC,ensaios}$ [W]	$P_{DC,ensaios}$ [W]
1C	2151	2127
2C	4338	4337
3C	6523	6584
4C	8572	8841
5C	10255	11170
6C	11740	13546
7C	10660	16980
8C	11293	19596

Tal como fora referido nos parágrafos anteriores, também se obtiveram as capacidades de carga-descarga do supercondensador correspondentes às C-rate's ensaiadas. Por norma, o parâmetro da capacidade é fornecido e definido pelo fabricante da tecnologia em questão. O referido parâmetro corresponde à quantidade de energia que essa tecnologia consegue fornecer de acordo com a tensão especificada, até ficar totalmente descarregada (Santos, 2023).

Como tal, existem diversos que afetam esta capacidade, tais como:

- O nível da corrente de descarga, pois quanto maior for a corrente de descarga, menor será a capacidade que pode ser utilizada (Robert Bosch Ltda.);
- Processo de descarga em função do tempo, uma vez que a capacidade será maior se for feita uma pausa durante o processo de descarga ao invés do processo de descarga ser contínuo (Robert Bosch Ltda.);
- Vida Útil, porque com o passar do tempo verifica-se uma perda do material ativo que está entre as placas, diminuindo a capacidade da tecnologia em causa (Robert Bosch Ltda.).

Para os ensaios realizados, as capacidades de carga e descarga de cada C-rate ensaiada, foram obtidas através das seguintes equações:

$$C_{Carga} = \sum E_{DC,Carga\ Supercondensador} = \sum \left(\int_{t_1}^{t_2} P_{DC,Carga\ Supercondensador} dt \right) [Wh] \text{ Eq.(9)}$$

$$C_{Descarga} = \sum E_{DC,Descarga\ Supercondensador} = \sum \left(\int_{t_1}^{t_2} P_{DC,Descarga\ Supercondensador} dt \right) [Wh] \text{ Eq.(10)}$$

Em que, cada somatório apresentado nas equações acima corresponde à soma dos parâmetros das $E_{DC,Carga\ Supercondensador}$ e $E_{DC,Descarga\ Supercondensador}$ obtidas em cada instante i , do respetivo ensaio de cada C-rate.

Por último, também foi obtida a eficiência de energia que resulta da razão existente entre o somatório da energia elétrica que é obtida durante o processo de descarga e o somatório da energia elétrica utilizada durante o processo de carga do supercondensador, sendo a mesma calculada através da seguinte expressão:

$$\eta_{Energia} = \frac{\sum E_{DC,Descarga\ Supercondensador}}{\sum E_{DC,Carga\ Supercondensador}} = \frac{\sum \left(\int_{t_1}^{t_2} P_{DC,Descarga\ Supercondensador} dt \right)}{\sum \left(\int_{t_1}^{t_2} P_{DC,Carga\ Supercondensador} dt \right)} [-] \text{ Eq.(11)}$$

Tal como já tinha sido referido anteriormente, os parâmetros $E_{DC,Carga\ Supercondensador}$ e $E_{DC,Descarga\ Supercondensador}$ correspondem às energias de carga e descarga do supercondensador no instante i , respetivamente.

Por fim, foram ainda obtidos os tempos de resposta para as potências testadas, uma vez que nem sempre os processos de carga e descarga eram imediatos.

6.1 Eficiências de Carga e Descarga dos Inversores

Como fora referido no início do presente capítulo, os ensaios realizados nos inversores tiveram como principal objetivo, o cálculo das eficiências de carga e de descarga dos inversores de acordo com as Eq.(1) a Eq.(4). Os resultados obtidos resultam do cálculo médio das eficiências obtidas para cada um dos cinco ensaios realizados, de acordo com a percentagem de potência correspondente.

Na tabela que se segue, são apresentados os valores médios obtidos para as eficiências de carga e descarga dos inversores de acordo com as percentagens de potência correspondentes.

Tabela 16 – Resultados das Eficiências Médias de Carga e Descarga obtidas nos ensaios aos Inversores

Percentagem Nominal de Potência (%)	Potência Nominal AC (W)	Eficiência média Carga Inversores (AC-DC)	Desvio Padrão das medidas dos ensaios de Carga dos Inversores	Eficiência média Descarga Inversores (DC-AC)	Desvio Padrão das medidas dos ensaios de Descarga dos Inversores
5	1 500	0,8568	0,0019	1,0064	0,0076
10	3 000	0,8609	0,0051	1,0139	0,0042
20	6 000	0,8843	0,0029	0,9929	0,0036
30	9 000	0,8895	0,0017	0,9883	0,0023
50	15 000	0,9128	0,0248	0,8635	0,0350

Dos dados obtidos, obtiveram-se os seguintes gráficos que se apresentam em seguida, representando as curvas de eficiência de carga e de descarga dos inversores.

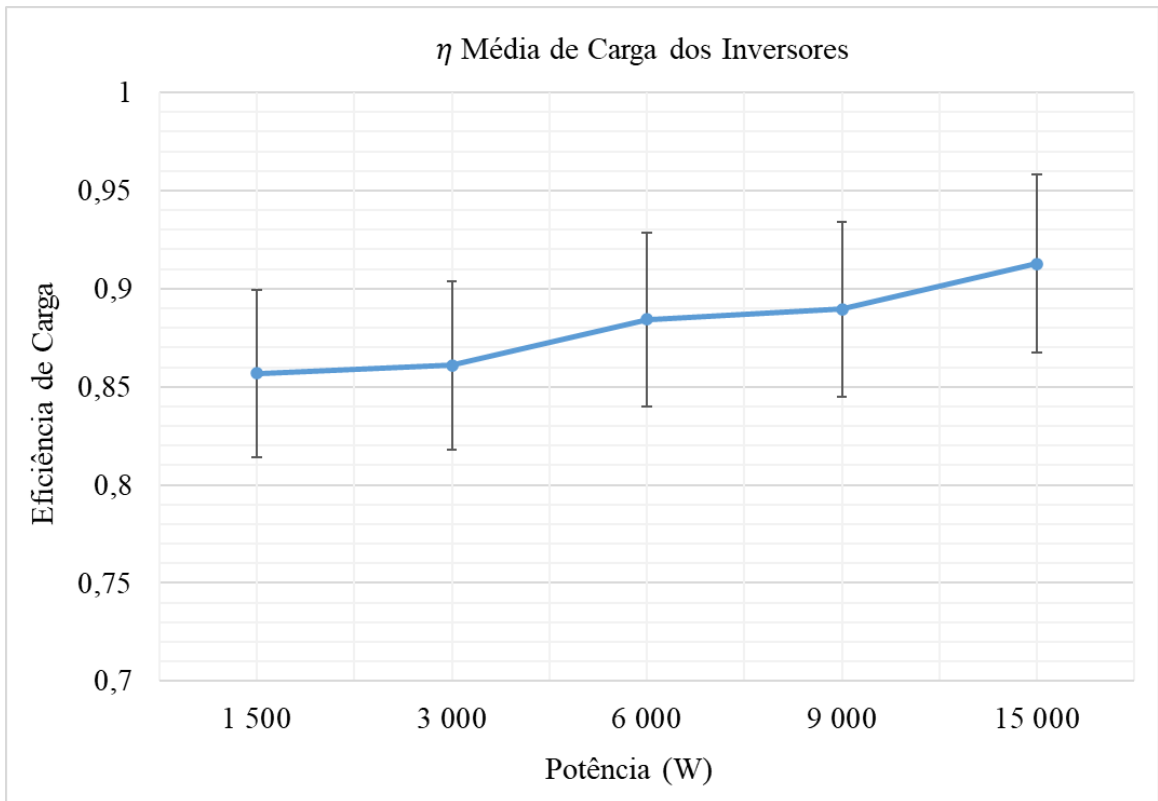


Figura 60 - Eficiência média de Carga dos inversores para os diferentes níveis de potência ensaiadas

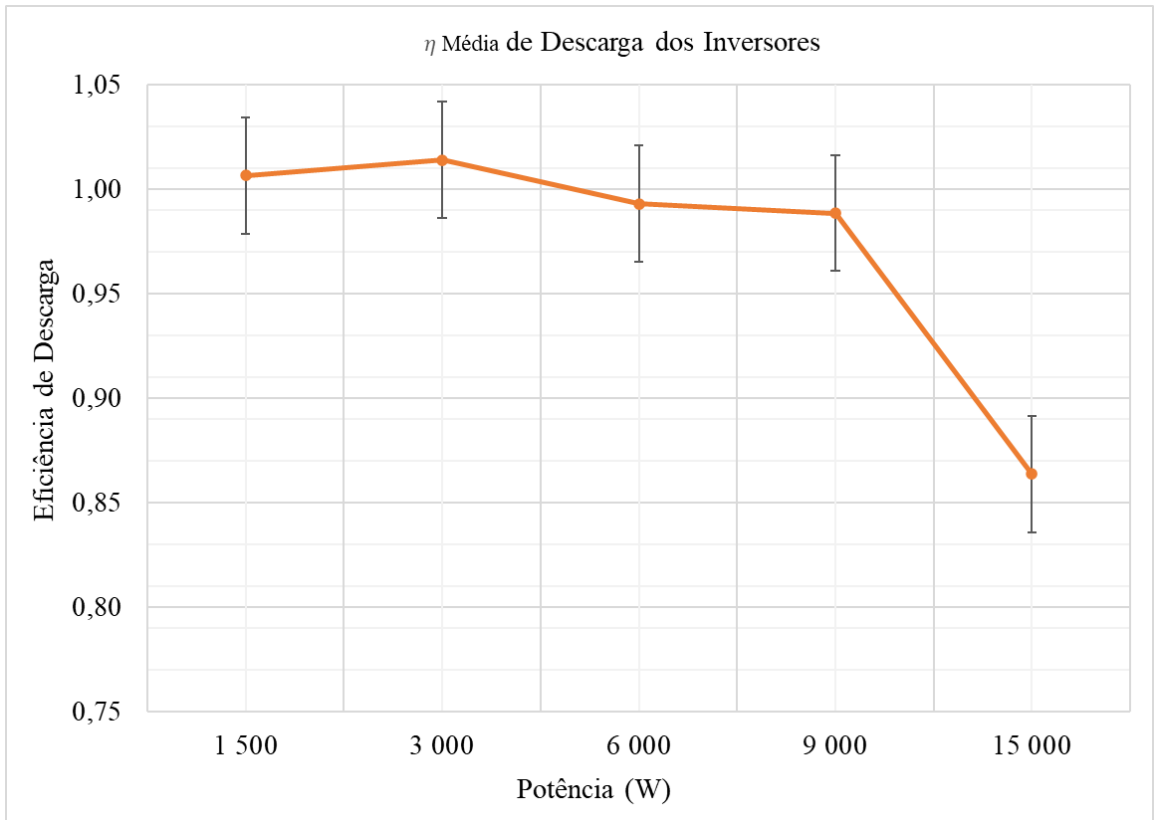


Figura 61 - Eficiência média de Descarga dos inversores para os diferentes níveis de potência ensaiadas

6.2 Capacidades e Curvas de Carga e Descarga do Supercondensador

Relativamente, aos ensaios realizados no supercondensador, como já tinha sido referido, estes tiveram como objetivo a obtenção de alguns parâmetros, sendo um deles, as capacidades de carga e descarga do supercondensador para cada *C-Rate*'s definida. As referidas capacidades de carga e descarga foram obtidas através das Eq.(8) e Eq.(9), apresentadas anteriormente.

Os dados presentes na tabela que se segue, representam o cálculo médio das capacidades de carga e descargas obtidas para cada um dos seis ensaios realizados em cada *C-Rate* definida, bem como o desvio padrão que está associado ao referido cálculo.

Tabela 17 - Capacidades Médias de Carga e Descarga do Supercondensador e Desvio Padrão associado

<i>C-Rate</i>	\overline{C}_C (Wh)	Desvio Padrão \overline{C}_C	\overline{C}_D (Wh)	Desvio Padrão \overline{C}_D
2C	1021	98	740	169
3C	499	121	453	83
4C	457	82	404	80
5C	352	69	339	37
6C	218	50	210	42
7C	141	19	137	17
8C	118	9	115	6

Nas figuras que se seguem, são apresentadas as curvas de carga e descarga obtidas, de acordo com os limites de operação definidos no supercondensador. Segue-se também uma tabela onde são apresentados os desvios-padrão dos parâmetros da corrente e da tensão obtidos aos terminais do supercondensador para cada *C-Rate* ensaiada, consoante se trate do processo de carga ou descarga do supercondensador.

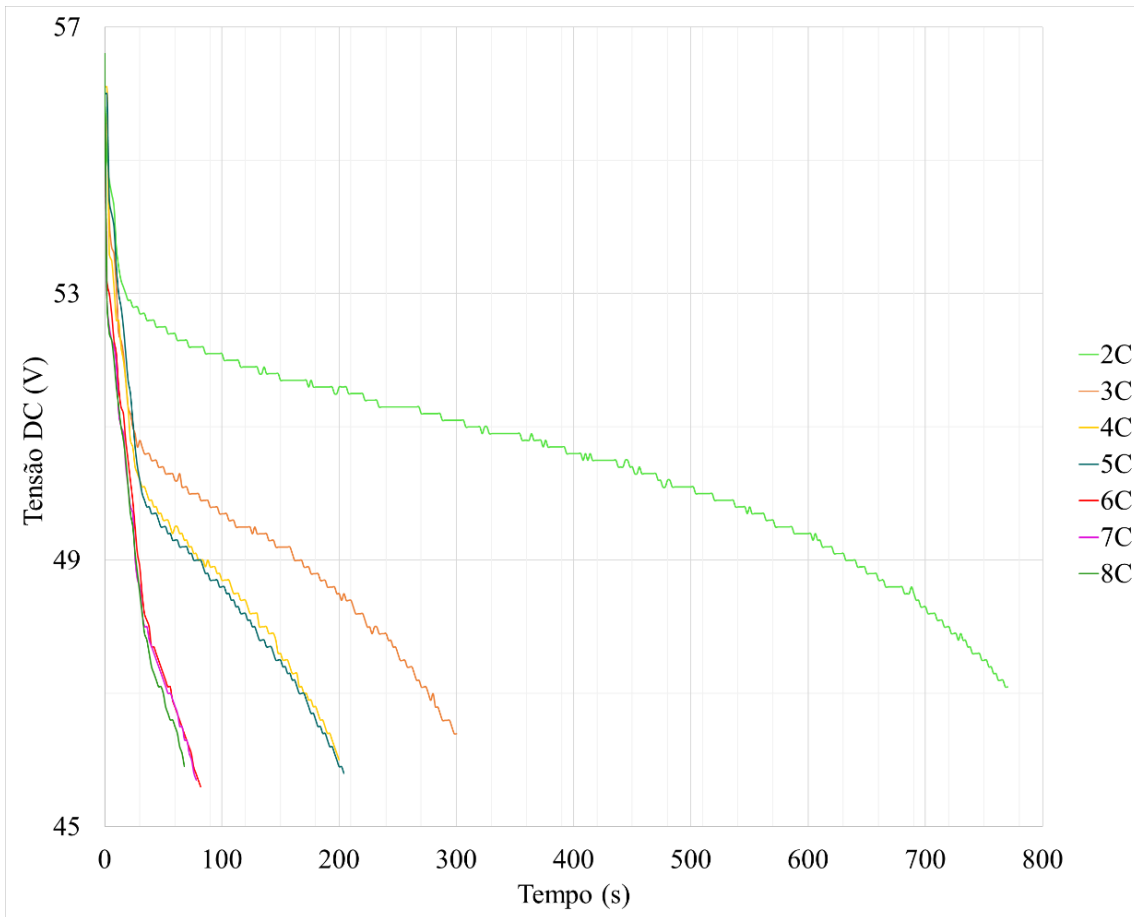


Figura 62 - Curva de Tensão DC em função do tempo para o estado de descarga do Supercondensador

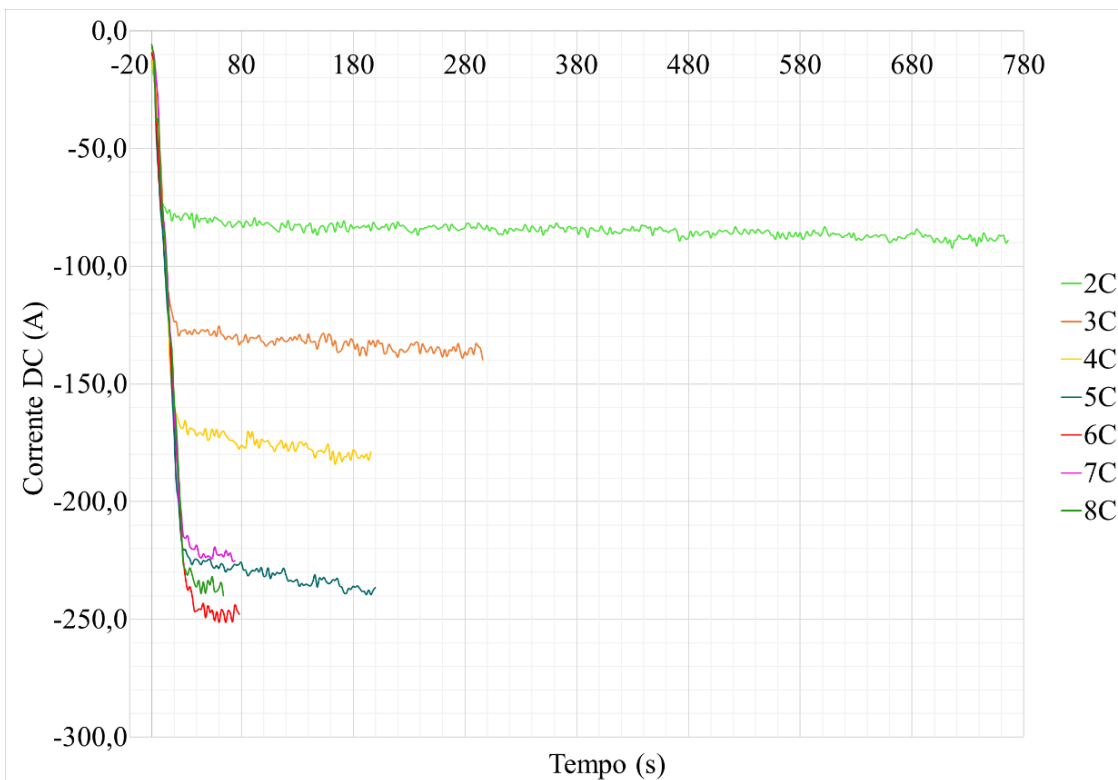


Figura 63 - Curva de Corrente DC em função do tempo para o estado de descarga do supercondensador

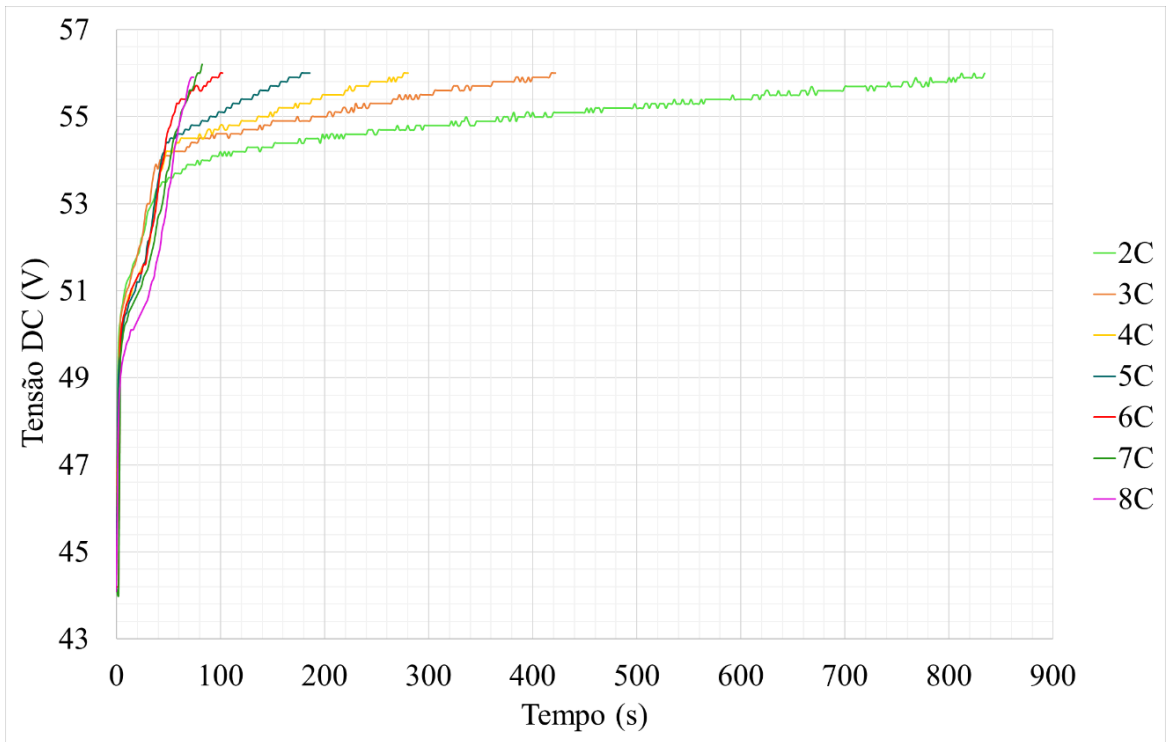


Figura 64 - Curva de Tensão DC em função do tempo para o estado de carga do Supercondensador

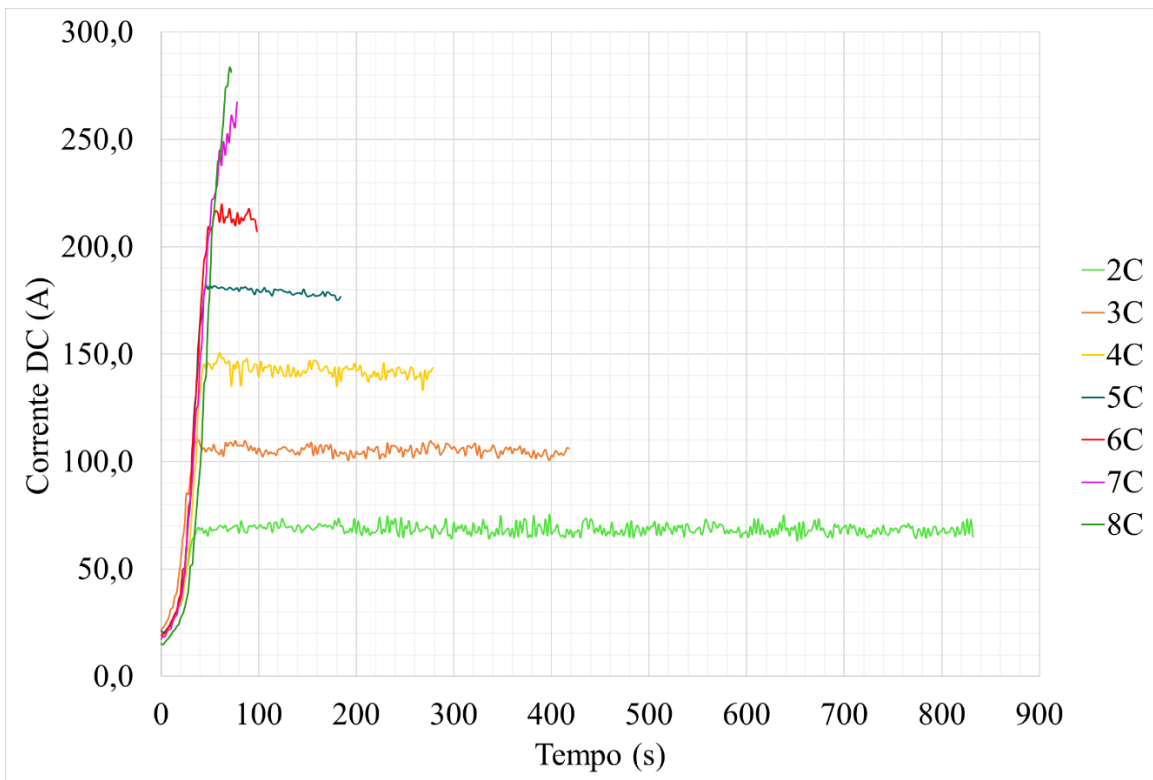


Figura 65 - Curva de Corrente DC em função do tempo para o estado de carga do supercondensador

Tabela 18 - Desvios-Padrão obtidos para os parâmetros da Corrente e Tensão de acordo com os estados de carga e descarga do Supercondensador

	Estado de Carga		Estado de Descarga	
	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)
<i>C-Rate</i>	11,567	1,007	11,486	1,498
2C	24,780	1,293	29,525	1,686
3C	44,194	1,666	47,683	1,931
4C	65,666	2,018	62,511	2,113
5C	101,767	2,715	101,461	2,511
6C	111,472	2,789	102,354	2,416
7C	109,981	2,569	110,790	2,467
8C	11,567	1,007	11,486	1,498

6.3 Eficiência Energética do Supercondensador

À semelhança da obtenção das capacidades de carga e descarga do supercondensador, foi também obtida a eficiência média de energia conforme a Eq.(11). Como descrito nos parágrafos anteriores, para cada uma das *C-Rate*'s mencionadas, foram realizados seis ensaios que resultaram num valor de médio de eficiência de energia que se encontra apresentado na tabela seguinte.

Tabela 19 - Eficiência Média de Energia para cada *C-Rate* ensaiada

<i>C-Rate</i>	$\eta_{\text{Média de Energia}}$
2C	1,444
3C	1,135
4C	1,181
5C	0,848
6C	1,045
7C	0,506
8C	0,684

Após a obtenção das respetivas eficiências médias de energia para cada uma das *C-Rate*'s, procedeu-se ao cálculo do valor médio para todas as *C-Rate*'s ensaiadas, estando este apresentado na tabela seguinte, assim como o seu desvio padrão e a sua variância.

Tabela 20 - Eficiência Média de Energia do Supercondensador

	Eficiência Média	Desvio Padrão	Variância
Eficiência de Energia	0,978	0,341	0,145

6.4 Análise dos Tempos de Resposta para as Potências Ensaaiadas

Os tempos de resposta dos equipamentos são obtidos de acordo com o tempo que demoram a dar resposta quando são realizados de testes com determinadas potências, ou seja, este tempo consiste em saber quanto tempo é que os inversores ou até mesmo o supercondensador demoram a atingir a potência pretendida após o envio do comando de potência.

Tendo em conta todos os ensaios realizados dos lados AC e DC do sistema, foram então obtidos os tempos de resposta médios, para os processos de carga e de descarga dos equipamentos ensaiados.

As duas primeiras figuras, representam os tempos de resposta ao longo do processo de carga dos inversores e do supercondensador. Por fim, as últimas figuras representam os tempos de resposta dos inversores e supercondensador para o processo de descarga.

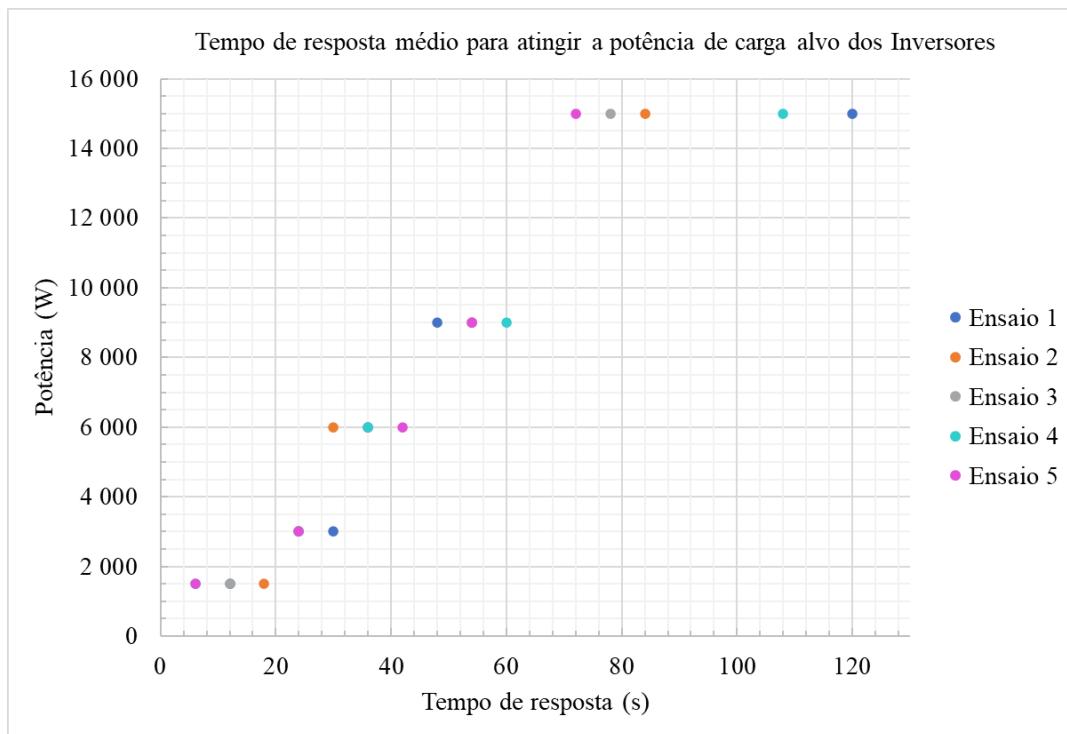


Figura 66 - Tempo de resposta médio para atingir a potência de carga alvo dos Inversores

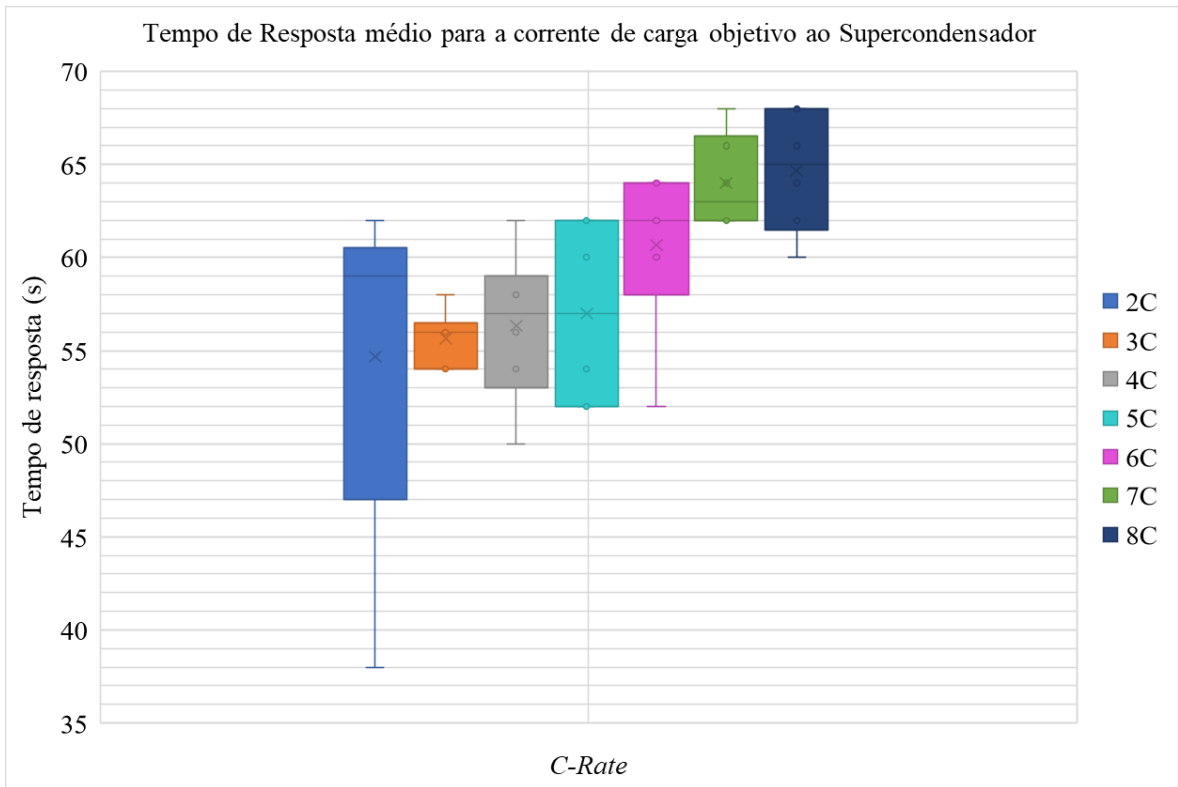


Figura 67 - Tempo de resposta médio para a corrente de carga objetivo ao Supercondensador

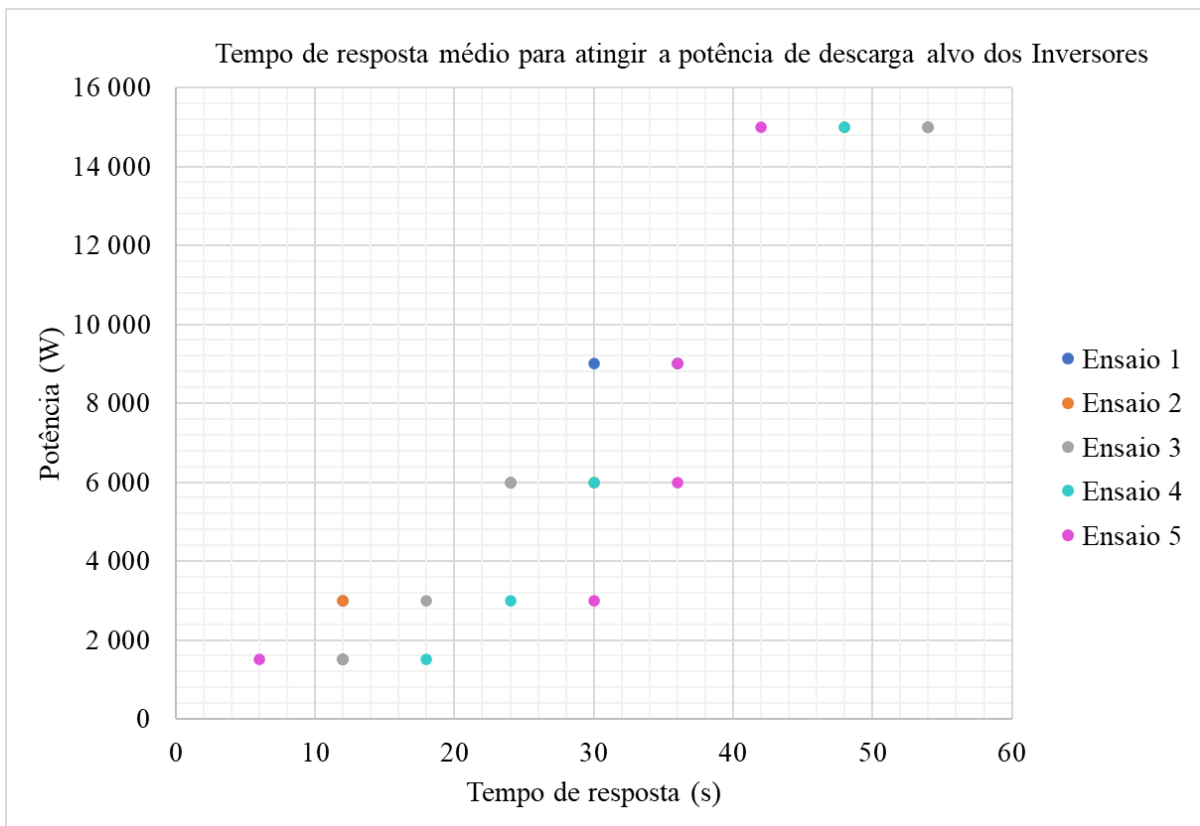


Figura 68 - Tempo de resposta médio para atingir a potência de descarga alvo dos Inversores

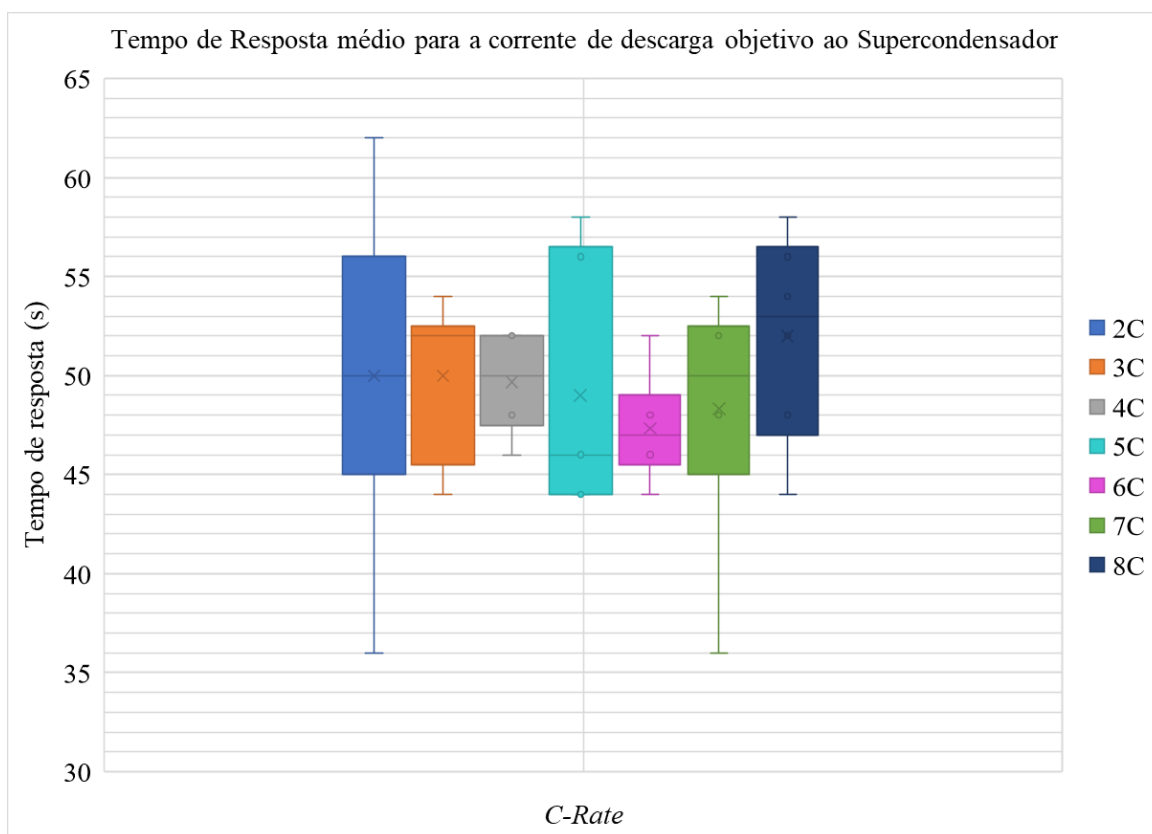


Figura 69 - Tempo de resposta médio para a corrente de descarga objetivo do Supercondensador

6.4 Discussão dos Resultados obtidos

Dados os resultados apresentados, é possível desde já concluir que a tecnologia do supercondensador híbrido foi integrada com sucesso na microrrede da CERUÉ, onde o controlo com as unidades de condicionamento de potência foi conseguido de forma eficaz, permitindo assim prosseguir com os testes de caracterização e de avaliação do supercondensador e respetivos inversores.

Relativamente ao cálculo da média da capacidade de carga e descarga foi obtido um valor médio de 1021Wh @2C para a carga e um valor médio de 740 Wh para a descarga. Tendo em conta os limites de tensões utilizados nos ensaios, eram esperados valores inferiores aos valores nominais; à semelhança de outras tecnologias de armazenamento de energia, a capacidade de energia útil calculada é inferior à capacidade de energia nominal indicada pelo fabricante. Na fase de engenharia de projetos de aplicação à escala real, deverá ser efetuado um dimensionamento cuidadoso dos principais equipamentos da instalação, ou seja, supercondensador e inversores, de forma a acomodar este aspeto. Tal como esperado, a exigência de correntes de carga/descarga mais elevadas diminui a capacidade de energia armazenada.

Nos gráficos das Figura 62 e Figura 63 e que se referem ao estado de descarga do supercondensador e que relacionam a tensão DC (V_{DC}) e a corrente DC (I_{DC}) em função do tempo, respetivamente, podemos observar uma diminuição da tensão DC, bem como da corrente DC, como seria de esperar, uma vez que se trata de uma descarga. Inicialmente, a corrente DC de

descarga apresenta uma diminuição quase linear, acabando depois por se tornar quase constante ao longo do tempo.

Em contrapartida, nos gráficos das Figura 64 e Figura 65, que se referem ao estado de carga do supercondensador e, relacionam as mesmas grandezas descritas anteriormente, verifica-se precisamente o contrário, uma vez que se trata do estado de carga. Num estado de carga, verifica-se sempre um aumento da tensão DC e da corrente DC ao longo do tempo, embora esta última acabe por se tornar quase constante a partir de um determinado ponto. Tendo em conta a conhecida expressão, $P = VI$ e, considerando o facto de a corrente DC se tornar constante a partir de um determinado ponto no tempo, tanto para um estado de carga como de descarga, isto significa que o supercondensador mantém a sua tensão constante a partir de um determinado instante no tempo, bem como a sua potência, tornando esta corrente constante ao longo do tempo.

Quanto aos gráficos das Figura 60 e Figura 61, que dizem respeito às eficiências de carga e descarga, respetivamente, os inversores apresentam uma taxa elevada de eficiência de conversão tendo em conta os diferentes níveis de potência testados, quer em carga, quer em descarga, obtendo-se uma eficiência média de energia (ciclo carga-descarga) para o supercondensador de 97,8% ($\pm 3,7\%$). No gráfico da Figura 61 é visível a existência de duas médias cujos valores de eficiência são superiores a 100%.

Sabe-se desde já, que do ponto de vista físico não existem eficiências superiores a 100%, pelo que estes valores se devem a erros de medição substanciais, relacionados com os sensores de baixa precisão que vêm incluídos no próprio equipamento – inversor -, existindo pontos de medição nessa amostra dentro da barra de erro e abaixo de 100%. Este erro deve-se, provavelmente, devido à baixa qualidade de sensores utilizados pelos fabricantes para medição das variáveis que foram utilizadas no cálculo.

Os limites operacionais atuais do modelo dos inversores utilizados acabam por limitar os ensaios a níveis de potência/corrente mais elevados, sendo a potência máxima atingida de 19,8 kW. O dimensionamento de futuros inversores deverá de facto colmatar esta limitação de potência, permitindo atingir todo o potencial dos supercondensadores, ultrapassando as curvas de carga na ordem dos 8C.

Relativamente aos gráficos das Figura 66, Figura 67, Figura 68 e Figura 69 que representam os tempos de resposta médios dos inversores e do supercondensador para os diferentes valores de potências testadas nos processos de cargas e descargas completas de acordo com as *C-Rate's* ensaiadas, verifica-se que o tempo de resposta para cada um dos equipamentos referidos tende a aumentar, à medida que se aumenta a potência de teste. Ou seja, o sistema apresenta dificuldade em dar resposta num período curto, no processo de cargas e descargas completa, sendo o período de tempo tomando como referência, um intervalo de tempo de 20 s.

Em média, o processo de carga do supercondensador é aquele que apresenta os maiores tempos de resposta, alcançando-se valores superiores a 60 s.

Tendo em conta o processo inverso, o tempo de resposta de descarga dos inversores é, em média, inferior a 60 s. Ou seja, uma descarga completa ocorre sempre mais rápido do que uma carga completa. A limitação do tempo de resposta deve-se muito provavelmente à estrutura de comando e controlo interno da eletrónica de potência dos inversores e não à tecnologia de supercondensadores. À partida, como já foi referido anteriormente, se fosse realizado um novo dimensionamento dos equipamentos da instalação e, se a potência da instalação de inversores fosse sobredimensionada, certamente que os tempos de resposta iriam apresentar valores mais baixos face aos obtidos.

Outro fator que também poderá afetar os tempos de resposta, será a duração de cada ciclo programático de controlo em *LabVIEW*, pois caso este ciclo seja cada vez menor, o tempo de execução de novos comandos poderá ser mais ágil. No entanto, existem outros fatores que podem vir a afetar a duração de cada ciclo, uma vez que como os comandos são enviados através de infraestrutura *ethernet*, a mesma apresenta também atrasos adicionais na comunicação. Para além disso, se reduzirmos a duração de cada ciclo programático abaixo de 1 s, existe a possibilidade de alguns comandos não serem executados e as mensagens entre equipamentos poderem ser truncadas, acrescentando erros e/ou falsas leituras.

De acordo com os tempos médios de resposta obtidos para a configuração de supercondensador acoplado a 3 inversores monofásicos (1 por fase), não mostrou atingir os tempos de resposta necessários para esta estratégia de gestão de rampas de potência de mitigação das flutuações com passagem de nuvens. O sobredimensionamento da eletrónica dos inversores para um múltiplo da potência existente permitiria atingir os 30 *kVA* totais nas três fases com tempos de resposta muito mais baixos.

7. Conclusões

A escolha do comissionamento e instalação desta tecnologia como tema desta dissertação prendeu-se com o facto desta tecnologia de armazenamento de energia ser inovadora e única nas instalações da CERUÉ.

Os objetivos definidos para esta dissertação foram atingidos na sua grande maioria. A instalação e o comissionamento deste sistema foram conseguidas com o auxílio do grupo PV da CERUÉ.

O desenvolvimento da programação para esta tecnologia através do *LabVIEW*, foi feito de forma a conseguir realizar-se um controlo e otimizações de grandezas específicas. Devido à inexistência de qualquer protocolo de comunicação específico com uma tecnologia deste género, através de inversores comuns, este desenvolvimento foi realizado para os mesmos e foi possível obter comunicação e comando com sucesso, sem erros. Para a referida programação, foi desenvolvido um modelo de comunicação através do protocolo Modbus TCP/IP, pela sua normalização no mercado e compatibilidade com os mais diversos componentes utilizados neste sistema e na microrrede. Foi possível fazer todo o controlo através do *software* desenvolvido e, consequentemente, fazer a validação experimental com recurso ao mesmo.

Na fase experimental, foram obtidos e analisados os resultados através dos ensaios realizados no supercondensador e nos inversores. Esta análise permitiu obter alguns parâmetros experimentais, tais como, as capacidades de carga e descarga do supercondensador e as eficiências de carga e descarga por parte dos inversores, em função de determinadas percentagens em relação à potência nominal do sistema. Foi obtida uma eficiência média de carga-descarga para o supercondensador de 97,8% ($\pm 3,7\%$), valor considerado bastante elevado para uma tecnologia de armazenamento eletroquímico. Foi ainda possível obter as capacidades médias de carga e de descarga do supercondensador, tendo sido obtido um valor médio de 1021 Wh @2C para a carga e um valor médio de 740 Wh para a descarga. Deve salientar-se que à semelhança de outras tecnologias de armazenamento de energia, a capacidade de energia útil calculada é inferior à capacidade de energia nominal indicada pelo fabricante. Este facto deverá então considerar-se na fase de design e dimensionamento de futuros sistemas similares.

Os tempos de resposta médios obtidos para os ensaios realizados com a configuração experimental deste supercondensador demonstram ser superiores ao necessário para a realização de controlo e gestão de rampas de potência fotovoltaica causadas pela passagem das nuvens. Obtiveram-se tempos de resposta superiores ao valor estimado de 20s para resposta e controlo de passagem das nuvens em aplicações de irrigação de alta potência. O sobredimensionamento da potência do conjunto dos inversores permitirá obter tempos de resposta inferiores aos obtidos com este *setup* experimental, e executar o serviço pretendido. Assim, considerando também a ausência de degradação indicada pelo fabricante (com tempo de vida ou face à sua operação) e muito elevada densidade de potência assinalam permitir a sua aplicabilidade no serviço pretendido.

Comparativamente com os valores obtidos para diversas tecnologias eletroquímicas de armazenamento de energia, os custos associados à aquisição deste sistema, apresentam-se na mesma ordem de grandeza às baterias de iões de lítio, no que diz respeito ao custo por capacidade (€/kWh) e um custo inferior para a potência (€/kW). Relativamente a equipamentos cujo campo de operação se sobrepõe aos serviços e aplicações de um supercondensador híbrido de base de carbono, tal como, o volante de inércia e os supercondensadores (convencionais), temos custos de energia e potência similares. O seu tempo de vida deverá aproximar-se do de um supercondensador convencional e poderá ser superior ao de um volante de inércia (por ex. pela ausência de peças móveis).

De acordo com a análise económica realizada para esta tecnologia, o modelo aplicado apenas é válido quando aplicado a uma bateria, uma vez que o seu propósito é armazenar energia através de cargas e descargas de energias. O mesmo não se verifica com a tecnologia dos supercondensadores híbridos, pois o seu propósito é prestar serviço em casa de falha de potência no setor da irrigação fotovoltaica de alta potência.

Por fim, o desenvolvimento de uma estratégia adequada ao controlo automático do sistema foi conseguida, obtendo-se um ciclo de controlo de execução em tempo real dos três inversores. No futuro, com a realização de um novo dimensionamento de inversores, pode esperar-se que os tempos de resposta se tornem efetivamente mais reduzidos e, nessa altura, a aplicação desta tecnologia para o controlo e gestão de rampas de potência será alcançada, como assim se pretende.

Num futuro próximo, a tecnologia de supercondensadores híbridos poderá vir a ser comercializada de forma mais generalizada no mercado, da mesma forma que as baterias comuns são atualmente. Para isto o custo de aquisição deste tipo de supercondensador deve sofrer uma redução, deve aumentar-se o conhecimento acerca desta tecnologia, do seu controlo, gestão e dimensionamento, deve demonstrar-se a sua aplicabilidade em serviços de gestão de potência, serviços de *peak-shaving*, serviços de qualidade de rede elétrica, etc. Outro fator que poderá vir a influenciar esta comercialização no mercado, será a desmonopolização, pois neste momento a aquisição desta tecnologia em específico é feita através de um único fornecedor (Kurt Energy, s.d.) não existindo competitividade no mercado.

8. Trabalhos Futuros

Como já referido no capítulo anterior, esta dissertação diz respeito à primeira fase de testes de operação deste supercondensador híbrido de base-carbono e, como tal, numa segunda fase de testes de operação deverão ser tidos em conta alguns aspetos de forma a obter-se objetivos de validação e demonstração, assim como desenvolvimento de novas estratégias de gestão e controlo.

As tarefas futuras incluem:

- Dimensionamento de novos inversores para este sistema, de forma que se possam realizar cargas e descargas com potências cada vez mais elevadas em tempos de resposta adequados;
- Ensaio e demonstração experimental da estratégia de controlo e gestão de rampas de potência (por ex. causadas pela passagem das nuvens sobre o campo fotovoltaico);
- Desenvolvimento de novas estratégias adequadas ao controlo e aplicação desta tecnologia, mostrando novos serviços e validar modelos de negócio que viabilizem a sua utilização pelo mercado;
- Demonstrar a sua integração à escala real num sistema de bombagem fotovoltaica de alta potência;
- Realizar novos eventos e workshops de divulgação e formação de pessoal técnico e de engenharia sobre a aplicação desta tecnologia de armazenamento de eletricidade.

Referências

- Acromag. (n.d.). *BusWorks 900EN Series 10/100M Industrial Ethernet I/O Modules w/Modbus: Technical Reference - Modbus TCP/IP*. Retrieved from https://www.prosoft-technology.com/kb/assets/intro_modbustcp.pdf
- Agricultura e Mar. (2021). Universidade de Évora organiza conferência e visita a sistema de irrigação fotovoltaica solar acessível com emissões zero. <https://agriculturaemar.com/universidade-de-evora-organiza-conferencia-e-visita-a-sistema-de-irrigacao-fotovoltaica-solar-acessivel-com-emissoes-zero/>.
- Agronegócios. (2021). FENAREG propõe criar projeto-piloto de comunidades de energia solar no regadio coletivo. <http://www.agronegocios.eu/noticias/fenareg-propoe-criar-projeto-piloto-de-comunidades-de-energia-solar-no-regadio-coletivo/>.
- Almeida, R. H., Herraiz, J. I., Carrasco, L. M., Narvarte, L., Fialho, L., & Duarte, D. (n.d.). *SolaQua*. Retrieved 12 23, 2022, from https://sol-aqua.eu/Files/ENG/Training_Manual_For_Irrigators.pdf
- Ana Foles, L. F.-P. (2022). An approach to implement photovoltaic self-consumption and ramp-rate control algorithm with a vanadium redox flow battery day-o-day forecast charging. *Elsevier*, 12.
- Andrews, B. (2017). *Review of Electrical Energy Storage Technologies and Systems and of their Potential for the UK*. DTI.
- Aneke, M., & Wang, M. (2016, 10 1). Applied Energy. *Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review*, pp. 350-377.
- APREN - Associação Portuguesa de Energias Renováveis. (n.d.). Retrieved 11 17, 2022, from <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>
- Aroso, J. R. (2017). *Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em software LabView para uma instalação piloto de gaseificação de biomassa*. Coimbra.
- Arun Thirumurugan, S. S.-M. (2023). Chapter 10 - Hybrid supercapacitors, formation, and new advances with different electrochemical electrodes based on layered double hydroxides (LDHs), metal–organic framework (MOF) materials, smart supercapacitors. In *Smart Supercapacitors: Fundamentals, Structures, and Applications* (pp. 199-226). Elsevier.
- AutoSolar. (n.d.). *Etapas de carga de una batería*. Retrieved from <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/etapas-de-carga-de-una-bateria>
- Away, R. (2023, 1 4). *Energias Renováveis abasteceram quase 50% do consumo em Portugal, em 2022*. Retrieved 1 7, 2023, from <https://away.iol.pt/energia/atualidade/energias-renovaveis-abasteceram-quase-50-do-consumo-em-portugal-em-2022/20230104/63b465390cf255d6e1440798>
- BatteryJunction.com. (n.d.). *18650 Battery Cells*. Retrieved from <https://www.batteryjunction.com/batteries/shop-by-size/18650>
- Box, F. T. (n.d.). Levadas da Madeira, Portugal. <https://franks-travelbox.com/pt/europa/portugal/levadas-von-madeira-portugal/>.

- Carlo Gavazzi. (n.d.). *Energy meters and analysers*. Retrieved 12 29, 2022, from <https://www.gavazziautomation.com/nsc/HQ/EN/product/EM24DINAV23XW1IX>
- Caroline, S. C., Madhusudanan, S. P., Dalapati, G. K., & Batabyal, S. K. (2022). Chapter 22 - Energy storage technologies for sustainable development. In *Sulfide and Selenide Based Materials for Emerging Applications* (pp. 583-606). Elsevier.
- Chamsa. (n.d.). *Irrigação por Gotejamento*. Retrieved 12 22, 2022, from <https://grupochamartin.com/pt/riego/sistemas-por-goteo-precio-comprar-material>
- Chamsa. (n.d.). *Rega por aspersão*. Retrieved 12 22, 2022, from <https://grupochamartin.com/pt/riego/tuberias-para-irrigacion-por-aspersion-agricola>
- Chen, H., Ngoc, T., Yang, W., Chunqing, Li, Y., & Ding, Y. (2009, 3 10). Science Direct. *Progress in electrical energy storage system: A critical Review*, pp. 291-312.
- Circutor. (n.d.). *SH 500A/60mV*. Retrieved from [https://circutor.com/pt-pt/produtos/medicao-e-controlo/transformadores-de-corrente-e-shunts/medida-em-continua/product/M7123C./](https://circutor.com/pt-pt/produtos/medicao-e-controlo/transformadores-de-corrente-e-shunts/medida-em-continua/product/M7123C/)
- Coletivo Saberes. (2020, 9 19). Retrieved 12 6, 2022, from <https://www.youtube.com/watch?v=1vtCTyxa7IU>
- Commission, I. E. (2011, 12 26). *Electrical Energy Storage*. Retrieved from file:///C:/Users/marci/Downloads/iec_wp-electrical_energy_storage-en.pdf
- Concepts, T. E. (n.d.). *PID Control (Proportional + Integral + Derivative)*. Retrieved from <https://www.theengineeringconcepts.com/pid-controller/>
- Control, Z. (n.d.). *Como funciona a comunicação Modbus?* Retrieved from <https://zenzorcontrol.pt/pt/como-funciona-a-comunicacao-modbus>
- Copco, A. (n.d.). *Armazenamento de energia solar - tirar o máximo partido do sol*. Retrieved from <https://www.atlascopco.com/pt-pt/construction-equipment/resources/green-solutions-guide/solar-energy-storage-getting-the-most-out-of-the-sun>
- Correia, J. A. (2015). *Ensaio de supercondensadores híbridos utilizando eléctrodos de aço inoxidável eletrodepositados com óxidos de metais de transição*.
- Costa, F. R. (2019). Processos de armazenamento de energia com recurso a ar comprimido: revisão. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Dan Gao, Z. L. (2023). A survey of hybrid energy devices based on supercapacitors. In *Green Energy & Environment* (pp. 972-988). Elsevier.
- DGEG. (n.d.). Retrieved 11 25, 2022, from <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/energia-solar/solar-fotovoltaico/>
- DGEG. (2022, 05 05). *Pordata*. Retrieved 11 10, 2022, from <https://www.pordata.pt/db/portugal/ambiente+de+consulta/grafico>
- Diário da República Eletrónico. (1984, 12 26). *Decreto Regulamentar n°90/84, de 26 de Dezembro*. Retrieved 12 30, 2022, from <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-regulamentar/90-1984-396518>
- Diário da República Eletrónico. (2022, 1 14). *Decreto-Lei n.°15/2022, de 14 de Janeiro*. Retrieved 12 29, 2022, from <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/15-2022-177634016>

- Dillip Kumar Subudhi, D. K. (2022). 11 - Supercapacitors: a review on electrode materials and models based on conjugated polymers. In *Conjugated Polymers for Next-Generation Applications* (pp. 335-365). Woodhead Publishing.
- DN/Lusa. (2022). Portugal cada vez mais ameaçado pela falta de água, revela estudo. *Diário de Notícias*.
- Eknath,, P., Chavan, U. S., & Pandey,, A. (2020). Electrochemical Energy Reviews. *Materials and Fabrication for Electrochemical Supercapacitors: Overview*, pp. 155-186.
- Electricity Magnetism. (n.d.). *Dispositivos de armazenamento de energia indutiva*. Retrieved from <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/dispositivos-de-armazenamento-de-energia-indutiva/>
- Electrofun*. (n.d.). Retrieved 12 23, 2022, from <https://www.electrofun.pt/componentes-eletronicos/condensadores>
- Eletronica PT. (n.d.). *Lei de Ohm*. Retrieved 12 28, 2022, from <https://www.electronica-pt.com/lei-ohm>
- Eltrónico, D. d. (n.d.). *Portaria n.º252/2015, de 19 de Agosto*. Retrieved 12 30, 2022, from https://dre.pt/dre/detalhe/portaria/252-2015-70055493?_ts=1656633600034
- ELPROCUS. (n.d.). *What is a PID Controller : Working & Its Applications*. Retrieved from <https://www.elprocus.com/the-working-of-a-pid-controller/>
- Energy, G. (n.d.). *Célula de Combustível* . Retrieved from <https://goldenergy.pt/glossario/celula-combustivel/>
- Energy, V. (n.d.). Retrieved 12 28, 2022, from <https://www.victronenergy.pt/upload/documents/Datasheet-Quattro-3-10kVA-120V-PT.pdf>
- Energy, V. (n.d.). *CCGX Modbus TCP Register List*. Retrieved from <https://energytalk.co.za/t/victron-modbus-tcp-register-list/1213>
- Energy, V. (n.d.). *Cerbo GX Manual*. Retrieved 12 28, 2022, from https://www.victronenergy.com/upload/documents/Cerbo_GX/CCGX__Venus_GX__Cerbo_GX__Cerbo-S_GX_Manual-en.pdf
- Energy, V. (n.d.). *Charging - Bulk, Absorption and Float*. Retrieved from <https://community.victronenergy.com/questions/63640/charging-bulk-absorption-and-float.html>
- Energy, V. (n.d.). *Inversor/Carregador: Quattro*. Retrieved 12 27, 2022, from <https://www.victronenergy.pt/inverters-chargers/quattro#pd-nav-image>
- E-Redes. (n.d.). *FT 1.5.3 – LUVAS ISOLANTES (DE PROTEÇÃO ELÉTRICA)*. Retrieved from https://www.e-redes.pt/sites/eredes/files/2022-07/FT153_Luvas%20Isolantes.pdf
- Europeia, J. O. (2011). *Diretiva 2011/65/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de Junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrónicos (reformulação)*. Parlamento Europeu.
- Europeia, J. O. (2014). *Diretiva 2014/30/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 26 de Fevereiro de 2014* . Parlamento Europeu.

- Europeia, J. O. (2014). *Diretiva 2014/30/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 26 de Fevereiro de 2014 relativa à harmonização da legislação dos Estados-Membros respeitante à compatibilidade eletromagnética (reformulação)*. Parlamento Europeu.
- Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2012, 8 6). *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration*, p. 6.
- EVESCO. (n.d.). *The Power of Peak Shaving: a complete guide*. Retrieved from <https://www.power-sonic.com/blog/the-power-of-peak-shaving-a-complete-guide/>
- Exro.com. (n.d.). *Peak Shaving: Optimize Power Consumption with Battery Energy Storage Systems*. Retrieved from <https://www.exro.com/industry-insights/peak-shaving>
- Farnell. (n.d.). *Fuseholder, Automotive Blade, 1 Fuse, 425 A, 80 VDC, Bolt Down*. Retrieved from <https://pt.farnell.com/littelfuse/177-5701-0001/fuse-holder-425a-80v-bolt-down/dp/307282?st=portable%20fusible%20425%20a>
- Farnell. (n.d.). *Fuseholder, Chassis Mount, 1 Fuse, 800 A, 150 VAC, 150 VDC, Bolt Down*. Retrieved from <https://pt.farnell.com/littelfuse/lffb0003z/fuseholder-800a-150v-chassis/dp/2840035?ICID=I-RP-STM7REC-0>
- Farnell. (n.d.). *TR SERIES DUAL POLE MASTER DISCONNECT SWITCH*. Retrieved 12 28, 2022, from <https://www.farnell.com/datasheets/3105915.pdf>
- Foles, A. C., Fialho, L., Collares-Pereira, M., & Horta, P. (2022). An approach to implement photovoltaic self-consumption and ramp-rate control algorithm with a vanadium redox flow battery day-o-day forecast charging. *Elsevier*, 12.
- Francisco Jesús Guillén-Arenas, J. F.-R. (2022, 9 29). A New Strategy for PI Tuning in Photovoltaic Irrigation Systems Based on Simulation of System Voltage Fluctuations Due to Passing Clouds. p. 20.
- Gao, D., Luo, Z., Liu, C., & Fan, S. (2023). A survey of hybrid energy devices based on supercapacitors. In *Green Energy & Environment* (pp. 972-988). Elsevier.
- Gates, B. (2021). *Como Evitar Um Desastre Climático*. Porto: Ideias de Ler.
- Gold Energy. (n.d.). *BTE (Baixa Tensão Especial)*. Retrieved 12 30, 2022, from <https://goldenergy.pt/glossario/bte-baixa-tensao-especial/>
- Goswami, L., Kushwaha, A., Goswami, S., Sharma, Y. C., Kim, T., & Tripathi, K. M. (2021). 19 - Nanocarbon-based-ZnO nanocomposites for supercapacitor application. In *Nanostructured Zinc Oxide: Synthesis, Properties and Applications* (pp. 553-573). Elsevier.
- Grazzini, G., & Milazzo, A. (2008, 9). *Thermodynamic analysis of CAES/TES systems for renewable energy plants*, pp. 1998-2006.
- Green, A., & Jehoulet, C. (n.d.). *THE NON-BATTERY BATTERY - THE POTENTIAL ROLE OF SUPERCAPACITORS. IN STANDBY POWER APPLICATIONS*.
- Guihua Yu, X. X. (2013, 3). Elsevier. *Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors*, pp. 213-234.

- Guillén-Arenas, F. J., Fernández-Ramos, J., & Narvarte, L. (2022, 9 29). A New Strategy for PI Tuning in Photovoltaic Irrigation Systems Based on Simulation of System Voltage Fluctuations Due to Passing Clouds. p. 20.
- Helsingen, E. M. (2015). Adiabatic compressed air energy storage.
- HITACHI. (n.d.). *Tipos de armazenamento de energia: quais são? Entenda!* Retrieved from <https://www.hitachi.com.br/blog-q3-p6.php>
- Horta, M., Fialho, L., Foles, A. C., & Horta, P. (2023). CARBON-BASED HYBRID SUPERCAPACITORS FOR HIGH POWER PHOTOVOLTAIC IRRIGATION. *EUPVSEC 2023*. Lisboa.
- International Energy. (2021). *Global Energy Review 2021*. Paris, France.
- Izzati, L., Ariffin, W., Zain, A. S., Nordin, J., & Saad, N. S. (2021). Comparative Study of Energy Storage Systems (ESSs). *1st International Conference on Engineering and Technology (ICoEngTech)*.
- Jayalakshmi, M., & Balasubramanian, K. (2008). International Journal of Electrochemical Science. *Simple Capacitors to Supercapacitors - An Overview*, pp. 1196-1217.
- Johansson, P., & Andersson, B. (2008). Master of Science Thesis. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. *Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling*, p. 131.
- Joyce. (n.d.). *Como acontece a fuga térmica da bateria?* Retrieved from <https://www.lithiumbatterytech.com/pt/how-does-battery-thermal-runaway-happen/>
- KEMET. (2019, 4 21). *Supercapacitors vs. Batteries*. Retrieved 12 23, 2022, from <https://www.kemet.com/en/us/technical-resources/supercapacitors-vs-batteries.html>
- Keysight. (n.d.). *Keysight 34970A/34972A Data Acquisition/Switch Data*. Retrieved 12 28, 2022, from <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-02644/user-manuals/9018-02644.pdf>
- Kurt Energy. (n.d.). Retrieved 12 27, 2022, from <https://kurt.energy/technology/>
- Kwadwo Mensah-Darkwa, S. A. (2022). Chapter 9 - Advanced applications of biomass for energy storage. In *Bio-Based Nanomaterials: Synthesis Protocols, Mechanisms and Applications* (pp. 171-209). Elsevier.
- Lalit Goswami, A. K. (2021). 19 - Nanocarbon-based-ZnO nanocomposites for supercapacitor application. In *Nanostructured Zinc Oxide: Synthesis, Properties and Applications* (pp. 553-573). Elsevier.
- Leal, R. S., Hartmann, L. V., Gehrke, C. S., & Salvadori, F. (n.d.). *Análise de Tecnologias para Sistemas de Armazenamento de Energia*, p. 8.
- Lei Zhou, C. L. (2019). 7 - Metal oxides in supercapacitors. In *Metal Oxides in Energy Technologies* (pp. 169-203). Elsevier.
- Leonzio, G. (2016, 4 15). Chemical Engineering Journal. *Process analysis of biological Sabatier reaction for bio-methane production*, pp. 490-498.

- Littelfuse. (n.d.). *High Current Fuses*. Retrieved 12 28, 2022, from <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/LFSI/LFSI-S-A0002371988/LFSI-S-A0002371988-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>
- Littelfuse. (n.d.). *TR SERIES 32V 500A 2-Pole Waterproof Master Battery Disconnect Switch*. Retrieved 12 28, 2022, from <https://www.littelfuse.com/media?resourcetype=datasheets&itemid=f3e3e428-16c1-49ff-a341-734421676ad9&filename=littelfuse-switches-battery-disconnects-tr-series>
- Littelfuse. (n.d.). *TR Series - 32V 500A 2-Pole Waterproof Master Battery Disconnect Switch*. Retrieved 12 28, 2022, from <https://www.littelfuse.com/products/switches/manual-battery-disconnect-switches/tr.aspx>
- Lojaluz. (n.d.). *Tensão BTE*. Retrieved 12 30, 2022, from <https://lojaluz.com/faq/tensao-bte>
- Lopes, S. A. (2015, Setembro). *Tecnologias de Armazenamento de Energia para Fornecimento de Serviços de Sistema*. Retrieved from <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/40488/1/Tecnologias%20de%20Armazenamento%20de%20Energia%20para%20Fornecimento%20de%20Servicos%20de%20Sistema.pdf>
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015, 1 1). Science Direct. *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, pp. 511-536.
- LuzeGas.pt. (n.d.). *Quais são as tarifas da EDP? | Maio 2024*. Retrieved from <https://luzegas.pt/fornecedores-energia/edp/tarifas-preco-kwh#preco-eletricidade-edp>
- Manualslib. (n.d.). *Curva De Carga; Resolução De Problemas - BS Charger BS 15 Instruction Manual*. Retrieved from <https://www.manualslib.com/manual/2278292/Bs-Charger-Bs-15.html?page=31>
- Márcia Horta, L. F. (2023). CARBON-BASED HYBRID SUPERCAPACITORS FOR HIGH POWER PHOTOVOLTAIC IRRIGATION. *EUPVSEC 2023*. Lisboa.
- Maslowaten. (n.d.). *Maslowaten*. Retrieved from https://maslowaten.eu/?page_id=602&lang=pt#proyecto
- Maxwell Technologies. (n.d.). *Top 10 Reasons for using Ultracapacitors in your system designs*. Retrieved from https://www.aepint.nl/wp-content/uploads/2015/05/whitepaper_top_10_reasons_for_ultracaps.pdf
- Mensah-Darkwa, K., Akromah, S., & Gupta, R. K. (2022). Chapter 9 - Advanced applications of biomass for energy storage. In *Bio-Based Nanomaterials: Synthesis Protocols, Mechanisms and Applications* (pp. 171-209). Elsevier.
- Mundo Projetado. (n.d.). *Modbus RTU - O que é e como funciona*. Retrieved from <https://mundoprojetado.com.br/modbus-rtu-o-que-e-e-como-funciona/>
- National Instruments. (n.d.). *What is the Modbus Protocol & How Does It Work?* Retrieved from <https://www.ni.com/pt-pt/shop/seamlessly-connect-to-third-party-devices-and-supervisory-system/the-modbus-protocol-in-depth.html>
- Ni. (n.d.). *The PID Controller & Theory Explained*. Retrieved from <https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html>

- ni. (n.d.). *What Is LabVIEW*. Retrieved 12 30, 2022, from <https://www.ni.com/pt-pt/shop/labview.html>
- Noticias de Jardim. (2021, 6 22). Irrigação por gotejamento na horta | Vantagens e como instalar. <https://www.noticiasdejardim.com/dicas/irrigacao-por-gotejamento-na-horta-vantagens-e-como-instalar/>.
- O Instalador. (2020). Elvas: sistema de bombagem solar da Krannich Solar para rega de olivais. <https://oinstalador.com/Artigos/307914-Elvas-sistema-de-bombagem-solar-da-Krannich-Solar-para-rega-de-olivais.html>.
- O QUE É UM SUPER CAPACITOR, SUPERCAP OU ULTRACAPACITOR. (2022, 9 16). (Raisa) Retrieved 12 23, 2022, from <https://www.raisa.com.br/o-que-e-um-super-capacitor-supercap-ou-ultracapacitor>
- Odero, H. Z., Wekesa, C. W., & Irungu, G. K. (2022). Comprehensive Review of Energy Storage Technologies: Types, Applications, Optimal Sizing and Sitting in Power Systems. p. 5.
- Pinto, J. C. (2021). *Tecnologias de Automação na Indústria 4.0*. Lisboa: Lidel - Edições Técnicas, Lda.
- Portal Eletricista. (2014, 3 4). *Capacitores e suas aplicações comerciais*. Retrieved 12 23, 2022, from <https://www.portaleletricista.com.br/capacitores-e-suas-aplicacoes/>
- Porto Editora. (n.d.). *Irrigação*. (Infopédia) Retrieved 12 5, 2022, from [https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$irrigacao](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$irrigacao)
- Pu, L. (2014). *Nanostructured Materials for Pseudocapacitors and Single Electron Devices*. Retrieved from https://www.uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/8464/pu_long.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Resfarm. (n.d.). Retrieved from <http://resfarmproject.eu/en/>
- Robert Bosch Ltda. (n.d.). *Manual de Baterias Bosch*. Retrieved from <https://www.yumpu.com/pt/document/read/13581748/manual-de-baterias-bosch>
- Rodrigues, M. J. (2022, 12 15). A Agricultura.
- Rogalev, N., Rogalev, A., Kindra, V., & Maksimov, I. (2022, 12 15). *Comparative Analysis of Energy Storage Methods for Energy*, p. 18.
- S. Charis Caroline, S. P. (2022). Chapter 22 - Energy storage technologies for sustainable development. In *Sulfide and Selenide Based Materials for Emerging Applications* (pp. 583-606). Elsevier.
- Sanches, R. D. (2020). *Instalação, Comissionamento e Ensaios de uma Bateria de Sais Fundidos (NaNiCl2)*. Évora.
- Santos, I. G. (2023, 7 14). *Dimensionamento de baterias para serviços auxiliares*. Retrieved from <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/151838/2/636186.pdf>
- Scognamillo, S., Gioffredi, E., Piccinini, M., Lazzari, M., Alzari, V., Nuvoli, D., . . . Mariani, A. (2012, 8 31). Science Direct. *Synthesis and characterization of nanocomposites of thermoplastic polyurethane with both graphene and graphene nanoribbon fillers*, pp. 4019-4024.

- Shah, V., Bhaliya, J., Patel, G. M., Popaliya, M., Mishra, A., & Patel, P. R. (2023). Chapter 10 - Biodegradable polymer nanocomposites as electrode materials for electrochemical double-layer capacitors and hybrid supercapacitor applications. In *Biodegradable and Biocompatible Polymer Nanocomposites: Processing, Characterization, and Applications* (pp. 311-352). Elsevier.
- Silva, P. (2013). *Supercondensadores*. Porto.
- Sonepar. (n.d.). +47080 CX TRANSICAO 375X475X20. Retrieved from https://loja.sonepar.pt/produtos/w02/03/06/47080-cx-transicao-375x475x20_115317
- Subasinghage, K., Gunawardane, K., Padmawansa, N., Kularatna, N., & Moradian, M. (2022, 10 20). *Modern Supercapacitors Technologies and Their Applicability in Mature Electrical Engineering Applications*, p. 16.
- Subudhi, D. K., Mishra, D. K., Achary, P., & Ramana, C. (2022). 11 - Supercapacitors: a review on electrode materials and models based on conjugated polymers. In *Conjugated Polymers for Next-Generation Applications* (pp. 335-365). Woodhead Publishing.
- Sul Informação. (2022). Regantes apostam em projeto-piloto de bombagem fotovoltaica no concelho de Aljustrel. <https://alentejo.sulinformacao.pt/2022/03/regantes-apostam-em-projeto-piloto-de-bombagem-fotovoltaica-no-concelho-de-aljustrel/>.
- Super Teslas. (n.d.). *Campo Eléctrico | Linhas de Campo*. Retrieved 12 23, 2022
- Thirumurugan, A., Dhanabalan, S. S., Shanavas, S., Udayabhaskar, R., Morel, M. J., Dineshbabu, N., . . . Ramadoss, A. (2023). Chapter 10 - Hybrid supercapacitors, formation, and new advances with different electrochemical electrodes based on layered double hydroxides (LDHs), metal–organic framework (MOF) materials, smart supercapacitors. In *Smart Supercapacitors: Fundamentals, Structures, and Applications* (pp. 199-226). Elsevier.
- TRAXCO. (2010, 2 17). Projeto da Rega por aspersão. <https://www.traxco.pt/regaporaaspersao/projecto-da-rega-por-aspersao>.
- Universidade Politécnica de Madrid. (n.d.). *SolaQua*. Retrieved from <https://sol-aqua.eu/>
- Victron Energy. (n.d.). *Firmware Updates*. Retrieved from https://www.victronenergy.com/media/pg/VictronConnect_configuration_guide_for_V_E.Bus_products/en/firmware-updates.html
- Victron Energy. (n.d.). *Interface MK3-USB*. Retrieved 2 25, 2023, from <https://www.victronenergy.pt/accessories/interface-mk3-usb#pd-nav-secondimage>
- Vraj Shah, J. B. (2023). Chapter 10 - Biodegradable polymer nanocomposites as electrode materials for electrochemical double-layer capacitors and hybrid supercapacitor applications. In *Biodegradable and Biocompatible Polymer Nanocomposites: Processing, Characterization, and Applications* (pp. 311-352). Elsevier.
- Vranas, T. M. (2017, 6 1). Control System Development for Power Generation from Small-Scale Compressed Air Energy Storage.
- What are the advantages and disadvantages of supercapacitors compared to batteries?* (n.d.). (Electricity) Retrieved from <https://www.electricity-magnetism.org/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-supercapacitors-compared-to-batteries/>

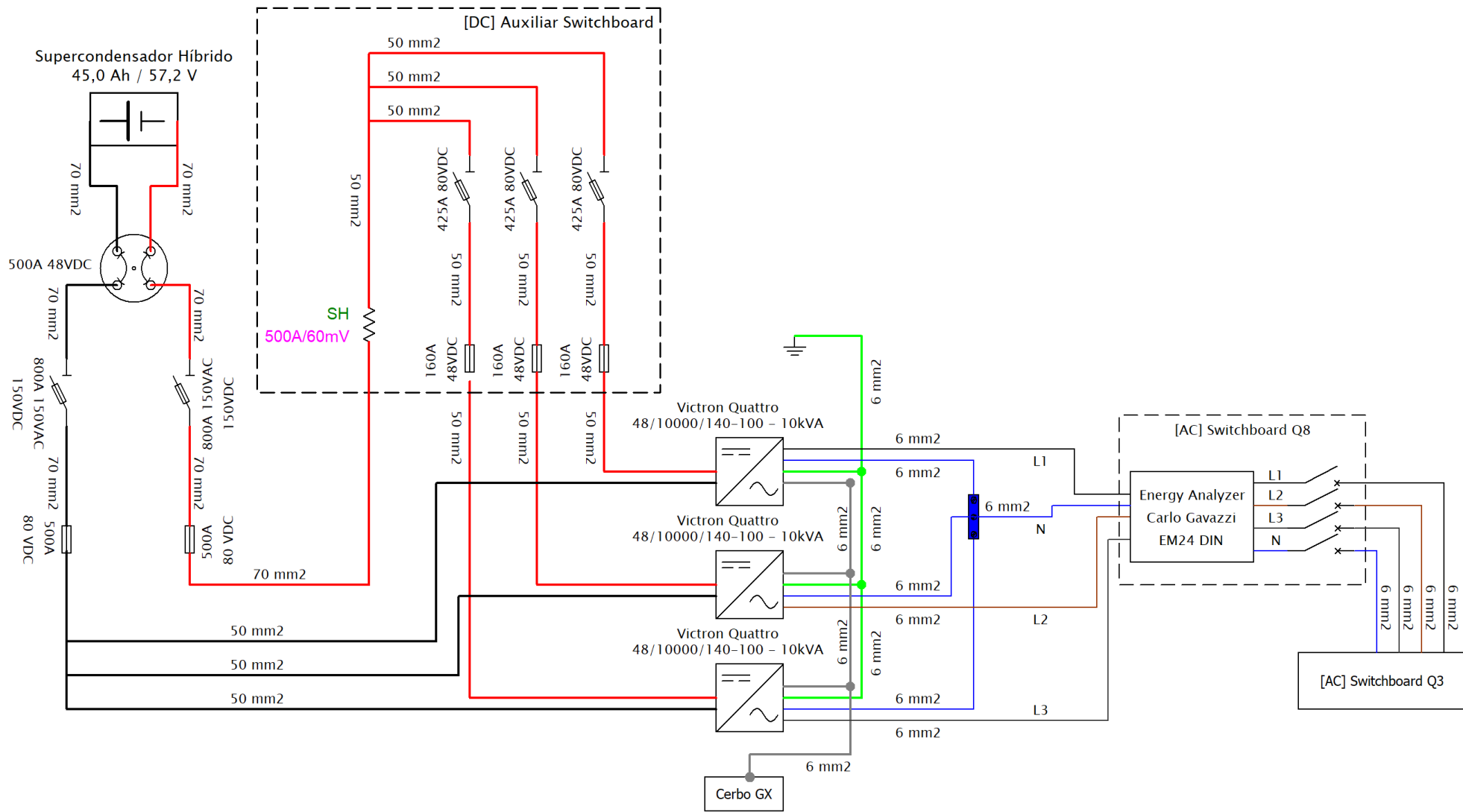
Wikipédia. (n.d.). *Capacitância*. Retrieved 12 27, 2022, from <https://pt.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A2ncia>

Wikipédia. (n.d.). *LabVIEW*. Retrieved from <https://pt.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>


Yu, G., Xie, X., Pan, L., Bao, Z., & Cui, Y. (2013, 3). Elsevier. *Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors*, pp. 213-234.

Zhou, L., Li, C., Liu, X., Zhu, Y., Wu, Y., & Ree, T. V. (2019). 7 - Metal oxides in supercapacitors. In *Metal Oxides in Energy Technologies* (pp. 169-203). Elsevier.


Anexo



Name: Carbon-Based Hybrid Supercapacitor Electrical Scheme



UNIVERSITY OF ÉVORA



RENEWABLE ENERGIES CHAIR

Legend:

- DC Side ———
- Ground Connection ———
- AC Side ———
- Internet Connection ———

Rev.	Date	Author	Description
01	21/01/2023	CERUÉ	First Scheme Version.

RENEWABLE ENERGIES CHAIR, UNIVERSITY OF ÉVORA