

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia elétrica

Mariana da Silva Campos

**ORGANIZAÇÃO SISTÊMICA PARA CONCEPÇÃO DE CARGA ÚTIL EM CUBESAT
USANDO SUPERCAPACITOR**

Belo Horizonte
2025

Mariana da Silva Campos

**ORGANIZAÇÃO SISTÊMICA PARA CONCEPÇÃO DE CARGA ÚTIL EM CUBESAT
USANDO SUPERCAPACITOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Professora Doutora Luciana Pedrosa Sales

Coorientadora: Professora Doutora Maria Cecília Pereira de Faria

Belo Horizonte
2025

C198o

Campos, Mariana da Silva.

Organização sistêmica para concepção de carga útil em CubeSat usando supercapacitor [recurso eletrônico] / Mariana da Silva Campos. - 2025.

1 recurso online (99 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Luciana Pedrosa Salles.

Coorientadora: Maria Cecília Pereira de Faria.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 94-99.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Satélites artificiais - Teses. 3. Controle de temperatura - Teses. I. Salles, Luciana Pedrosa. II. Faria, Maria Cecília Pereira de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Organização Sistêmica para Concepção de Carga Útil em CubeSat usando um Supercapacitor"

Mariana da Silva Campos

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 17 de janeiro de 2025.

Por:

Prof. Dr^a. Luciana Pedrosa Salles
DEE (UFMG) - Orientadora

Prof. Dr. Maria Cecilia Pereira de Faria
DEMEC (UFMG) - Coorientadora

Prof. Dr. Dalton Martini Colombo
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Rodrigo Lassarote Lavall
Departamento de Química (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Pedrosa Salles, Professora do Magistério Superior**, em 22/01/2025, às 23:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dalton Martini Colombo, Professor do Magistério Superior**, em 24/01/2025, às 16:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Cecília Pereira de Faria, Professora do Magistério Superior**, em 27/01/2025, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Lassarote Lavall, Professor do Magistério Superior**, em 31/01/2025, às 11:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3875885** e o código CRC **627DFE2E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores, amigos, colegas, familiares, orientadora e coorientadora pelo incentivo, motivação e orientação nesta caminhada acadêmica. Agradeço também, ao coordenador do Programa de Pós-graduação da Engenharia Elétrica e aos membros do Colegiado do Departamento de Pós-graduação da Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Minas Gerais, por permitir meu afastamento para tratamento de saúde. Agradeço também aos professores dos laboratórios do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG pelo apoio ao projeto. Agradeço também ao PETEE por fornecer recursos técnicos para o desenvolvimento do projeto. Agradeço especialmente às minhas orientadoras pelo suporte e parceria durante esse processo de desenvolvimento da pesquisa. Agradeço à equipe do PdQSat pela parceria e suporte técnico durante o desenvolvimento do trabalho. Agradeço especialmente aos alunos de graduação Gustavo Alves Dourado e Arnaldo Kokke de Brito pelo desenvolvimento do Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores (*System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors* - SAAES^{SC}), ao Me. Pedro Santos Candiotto de Oliveira, a doutoranda Danielle Diniz Justino e a aluna de graduação Fernanda Gabrielle Gandra pela produção da primeira amostra selecionada de célula supercapacitiva aplicada a eletrônica de baixa potência e pelos testes realizados no equipamento potenciostato multicanal VMP3 para caracterização do SAAES^{SC}, ao Dr. André Luiz Costa de Carvalho, aos alunos Felipe Cabello Russo Magalhães Silva e Pedro Henrique Silva Beraldo pela produção e testes da amostra de célula supercapacitiva para aplicação em eletrônica de baixa potência selecionada para o trabalho, ao Prof. Dr. Rodrigo Lassarote Lavall por disponibilizar os equipamentos do laboratório para teste, corpo técnico e produção das amostras de células supercapacitivas. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Agência Espacial Brasileira através de auxílio a projeto de pesquisa, nº de processo nº 01350.000949/2020-54. O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da concessão de bolsa de estudo de Mestrado, nº 131801/2021-0. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) e Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

RESUMO

Recentemente, a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) iniciou o projeto de um CubeSat, padrão de satélite com requisitos de tamanho e massa, com o propósito de realizar demonstrações tecnológicas, incluindo a avaliação de uma célula supercapacitiva aplicada à eletrônica de baixa potência desenvolvida na própria universidade, além de promover o treinamento de mão de obra especializada. Logo, este trabalho consiste em organizar sistematicamente a concepção da carga útil de um CubeSat usando um supercapacitor. No contexto desse trabalho, a carga útil do CubeSat é composta por uma célula supercapacitiva de eletrólito sólido flexível aplicada ao suprimento de energia em eletrônica de baixa potência, do Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores (*System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors* - $SAAES^{SC}$) e seu respectivo *software*, todos desenvolvidos internamente na UFMG. Para essa concepção, é preciso entender as condições de trabalho do CubeSat em órbita baixa (LEO), verificar quais testes são realizados em CubeSats para validação da carga útil, verificar os testes realizados em supercapacitores para caracterização elétrica, propor e validar um protocolo de testes de temperatura, realizar os testes de validação do $SAAES^{SC}$, iniciar os testes da célula supercapacitiva, promover a comunicação e integração entre os laboratórios envolvidos. A célula supercapacitiva testada é composta por: eletrólito de polímero gel formado pelo POLI(Líquido Iônico)-PIL = $[A_2M_2Am][TFSI]$ e o Líquido Iônico - LI $[EPPy][TFSI]$, com eletrodo de óxido de grafeno reduzido (r-GO) com material ativo. Ela foi escolhida observando algumas características elétricas, como capacitância específica, densidade de energia e densidade de potência, além de características físicas como volatilidade e viscosidade do eletrólito. O teste inicial de temperatura foi realizado na amostra da célula supercapacitiva e consistiu em ciclagens galvanostáticas e carga e autodescarga, primeiramente em temperatura ambiente e posteriormente com aumento gradativo de temperatura. Foram realizadas duas rodadas do protocolo sugerido e os resultados mostraram que a amostra continuou operacional após o aumento de temperatura, apresentando melhores resultados nas temperaturas mais elevadas. No entanto, ela sofreu degradação de uma rodada de teste para outra. Visando promover os testes elétricos do supercapacitor, projetou-se o $SAAES^{SC}$ que realiza testes de ciclagem galvanostática e carga e autodescarga, cujos dados coletados são utilizados para caracterização dos parâmetros elétricos do dispositivo e cálculo do seu respectivo circuito elétrico equivalente. O equipamento apresentou-se promissor, pois, ao comparar os resultados obtidos por ele com os resultados obtidos pelo equipamento potenciostato/galvanostato multicanal VMP3 da marca BioLogic, obteve-se um percentual de erro de 0,23%, com desvio padrão muito próximo de zero. Neste trabalho foram identificadas melhorias fundamentais a serem reprojatadas no $SAAES^{SC}$ e na célula supercapacitiva testadas visando aplicação em CubeSat.

Palavras chave: supercapacitor; caracterização elétrica de supercapacitor; CubeSat; Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores; teste de aumento gradativo de temperatura; carga útil.

ABSTRACT

Recently, the Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) initiated a CubeSat project, a satellite standard with size and mass requirements, with the purpose of conducting technological demonstrations, including the evaluation of a supercapacitive cell applied to low-power electronics developed at the university, as well as promoting specialized workforce training. Therefore, this work consists of systematically organizing the design of the payload of a CubeSat using a supercapacitor. In the context of this work, the CubeSat's payload is composed of a flexible solid electrolyte supercapacitive cell applied to power supply in low-power electronics, the System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors (SAAES^{SC}) and its respective software, all developed internally at UFMG. For this design, it is necessary to understand the working conditions of the CubeSat in low Earth orbit (LEO), verify which tests are performed on CubeSats for payload validation, verify the tests performed on supercapacitors for electrical characterization, propose and validate a temperature test protocol, carry out the validation tests of SAAES^{SC}, start the tests of the supercapacitive cell, and promote communication and integration among the involved laboratories. The tested supercapacitive cell is composed of: gel polymer electrolyte formed by POLY(Ionic Liquid)-PIL = [A₂M₂Am][TFSI] and the Ionic Liquid - IL [EPPy][TFSI], with reduced graphene oxide (r-GO) electrode with active material. It was chosen considering some electrical characteristics, such as specific capacitance, energy density and power density, as well as physical characteristics like electrolyte volatility and viscosity. The initial temperature test was conducted on the supercapacitive cell sample and consisted of galvanostatic cycling and charge and self-discharge, first at room temperature and later with gradual temperature increase. Two rounds of the suggested protocol were carried out, and the results showed that the sample remained operational after the temperature increase, presenting better results at higher temperatures. However, it suffered degradation from one test round to another. Aiming to promote electrical tests of the supercapacitor, SAAES^{SC} was designed to perform galvanostatic cycling and charge and self-discharge tests, whose collected data are used to characterize the device's electrical parameters and calculate its respective equivalent electrical circuit. The equipment proved to be promising, as, when comparing the results obtained by it with the results obtained by the potentiostat/galvanostat multichannel VMP3 equipment from the BioLogic brand, an error percentage of 0,23% was obtained, with a standard deviation very close to zero. In this work, fundamental improvements were identified to be redesigned in SAAES^{SC} and the tested supercapacitive cell for application in CubeSat.

Keywords: supercapacitor; electrical characterization; CubeSat; System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors; gradual temperature increase test; payload.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tipos de órbitas a) LEO, MEO e GEO (CARVALHO, 2024), b) LEO, MEO, GEO e HEO adaptado de Carvalho (2024) e c) equatorial e polar (SOUZA, 2007)	24
Figura 2 – Arquitetura básica de um satélite (autor)	26
Figura 3 – EPS (WERTZ et al., 1999; SILVA, 2018)	28
Figura 4 – Gráfico de Ragone (SHAO et al., 2018)	30
Figura 5 – Comparação entre as curvas de carga e descarga a corrente constante o funcionamento da ciclagem galvanostática teórica a) dos SCs e b) das baterias, onde ESR é a Resistência Equivalente em Série (<i>Equivalent Series Resistance - ESR</i>) (SHAO et al., 2018)	32
Figura 6 – Representação da montagem do SC (autor)	37
Figura 7 – SAAES ^{SC} (CAMPOS et al., 2023)	38
Figura 8 – Circuito do SAAES ^{SC} (CAMPOS et al., 2023)	39
Figura 9 – Algoritmo do SAAES ^{SC} (CAMPOS et al., 2023)	41
Figura 10 – Arquitetura típica de armazenadores de energia (LUKATSKAYA; DUNN; GOGOTSI, 2016)	40
Figura 11 – SC de acordo com o sistema de armazenamento (SATPATHY et al., 2023)	42
Figura 12 – Materiais construtivos de eletrodos de supercapacitores (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013)	42
Figura 13 – Classificação de SC com tipos de eletrodos adaptado (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013; ZORNITTA, 2015; SHAO et al., 2018)	43
Figura 14 – SC de acordo com o mecanismo de armazenamento a) EDLC, b) pseudocapacitor e c) híbrido (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013)	43
Figura 15 – Voltametria cíclica de uma célula de EDLC para uma velocidade de varredura de 5 mVs ⁻¹ para a) eletrólito aquoso 6 M KOH e b) eletrólito orgânico 1 M Tetrafluoroborato de tetraetilamônio (GONZÁLEZ et al., 2016)	44
Figura 16 – Eletrólito e impacto no SC (ZHONG et al., 2015)	46
Figura 17 – Tipos de eletrólitos (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019)	47
Figura 18 – Circuito equivalente modelo de dois ramos em paralelo (FARANDA, 2010)	54
Figura 19 – Circuito equivalente modelo de redistribuição de cargas por difusão (SEDLAKOVA et al., 2015)	54
Figura 20 – Curva de carga e autodescarga (FERREIRA, 2022)	54
Figura 21 – Curva de carga e autodescarga (FERREIRA et al., 2023)	55
Figura 22 – Diagrama geral do fluxo de teste de CubeSat (JOHNSTONE, 2022)	60
Figura 23 – Sequência de teste adaptado (WERTZ et al., 1999; BÜRGER, 2014)	61
Figura 24 – Perfil de teste de ciclagem térmica com vácuo (BÜRGER, 2014)	64
Figura 25 – Parâmetros de qualificação e sequência de teste de ciclagem térmica com vácuo (BÜRGER, 2014)	64

Figura 26 – Gráfico de Tensão X Tempo da ciclagem galvanostática de carga e descarga do SAAES ^{SC} e do VMP3 com o desvio padrão, sendo que a curva preta representa a curva traçada pelo VMP3, é considerada a medida ouro, a curva azul escura, tracejada e grossa representa a medida da média das 35 curvas traçadas pelo SAAES ^{SC} para o SC1, a curva bege escura, pontilhada e grossa representa a média das 35 curvas traçadas pelo SAAES ^{SC} para o SC2, a curva azul clara, fina e tracejada representa o desvio padrão das 35 curvas traçadas pelo SAAES ^{SC} para o SC1 e a curva bege clara, fina e pontilhada representa o desvio padrão das 35 curvas traçadas pelo SAAES ^{SC} para o SC2 (CAMPOS et al., 2023)	68
Figura 27 – Gráfico de Tensão X Tempo da carga e autodescarga (CAMPOS et al., 2023)	69
Figura 28 – Circuito equivalente pelo modelo de dois ramos em paralelo com os valores calculados (autor)	69
Figura 29 – Equemático do teste de elevação de temperatura realizado na amostra (PLI/[A2M2Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de (r-GO) (autor)	72
Figura 30 – Esquemático do preparo do eletrodo via <i>casting</i> (ALEXANDRE, 2019)	72
Figura 31 – SCs desmontados em tarugo e parafuso, prontos para serem montados e colocados no equipamento de medição (autor)	73
Figura 32 – a) <i>Solartron analytical</i> 1287 A, superior, e <i>Solartron analytical</i> 1255B, inferior e b) AN1048 (autor)	74
Figura 33 – a) Base cilíndrica que recebe o parafuso do SC, b) parte superior que possui as molas para garantir a montagem correta do SC e a conexão elétrica, c) é a estrutura com a base cilíndrica e a parte superior montadas e a d) é a montagem do forno (autor)	75
Figura 34 – Montagem da aparelhagem para o teste do SC (autor)	75
Figura 35 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 21 °C do dia 0 (autor)	77
Figura 36 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 21 °C do dia 112 (autor)	78
Figura 37 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 40 °C do dia 28 (autor)	78
Figura 38 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 40 °C do dia 105 (autor)	79
Figura 39 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 80 °C do dia 28 (autor)	79
Figura 40 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 80 °C do dia 105 (autor)	80
Figura 41 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 120 °C do dia 29 (autor)	80
Figura 42 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 120 °C do dia 105 (autor)	81
Figura 43 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 20 °C do dia 112 (autor)	81
Figura 44 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 40 °C, sendo a curva em azul com marcadores de pontos o teste realizado no dia 28 e a curva vermelha com marcadores em asterisco o teste realizado no dia 105 (autor)	82
Figura 45 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 80 °C, sendo a curva em azul com marcadores de pontos o teste realizado no dia 28 e a curva vermelha com marcadores em asterisco o teste realizado no dia 105 (autor)	83
Figura 46 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 120 °C do dia 105 (autor)	83
Figura 47 – Gráfico de Capacitância Específica X Número de Ciclos da amostra selecionada (autor)	84
Figura 48 – Gráfico de Densidade de Energia X Número de Ciclos da amostra selecionada (autor)	84
Figura 49 – Gráfico de Capacitância Específica X Número de Ciclos da amostra selecionada dos dois testes a 21 °C seguidos, sendo a parte azul com marcadores preenchidos a primeira rodada de testes e a parte vermelha com marcadores sem preenchimento a segunda rodada de testes (autor)	86

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos satélites quanto a massa e ao tamanho (SILVA; XAVIER JUNIOR, 2019)	27
Tabela 2 – Dimensões de CubeSat's (JOHNSTONE, 2022)	27
Tabela 3 – Características de operação do CubeSat usado neste trabalho (autor)	34
Tabela 4 – Características da amostra selecionada e do SAAES ^{SC} (autor)	41
Tabela 5 – Características do SC (autor)	58
Tabela 6 – Tolerância aceita nos testes (BÜRGER, 2014)	62
Tabela 7 – Frequência e tempo do teste de vibração senoidal (BÜRGER, 2014)	62
Tabela 8 – Frequência e tempo do teste de vibração randômica para Falcon 9 (BÜRGER, 2014)	62
Tabela 9 – Parâmetros para o teste de choque (BÜRGER, 2014)	63
Tabela 10 – Níveis de teste vácuo térmico adaptado (BÜRGER, 2014)	63
Tabela 11 – Legenda da sequência de testes (BÜRGER, 2014)	65
Tabela 12 – Testes a serem realizados na carga útil antes do voo (autor)	66
Tabela 13 – Resultado da capacitância específica, densidade de energia e densidade de potência da amostra com a variação de temperatura (autor)	85
Tabela 14 – Modelo de circuito equivalente de dois ramos em paralelo (autor)	88
Tabela 15 – Modelo de circuito equivalente por redistribuição de cargas por difusão (autor)	89

Lista de Abreviações e Símbolos

AC - Carbono Ativado (*Activated Carbon*)
 Ag - Prata
 Au - Ouro
 BOL - Início da Vida do Satélite (*Beginning-of-life*)
 $Cal Poly$ - Universidade Politécnica do Estado da Califórnia (*California Polytechnic State University*)
 C_{cel} - Capacitância da Célula
 C_{esp} - Capacitância Específica
 CDC - Carbonetos Derivados de Carbono (*Carbide Derived Carbons*)
 CNT - Nanotubos de Carbono (*Carbon Nanotubes*)
 Co_2O_3 - Óxido de Cobalto
 Cu - Cobre
 DD - Dano por Deslocamento (*Displacement Damage*)
 DDP - Diferença de Potencial
 DoD - Profundidade de Descarga (*Dedth of Discharge*)
 DQ - Departamento de Química
 E - Densidade de Energia
 $EDLC$ - Capacitor Elétricos de Dupla Camada (*Electric Double Layer Capacitor*)
 ESS - Subsistema de Armazenamento de Energia (*Energy Storage Sistem*)
 EMC - Compatibilidade Eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility*)
 EOL - Final da Vida do Satélite (*End-of-life*)
 EPR - Resistência Paralela Equivalente (*Equivalent Parallel Resistance*)
 EPS - Subsistema de Suprimento de Energia (*Eletrical Power Sistem*)
 ESD - Descarga Elétrica Estática (*Electro Static Discharge*)
 $ESPW$ - Janela de Estabilidade Potencial Eletroquímica (*Eletrochemical Stable Potential Windows*)
 ESR - Resistência em Série Equivalente (*Equivalent Series Resistance*)
 GE - *General Electric*
 GEO - Órbita Geoestacionária (*Geostationary Earthe Orbit*)
 GPE - Polímero Gel (*Gel Polimer Electrolyte*)
 HEO - Órbita Elíptica (*Highly Elliptical Orbit*)
 $i_{amp}(tf')$ - Valor de Descarga Livre do SC Através do Osciloscópio
 I_{amp} - Valor da Corrente de Descarga Controlada do SC Através da Resistência Variável
 ISS - Estação Espacial Internacional (*International Space Station*)
 Ir - Irídio
 IrO_2 - Óxido de Irídio
 LEO - Baixa Órbita (*Low Earth Orbit*)
 LI - Líquido Iônico
 m - Massa do Material Ativo de um Eletrodo
 M - Massa Total dos Dois Eletrodos
 MEO - Órbita Média (*Medium Earth Orbit*)
 MnO_2 - Óxido de Manganês
 MoO_x - Óxido de Molibdênio

NEC - *Nippon Electric Company*
NiO - Óxido de Níquel
OBM - Computador de Bordo (*On Board Computer*)
Os - Ósmio
P - Densidade de Potência
Pd - Paládio
PHS - Armazenamento Hidroelétrico (*Pumped Hydroelectric Storage*)
PLI - Poli(líquido iônico)
Pt - Platina
R_{amp} - Resistência do Amperímetro
Rh - Ródio
Ru - Rutênio
RuO₂ - Óxido de Rutênio
SAAES^{SC} - *System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors*
(Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores)
SC - Supercapacitor
SEE - Efeito de Evento Único (*Single Event Effects*)
SMES - Sistema Supercondutor Magnético de Armazenamento de Energia (*Superconducting Magnetic Energy Storage System*)
SnO₂ - Óxido de Estanho
SOHIO - *Standard Oil Company*,
SPE - Polímero Seco Sólido (*Solid Polymer Electrolyte*)
T₁ - Tempo do Potencial Máximo Após a Queda Ôhmica
T₂ - Tempo da Metade do Potencial Máximo Após a Queda Ôhmica
TES - Sistema Térmico de Armazenamento de Energia (*Thermal Energy Storage System*)
TID - Dose Total Ionizante (*Total Ionizing Dose*)
TTeC - Subsistema de Telecomunicações e Serviços
TVAC - Teste de Vácuo-Térmico (*Thermal Vacuum*)
UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais
UPS - Suprimento de energia Ininterrupto (*Uninterruptible Power Supply*)
V - Tensão Máxima de Carregamento
V_{2O₅} - Óxido de Vanádio
V_{fall} - Valor da Diferença Entre o Potencial ao Terminar do Processo de Descarga Livre e ao Início do Processo de Descarga Controlada
V_{max} - Potencial Máximo na Curva de descarga Após a Queda Ôhmica
v_{sc}(tf') - Valor da Tensão ao Final do Processo de Descarga Livre
v_{sc}(tf'') - Valor da Tensão ao Início do Processo de Descarga Controlada

Lista de Variáveis

C_{cel} - Capacitância da Célula

C_{esp} - Capacitância Específica

DDP - Diferença de Potencial

E - Densidade de Energia

EPR - Resistência Paralela Equivalente (*Equivalent Parallel Resistance*)

ESR - Resistência em Série Equivalente (*Equivalent Series Resistance*)

$i_{amp}(tf')$ - Valor de Descarga Livre do SC Através do Osciloscópio

I_{amp} - Valor da Corrente de Descarga Controlada do SC Através da Resistência Variável

m - Massa do Material Ativo de um Eletrodo

M - Massa Total dos Dois Eletrodos

P - Densidade de Potência

T_1 - Tempo do Potencial Máximo Após a Queda Ôhmica

T_2 - Tempo da Metade do Potencial Máximo Após a Queda Ôhmica

V - Tensão Máxima de Carregamento

V_{fall} - Valor da Diferença Entre o Potencial ao Terminar do Processo de Descarga Livre e ao Início do Processo de Descarga Controlada

V_{max} - Potencial Máximo na Curva de descarga Após a Queda Ôhmica

$v_{sc}(tf')$ - Valor da Tensão ao Final do Processo de Descarga Livre

$v_{sc}(tf'')$ - Valor da Tensão ao Início do Processo de Descarga Controlada

Definições de termos

Carga útil - É composta pelos elementos necessários para o cumprimento da missão do satélite.

Estação terrestre - Qualquer estação que realize a telecomunicações satelitais que estejam instaladas em local que não seja o próprio satélite (DECEA, 2025).

Micro satélite - Satélites com massa de 10 kg até < 100 kg (AS; JR, 2019).

Missão - Tarefa para a qual um sistema espacial é designado.

Nano satélite - Satélites com massa de 1 kg até < 10 kg (AS; JR, 2019).

Nó - Ponto no circuito responsável por interligar dois ou mais elementos.

Ramos - Terminologia usada em circuitos elétricos cuja função é a ligação entre dois nós quaisquer.

Sistemas - Conjunto de elementos interligados que desempenham uma função (CAETANO, 2025).

Subsistemas - Conjunto de partes identificadas de forma estruturada que compõem um sistema (CAETANO, 2025).

PdQSat - Projeto de CubeSat 3U desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com peso de até 6 kg, cujo objetivo é treinar mão de obra qualificada e testar dois componentes em ambiente espacial, uma bateria de Li-S e uma célula supercapacitiva para aplicação em eletrônica de baixa potência (PEREIRA et al., 2020)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação e justificativa.....	20
1.2	Objetivo	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivo específico	21
2	SATÉLITES.....	22
2.1	CubeSat	25
2.1.1	Subsistema de suprimento de energia - EPS	27
2.1.1.1	Subsistema de armazenamento de energia - ESS.....	28
2.1.1.1.1	Bateria	29
2.1.1.1.2	Armazenamento híbrido de energia bateria/SC.....	30
2.1.2	Carga útil.....	31
2.2	Considerações finais do capítulo	32
3	CARGA ÚTIL.....	34
3.1	Amostra selecionada: eletrólito de matriz polimérica o poli(bis(trifluorometilsulfonil)imideto de <i>N</i>-alil-<i>N</i>-metilpirolidínio) e LI o bis(trifluorometilsulfonil)imideto de 1-metil-3-propil- pirolidínio) (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de grafeno reduzido (r-GO)	35
3.2	Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores (System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors - SAAES^{SC}).....	36
3.2.1	Circuito.....	37
3.2.2	Algoritmo	39
3.3	Considerações finais do capítulo	39
4	SUPERCAPACITOR.....	41
4.1	Tipos de materiais usados na fabricação de eletrodos de supercapacitores.....	42
4.1.1	Materiais de carbono.....	44
4.1.2	Óxidos de metal.....	45
4.1.3	Metal nobre	45
4.1.4	Polímeros condutores	46
4.1.5	Compósitos.....	46
4.2	Tipos de materiais usados na fabricação de eletrólitos de supercapacitores	46
4.2.1	Eletrólitos líquidos	47
4.2.2	Eletrólitos sólidos ou quase sólidos	50
4.2.3	Eletrólitos redox-ativo	51
4.3	Separadores.....	51

4.4	Supercapacitor comercial	51
4.5	Figura de mérito	52
4.6	Modelo de circuito	54
4.7	Considerações finais do capítulo	58
5	PROTOCOLO DE TESTES	60
5.1	Descrição dos testes a serem realizados em CubeSat.....	61
5.1.1	Testes dinâmicos	62
5.1.1.1	Teste de assinatura (ressonância)	62
5.1.1.2	Teste de vibração senoidal	62
5.1.1.3	Teste de vibração randômica.....	62
5.1.1.4	Teste de choque	63
5.1.1.5	Teste quase estático.....	63
5.1.2	Teste de ambiente termo-vácuo	64
5.1.2.1	Teste de <i>bake-out</i>	64
5.1.2.2	Teste de ciclagem térmica com vácuo.....	64
5.1.3	Teste de radiação.....	64
5.1.4	Inspeção visual.....	66
5.2	Considerações finais do capítulo	66
6	PROTOCOLO DE VALIDAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERI- ZAÇÃO DO SAAES^{SC}.....	68
6.1	Teste e resultado experimental para a validação do SAAES^{SC}.....	68
6.2	Considerações finais do capítulo	71
7	PROTOCOLO DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA SELECIONADA	72
7.1	Metodologia de teste feitos nas amostras	72
7.1.1	Descrição da Manufatura do Dispositivo (SC).....	72
7.1.2	Descrição do Dispositivo.....	74
7.1.3	Descrição dos Equipamentos Usados nos Testes.....	74
7.1.4	Montagem do Experimento	76
7.1.5	Coleta de Dados	76
7.1.6	Processamento dos Dados Coletados.....	78
7.2	Resultados e discussões do teste de temperatura do SC	78
7.3	Considerações finais do capítulo	90
8	CONCLUSÃO	91
9	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	93
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

Considera-se que o sistema de armazenamento de energia é importante para qualquer aplicação que envolva equipamentos elétricos ou eletrônicos. Devido a isso, é comum observar que muitos desses dispositivos possuem baterias acopladas aos seus sistemas, como, por exemplo, carros, celulares, aparelhos de barbear, entre outros. Assim como esses equipamentos, que estão acessíveis à maior parte da população, os satélites também precisam armazenar energia.

Com o crescente aumento da demanda energética de equipamentos elétricos e eletrônicos e com a limitação quanto ao uso das baterias (GONTIJO, 2018), viu-se a necessidade de partir para tecnologias mais eficazes e de menor tamanho que consigam realizar o suprimento energético. Neste contexto, soluções com supercapacitores (SCs) tornaram-se muito promissoras. Dessa forma, desenvolveram-se sistemas híbridos, com o uso de baterias e SCs associados, e sistemas puramente feitos com SCs conjugados (KOUCHACHVILI; YAÏCI; ENTCHÉV, 2018).

O subsistema ¹ de armazenamento de energia é usado para manter equipamentos funcionando de forma autônoma. Assim como esses equipamentos, o satélite também necessita dessa autonomia de trabalho durante todo o tempo em que estiver em órbita. Isso ocorre pelo fato dos satélites se encontrarem fisicamente distantes da superfície terrestre, o que impossibilita o acesso para a manutenção dele ou de qualquer outro subsistema. Existem algumas formas de produzir essa energia e, durante essa geração, o satélite consome uma parte para manter seu funcionamento e armazena outra parte, que será consumida posteriormente. Isso pode ser exemplificado com satélites que usam painéis fotovoltaicos, que, quando expostos à luz do Sol, produzem energia, sendo parte dessa energia armazenada e usada posteriormente quando o satélite estiver no eclipse, ou seja, local onde não recebe luz solar (JÚLIO FILHO et al., 2019).

Devido a isso, torna-se necessário um projeto de subsistema de armazenamento de energia (*Energy Storage System - ESS*) que seja eficiente e que consiga garantir mais confiabilidade de funcionamento. Assim, pesquisadores deram início a estudos voltados para subsistemas híbridos de armazenamento de energia com aplicação em uso espacial, visto que esses já apresentavam bons resultados em simulações para aplicação em veículos elétricos e geração de energia eólica (VRINDAVANAM et al., 2020). Contudo, tais aplicações ocorrem na Terra, ou seja, levando em consideração condições ambientais diferentes daquelas enfrentadas por satélites. Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de soluções que consigam trabalhar em ambiente espacial para atender a essa demanda.

Com isso, percebeu-se que seria interessante desenvolver um subsistema híbrido de armazenamento de energia que funcionasse no ambiente espacial. Logo, é necessário que a escolha dos materiais embarcados seja criteriosa, considerando as condições adversas presentes no espaço. Dessa forma, alguns requisitos foram analisados para a escolha dos equipamentos embarcados em satélites, como a resistência a grandes variações de temperatura, em torno de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, vácuo de 10^{-11} a 10^{-7} atm (10^{-8} a 10^{-4} Tor) e radiação ionizante existente em ambiente espacial (PRADO; KUGA, 2001; CHIN et al., 2018; SILVA; LOPES, 2020). Outro ponto que deve ser levado em consideração são os esforços sofridos pelos componentes durante o lançamento até a chegada do satélite à órbita, sendo necessário que esses componentes suportem tais esforços sem falhar, o que poderia levar a missão ² ao fracasso. Eles podem sofrer com a grande aceleração vertical

¹ Conjunto de partes identificadas de forma estruturada que compõem um sistema (CAETANO, 2025).

² Tarefa para a qual um sistema espacial é designado.

do satélite, vibrações aleatórias no lançamento e subida, choques decorrentes da separação dos módulos do veículo lançador e a própria separação dele, além das condições espaciais citadas anteriormente. Isso implica que os dispositivos embarcados precisam ser bem robustos ou possuírem proteção contra essas intempéries (HE; WANG; ZHANG, 2021; CHIN et al., 2021).

No contexto deste trabalho, será abordado o CubeSat, satélite que segue um padrão de tamanho e massa, sendo satélites de porte reduzido e cujos custos de produção são mais acessíveis em comparação aos de um satélite convencional. Ele é dividido em unidades, indo de 1 unidade ou 1U até 12 unidades, 12U, no qual, 1 unidade tem 10 cm de arestas e massa máxima de 2 kg, se enquadrando como nano satélite ³ até o 3U e micro satélite ⁴ o 6U e o 12U. Esse tipo de satélite surgiu com o objetivo de treinar alunos de engenharia, pois normalmente o ciclo de vida da missão é de até cinco anos. Dessa forma, é possível que uma turma de graduação seja capaz de acompanhar o projeto completo. Entretanto, observou-se que esse tipo de satélite conseguia desenvolver missões tradicionais e por isso começou a ser empregado em outras atividades além do treinamento de mão de obra.

Portanto, torna-se interessante desenvolver soluções compactas de subsistemas que consigam armazenar energia sem que haja comprometimento da missão desses CubeSats. Dessa forma, pensar em subsistemas híbridos de armazenamento de energia tem sido uma linha de grande interesse de pesquisa, pois supercapacitores podem ser usados como armazenadores de energia, trabalhando juntamente com as baterias. Assim, há um ganho na vida útil da bateria e uma melhoria quanto ao fornecimento de energia (CHIN et al., 2018).

Outro ponto a ser observado é que esse sistema de armazenamento usando SCs tem uma retomada mais rápida de funcionamento quando reiniciado, pois o SC consegue fornecer carga de forma mais rápida que a bateria. Além disso, pode ser usado em momento de pico de carga de um determinado dispositivo eletrônico, fornecendo carga pontualmente àquele dispositivo, evitando assim que a bateria seja sobrecarregada (ZHONG et al., 2015; SHAO et al., 2018; GONTIJO, 2018; PAL et al., 2019; CHIN et al., 2021).

Com isso, pesquisas nessa linha começaram a ser desenvolvidas, pois o tamanho das baterias começou a interferir no projeto de nano satélites. Assim, SCs começaram a ser estudados como uma forma alternativa de armazenamento de energia (SHIMIZU; UNDERWOOD, 2013). Esse caminho começou a ser traçado na década de 2010, com pesquisas relacionando SCs como armazenadores em micro satélites (SHIMIZU; UNDERWOOD, 2013). No mesmo ano, Totu (2013) escreveu sobre a implementação de supercapacitores de dupla camada (*Double-Layer Capacitors - EDLC*) no subsistema de suprimento de energia, posteriormente simulando e testando para comprovar a utilização desse tipo de solução em nano satélites (TOTU, 2013; TOTU; DONȚU; TOTU, 2017). Com isso, começaram a ser projetados e desenvolvidos sistemas híbridos, usando a bateria como fonte confiável de armazenamento de energia e SCs comerciais para testes como armazenadores (LYNCH; WALLACE, 2014), até que estudos usando apenas SCs para armazenamento de energia começaram a ser desenvolvidos (ALKALI et al., 2015).

Com as pesquisas em andamento, iniciou-se a aplicação desse sistema híbrido, usando a bateria, que possui maior densidade de energia, o que implica em armazenar mais energia; e o SC, que possui maior densidade de potência, o que implica em fornecer picos de carga, com a vantagem desse sistema ocupar menos espaço e possuir menor massa do que aqueles com apenas bateria (MONTEIRO et al., 2018; POSIELEK, 2018). Com base nesses projetos anteriores, foi viável projetar e fazer testes em laboratório de termo-vácuo com SCs comerciais (ABUROUK et al., 2018). Seguindo essa tendência tecnológica, Chin et al. (2018 e 2021) desenvolveram um estudo, simulações, testes em ambiente simulado e lançamento de um CubeSat com subsistema de armazenamento híbrido, usando bateria associadas a supercapacitores (CHIN et al., 2018; CHIN;

³ São satélites com massa de 1 kg até < 10 kg (AS; JR, 2019).

⁴ Satélites com massa de 10 kg até < 100 kg (AS; JR, 2019)

GREEN; BRANDON, 2018; CHIN et al., 2021). Então, SCs comerciais começaram a ser implementados no armazenamento de energias em CubeSats e seus estudos em baixa órbita (*Low Earth Orbit – LEO*) começaram a ser realizados (SISNIEGAS, 2020; GONZALEZ-LLORENTE et al., 2020; VRINDAVANAM et al., 2020; HE; WANG; ZHANG, 2021).

Entretanto, supercapacitores convencionais também possuem um tamanho considerável, o que precisa ser bem analisado devido ao espaço disponível dentro de um CubeSat. Por essa razão, células supercapacitivas para aplicação em baixa potência podem se apresentar como uma solução viável, dado que podem se enquadrar dentro do espaço disponível em um CubeSat, podendo garantir o suprimento energético da microeletrônica embarcada.

1.1 Motivação e justificativa

Seguindo o avanço da tecnologia espacial, em 2020, a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) iniciou um projeto para a construção de um CubeSat (PEREIRA et al., 2020). Tal projeto foi nomeado PdQSat e será um CubeSat 3U, com peso de até 6 kg, cujo objetivo é treinar mão de obra qualificada e testar dois componentes em ambiente espacial, uma bateria de Li-S e uma célula supercapacitiva com eletrólito sólido flexível para aplicação em eletrônica de baixa potência desenvolvida e construída dentro da UFMG (PEREIRA et al., 2020). O PdQSat está previsto para trabalhar em LEO, com altitude aproximada de 400 km a 700 km, excentricidade próxima de 0 e inclinação provável de 50° (GUILHERME, 2022).

Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho é organizar de forma sistêmica a concepção de uma das cargas úteis do PdQSat. Para isso, é necessário entender o ambiente operacional, relacionar os testes a serem feitos na carga útil⁵, desenvolver o Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores (*System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors* - SAAES^{SC}), testar uma célula supercapacitiva com eletrólito sólido flexível para aplicação em eletrônica de baixa potência, validar o SAAES^{SC}, desenvolver o protocolo de testes da amostra e de validação do SAAES^{SC}, promover a comunicação e integração entre os laboratórios envolvidos. Neste trabalho, os testes realizados incluirão a validação do equipamento portátil que foi desenvolvido para a caracterização elétrica de supercapacitores, o SAAES^{SC}, o teste em temperatura ambiente e o de aumento gradativo de temperatura na célula supercapacitiva. Todos os testes serão realizados na própria instituição.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é organizar sistemicamente a concepção da carga útil em um CubeSat usando um supercapacitor. Para isso, é necessário entender o ambiente operacional, relacionar os testes a serem feitos na carga útil, desenvolver o protocolo de testes a serem feitos na carga útil, testar uma célula supercapacitiva flexível de eletrólito sólido aplicada a suprimento de energia para eletrônica de baixa potência desenvolvido no âmbito da UFMG, desenvolver um sistema que seja capaz de caracterizar esse dispositivo, seja em condições ambientais normais quanto em condições ambientais adversas, como no espaço, validar esse dispositivo, promover a comunicação e integração entre todos os laboratórios envolvidos.

1.2.1 Objetivo geral

- Organizar de forma sistêmica a concepção da carga útil do PdQSat.

⁵ É composta pelos elementos necessários para o cumprimento da missão do satélite.

1.2.2 Objetivo específico

- Entender as perturbações do ambiente espacial.
- Relacionar os testes a serem feitos na carga útil.
- Desenvolver uma instrumentação para caracterizar SCs em condições ambientais normais.
- Desenvolver o protocolo de testes da célula supercapacitiva com eletrólito sólido flexível para aplicação em suprimento de energia em eletrônica de baixa potência e para validação do SAAES^{SC}.
- Testar e caracterizar a célula supercapacitiva em temperatura ambiente.
- Testar a mesma célula supercapacitiva com aumento gradativo de temperatura.
- Propor um projeto inicial de instrumentação para caracterização desse tipo de célula supercapacitiva.
- Promover a comunicação e integração entre todos os laboratórios envolvidos.

2 SATÉLITES

Como o objetivo do satélite é embarcar uma célula supercapacitiva aplicada em eletrônica de baixa potência e testá-la em ambiente espacial, vê-se a necessidade de entender o que é um satélite e as condições ambientais de operação de um satélite. Este capítulo tem como objetivo apresentar o que é um satélite, o que é o padrão CubeSat, os subsistemas que estão relacionados ao trabalho e o ambiente em que ele opera.

Os satélites são objetos que orbitam em torno de um planeta no espaço, sendo classificados em satélites naturais e satélites artificiais (FLORENZANO, 2008). Como satélites naturais, temos as diversas luas que orbitam planetas como, por exemplo, as 82 luas de Saturno, as 79 luas de Júpiter, a Lua e a 2020CD3, que orbita a Terra temporariamente como uma segunda lua (FAPESP, 2019; ROTHERY, 2020; MICHELI; SCHWAB, 2020; ADETUNJI, 2021). Por outro lado, os satélites artificiais são equipamentos desenvolvidos pelo ser humano, colocados em órbita de forma intencional e que permanecem lá devido à aceleração da gravidade (FLORENZANO, 2008; RIBEIRO, 2019). Eles encontram-se em determinadas órbitas, definidas em projeto, onde permanecem até o final de sua missão.

Segundo Fonseca (2004), adaptado por Souza (2007), o movimento do centro de massa é o que define o movimento orbital do satélite. A órbita é a trajetória em torno do corpo central e é definida de acordo com a missão do satélite. De acordo com a altitude, a órbita é dividida em baixa (*Low Earth Orbit – LEO*); média (*Medium Earth Orbit – MEO*); alta, onde se encontra a órbita geoestacionária (*Geostationary Earth Orbit – GEO*); e a órbita, também, pode ser considerada órbita altamente elíptica ou excêntrica (*Highly Elliptical Orbit – HEO*). Essas órbitas podem ser vistas na Figura 1 a e b. Outra classificação de órbita está relacionada à inclinação do plano, variando de 0° a 90°, sendo a 0° chamada de equatorial e a 90° chamada de polar (Figura 1 b e c) (PRADO; KUGA, 2001; SOUZA, 2007; FLORENZANO, 2008; TOSTO et al., 2014; MACENO, 2019; CARVALHO, 2021; ABRASAT, 2014/2024).

A LEO encontra-se entre 160 a 2000 km de altitude. É nestas órbitas que os satélites percorrem mais ciclos ao redor da Terra, pois possuem uma velocidade elevada e um caminho menor para percorrer (PRADO; KUGA, 2001; MACENO, 2019; CARVALHO, 2021). Eles podem ser de engenharia, exploração científica, observação da Terra, sendo também essa a órbita da Estação Espacial Internacional (*International Space Station – ISS*) (SOUZA, 2007; CARVALHO, 2021). Segundo Silva (2018), os satélites costumam ser lançados a uma altura entre 500 e 900 km. Para satélites com altitudes abaixo de 500 km, o controle de atitude e de órbita torna-se complexo devido à alta densidade atmosférica (SILVA, 2018). Entretanto, ao final da missão do satélite, é interessante a existência de arrasto atmosférico, pois isso pode levar à autodestruição do satélite, que queimará na reentrada da atmosfera, dessa forma, evitando-se o acúmulo de *debris* (lixo espacial) (SILVA, 2018).

Já a MEO está entre 2000 e 20.000 km de altitude (MACENO, 2019; CARVALHO, 2021; ABRASAT, 2014/2024). Um ponto a ser observado para essa órbita é que entre 1500 e 5000 km de altitude encontra-se um dos anéis do cinturão de Van Allen, que se trata de um cinturão de radiação que torna o ambiente altamente hostil. Devido a isso, os satélites que orbitam nesse intervalo de altitude precisam ser fortemente blindados e resistentes à radiação (PRADO; KUGA, 2001; SILVA, 2018).

A órbita alta encontra-se acima de 20.000 km (SOUZA, 2007; CARMO; MOREIRA; MANEA, 2021). Dentro dessa faixa destaca-se a órbita geoestacionária ou geossíncrona que está a aproximadamente 36.000 km

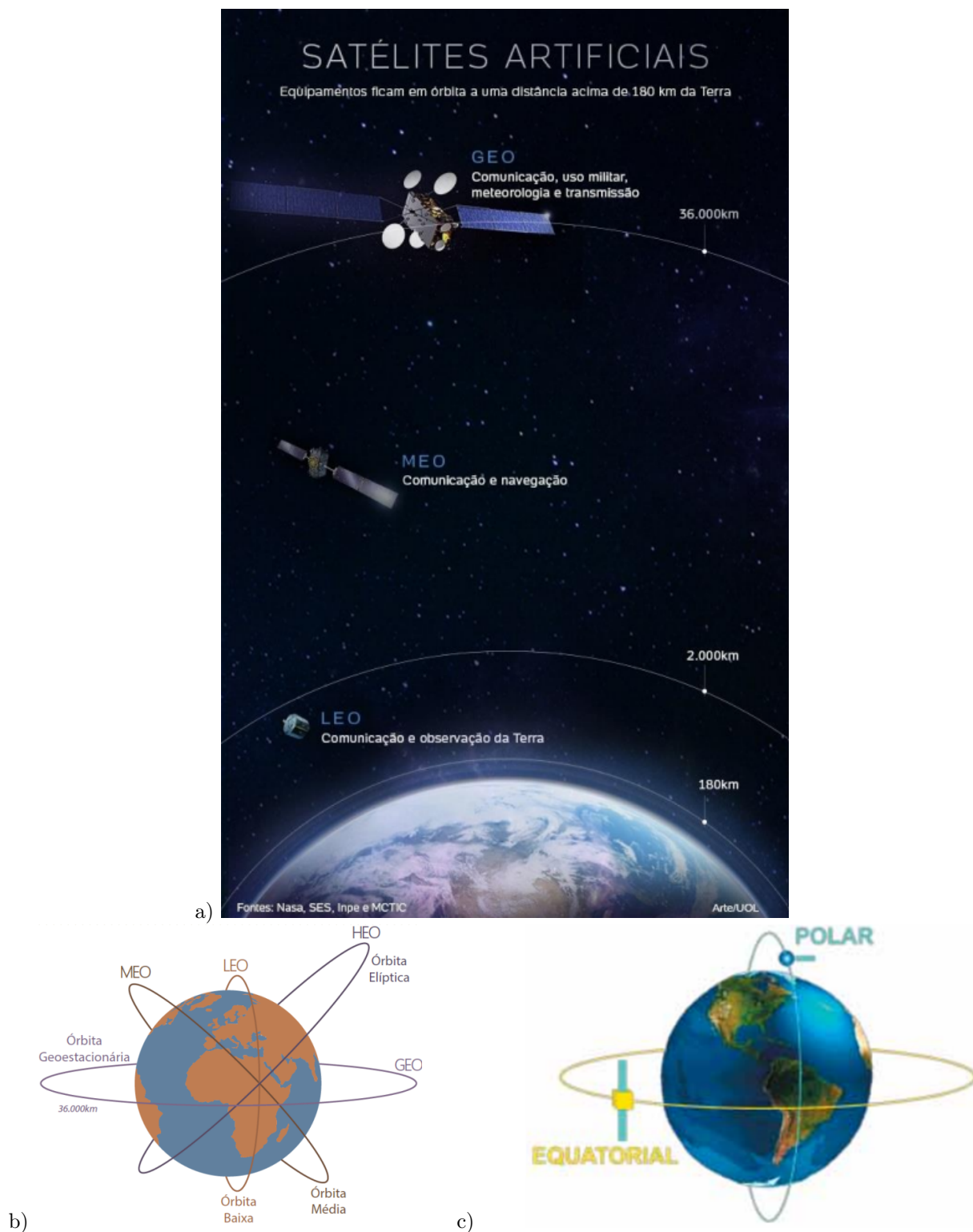


Figura 1 – Tipos de órbitas a) LEO, MEO e GEO (CARVALHO, 2024), b) LEO, MEO, GEO e HEO adaptado de Carvalho (2024) e c) equatorial e polar (SOUZA, 2007)

de altura. O período orbital nessa altitude é de 24h, e os satélites que normalmente se encontram aí são predominantemente de comunicação e alguns meteorológicos (PRADO; KUGA, 2001; SOUZA, 2007; TOSTO

et al., 2014; MACENO, 2019; CARVALHO, 2021; ABRASAT, 2014/2024).

O ambiente de operação de um equipamento é um parâmetro altamente importante para seu projeto, pois definirá o desempenho, durabilidade, funcionalidade e custo de projeto e construção (PRADO; KUGA, 2001). Quando se fala de um projeto espacial, o ambiente de operação é bastante complexo e dinâmico, variando a densidade atmosférica, a energia e os constituintes do ambiente orbital natural de acordo com a hora local, a atividade solar, posição (altitude, latitude e longitude) e a estação (PRADO; KUGA, 2001). Logo, a órbita interfere no ambiente espacial em que o satélite está localizado.

O ambiente espacial oferece algumas perturbações aos satélites, entre as quais temos: radiação (UV, e^- , p^+ , etc...), oxigênio atômico, pressão muito baixa (vácuo), meteoritos e lixo espacial (PRADO; KUGA, 2001). O satélite também passa por ciclo térmico com extremos de -156°C a 121°C (PRADO; KUGA, 2001), que estão relacionados ao percurso em órbita no qual ele se encontra. Já de forma mais específica, temos para LEO os principais parâmetros ambientais: radiação, vácuo, oxigênio atômico, meteoritos e lixo espacial (PRADO; KUGA, 2001). Em relação ao GEO, temos: radiação e vácuo (PRADO; KUGA, 2001). O ciclo térmico é uma consequência da órbita, estando presente em todas elas.

Em consequência dessas condições, os materiais têm que ser capazes de suportar baixas pressões, da ordem de 10^{-8} a 10^{-4} torr, que equivale a 10^{-11} a 10^{-7} atm (PRADO; KUGA, 2001). Eles também devem ser capazes de suportar a radiação UV, que é oriunda do Sol, e partículas carregadas, provenientes do cinturão de Van Allen. Em relação a esses tipos de radiação, sabe-se que a radiação UV e o próton danificam superficialmente os materiais, ao passo que o elétron é altamente penetrante, podendo causar danos internos. Já em relação ao oxigênio atômico, ele se encontra a altitudes de 200 km a 700 km, e seu principal dano é o ataque e a erosão rápida dos materiais externos. Por fim, a ciclagem térmica, para um corpo que esteja na mesma órbita da estação espacial, será de 175.000 ciclos (Sol-sombra) no intervalo de 30 anos (PRADO; KUGA, 2001).

Os meteoritos, conhecidos também como meteoros, viajam a uma velocidade que varia aproximadamente de 13 a 72 km/s e podem se chocar com os satélites e causar danos catastróficos a eles, sendo capazes de inutilizá-los. Já os micrometeoritos estão mais ligados à erosão superficial do satélite, não causando danos catastróficos ao se colidirem com ele, porém causando danos a longo prazo, pois podem erodir os revestimentos para controle térmico e as superfícies ópticas. Lixo espacial, que são fragmentos de componentes lançados pelo homem ao espaço, pode causar os mesmos efeitos negativos que os meteoritos ou micrometeoritos. Porém, a altitudes acima de 1500 km, a densidade de lixo espacial diminui. Um ponto a ser observado é que na LEO há significativamente mais lixo espacial do que meteoritos (PRADO; KUGA, 2001).

Para que o satélite consiga executar uma determinada missão dentro desse ambiente, vários subsistemas são desenvolvidos, e esses subsistemas devem suportar essas condições (MÜLLER et al., 2017). Todo satélite contém requisitos mínimos para ir à órbita e, segundo Palmer (2005), citado por Müller (2019), um satélite requer subsistemas comuns, os quais são divididos em dois grandes grupos: a carga útil (*payload*), que cumpre a missão, e a plataforma (*bus*), que são os subsistemas que apoiam o funcionamento da carga útil. Essa divisão pode ser vista na Figura 2.

Então, desde a primeira vez em que a humanidade colocou em órbita um satélite artificial, durante a Guerra Fria, estudos foram desenvolvidos e satélites continuaram a ser enviados ao espaço. Porém, com o passar dos anos, eles aumentaram de tamanho e custo operacional (BUGRYNIEC, 2016), criando assim a necessidade de buscar alternativas que fossem menos onerosas e que levassem menos tempo para projeto. Com o amadurecimento das tecnologias e a necessidade de treinamento de mão de obra, os satélites diminuíram e o custo foi reduzido. Nessa linha de desenvolvimento, um professor da *California Polytechnic State University* (Cal Poly) desenvolveu um satélite pequeno, cujo ciclo de vida fosse suficiente para que uma equipe de

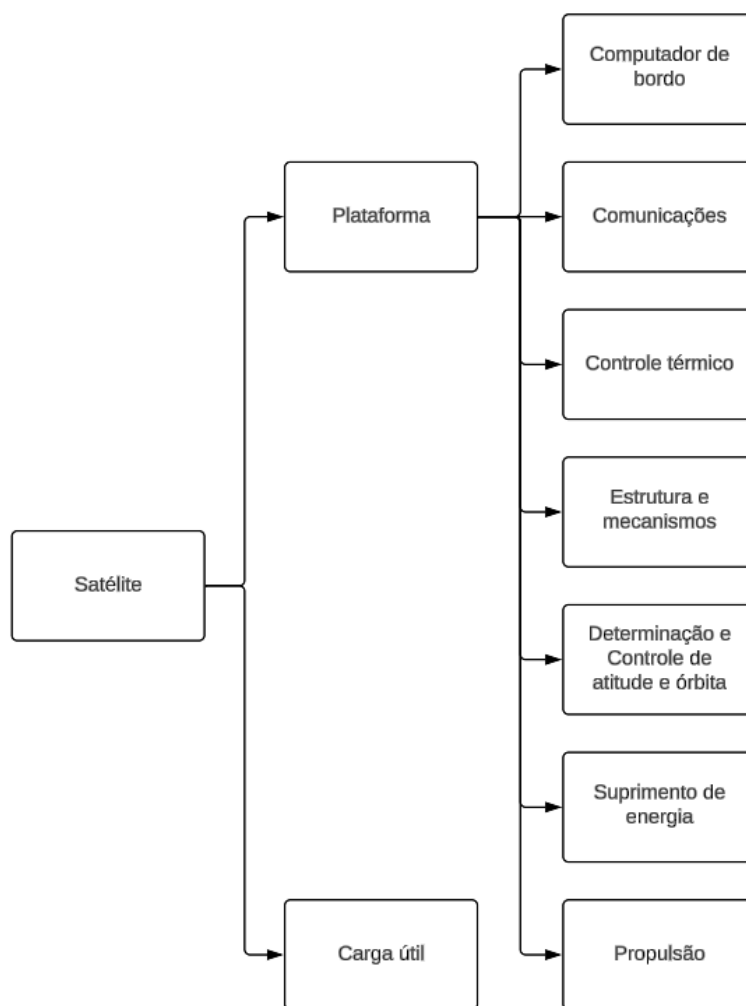


Figura 2 – Arquitetura básica de um satélite (autor)

estudantes de engenharia pudesse acompanhar o projeto completo. Porém, observou-se que esses satélites pequenos eram capazes de realizar missões reais, tornando-se assim o padrão CubeSat. Dessa forma, a acessibilidade ao espaço aumenta juntamente com lançamentos mais frequentes (SILVA; LOPES, 2020). Isso pode ser observado ao se considerar que mais de 1300 missões de nano satélites, a maioria baseada no padrão CubeSat, foram lançadas entre os anos de 1998 e 2019 (SILVA; LOPES, 2020). Dessa forma, os satélites começaram a ser classificados com relação à sua massa e ao seu tamanho, como pode ser visto na Tabela 1 (SILVA; XAVIER JUNIOR, 2019).

2.1 CubeSat

Os CubeSats são satélites que obedecem a um padrão de tamanho, massa e forma (MARTINS, 2019), sendo reconhecidos como satélites pequenos e com especificações padronizadas (BUGRYNIEC, 2016). Eles são classificados como micro ou nano satélites de acordo com sua massa (SILVA; XAVIER JUNIOR, 2019). Dentro do padrão CubeSat, eles são divididos de acordo com o tamanho e a massa como por exemplo 1U ou 1 Unidade, um cubo com 10 cm de aresta e massa máxima de 2 kg (BUGRYNIEC, 2016). A Tabela 2 mostra a relação dos nomes de referência dos CubeSats com suas respectivas dimensões e massas.

Classe	Massa (kg)	Tamanho
Mega satélite	>1000000	Super ultra grande
Hecto satélite	[100000 - 1000000[	Ultra grande
Deca satélite	[10000 - 100000[	Muito grande
Protótipo satélite	[3000 - 10000[	Grande
	[1000 - 3000[	Médio
Mini satélites	[500 - 1000[	
	[100 - 500[	
Micro satélite	[10 - 100[	Pequeno
Nano satélite	[1 - 10[	
Pico satélite	[0,1 - 1[	Muito Pequenos
Femto satélite	[0,01 - 0,1[	Ultra pequenos
Gram satélite	<0,01	Super ultra pequeno

Tabela 1 – Classificação dos satélites quanto a massa e ao tamanho (SILVA; XAVIER JUNIOR, 2019)

Tamanho do CubeSat	Dimensões (cm ³)	Massa Máxima (kg)
1U	10 x 10 x 10	2,00
1,5 U	10 x 10 x 15	3,00
2 U	10 x 10 x 20	4,00
3 U	10 x 10 x 30	6,00
6 U	12 x 24 x 36	12,00
12 U	23 x 24 x 36	24,00

Tabela 2 – Dimensões de CubeSat's (JOHNSTONE, 2022)

Dentro de um CubeSat há subsistemas ¹ necessários para o seu devido funcionamento, como pode ser visto na Figura 2. A plataforma é composta pelos equipamentos necessários para o funcionamento do CubeSat, e a carga útil é composta pelos elementos necessários para o cumprimento da missão. Os subsistemas da plataforma são: o computador de bordo, que gerencia e controla as funções do CubeSat; o subsistema de comunicação, que permite a troca de informações entre o CubeSat e a estação terrestre ²; o subsistema de controle térmico, que tem como função controlar e gerenciar a temperatura dos componentes do CubeSat; o subsistema de estrutura e mecanismos, que suporta e protege os componentes do CubeSat; o subsistema de determinação e controle de atitude e órbita, que controla a órbita que o satélite deve percorrer; e o subsistema de suprimento de energia (*Electrical Power System – EPS*), que gera, fornece, armazena e distribui a energia para os demais subsistemas (SILVA; LOPES, 2020). Como um CubeSat é um satélite compacto, viu-se a necessidade de reduzir o tamanho desses subsistemas para que houvesse a possibilidade de aloca-los no CubeSat.

Dentre esses subsistemas citados, o EPS é de grande importância, visto que é de responsabilidade dele o gerenciamento, armazenamento, condicionamento e distribuição da energia necessária para o funcionamento correto de todos os subsistemas e da carga útil durante toda a missão (VRINDAVANAM et al., 2020). Dentro desse subsistema encontra-se o armazenamento de energia (*Energy Storage System – ESS*) que é responsável pelo armazenamento de energia do CubeSat, sendo vital para a missão ser bem-sucedida.

Então, pensando em um sistema mais compacto, baterias de íon de lítio começaram a ser usadas e os estudos para ganho de eficiência e tempo de vida da bateria continuaram sendo realizados. Seguindo nessa linha, subsistemas híbridos de armazenamento de energia que utilizam bateria de íon de lítio e supercapacitores

¹² Qualquer estação que realize a telecomunicações satelitais que estejam instaladas em local que não seja o próprio satélite (DECEA, 2025).

começaram a ser estudados, simulados e implementados (CHIN et al., 2021). Com isso, estudos começaram a ser feitos para a aplicação desse sistema em CubeSats com o intuito de aumentar a vida útil da bateria.

De acordo com Chin (2018) em seu trabalho, observou-se que um SC EDLC comercial de alta potência composto por um sal quaternário padrão (tetraetilamônio tetrafluoroborato) dissolvido no solvente acetonitrila e eletrodos de carbono ativado de alta área de superfície têm um desempenho bom quando operam em baixas temperaturas, ao passo que a bateria usada por ele perde rendimento. Nota-se também que essa bateria opera melhor quando a temperatura se eleva em relação a esses SCs, dessa forma os seus funcionamentos se completam e, conseqüentemente, há um aumento na vida útil da bateria (CHIN et al., 2018).

Entretanto, os supercapacitores comerciais podem ter um tamanho considerável, fazendo com que, em alguns casos, seja inviável sua utilização em CubeSat. Dessa forma, observou-se a necessidade de procurar por SCs que se enquadrem nos requisitos mínimos para embarque nesse tipo de satélite. Logo, um dos objetivos deste trabalho é testar uma célula supercapacitiva de eletrólito sólido flexível aplicada à eletrônica de baixa potência que consiga se enquadrar nos requisitos mínimos para embarque em um CubeSat, visto que os supercapacitores comerciais usados atualmente em pesquisa ocupam muito espaço, podendo fazer com que não atendam às necessidades devido à limitação espacial que há dentro desse tipo de satélite.

2.1.1 Subsistema de suprimento de energia - EPS

O subsistema de suprimento de energia (*Electrical Power System - EPS*) é o subsistema responsável por tarefas de grande importância para o funcionamento de um satélite, como gerar energia elétrica e fornecer a quantidade necessária de energia que garantirá o funcionamento correto de todos os equipamentos e da carga útil durante todo o tempo da missão (WERTZ et al., 1999; COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009; SILVA, 2018). Além de gerar a energia necessária, o EPS também precisa armazenar parte dessa energia gerada durante o período em que o satélite fica exposto ao Sol, para ser utilizada nos momentos em que estiver no eclipse, ou seja, quando ele estiver na sombra da Terra. As outras funções do subsistema são a distribuição, regulação e controle da potência nos equipamentos embarcados (COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009). Esse subsistema pode ser dividido em quatro partes, sendo elas a fonte de energia, o armazenamento de energia, a distribuição de energia e o controle de energia, como mostra a Figura 3 (WERTZ et al., 1999; SILVA, 2018).

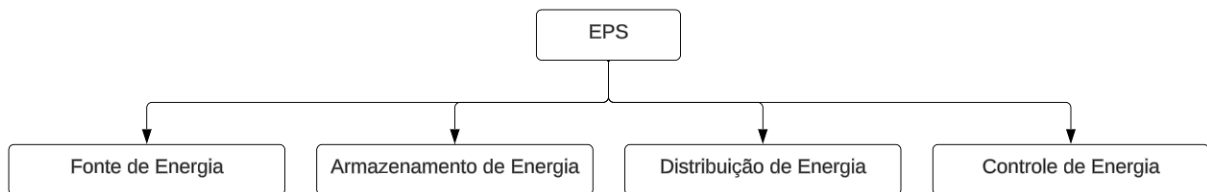


Figura 3 – EPS (WERTZ et al., 1999; SILVA, 2018)

Para dimensioná-lo, é importante saber as demandas médias de potência elétrica, o pico de potência elétrica e a órbita (WERTZ et al., 1999). Também é necessário identificar a potência elétrica de operação da missão no início da vida útil (*beginning-of-life - BOL*) e no final da vida útil (*end-of-life - EOL*) (WERTZ et al., 1999). Usualmente, para projetar o EPS, considera-se o pico de potência elétrica da carga útil, controle de atitude, térmica, carregamento dos armazenadores de energia, gastos do próprio EPS e multiplica-se por 2 ou 3, mesmo sabendo que os subsistemas normalmente não requerem o pico de potência ao mesmo tempo durante a missão (WERTZ et al., 1999).

Já para projetar a fonte, usa-se a potência elétrica média no EOL (WERTZ et al., 1999). Outro ponto a ser observado é que no EOL os sistemas de geração de energia estarão degradados, principalmente quando falamos de painel solar. Para compensar esse problema, o EPS é superdimensionado para o BOL (SILVA, 2018). A energia em CubeSat pode ser gerada por geradores termoelétricos, células fotovoltaicas, fontes de calor químico, nuclear e solar, bem como algumas células de combustível (COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009; SILVA, 2018).

O EPS deve controlar a energia gerada para evitar o aquecimento dos equipamentos e a sobrecarga dos armazenadores, visto que isso os degrada rapidamente (WERTZ et al., 1999; SILVA, 2018). Já em relação à distribuição da energia, ela é realizada por fiação utilizando chaves que podem ser semicondutoras ou relés mecânicos (SILVA, 2018). Esse subsistema também necessita de armazenadores, e estes se encontram no subsistema de armazenamento de energia (ESS).

2.1.1.1 Subsistema de armazenamento de energia - ESS

O subsistema de armazenamento de energia (ESS) é composto por armazenadores de energia que são classificados segundo dois critérios: a função e a forma de armazenamento (CHEN et al., 2009). Quanto à função, eles devem ser caracterizados em relação à qualidade de potência e confiabilidade, tendo alta potência com, relativamente, um conteúdo energético baixo ou para o suprimento de potência ininterrupto (*Uninterruptible Power Supply* - *UPS*), sendo capacitores/SCs, baterias e sistema supercondutor magnético de armazenamento de energia (*Superconducting Magnetic Energy Storage System* - *SMES*); e para suprimento de energia, incluindo baterias de fluxo e baterias de grande escala. Segundo Chen *et al.* (2009), a energia elétrica é dificilmente armazenada em forma de energia elétrica. No entanto, ela pode ser armazenada em outras formas e convertida novamente em energia elétrica.

Este subsistema é parte do EPS e é responsável por prover potência elétrica para pequenas missões, com duração menor que uma semana, ou *back-up* de energia para missões longas, com duração maior que uma semana (WERTZ et al., 1999). Ele tem como objetivo principal armazenar toda a energia produzida pelo EPS que não for usada imediatamente pelos demais equipamentos (COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009). A geração e o armazenamento são feitos quando o satélite se encontra sob a luz do Sol. Nesse momento, o EPS gera a energia usada pelos equipamentos e, paralelamente a isso, carrega os armazenadores (COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009). A energia armazenada será usada nos momentos de pico de demanda energética e quando o satélite estiver no eclipse (WERTZ et al., 1999; COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009).

Para satélites tradicionais, o subsistema usa armazenadores de energia elétrica, que são divididos em três tipos em relação ao equipamento usado para o armazenamento: baterias, que incluem as baterias primárias e secundárias, supercapacitores e sistemas híbridos, compostos por baterias e supercapacitores (NOORI et al., 2019).

No gráfico de Ragone (Figura 4), é possível ver a comparação de diferentes tipos de armazenadores em relação à densidade de energia e densidade de potência. Dessa forma, é possível verificar qual fonte de energia melhor se enquadra à aplicação desejada. Observa-se que as baterias possuem maior densidade de energia, sendo indicadas para aplicações de alta demanda de energia, e os supercapacitores possuem alta densidade de potência, sendo indicados para aplicações de alta demanda de potência. A densidade de energia indica a quantidade de energia que o dispositivo consegue armazenar por unidade de massa e a densidade de potência indica o quão rápido o dispositivo consegue entregar a energia armazenada em seus terminais (TRIGUEIRO, 2014).

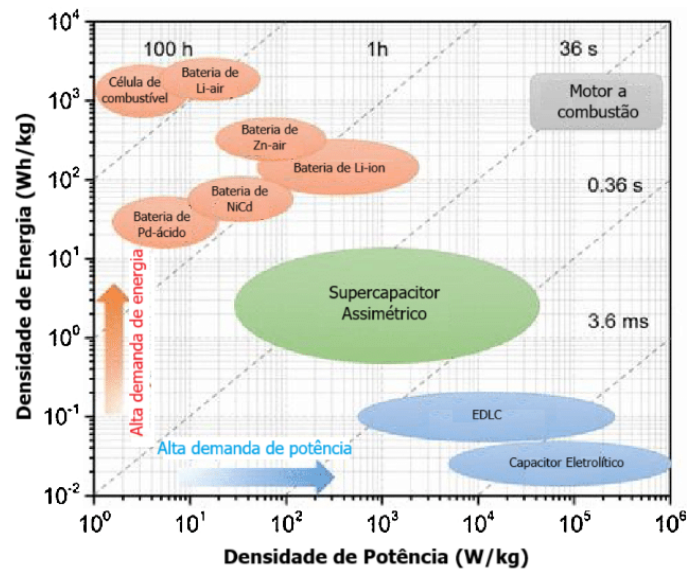


Figura 4 – Gráfico de Ragone (SHAO et al., 2018)

2.1.1.1.1 Bateria

As baterias são tipos de armazenadores de energia com armazenamento químico. Elas são indicadas para aplicações em que há grande demanda de energia, pois possuem grande densidade de energia, e são pouco indicadas para aplicações de alta demanda de potência, pois possuem baixa densidade de potência, como pode ser observado na Figura 4. Esses armazenadores podem ser divididos em dois tipos: baterias primárias, que não são recarregáveis, e secundárias, que são recarregáveis (WERTZ et al., 1999; NOORI et al., 2019; KNAP; VESTERGAARD; STROE, 2020).

As baterias primárias possuem algumas vantagens, como facilidade de aplicação e utilização, conveniência e simplicidade de uso, além de pouca ou nenhuma manutenção. Elas podem ser utilizadas em praticamente qualquer aplicação, possuem boa vida útil, confiabilidade, baixo custo, energia razoável e densidade de potência (LINDEN; REDDY, 2002). As baterias secundárias se enquadram principalmente em dois tipos de aplicações, uma delas como armazenadoras de energia. Assim, elas são carregadas por uma fonte de energia e posteriormente fornecem sua energia à carga sob demanda, quando a fonte principal de energia não se encontra disponível ou não consegue suprir totalmente a demanda da carga. Outra forma de atuação das baterias secundárias é por conveniência, para consumo além do que a bateria primária fornece ou para economizar custos, visto que ela não precisa ser substituída (LINDEN; REDDY, 2002).

Quando se trata de CubeSats, em quase todas as missões, as baterias mais usadas são as secundárias, pois a maioria das missões são em órbita e a demanda energética é consideravelmente maior do que o que pode ser fornecido pelas baterias primárias (KNAP; VESTERGAARD; STROE, 2020). As baterias mais usadas em missões até 2010 foram, respectivamente, íon-lítio (66%), níquel-cádmio (16%), polímero de lítio (12%), cloreto de lítio (4%) e outras (2%). Porém, em 2014, as baterias de íon-lítio já eram as mais utilizadas e estavam presentes em 98% dos novos satélites produzidos (BOUWMEESTER; GUO, 2010; SILVA, 2018; KNAP; VESTERGAARD; STROE, 2020).

Para o dimensionamento de baterias para CubeSat, deve-se levar em conta algumas características: a quantidade total de energia requerida pelo CubeSat, degradação da bateria, a massa e o volume destinados ao subsistema de armazenamento, profundidade de descarga (*Depth of Discharge - DoD*) e o tipo de órbita

(WERTZ et al., 1999; COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009; SILVA, 2018). É essencial conhecer o gasto energético total e a degradação da bateria para garantir que o sistema consiga suprir a demanda durante todo o período de vida do CubeSat. Como é um projeto de CubeSat, o tamanho e a massa são pontos críticos, visto que há restrições de tamanho e de massa. Portanto, o volume e a massa das baterias devem ser considerados para que elas caibam dentro do CubeSat e consigam fornecer a energia necessária. A DoD é o percentual do total da capacidade da bateria que é perdido durante o período de descarga (WERTZ et al., 1999).

As baterias são recarregadas durante a exposição ao Sol e descarregadas no período de eclipse (WERTZ et al., 1999). Logo, os ciclos de carga e descarga estão relacionados ao tipo de órbita, à altitude, excentricidade e inclinação, pois esses fatores determinam o tempo de eclipse e de exposição ao Sol e, consequentemente, o número de ciclos de carga e descarga que a bateria deve suportar durante todo o tempo de vida da missão (WERTZ et al., 1999). As órbitas mais altas possuem mais tempo de exposição ao Sol, fazendo com que os ciclos de descarga das baterias sejam menores, pois os eclipses são mais raros (COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009). Em órbita GEO, é necessário armazenar energia para dois ciclos de 45 dias por ano com eclipses que durem menos de 72 minutos por dia. Portanto, há poucos ciclos de carga e descarga das baterias durante o eclipse, resultando em uma DoD de 50%, o que é uma taxa considerada alta. Já em LEO, com uma velocidade de 8 km/s, há aproximadamente 15 eclipses por dia com aproximadamente 36 minutos de duração, ou seja, 15 ciclos de carga e descarga da bateria por dia, totalizando mais de 5000 ciclos de carga e descarga em um ano, com DoD de 15 a 25%, consideravelmente menor que em GEO (WERTZ et al., 1999; COSTA; SOUZA; SCHUCH, 2009). Essas informações são imprescindíveis para projetar um ESS que consiga suprir todas as demandas energéticas durante toda a vida útil do CubeSat.

A bateria é um armazenador de energia eficiente, porém estudos mostram que é possível melhorar sua vida útil usando supercapacitores (CHIN et al., 2021). Esse subsistema, contendo baterias e supercapacitores associados, é chamado de subsistema híbrido de armazenamento. Esse tipo de subsistema já está sendo estudado para aplicação em carros elétricos, por exemplo, e os resultados obtidos foram relevantes para o armazenamento de energia em CubeSats (VRINDAVANAM et al., 2020).

2.1.1.1.2 *Armazenamento híbrido de energia bateria/SC*

O armazenamento de energia híbrido consiste no uso de SCs e baterias juntos para armazenar energia, usando as características de ambos os dispositivos para melhorar a eficiência no armazenamento, aumentar a robustez e a variedade de aplicação do sistema. Os SCs são armazenadores de energia baseados em eletrostática de alta velocidade e/ou Faradaica que, quando comparados às baterias, possuem alta densidade de potência, o que os permite fornecer alta potência específica e carregar/descarregar em segundos (ZHONG et al., 2015; SHAO et al., 2018; PAL et al., 2019; CHIN et al., 2021). Entretanto, possuem densidade de energia mais baixa se comparados às baterias, o que leva a uma baixa energia específica, características que podem ser vistas na Fig 4 (ZHONG et al., 2015; SHAO et al., 2018; PAL et al., 2019; CHIN et al., 2021). Esses dispositivos também possuem, quando comparados às baterias, um ciclo de vida extenso, passando de 4.000.000 ciclos, e conseguem trabalhar em alguns casos a temperaturas mais baixas, enquanto as baterias de lítio-polímero podem ter ciclo de vida de apenas 500 ciclos (ZHONG et al., 2015; SHAO et al., 2018; PAL et al., 2019; PAULA; MAGALHÃESB, 2019; CHIN et al., 2021). Eles também são dispositivos que oferecem alta segurança operacional, alta eficiência e estabilidade de alto desempenho quando comparados às baterias (SHAO et al., 2018).

Outro aspecto importante a ser observado é que, durante a carga e a descarga galvanostática, a inclinação da reta de tensão possui uma variação que, nos capacitores teóricos, pode ser aproximada a uma constante tanto para carga quanto para descarga. Isso ocorre porque a capacitância permanece constante independente da variação da tensão, ao passo que, para a bateria, observa-se quase um platô em um estágio de tensão constante, conforme apresentado na Figura 5 a e b (SHAO et al., 2018).

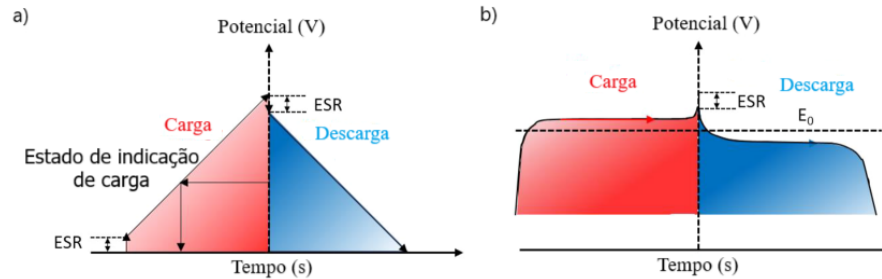


Figura 5 – Comparação entre as curvas de carga e descarga a corrente constante o funcionamento da ciclagem galvanostática teórica a) dos SCs e b) das baterias, onde ESR é a Resistência Equivalente em Série (*Equivalent Series Resistance - ESR*) (SHAO et al., 2018)

Combinando SCs com baterias para o armazenamento de energia em um ESS híbrido, obtêm-se os benefícios dos dois dispositivos, já que o SC tem como vantagem a capacidade de fornecer altas correntes, assim como o aumento dos ciclos de vida do subsistema (CHIN et al., 2021). O motivo dessa melhoria está no uso do SC, pois ele atuará como *buffer* de armazenamento sob as condições de alta potência, mitigando os mecanismos de degradação da bateria (CHIN et al., 2014; BUGRYNIEC, 2016; CHIN et al., 2021). Outra vantagem é que, dependendo do ciclo de trabalho do ESS, se ele for configurado adequadamente, pode evitar a necessidade de superdimensionamento das baterias, que seria necessário para atender às demandas de alta potência durante toda a vida da missão (CHIN et al., 2021).

De acordo com pesquisas realizadas, observou-se que o uso de supercapacitores em CubeSat é muito viável no armazenamento de energia. Segundo estudos realizados por Chin *et al.* (2021), o supercapacitor testado por eles tem um percentual de descarga a temperaturas negativas consideravelmente melhor que o das baterias de íon de lítio usadas atualmente. A porcentagem a -40°C é de 80% na capacidade de descarga em um capacitor, enquanto em uma bateria é menos de 20%. No entanto, com o aumento da temperatura, esse percentual de capacidade de descarga diminui para o supercapacitor e aumenta para a bateria testadas por eles.

Dessa forma, observa-se que os dispositivos se complementam quanto ao uso, pois a variação de temperatura no espaço é muito severa. Observou-se também na pesquisa de Chin *et al.* (2021) e de He e Zhang (2021) que supercapacitores diferentes apresentam a característica de suportar as condições de lançamento. He e Zhang (2021) também observaram que não houve a necessidade de colocar invólucro especial nos supercapacitores escolhidos. Ambas as pesquisas foram feitas com supercapacitores comerciais. Esses resultados motivam o desenvolvimento de células supercapacitivas compatíveis com a aplicação espacial.

2.1.2 Carga útil

A carga útil de um CubeSat é formada por todos os elementos, tanto de software quanto de hardware, que são necessários para o cumprimento da missão, tornando o CubeSat inteiramente dependente da sua aplicação (GUARESCHI, 2015; SILVA, 2018). A missão do CubeSat está relacionada à carga útil, pois somente com

a escolha adequada dela torna-se possível atingir os objetivos da missão (SILVA, 2018). Segundo Zea *et al.* (2014), citado por Silva (2018), a carga útil é a responsável por impor os requisitos e restrições tanto para os subsistemas quanto para os *budgets* de massa e volume.

As necessidades e os desejos dos clientes são os parâmetros que definem os objetivos de uma missão, portanto a escolha da missão deve ser bem estudada e planejada (SILVA, 2018). Ainda, de acordo com Silva (2018), um CubeSat costuma ter como objetivo a capacitação de mão de obra e teste de novas tecnologias. De acordo com Zea *et al.* (2014), citado por Silva (2018), há alguns aspectos que devem ser considerados no momento da escolha de uma missão, como riscos, relevância, recursos disponíveis, viabilidade e benefícios.

Conforme mencionado por Zea *et al.* (2014), citado por Silva (2018), uma análise de riscos deve ser feita e deve incluir os riscos de maior relevância, a probabilidade de ocorrerem e as consequências que trarão para a missão. Dessa forma, medidas preventivas podem ser tomadas para evitar interferências na missão. Já quanto à relevância, a análise deve alinhar-se aos objetivos estratégicos, à missão da organização e às aplicações em análise, considerando o contexto em que o CubeSat será produzido, neste caso, contexto acadêmico.

Também é importante analisar os recursos disponíveis para a missão, entre eles o tempo, orçamento, conhecimento interno, pessoas, patrocínios externos, parcerias e infraestrutura. Além dos recursos, é necessário analisar a viabilidade da missão, dividida em viabilidade global e viabilidade técnica. A viabilidade global é avaliada comparando com outras missões já realizadas para identificar quais foram bem-sucedidas e eliminando as que não foram. Já em relação à viabilidade técnica, é necessário verificar a aplicação, identificar os principais equipamentos; determinar os requisitos dos equipamentos e sensores como massa, volume e potência; e, por fim, verificar se todos os requisitos especificados podem ser cumpridos (SILVA, 2018).

Com essas análises, é possível verificar o impacto do projeto e os benefícios que ele proporciona. Segundo Silva (2018), entre os benefícios que podem ser trazidos pelo projeto estão os científicos, incluindo o desenvolvimento de novas tecnologias e pesquisas; os organizacionais, como o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias; e a nível nacional, com a criação de empregos, estudos em diversas áreas e desenvolvimento de carreiras.

2.2 Considerações finais do capítulo

Este trabalho tem como objetivo testar uma célula supercapacitiva que será implementada como armazenador de energia aplicada a baixa potência. Essa tecnologia será testada no PdQSat, e ele terá como missões testar uma bateria de Li-S e uma célula supercapacitiva. Como o CubeSat usado neste trabalho está previsto para trabalhar em LEO, com altitude aproximada de 400 km a 700 km, excentricidade próxima de 0 e inclinação provável de 50° (GUILHERME, 2022), devem ser observadas suas condições de operação. Nesta altura, ele precisa suportar o trabalho em vácuo, ciclo térmico, radiação, oxigênio atômico, meteoritos e lixo espacial (PRADO; KUGA, 2001).

Este CubeSat deve suportar o trabalho em vácuo, ou seja, pressões da ordem de 10^{-8} a 10^{-4} torr, que equivale a 10^{-11} a 10^{-7} atm (PRADO; KUGA, 2001). Quanto à ciclagem térmica, o CubeSat usado neste trabalho tem uma previsão de vida útil de 6 meses a 1 ano. Como ele está previsto para ficar próximo à órbita da ISS, com velocidade de 8 km/s a 8 km/s, prevê-se que ele passe por aproximadamente 5835 ciclos (Sol-sombra) em 1 ano, variando externamente de aproximadamente -150°C a 120°C em cada ciclo (PRADO; KUGA, 2001). Entretanto, o CubeSat usado neste trabalho conta com uma proteção térmica que permite que o seu interior chegue a apenas -40°C . Ele também deve suportar a radiação UV e partículas carregadas. A radiação UV e a de prótons danificam superficialmente o CubeSat, enquanto o elétron é altamente penetrante (PRADO; KUGA, 2001). Quanto ao oxigênio atômico, aos meteoritos e ao lixo espacial de pequeno tamanho,

seu principal dano é o ataque e a erosão rápida dos materiais externos. Caso o meteorito e o lixo espacial tenham um tamanho considerável, eles podem inutilizar o CubeSat (PRADO; KUGA, 2001).

Como a célula supercapacitiva em desenvolvimento e o SAAES^{SC} são parte da carga útil, eles estarão localizados na parte interna do CubeSat usado neste trabalho. Portanto, a carga útil estará protegida contra algumas situações adversas, como meteoritos e lixo espacial. Consequentemente, os maiores problemas enfrentados pela carga útil serão a pressão de vácuo, o ciclo térmico, a radiação, principalmente a de elétrons, e o oxigênio atômico. Considerando que os equipamentos para aplicação espacial são produzidos especificamente para esse fim, eles já conseguem sobreviver a algumas intempéries; entretanto, a maioria dos equipamentos eletrônicos específicos para aplicações espaciais não consegue trabalhar em temperaturas abaixo de -40°C , o que faz com que o CubeSat usado neste trabalho seja equipado com proteção térmica para temperaturas abaixo desse valor. Na Tabela 3, encontram-se as principais informações sobre o CubeSat utilizado neste trabalho e as condições de operação.

Características observadas para operação do PdQSat	Dados
Órbita	LEO (400 km a 700 km)
Excentricidade	Próxima de 0
Inclinação provável	50°
Velocidade	8 km/s
Tempo de vida	6 meses a 1 ano
Tempo de órbita	≈ 90 minutos (50 com Sol, 40 com eclipse)
Número de ciclos térmicos	2916,66 a 5833,33
Variação térmica interna	-40°C a 120°C
Radiação	UV, partículas carregadas e oxigênio atômico

Tabela 3 – Características de operação do CubeSat usado neste trabalho (autor)

3 CARGA ÚTIL

Partindo da premissa de que uma das missões do PdQSat, CubeSat tratado neste trabalho, é o teste de uma célula supercapacitiva aplicada à eletrônica de baixa potência, é necessário desenvolver algumas estratégias para viabilizar esse teste. Portanto, este capítulo tem como objetivo apresentar as cargas úteis relacionadas a essa missão, são elas: a célula supercapacitiva e o Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitore (System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors - SAAES^{SC}), juntamente com o algoritmo desenvolvido para a aquisição de dados. A função do SAAES^{SC} é fazer a interface entre a célula supercapacitiva e o computador de bordo.

Para embarcar qualquer componente em um equipamento, é desejável que ele suporte as condições adversas apresentadas no ambiente de trabalho. No caso do ambiente espacial, as principais situações enfrentadas são a variação severa de temperatura, a radiação incidente e a baixa pressão, sendo a última a situação mais crítica. Isso faz com que os equipamentos para aplicação espacial sejam produzidos com materiais especiais que suportem essas condições. Entretanto, nem todo equipamento ou material suporta operar em tais condições e precisa ser protegido. Para aplicação espacial, é possível proteger contra a variação brusca de temperatura usando mantas térmicas, blindagem contra radiação e proteção contra a baixa pressão.

Logo, para a escolha do SC a ser embarcado no CubeSat usado neste trabalho, os principais requisitos observados foram a capacitância, a densidade de energia, a densidade de potência, a volatilidade e a viscosidade do eletrólito, visto que ele será testado como um armazenador de energia para alimentação de componentes eletrônicos de baixa potência em ambiente espacial, e é desejável que ele suporte todas as condições adversas de trabalho. Contudo, como se trata de um componente novo, logo algumas características ainda não são conhecidas, como o funcionamento em baixa pressão, em temperaturas elevadas e com grande gradiente de temperatura. Dessa forma, torna-se necessário realizar testes em ambientes controlados que simulem o ambiente espacial, para saber como ele se comportará e se será necessário prover proteção extra para o componente.

Entretanto, a célula supercapacitiva precisa de um equipamento que realize estes testes, tanto em terra quanto no espaço. Este componente fará a interface entre o computador de bordo e a célula em questão, viabilizando o teste dentro do CubeSat utilizado neste trabalho. Para realizar esse teste, foi desenvolvido o Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitore (System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors - SAAESSC), que é um equipamento portátil que realiza testes de ciclagem galvanostática e carga e autodescarga. Porém, o projeto do SAAESSC iniciou-se com SC comerciais, pois há certa facilidade de aquisição desses dispositivos para teste, sem contar que eles possuem funcionamento conhecido e têm seus dados elétricos disponíveis em manuais de fácil acesso, viabilizando assim os testes de caracterização do equipamento, ao passo que as células produzidas ainda não tem todas as características elétricas conhecidas. Dessa forma, o dispositivo foi testado com SCs comerciais da empresa AVX, identificados por SCMR22D155PRBB0, e teve seus dados comparados com testes feitos em equipamento comercial, o potenciostato/galvanostato multicanal VMP3, e posteriormente os dados foram comparados também com o manual do fabricante, para verificar como o equipamento funcionava e se os dados fornecidos por ele eram coerentes.

Como a amostra escolhida se trata de uma amostra desenvolvida com materiais novos, suas características ainda não são completamente conhecidas. Dessa forma, vê-se a necessidade da produção e dos testes

em condições ambientais, com temperatura de 21 °C e pressão ambiental, dessa amostra para que seja possível entender o seu funcionamento e, a partir daí, adaptar a eletrônica do dispositivo desenvolvido para caracterização, para só assim conseguir testá-la com o SAAES^{SC}. Após esses testes ambientais, devem ser realizados testes na carga útil antes do voo. Esses testes devem ser realizados tanto na amostra quanto no SAAES^{SC}, pois ambos compõem a carga útil dessa missão. O software desenvolvido para o SAAES^{SC} também é a carga útil, porém, este já será testado durante a validação do dispositivo com SCs comerciais. Tanto o projeto do SAAES^{SC} e da produção da amostra foram feitos concomitantemente, sendo necessário iniciar os testes com SCs comerciais para depois adaptar o circuito do SAAES^{SC} para teste de amostras de células supercapacitivas.

3.1 Amostra selecionada: eletrólito de matriz polimérica o poli(bis(trifluorometilsulfonil)imideto de *N*-alil-*N*-metilpirolidínio) e LI o bis(trifluorometilsulfonil)imideto de 1-metil-3-propil-pirolidínio) (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de grafeno reduzido (r-GO)

Para a seleção da amostra, foram examinados três células diferentes, e a *priori*, a célula escolhida foi a que apresentou a maior capacitância dentre as opções de células testadas (ALEXANDRE, 2019). A amostra selecionada foi o supercapacitor cujo eletrólito polimérico gel PLI/LI poli(bis(trifluorometilsulfonil)imideto de 1-etil-3-propilimidazolio[EPIm][TFSI] e o líquido iônico bis(trifluorometilsulfonil) imideto de 1-etil-3-metilimidazolio[EMIm][TFSI] (PLI [EPIm] [TFSI]) em eletrodo composto de grafeno reduzido (r-GO) como material ativo na proporção 90:10 (90% de material ativo e 10% de material ligante) (ALEXANDRE et al., 2019; ALEXANDRE, 2019). Esse SC é um supercapacitor ELDC flexível que não necessita de separador. O eletrodo é composto de óxido de grafeno reduzido (r-GO) com dimensões de 25 mm de comprimento e 5 mm de largura, e a espessura pode variar devido à forma de produção. A base de apoio do eletrodo, que também é usada como contato, é feita de aço inoxidável com dimensões de 35 mm de comprimento, 5 mm de largura e 0.1 mm de espessura. O eletrólito é feito de ionogel com 25 mm de comprimento, 5 mm de largura e 2.7 mm de espessura. Todo o SC é fixado por um material chamado parafil.

Esse SC, ao ser produzido, não possui polarização. Porém, devido à forma de deposição do material do eletrodo, há uma polarização preferencial definida pela massa de eletrodo depositada no coletor de corrente. O coletor que estiver com mais material depositado será a parte negativa do componente, e a com menos material depositado será a parte positiva. Ambas as partes estão unidas pelo eletrólito de ionogel, que não permite o contato entre os eletrodos. Esse ionogel é depositado em cada eletrodo e depois unido manualmente. Para que o SC não se separe, ele é envolvido por um material polimérico chamado parafil.

Para essa célula testada, a densidade de corrente de 1 A/g, na janela de 2.5 V, no 20° ciclo de ciclagem de carga e descarga a corrente contínua, apresenta capacitância específica de 6.9 F/g, densidade de energia de 5.4 Wh/kg, densidade de potência de 930 W/kg e eficiência coulômbica de 85,1% (ALEXANDRE, 2019). Em relação às características mecânicas, a única característica conhecida é a temperatura máxima para a degradação do eletrólito, que é de 105 °C. Entretanto, essa amostra, apesar de muito promissora, apresentou um problema que inviabilizou seu uso: o eletrólito dela escorreu após alguns meses exposto à temperatura ambiente.

Logo, outra amostra precisou ser redefinida, buscando eletrólitos com características mais robustas, em relação à variações de temperatura, volatilidade e viscosidade, mesmo que com menor capacitância específica esperada. Escolheu-se então o supercapacitor cujo eletrólito de ionogel possui como matriz polimérica o poli(bis(trifluorometilsulfonil)imideto de *N*-alil-*N*-metilpirolidínio) e LI o bis(trifluorometilsulfonil)imideto

de 1-metil-3-propil-pirolidínio) (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) e o eletrodo é de grafeno reduzido (r-GO) na proporção 90:10, sendo também um SC ELDC, que não necessita de separador (ALEXANDRE, 2019). O eletrodo é composto de óxido de grafeno reduzido (r-GO) com dimensões de 25 mm de comprimento e 5 mm de largura (ALEXANDRE, 2019). A espessura pode ser variável devido à forma de produção. A base de apoio do eletrodo, que também é usada como contato, é feita de aço inoxidável com dimensões de 35 mm de comprimento, 5 mm de largura e 0.1 mm de espessura (ALEXANDRE, 2019). Em relação ao eletrólito, ele é feito de ionogel com 25 mm de comprimento, 5 mm de largura e 2.7 mm de espessura. Todo o SC é fixado por um material chamado parafil (ALEXANDRE, 2019).

Esse SC, ao ser produzido, não possui polarização. Porém, devido à forma de deposição do material do eletrodo, há uma polarização preferencial, que é definida pela massa de eletrodo depositada na base de aço. Assim como o capacitor escolhido anteriormente, a base que estiver com mais material depositado será a parte negativa do componente, e a com menos material depositado será a parte positiva. Ambas as partes estão unidas pelo eletrólito de ionogel, que não permite o contato entre os eletrodos. Esse ionogel é depositado em cada eletrodo e depois unido manualmente. Para que o SC não se separe, ele é envolvido por um material polimérico chamado parafil. A Figura 6 mostra o esquema de construção do SC.

Com relação à capacitância, ela “é proporcional à quantidade de carga acumulada nos eletrodos, bem como à natureza do eletrólito”, segundo Alexandre (2019). Para esse SC testado no plano de 180°, com densidade de corrente de 1 A/g, na janela de 2.5 V, no 20° ciclo de ciclagem de carga e descarga a corrente contínua, apresentou capacitância específica aproximada de 6.5 F/g, densidade de potência de 888 W/kg, densidade de energia de 5.1 Wh/kg e eficiência coulômbica de 96,4% (ALEXANDRE, 2019).

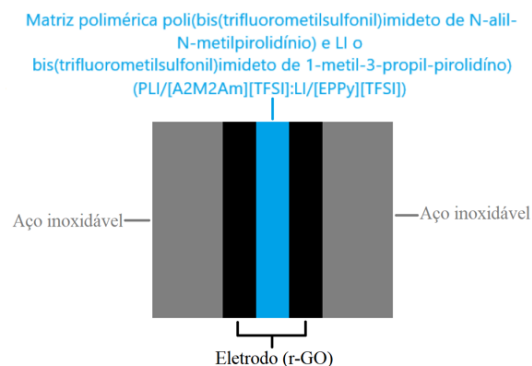


Figura 6 – Representação da montagem do SC (autor)

3.2 Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores (*System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors - SAAES^{SC}*)

Para fazer a aquisição dos dados da amostra de SCs, o Sistema para Aquisição Automática de Sinais Elétricos e Caracterização de Supercapacitores (*System to Automatic Acquire of Electrical Signals from characterization Supercapacitors - SAAES^{SC}*) foi desenvolvido a princípio, com o objetivo de caracterizar eletricamente supercapacitores aplicados ao suprimento de energia para microeletrônica. Esse sistema é capaz de fazer dois tipos de testes diferentes: a ciclagem galvanostática de carga e descarga e a carga e autodescarga.

No trabalho apresentado, os testes de interesse são a carga e autodescarga e a ciclagem galvanostática de carga e descarga a corrente constante, pois os parâmetros fornecidos por esses testes serão usados para análise.

O SAAES^{SC}, Figura 7, é um equipamento portátil, cujas dimensões são 71 mm x 68 mm x 22 mm, desenvolvido para fazer a caracterização elétrica de supercapacitores, sendo capaz de adquirir curvas de tensão enquanto o dispositivo é carregado e descarregado em corrente contínua ou autodescarga. Ele tem tensão de trabalho variando de 50 mV a 10 V e uma janela de corrente de trabalho de 5 mA a 1 A no SC, realizando testes de 4 pontas, o que permite medir a tensão diretamente sobre o SC, operando com uma frequência de amostragem de 20 Hz (FERREIRA; SAUD; SALLES, 2021; CAMPOS et al., 2023). Com essas curvas, é possível extrair os parâmetros para a construção do circuito equivalente usando o modelo de dois ramos e o modelo de redistribuição de cargas por difusão através da curva de carga e autodescarga (FERREIRA et al., 2023). Já para o cálculo da capacitância, densidade de energia e densidade de potência, é usada a curva de carga e descarga em corrente contínua, ou seja, ciclagem galvanostática.

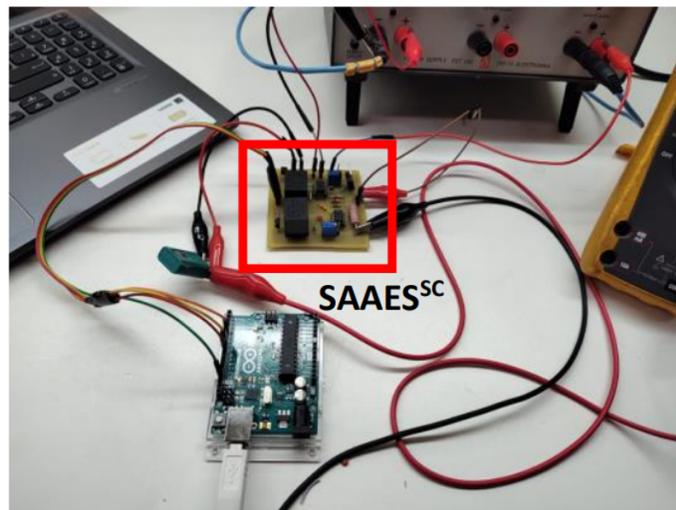


Figura 7 – SAAES^{SC} (CAMPOS et al., 2023)

Ele utiliza uma placa de prototipagem, no caso deste trabalho, usou-se o Arduino, uma fonte de tensão e corrente e o computador que fará todas as análises e cálculos (CAMPOS et al., 2023). Para os cálculos, desenvolveu-se uma programação para Matlab capaz de calcular todos os parâmetros, desenhar as curvas e fazer os cálculos estatísticos (CAMPOS et al., 2023). Em relação ao modelo de dois ramos, construiu-se um programa em Python que recebe como entrada uma curva de carga e autodescarga e retorna o modelo de circuitos equivalente do SC (CAMPOS et al., 2023).

3.2.1 Circuito

O projeto de circuito completo está representado na Figura 8. Para facilitar o entendimento do protótipo, o esquema elétrico será dividido em partes. Primeiro, será analisado o circuito de chaveamento, seguido pelo circuito de corrente constante e, por último, o circuito condicionador de sinais.

Primeiramente, cabe verificar o circuito de chaveamento, feito por relés que são controlados por uma saída digital de um controlador que, auxiliado por um transistor NPN de uso geral, aciona a bobina do relé. Ou seja, os relés são controlados de forma independente com o auxílio de uma saída digital. Além disso, é possível verificar que, ao alimentar o relé 1 (K1), liga-se o SC a fonte e este é carregado controlado por corrente. Ao

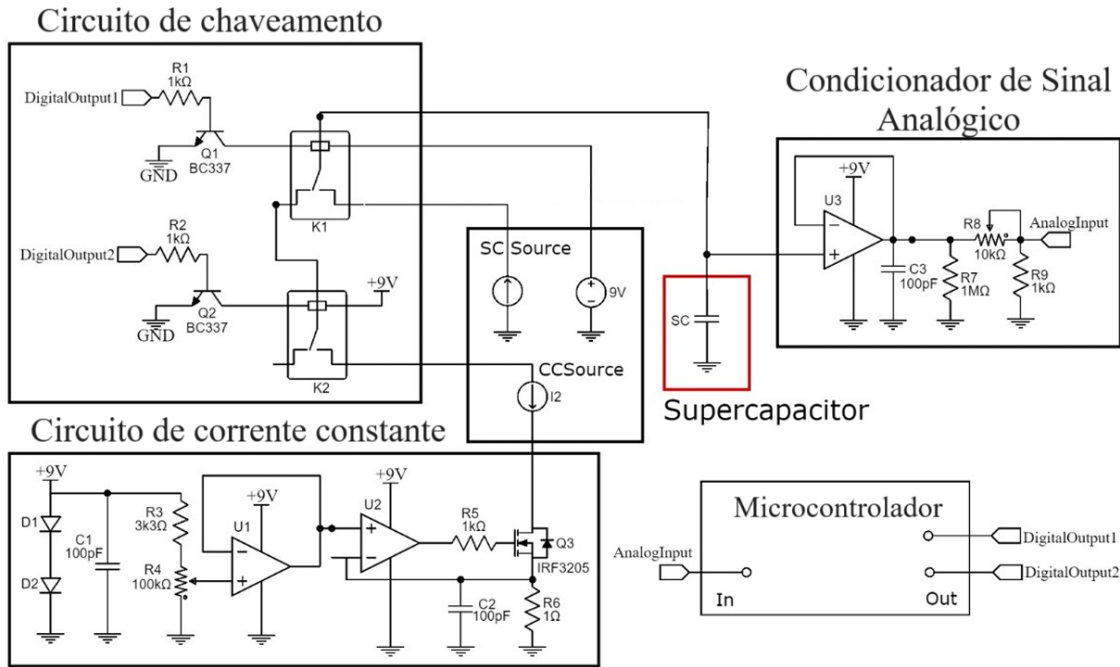


Figura 8 – Circuito do SAAES^{SC} (CAMPOS et al., 2023)

desligar o relé 1 e ligar o relé 2 (K2), observa-se que o SC é ligado ao circuito que força a corrente de descarga. Ao desligar os dois relés, se inicia a autodescarga do SC.

O circuito de corrente constante é o responsável por fazer a descarga do SC a corrente constante. Esse circuito possui dois diodos (D1 e D2) que servem para estabilizar a tensão fornecida pela fonte, eles se encontram no mesmo nó do capacitor (C1), que serve como um estabilizador do sinal, e da resistência (R3). A R3 está ligada ao potenciômetro (R4), formando juntos um divisor de tensão, no qual é possível controlar o ganho fazendo um ajuste fino na resistência de R4. Ligado a R4 encontra-se o amplificador operacional U1 que possui ganho unitário e serve como **buffer**, reforçador de corrente e casador de impedância, garantindo a transmissão de um sinal estável para o amplificador operacional U2. Por sua vez, o U2 amplifica o sinal de saída e com o auxílio de R5 ajusta a tensão no *gate* do MOSFET Q3. Esse ajuste é feito usando a tensão de saída de U1 e a tensão no nó Q3/R6 para controlar a tensão de saída de U2. O capacitor C2 ajuda na estabilidade do sinal gerado no nó Q3/R6 que entra em U2. O Q3, por sua vez, tem a função de permitir a passagem da corrente para a descarga a corrente contínua do SC.

Já o circuito condicionador de sinal é responsável por ajustar o sinal para que ele consiga ser lido pelo microcontrolador, no caso o Arduino. Esse circuito possui um amplificador de sinal (U3) que funciona como **buffer** na entrada que gera um ganho unitário, sendo também um reforçador de corrente e casador de impedância, esse sistema está ligado a um capacitor (C3), que promove a estabilidade do sinal gerado. A resistência R7 estabiliza a tensão no nó que vai para potenciômetro R8. O R8 permite um ajuste fino da resistência, permitindo o controle da tensão na entrada analógica do sistema, juntamente com R9 que auxilia na estabilidade do sistema. Além disso, é preciso uma fonte de corrente para forçar que o sistema consiga fornecer uma corrente constante ao longo de todo o processo de descarga.

Inicialmente, o SAAES^{SC} foi projetado para ser um equipamento de testes portátil de bancada, para testes de supercapacitores e células supercapacitivas assim que fossem produzidas. Essa versão apresentada no trabalho é uma primeira versão, que será modificada para o embarque no CubeSat. A nova versão a

ser projetada e desenvolvida para a carga útil deve: prever outro valor de resistor (R6), substituir os relés, prover outras soluções de circuito para caracterização de impedância, trabalhar com dispositivos de precisão e robustos à variações de temperatura, pressão e radiação. O circuito condicionador de sinal analógico terá um filtro passa baixa, que será construído passando o capacitor C3 para depois da R9, melhorando assim a qualidade do sinal.

3.2.2 Algoritmo

Um algoritmo, Figura 9, foi usado para controlar as saídas digitais do controlador, que chaveiam as entradas do SC conforme a curva desejada. Antes de iniciar o processo de extração, o SC é submetido a 20 ciclos de carga e descarga em corrente constante, que serão descartados. Primeiro, o *loop* principal define que o processo acontecerá n vezes, ou seja, 20. Logo após, o dispositivo é carregado em corrente constante até que seu nível de tensão seja igual ao valor da DDP escolhida. Então, o SC vai descarregar em corrente constante até que seu nível de tensão seja igual a zero. Por fim, o valor de n será incrementado e o *loop* começará de novo até que n seja igual a 20.

Logo após o algoritmo traçar as 20 primeiras curvas, ele verifica qual curva o sistema irá traçar. Caso seja a curva de carga e descarga a corrente constante, ele realizará o processo descrito anteriormente apenas mais uma vez, coletando os dados da vigésima primeira curva, armazenando-os em um arquivo CSV e depois finalizando o processo.

Caso a curva a ser feita seja a de carga e autodescarga, a principal diferença nesse processo será que a variável *timecounter*, que armazena o valor de tempo desde o início do processo. Ou seja, T_p está relacionado ao tempo entre as medições (*delay*) e T_t ao tempo total do processo. Portanto, para esse caso, o limitador para que o processo seja encerrado não é o nível de tensão, mas o tempo total da medição. Além disso, no momento em que o valor de tensão atinge o valor DDP, a variável *discharge* terá valor zero, ou seja, o SC não vai se descarregar em corrente contínua, mas em autodescarga, o que significa que ele será desligado de qualquer terminal. Ao fim do processo, os valores também são armazenados em um arquivo CSV.

3.3 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas as cargas úteis que farão parte da missão de teste de uma célula supercapacitiva com eletrólito sólido flexível aplicada à eletrônica de baixa potência. Essa carga útil consiste em uma célula supercapacitiva com eletrólito de matriz polimérica poli(bis(trifluorometilsulfonil)imideto de *N*-alil-*N*-metilpirolidínio) e LI bis(trifluorometilsulfonil)imideto de 1-metil-3-propil-pirolidínio (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]: LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de (r-GO); o SAAES^{SC}, o dispositivo responsável pela execução dos testes de ciclagem galvanostática e carga e autodescarga; e o software desenvolvido para o SAAES^{SC}, que é o responsável por controlar o dispositivo e coletar os dados dos testes. A Tabela 4 apresenta as principais características dos dispositivos que fazem parte da carga útil do satélite.

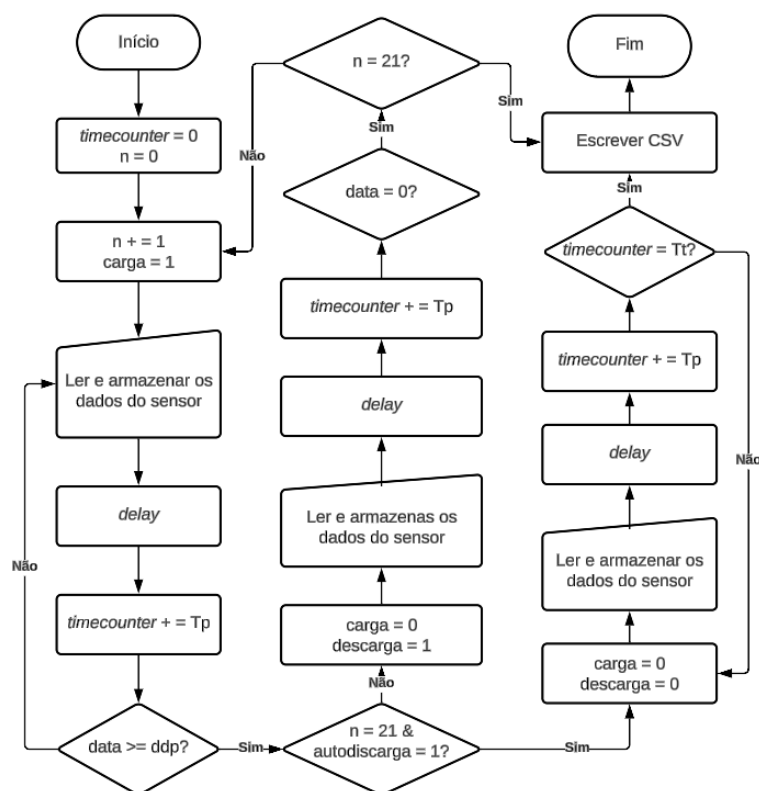


Figura 9 – Algoritmo do SAAES^{SC} (CAMPOS et al., 2023)

Amostra selecionada segundo Alexandre (2019)	Dimensões (mm ³)	25 x 5 x 2,7
	Densidade de corrente (A/g)	1
	Tensão (V)	2,5
	Capacitância específica (F/g)	6,5
	Densidade de potência (W/kg)	888
	Densidade de energia (Wh/kg)	5,1
SAAES ^{SC}	Dimensões (mm ³)	71 x 68 x 22
	Tensão de alimentação (V)	9
	Tensão máxima de trabalho (V)	10
	Tensão mínima de trabalho (V)	0,05
	Corrente máxima de trabalho (A)	1
	Corrente mínima de trabalho (A)	0,005
	Testes realizados	4 pontas
	Tipos de testes realizados	Ciclagem galvanostática e carga e autodescarga

Tabela 4 – Características da amostra selecionada e do SAAES^{SC} (autor)

4 SUPERCAPACITOR

Como uma das missões do CubeSat usado neste trabalho é testar uma célula supercapacitiva com eletrodo sólido flexível aplicada à eletrônica de baixa potência, torna-se necessário entender o que são supercapacitores, quais são os tipos, quais são as formas de armazenamento, os materiais usados na confecção desses dispositivos, quais são as características elétricas que devem ser observadas e quais circuitos equivalentes representam um supercapacitor. Portanto, esse capítulo tem como objetivo apresentar as informações necessárias relacionadas aos SCs.

O desenvolvimento econômico trouxe um aumento no consumo de energia mundial com a introdução de diversos equipamentos cujo desempenho é limitado pelas características das baterias usadas (GONTIJO, 2018). Desse modo, observa-se a necessidade de se projetar um subsistema de armazenamento de energia que seja eficaz e mais compacto para garantir a autonomia de funcionamento dos sistemas. Para isso, existem opções de armazenamento, como o armazenamento de energia em baterias, as mais usadas atualmente; em supercapacitores (SC); e em sistemas híbridos, compostos por SCs e baterias funcionando de forma conjugada (KOUCHACHVILI; YAÏCI; ENTCHÉV, 2018). Esses dispositivos de armazenamento de energia também são chamados de subsistemas de armazenamento eletroquímico e possuem como estrutura básica dois eletrodos, um negativo e um positivo, um coletor de corrente, um separador e um invólucro, Figura 10.



Figura 10 – Arquitetura típica de armazenadores de energia (LUKATSKAYA; DUNN; GOGOTSI, 2016)

Os SCs são formados por duas placas condutoras paralelas, chamadas de coletores, onde se encontram depositados os eletrodos que são separados por um material dielétrico, chamado de eletrólito. Na maioria das vezes, eles também possuem um separador, cuja função é impedir que haja contato entre os eletrodos e a troca de elétrons entre eles (WESLING et al., 2020). Esses coletores de corrente, ao serem conectadas a um circuito elétrico externo que forneça uma diferença de potencial (DDP) e que esteja no regime de corrente contínua, permitem que os elétrons fluam, acumulando-se na superfície dos eletrodos (WESLING et al., 2020). Isso ocorre até o momento em que os eletrodos alcançam a estabilidade de cargas, ficando carregadas com cargas opostas (WESLING et al., 2020).

Para avaliar os dispositivos com melhor qualidade de armazenamento de energia, são analisadas algumas características como a densidade de energia, também chamada de energia específica, que fornece a energia armazenada no dispositivo por quantidade de massa; a densidade de potência, também chamada de potência específica, que é a potência fornecida por quantidade de massa; a eficiência coulombica, que está relacionada com o consumo de corrente; e a eficiência energética, que está relacionada com a energia consumida pelo

dispositivo (ORTEGA, 2017; GONTIJO, 2018; COSTA, 2021). A Figura 4 mostra o Gráfico Ragone. Nele, pode-se observar que, na comparação entre as tecnologias de armazenamento, os Capacitores Elétricos de Dupla Camada (*Electric Double Layer Capacitor – EDLC*) são os de melhor custo-benefício, uma vez que apresentam o menor custo de fabricação e a "maior eficiência nos ciclos de carga e descarga em relação às baterias" (GONTIJO, 2018). Observa-se também que os SCs possuem grande densidade de potência, sendo indicados para aplicações onde há grande demanda de potência, e possuem baixa densidade de energia, não sendo indicados para aplicações com altas demandas de energia.

A utilização de SCs para armazenar energia decorre da necessidade de desenvolver soluções que consigam armazenar energia de forma compacta sem que haja comprometimento do sistema elétrico ou eletrônico. Eles são escolhidos em detrimento dos capacitores convencionais por possuírem maior capacitância e, conseqüentemente, maior capacidade de armazenamento de energia, fornecendo energia por mais tempo. A Figura 11, de Satpathy *et al.* (2023), apresenta vários aspectos presentes em um sistema de armazenamento por supercapacitor, como estruturas de armazenamento de energia, tipos de eletrodos, desempenho elétrico e algumas aplicações.

Para os SCs, o tipo de eletrodo pode definir sua classificação. Há vários materiais que podem ser usados, fazendo com que os SCs se enquadrem em EDLC, que pode ser feito de materiais de carbono; pseudocapacitores, formados por óxidos de metais, polímeros condutores e metais nobres; e híbridos, subdivididos em assimétricos, compósitos e tipo bateria, com materiais de carbono e polímeros condutores, materiais de carbono e óxidos de metais, materiais de carbono e íons de metais, redox e materiais de carbono e baterias. A Figura 12 mostra essa classificação segundo Pryor e Jiang (2013), e a Figura 13 apresenta os materiais de acordo com Shao *et al.* (2018) e Vangari, Pryor e Jiang (2013) (KÖTZ; CARLEN, 2000; VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013; GONZÁLEZ *et al.*, 2016; SHAO *et al.*, 2018; KUMAR; KUMAR; BERDIMURODOV, 2023).

Os SCs também podem ser divididos com base no mecanismo de armazenamento de energia, sendo classificados como EDLC, pseudocapacitor e faradaico. O EDLC (Figura 14 a) possui separação de cargas eletrostática; os pseudocapacitores (Figura 14 b) armazenam cargas por processos eletroquímicos além da separação eletrostática (ENDO, 2017); e o faradaico utiliza processos faradaicos para armazenamento de energia. Outra divisão pode ser com base no tipo de eletrodo, sendo simétricos e assimétricos. No tipo simétrico, os eletrodos são feitos do mesmo material e possuem a mesma quantidade de material nos dois lados do eletrodo, enquanto o assimétricos, ou serem híbridos, que combina EDLC com pseudocapacitância, Figura 14 c (ENDO, 2017).

De acordo com Shao *et al.* (2018) outra divisão pode ser feita, os supercapacitores podem ser divididos em três tipos: EDLC, pseudocapacitor (dividido em polímeros condutores, óxidos de metal e metais nobres) e supercapacitor assimétrico. O supercapacitor assimétrico é dividido em supercapacitor assimétrico capacitivo, com os dois eletrodos feitos do mesmo material, porém com massas diferentes em cada lado; e supercapacitor híbrido, que por sua vez é subdividido em supercapacitores de íon metálico, supercapacitor de eletrólito redox e supercapacitor híbrido aquoso, conforme a Figura 13 (SHAO *et al.*, 2018).

4.1 Tipos de materiais usados na fabricação de eletrodos de supercapacitores

Os materiais que compõem os eletrodos influenciam na performance do SC (WESLING *et al.*, 2020). Atualmente, há uma grande variedade de materiais usados na construção de SCs e a escolha do material depende do tipo de armazenamento de energia que será solicitado pela aplicação e das faixas de capacitância necessárias, conforme mostrado na Figura 13. Os materiais definem a classificação dos SCs em três tipos: EDLC, pseudocapacitor e híbrido, Figura 14 a, b e c (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013).

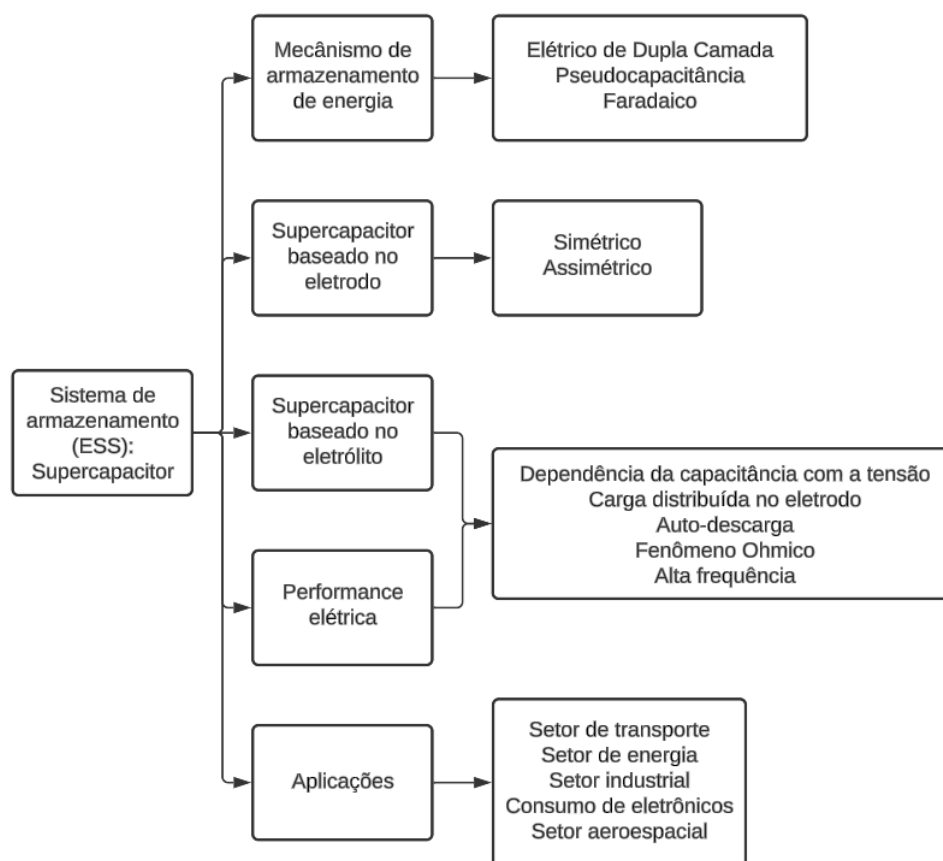


Figura 11 – SC de acordo com o sistema de armazenamento (SATPATHY et al., 2023)

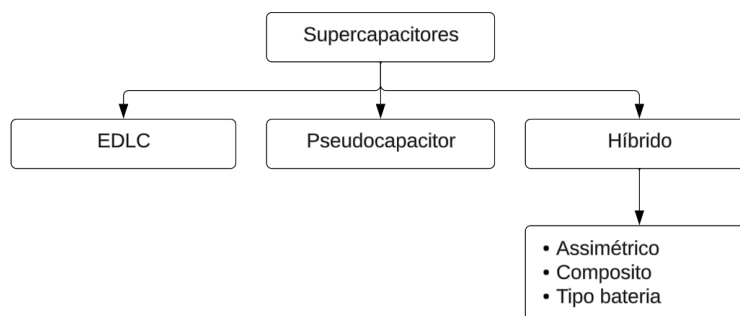


Figura 12 – Materiais construtivos de eletrodos de supercapacitores (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013)

Os materiais mais usados para a produção de eletrodos de SCs são nanotubos de carbono (*carbon nanotubes* - *CNT*), compósitos, óxidos de metais, metais nobres e polímeros condutores. Recentemente, os CNTs têm sido mais empregados pois oferecem uma maior área de contato, entre outras vantagens. Outros materiais muito usados são os compósitos, incluindo nanomateriais como a combinação de CNTs e polímeros condutores ou óxidos de metais. Os óxidos de metais mais comumente usados são óxido de níquel, óxido de cobalto, óxido de manganês e óxido de rutênio. Os metais nobres mais usados são platina, paládio, ródio, rutênio, prata e ouro. Polímeros condutores também são usados para a produção de SCs. Materiais nanoestruturados são de grande interesse para a produção de eletrodos de SCs, pois apresentam melhor performance capacitiva e maior área superficial (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013).

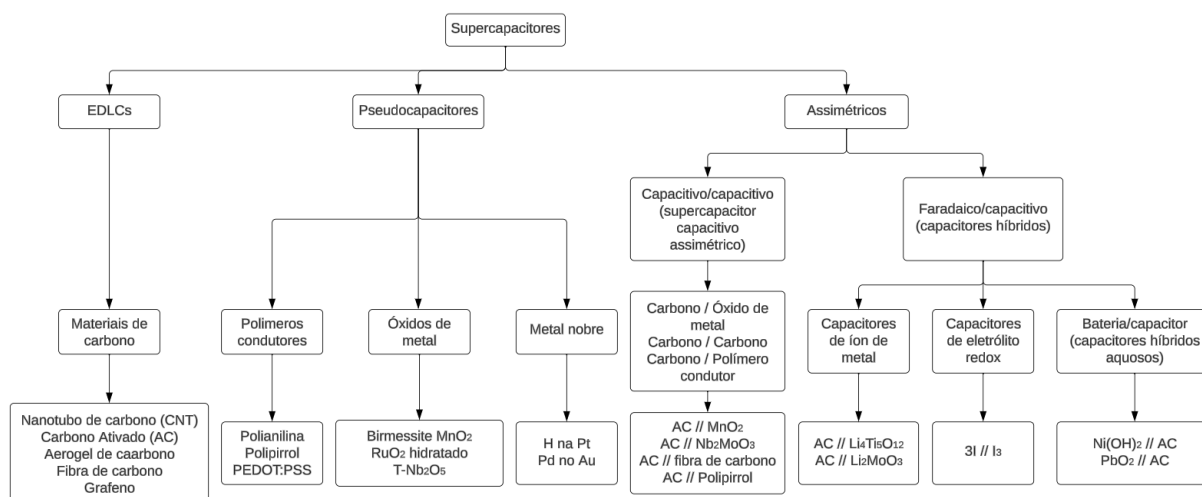


Figura 13 – Classificação de SC com tipos de eletrodos adaptado (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013; ZOR-NITTA, 2015; SHAO et al., 2018)

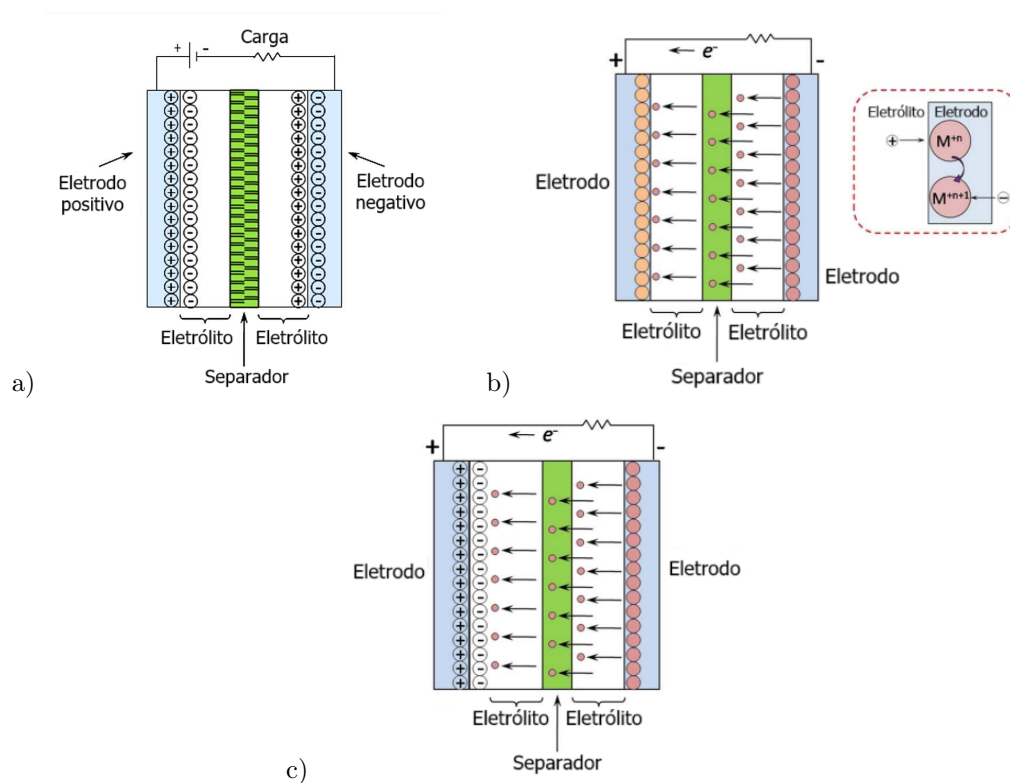


Figura 14 – SC de acordo com o mecanismo de armazenamento a) EDLC, b) pseudocapacitor e c) híbrido (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013)

4.1.1 Materiais de carbono

Os materiais à base de carbono possuem algumas vantagens que os tornam amplamente utilizados em diversas aplicações, com suas várias modificações frequentemente usadas na produção de eletrodos de capacitores (GONZÁLEZ et al., 2016; KÖTZ; CARLEN, 2000). Entre as vantagens estão o baixo custo de produção, um processo industrial bem estabelecido e, quando aplicados em SCs juntamente com eletrólitos

aquosos e orgânicos, apresentam um formato quase retangular no teste de voltametria cíclica (Figura 15) (GONZÁLEZ et al., 2016). Outras vantagens na produção de eletrólitos são a grande área de contato, disponibilidade, e um processo de produção de eletrodos bem estabelecido (KÖTZ; CARLEN, 2000; HALPER; ELLENBOGEN, 2006). Os materiais mais usados são aerogel de carbono, grafeno, carbono ativado (*activated carbon - AC*), fibra de carbono, CNT, carbonetos derivados de carbono (*Carbide Derived Carbons - CDC*) e carbonos mesoporosos (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013; GONZÁLEZ et al., 2016).

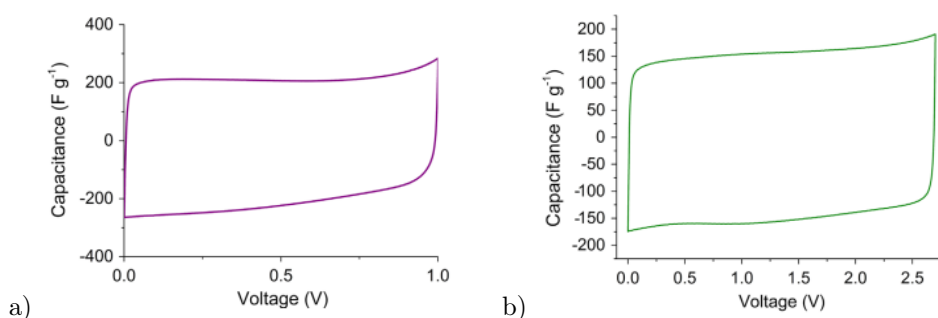


Figura 15 – Voltametria cíclica de uma célula de EDLC para uma velocidade de varredura de 5 mVs^{-1} para a) eletrólito aquoso 6 M KOH e b) eletrólito orgânico 1 M Tetrafluoroborato de tetraetilamônio (GONZÁLEZ et al., 2016)

4.1.2 Óxidos de metal

As propriedades dos óxidos de metais são muito interessantes e possibilitam suas aplicações em diversas áreas importantes, incluindo baterias, células solares, dispositivos fotovoltaicos e supercapacitores (RICHTER, 2006; JOGADE et al., 2011; VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013). Esses óxidos são empregados na produção de SCs pois possuem capacitância específica e condutividade altas e longo tempo de operação, visando a produção de pseudocapacitores de alta energia e potência (HALPER; ELLENBOGEN, 2006; JOGADE et al., 2011; VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013; GONZÁLEZ et al., 2016). Para a produção de eletrodos, há várias opções, incluindo óxido de rutênio (RuO_2), óxido de irídio (IrO_2), óxido de manganês (MnO_2), óxido de níquel (NiO), óxido de cobalto (Co_2O_3), óxido de estanho (SnO_2), óxido de vanádio (V_2O_5) e óxido de molibdênio (MoO_x), sendo que os mais pesquisados são RuO_2 e MnO_2 (GONZÁLEZ et al., 2016).

4.1.3 Metal nobre

Os metais nobres possuem boa condutividade elétrica e são estáveis eletroquimicamente, o que os torna aplicáveis em eletrodos de SCs (YAN et al., 2017). Os metais considerados nobres mais comuns são os do grupo da platina (platina (Pt), paládio (Pd), Irídio (Ir), ródio (Rh), rutênio (Ru) e ósmio (Os)), cobre (Cu), prata (Ag) e ouro (Au) (ALVES; SILVA; GUERRA, 2010; YAN et al., 2017; KUMAR; KUMAR; BERDIMURODOV, 2023). Dentre eles, os mais usados em supercapacitores como eletrodos são Pt, Pd, Rh, Ru, Ag e Au por possuírem excelente condutividade elétrica, facilitando a mobilidade dos elétrons originados nas reações redox dos pseudocapacitores para os coletores de corrente (YAN et al., 2017; KUMAR; KUMAR; BERDIMURODOV, 2023). Contudo, os metais nobres são escassos e muito caros, sendo usados apenas em aplicações militares (YAN et al., 2017; SHAO et al., 2018). Para uma utilização mais ampla, há necessidade de integrá-los a materiais mais sustentáveis e de menor preço, tornando viáveis os custos de montagem, reduzindo o consumo de metais nobres e otimizando as propriedades dos eletrodos (YAN et al., 2017).

4.1.4 Polímetros condutores

Os polímeros condutores são empregados em SCs por terem uma condutividade e uma capacitância altas e resistência equivalente em série baixa (*Equivalent Series Resistance* - ESR) (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013). Eles também possuem uma capacitância específica comparada à dos óxidos metálicos, sendo utilizados em supercapacitores de alta capacitância (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013). Ao serem comparados com alguns materiais de carbono, incluindo o AC, podem ser superiores em alguns aspectos, segundo Frackowiak *et al.* (2006) e Arbizzani *et al.* (2001) citados por Vangari *et al.* (2013). O armazenamento de energia desse tipo de material ocorre por ação redox, proporcionando uma grande superfície de contato (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013). Segundo Zou *et al.* (2007), Fan e Maier (2006), Gupta e Miura (2006) e Xu *et al.* (2006), todos citados por Vangari *et al.* (2013), os principais polímeros condutores são polipirrol, polianilina (PANI) e poli-(3,4-etilenodioxitiofeno) (PEDOT).

Entretanto, algumas desvantagens no uso destes polímeros estão na ineficiência na condução quando dopados negativamente, ou seja, carregados negativamente; e a insuficiência da estabilidade mecânica quando submetidos a ciclos de carga e descarga, resultando em estresse mecânico, como dito por Mastragostino *et al.* (2001), Frackowiak *et al.* (2006) e Arbizzani *et al.* (2001), respectivamente, todos citados por Vangari *et al.* (2013).

4.1.5 Compósitos

Os materiais compósitos são aqueles que são definidos como a mistura, normalmente a nível macroscópico, de dois ou mais constituintes com diferentes composições, estruturas e propriedades, que se encontram em fases distintas e se combinam (MOREIRA, 2009; NETO; PARDINI, 2016). Em relação a esses materiais, um componente é a matriz, responsável por garantir a ligação, e o outro é o reforço, responsável por garantir a resistência (MOREIRA, 2009; NETO; PARDINI, 2016).

No caso dos nanocompósitos, Neto e Pardini (2016) afirmam que são adicionadas nanopartículas às matrizes, com dimensões características iguais ou inferiores a 10^{-9} m, ocasionando também uma combinação de fases em níveis submicroscópicos. Entretanto, isso ocorre de forma distinta dos materiais cerâmicos e das ligas metálicas, pois as combinações ocorrem em nível atômico.

Para o caso de supercapacitores, os compósitos são utilizados na formação do eletrólito de supercapacitores híbridos, combinando materiais de carbono com óxidos metálicos ou materiais de carbono com polímeros. Dessa forma, incorporam-se aspectos tanto do EDLC quanto dos pseudocapacitores, ou seja, armazenando energia de forma capacitiva e faradaica ao mesmo tempo (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013).

4.2 Tipos de materiais usados na fabricação de eletrólitos de supercapacitores

O eletrólito, composto eletrólítico + solvente, é um dos componentes principais do SC, desempenhando um papel fundamental na sua performance (ZHONG *et al.*, 2015; GONZÁLEZ *et al.*, 2016). As propriedades dos materiais dos eletrólitos também influenciam no desempenho do SC, pois fornecem a condutividade iônica e facilitam a compensação de carga que ocorre nos eletrodos de cada célula (ZHONG *et al.*, 2015; WESLING *et al.*, 2020). As mais importantes propriedades a serem levadas em conta são as que impactam principalmente na resistência ESR do SC. Estas propriedades incluem o coeficiente de temperatura e a condutividade (GONZÁLEZ *et al.*, 2016). Já segundo Wesling (2020), "a potência e energia do dispositivo são propriedades proporcionais ao quadrado da tensão de operação do dispositivo, a qual é limitada pela sua estabilidade eletroquímica".

Entretanto, há outros requisitos que devem ser observados, como a janela de tensão operacional, densidade de energia, densidade de potência, resistência interna, alta concentração iônica, taxa de desempenho, faixa de temperatura operacional, baixo raio iônico solvatado, ciclo de vida útil, baixa viscosidade, baixa toxicidade, baixa volatilidade, baixo custo, disponibilidade em alta pureza e autodescarga, Figura 16 (ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016). Outro ponto que influencia na capacitância, densidade de energia, densidade de potência e ciclo de vida é a natureza do eletrólito, que inclui a janela de potencial; o tipo e o tamanho do íon; a interação entre o eletrólito e os materiais do eletrodo; e a concentração de íons e solvente, segundo Zhong *et al.* (2015). Devido à importância do eletrólito e ao impacto nas características do SC, desenvolveram-se vários tipos de eletrólitos diferentes, como mostra a Figura 17. Eles são classificados em líquidos, estado sólido ou quase sólido e redox ativo. Dentro dessa classificação, o eletrólito líquido é dividido em sal em água, aquoso e não aquoso; o sólido ou quase sólido é dividido em sólido seco, polimérico gel e inorgânico; e o redox ativo é dividido em aquoso, orgânico, líquido iônico e polimérico gel. Já o eletrólito aquoso é dividido em ácido, alcalino e neutro; e o não aquoso em orgânico, líquido iônico e misturas.



Figura 16 – Eletrólito e impacto no SC (ZHONG et al., 2015)

4.2.1 Eletrólitos líquidos

O eletrólito líquido possui três divisões, e cada divisão possui características e aplicações diferentes. O eletrólito líquido aquoso é fácil de produzir e possui um valor baixo para os insumos, não necessitando de processos mais elaborados para sua produção e manuseio. Assim, ele é um dos mais pesquisados pela literatura (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Outra vantagem do eletrólito líquido aquoso é a alta condutividade que melhora a entrega de energia e diminui a *ESR* (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). As características

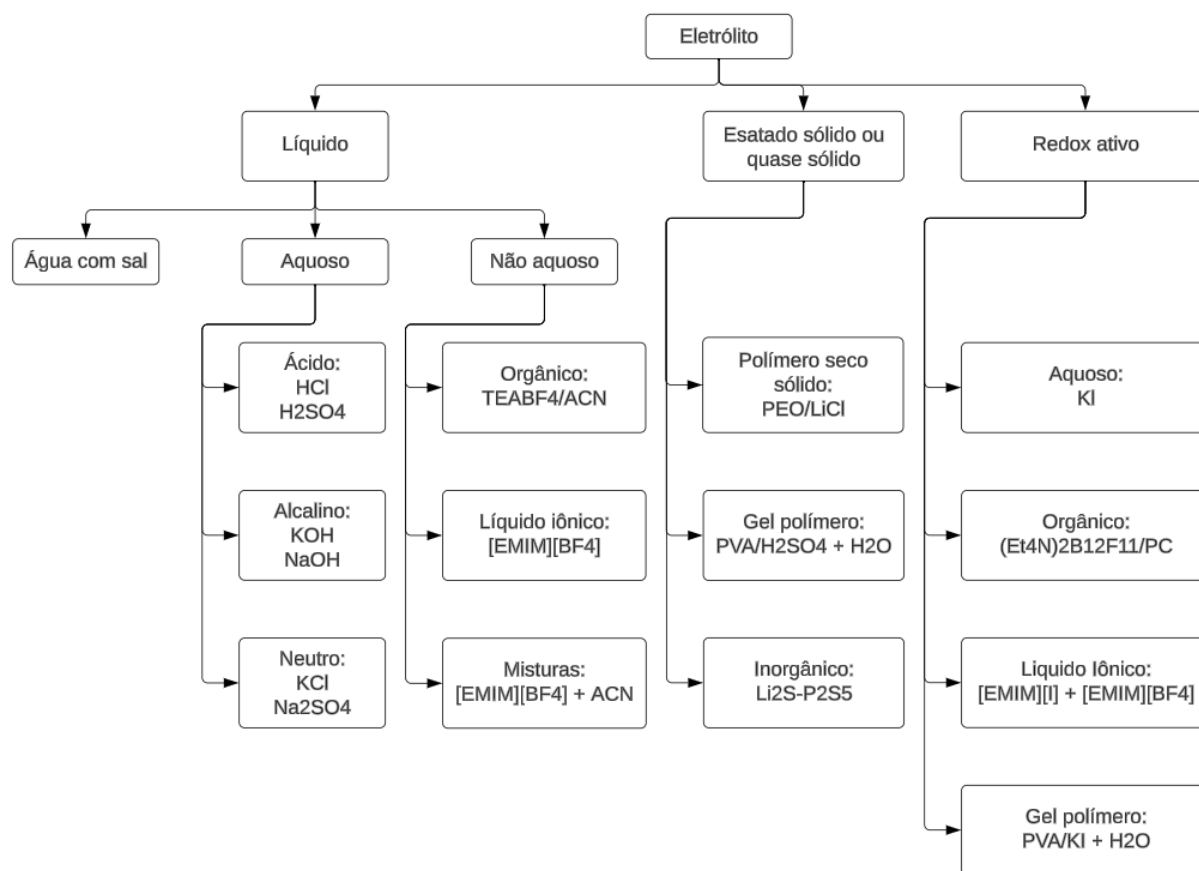


Figura 17 – Tipos de eletrólitos (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019)

normalmente observadas para a escolha do eletrólito aquoso são o tamanho dos portadores, a mobilidade dos íons, e a hidratação dos cátions e ânions, que afetam a capacitância específica e a condutividade (ZHONG et al., 2015). Outras características observadas são a janela de estabilidade potencial eletroquímica (*Electrochemical Stable Potential Windows - ESPW*) e a degradação por corrosão do eletrodo (ZHONG et al., 2015).

Contudo, há desvantagens em relação à densidade de energia, dado que possui uma janela estreita de tensão, o que faz com que não sejam muito interessantes para a indústria, além da estreita janela de trabalho de temperatura, pois este tipo de eletrólito se limita ao congelamento e à ebulição da água (ZHONG et al., 2015). Esse tipo de eletrólito é dividido em três grupos: ácido, com o H_2SO_4 sendo o mais usado em pesquisas devido à alta condutividade, empregado principalmente em SCs com eletrodo à base de carbono; alcalino, com o KOH sendo o mais estudado devido à sua alta condutividade iônica, porém, também são estudados NaOH e LiOH, podendo ser usados em EDLC à base de carbono, pseudocapacitores e híbridos; e neutros, que possuem janelas de potência maiores, maior segurança e menor corrosão, com os sais mais usados sendo os de Li, Na, K, Ca e Mg, com o Na_2SO_4 sendo o mais usado, empregados principalmente em pseudocapacitores e híbridos (ZHONG et al., 2015).

Já os eletrólitos não aquosos são divididos em três tipos: orgânico, líquido iônico e mistura, que consiste em um eletrólito que possui componentes orgânicos e componentes de líquido iônico juntos. Os eletrólitos orgânicos normalmente são constituídos por solventes orgânicos e sais condutores dissolvidos nos solventes (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Eles possuem uma janela de tensão entre 2.5 V e 2.9 V, o que aumenta a densidade de potência e a densidade de energia, sendo mais utilizados na produção de SC comerciais

(ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Os eletrólitos orgânicos são usados na produção de SC EDLC, pseudocapacitores e SC híbridos. Esses eletrólitos permitem o uso de materiais mais baratos para os coletores de corrente e para os invólucros (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Assim como nos eletrólitos aquosos, algumas características são observadas, como o tamanho do íon, condutividade, a natureza do solvente e dos sais, relação da interação íon-solvente e viscosidade, visto que essas características influenciam no desempenho dos SCs (PAL et al., 2019).

Apesar de o eletrólito orgânico ter uso difundido na área comercial, ele possui algumas desvantagens em relação ao eletrólito aquoso na aplicação em SCs. Os eletrólitos orgânicos possuem uma resistividade maior que a dos eletrólitos aquosos. Isso ocorre porque as moléculas dos eletrólitos orgânicos são maiores, requerendo que os poros dos eletrodos também sejam grandes (ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016; PAL et al., 2019). Outros pontos a serem observados são que os eletrólitos orgânicos possuem menor capacitância específica e menor condutividade em comparação com os eletrólitos aquosos (ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016). Também deve ser considerado o processo de fabricação, que para o eletrólito orgânico é mais complexo e mais caro que o do eletrólito aquoso, pois o processo de purificação e montagem são complicados, realizados em ambiente controlado para a remoção da água e de qualquer outra impureza que possa causar degradação e problemas durante a autodescarga (ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016). Além disso, os eletrólitos orgânicos, além de mais caros para serem produzidos, geram preocupações de segurança em relação à inflamabilidade, volatilidade e toxicidade (ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016).

Em relação ao eletrólito de líquido iônico (LI), também conhecido como sais fundidos à temperatura ambiente, sais fundidos a baixa temperatura e sais orgânicos fundidos, são sais compostos por cátions orgânicos, que são volumosos e assimétricos, e ânions inorgânicos, que são fracamente coordenantes. Eles se mantêm líquidos abaixo de 100 °C e permanecem assim por um intervalo de temperatura considerável, sendo classificados em três tipos: próticos, apróticos e zwitteriônicos (TRIGUEIRO, 2014; ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016; PAL et al., 2019). As pesquisas dos materiais LIs têm aumentado, principalmente quando aplicados aos SCs, devido às propriedades e estruturas únicas que permitem ajustes graças à grande variedade de cátions e ânions, motivo pelo qual são considerados "solventes de *design*", tendo janela de tensão entre 4.5 V a 6 V (TRIGUEIRO, 2014; ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016; PAL et al., 2019).

Algumas características são bem interessantes quando se fala de LIs, como a alta condutividade iônica, boa estabilidade química e térmica, ampla janela eletroquímica de potencial, pressão de vapor negligenciável, baixa toxicidade, elevadas densidades, inflamabilidade desprezível e a capacidade de se manter líquidos sob uma ampla faixa de temperatura (TRIGUEIRO, 2014; ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016; PAL et al., 2019). Deve-se observar que "LIs que apresentam frações polimerizáveis podem, após a polimerização, ser tratados como poli(líquidos iônicos) (PLI). Ou seja, é possível dizer que PLIs são polímeros nos quais as unidades de repetição contêm fragmentos de líquidos iônicos, ou ainda, PLIs são LIs polimerizados" (CORRÊA, 2018). Assim, os LIs são desenvolvidos com a incorporação de LI em matriz polimérica, formando o PLI, caracterizado por força mecânica, alta condutividade, estabilidade térmica e eletroquímica (ZHONG et al., 2015).

Todavia, há alguns pontos negativos a serem observados com relação aos LIs. Eles possuem baixa condutividade elétrica quando comparados aos eletrólitos aquosos, sendo a condutividade fortemente relacionada à viscosidade e dependente da temperatura. Além disso, o conhecimento das propriedades físicas e químicas é muito limitado devido ao número extenso de combinações diferentes possíveis (TRIGUEIRO, 2014; ZHONG et al., 2015). Outros pontos a serem observados são as restrições na produção, que exigem condições mais rigorosas em relação à secagem do carbono, visto que não pode haver água na célula. Por último, eles possuem

baixa compatibilidade com carbonos microporosos (ZHONG et al., 2015). No entanto, eles continuam sendo uma solução interessante para melhorar o desempenho de SCs (ZHONG et al., 2015).

4.2.2 Eletrólitos sólidos ou quase sólidos

Os eletrólitos sólidos ou quase sólidos têm ganhado muita visibilidade na pesquisa pela versatilidade em suas aplicações, como eletrônicos vestíveis, portáteis e impressos, microeletrônica e dispositivos flexíveis (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Esse tipo de eletrólito tem grande vantagem em relação aos outros pois não possui problema com encapsulamento e vazamento de líquidos, além de serem de fabricação simples e bons condutores iônicos. Eles também podem servir de separadores (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). A maior parte dos estudos desenvolvidos é baseada em eletrólitos poliméricos, com trabalho muito limitado focado em materiais sólidos inorgânicos, como os cerâmicos (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019).

Esses eletrólitos sólidos poliméricos são divididos em três tipos: polímero seco sólido (*Solid Polymer Electrolyte - SPE*), gel polímero (*Gel Polymer Electrolyte - GPE*) e polieletrólito, também conhecido como inorgânico (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Os SPEs possuem boa resistência mecânica, porém, possuem baixa condutividade iônica e área de superfície de contato eletrodo-eletrólito limitada, principalmente em eletrodos de material nanoporoso, o que resulta em maior *ESR* e baixa capacitância, reduzindo o desempenho e limitando o tipo de material a ser usado no eletrólito (ZHONG et al., 2015). Devido a esses problemas, o emprego desse tipo de eletrólito é muito limitado (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019).

Já os GPEs, também conhecidos como eletrólitos de estado quase sólido, são assim classificados devido à presença da fase líquida dentro deles (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Esse tipo de eletrólito é composto por uma matriz polimérica (polímero hospedeiro) e um eletrólito líquido (aquoso, solvente orgânico e LI), sendo esta fase líquida que proporciona maior concentração iônica, resultando em alta condutividade iônica, a maior entre os três tipos de eletrólitos sólidos (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Alguns solventes orgânicos e água podem ser usados como plastificantes; no entanto, quando a água é utilizada, esse eletrólito também pode ser chamado de eletrólito de polímero hidrogel (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Porém, a aplicação do eletrólito de polímero hidrogel possui a limitação da temperatura, devido à presença da água (ZHONG et al., 2015). A proporção entre a quantidade de polímero e plastificante interfere no grau de plastificação, afetando a temperatura da transformação vítrea dos GPEs (ZHONG et al., 2015). Como desvantagem desse eletrólito tem-se a baixa resistência mecânica, podendo causar curtos-circuitos internos (ZHONG et al., 2015).

No caso do eletrólito de estado sólido inorgânico, poucos estudos foram desenvolvidos quando comparados aos outros dois tipos (ZHONG et al., 2015). Eles possuem alta condutividade iônica, exibindo altas capacitâncias específicas, boa estabilidade térmica e alta resistência mecânica (ZHONG et al., 2015). No entanto, são pouco dobráveis e quase nada flexíveis (ZHONG et al., 2015).

Esses eletrólitos, de estado sólido e quase sólido, são aplicados em EDLCs, pseudocapacitores e SC híbridos (ZHONG et al., 2015). Para desenvolvimento desses eletrólitos, alguns critérios devem ser levados em conta, incluindo alta condutividade iônica; alta estabilidade química, eletroquímica e térmica; estabilidade dimensional e resistência mecânica (ZHONG et al., 2015). Entretanto, existe dificuldade em obter tais características combinadas, sendo necessário, muitas vezes, equilibrar a condutividade iônica com a resistência mecânica (ZHONG et al., 2015).

4.2.3 Eletrólitos redox-ativo

Os eletrólitos redox-ativos contribuem para o aumento da capacitância específica porque neles ocorrem reações de oxidação/redução, aumentando a capacitância com reações Faradaicas (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Esses eletrólitos são divididos em três tipos: aquosos; não aquosos, subdivididos em orgânicos e LIIs; e sólidos, com gel polímero (ZHONG et al., 2015; PAL et al., 2019). Os eletrólitos redox-ativos aquosos apresentam alta capacitância devida à pseudocapacitância que fornecem, e são aplicados em pseudocapacitores, SCs assimétricos e SCs híbridos (ZHONG et al., 2015). Os eletrólitos redox-ativos não aquosos conseguem alcançar tensões mais elevadas, proporcionando maior densidade de energia (ZHONG et al., 2015). Por fim, os eletrólitos redox-ativos sólidos também apresentam maior capacitância específica e maior densidade de energia, indicando tensões de trabalho mais elevadas (ZHONG et al., 2015).

4.3 Separadores

Os separadores estão entre os eletrodos e têm como objetivo evitar o contato entre eles, prevenindo assim um curto-circuito (ZHONG et al., 2015; WESLING et al., 2020). Para serem adequados a um supercapacitor, precisam ter algumas características, incluindo: menor resistência possível para transferência de íons e grande isolamento eletrônico, estabilidade química e eletroquímica no eletrólito e boa resistência mecânica para aumentar a durabilidade do SC (ZHONG et al., 2015; WESLING et al., 2020). A escolha do separador depende do tipo de eletrólito, dos eletrodos, da tensão de operação e da temperatura de trabalho (ZHONG et al., 2015; WESLING et al., 2020). Normalmente, isolantes finos e com alta porosidade são ideais para esse uso, sendo os mais comuns a fibra de vidro, membranas poliméricas e celulose (ZHONG et al., 2015; WESLING et al., 2020).

4.4 Supercapacitor comercial

Os dispositivos conhecidos como EDLCs são amplamente comercializados como SCs e não envolvem armazenamento de carga faradaica, armazenando carga apenas por meio da absorção controlada dos íons na superfície do material (SAMPAIO, 2021). Dessa forma, o mecanismo de armazenamento de carga através do mecanismo capacitivo leva o dispositivo a ter alta potência e carregamento rápido (SAMPAIO, 2021). Esse conceito foi desenvolvido por Hermann Von Helmholtz, um físico alemão, que estudou o dispositivo, desenvolvendo e modelando o conceito de dupla camada elétrica no século XIX (SAMPAIO, 2021). Entretanto, somente em 1957 o EDLC foi usado para armazenamento de carga, sendo demonstrado e patenteado por H. I. Becker da *General Electric* (GE). Ele usava eletrodos porosos de carbono em um eletrólito aquoso (LU, 2013; SAMPAIO, 2021).

No entanto, somente em 1966 foi concedida uma patente a R. A. Rightmaire da *Standard Oil Company* (SOHIO) juntamente com D. L. Boss, também da SOHIO, que reconhecia que o dispositivo em questão realmente armazenava carga elétrica na dupla camada elétrica e não de forma faradaica, na interface do eletrodo e a solução do eletrólito (LU, 2013; SAMPAIO, 2021). Logo, o primeiro SC EDLC comercial foi produzido pela SOHIO e era feito com eletrodos de pasta de carbono, imerso em um eletrólito e separado por um separador permeável a íons (SAMPAIO, 2021). Entretanto, como não teve muitas vendas, a SOHIO transferiu a licença para *Nippon Electric Company* (NEC) em 1971, que aprimorou e comercializou o EDLC para aplicações em sistemas de *backup* de memória (LU, 2013; SAMPAIO, 2021). Atualmente, há várias

empresas ao redor do mundo que comercializam EDLCs de alta performance baseados em carbono poroso (LU, 2013; SAMPAIO, 2021).

4.5 Figura de mérito

Para especificar um capacitor, é necessário conhecer algumas características fundamentais, incluindo: a capacitância da célula, a capacitância específica, ESR , a densidade de energia, a densidade de potência, eficiência coulombica e a eficiência energética. Para calcular as figuras de mérito, o teste utilizado neste trabalho foi a ciclagem galvanostática de carga e descarga a corrente constante. Falando de capacitância, segundo Alexandre (2019), ela é a proporcionalidade da quantidade de carga acumulada nos eletrodos juntamente com a natureza do eletrólito. A capacitância da célula (C_{cell}) para um capacitor perfeitamente simétrico é calculada seguindo a Equação 4.1:

$$C_{cel} = \frac{I}{\frac{\Delta V}{\Delta t}} \quad (4.1)$$

Onde C_{cell} é a capacitância da célula em Farad, I pode ser a corrente média ou a corrente usada, dependendo do teste analisado, $\Delta V/\Delta t$ pode ser a velocidade de varredura ou a inclinação da reta de descarga, de acordo com o teste a ser realizado (TRIGUEIRO, 2014), neste caso, a ciclagem galvanostática.

A ciclagem galvanostática tem o intuito de determinar como o dispositivo se comporta no início da operação, avaliando se o dispositivo mantém o desempenho desejado após uma certa quantidade de ciclos (TRIGUEIRO, 2014). Com este teste é possível calcular a capacitância específica do dispositivo, a reversibilidade dos ciclos de carga e descarga, a densidade de energia e a densidade de potência. É desejável que esses parâmetros alcancem o maior valor possível (TRIGUEIRO, 2014). Para o cálculo da C_{esp} , o $\Delta V/\Delta t$ é dado pela inclinação da curva de descarga (TRIGUEIRO, 2014). Este termo é obtido através da Equação 4.2:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{max} - \frac{1}{2}V_{max}}{T_2 - T_1} \quad (4.2)$$

Onde V_{max} é o potencial máximo na curva de descarga após a queda ôhmica, T_1 é o tempo correspondente a V_{max} e T_2 é o tempo correspondente a $(1/2)V_{max}$.

Entretanto, quando o capacitor é assimétrico a equação usada é a 4.3:

$$C_{cel} = \frac{i \int V dt_{desc}}{V_{desc}^2} \quad (4.3)$$

Onde i é a corrente aplicada, $V dt_{desc}$ é a área sob a curva de potencial da célula da tensão em função do tempo e V_{desc} é o potencial no início da descarga (ORTEGA, 2017; COSTA, 2021).

Já a capacitância específica (C_{esp}) é dada pela Equação 4.4:

$$C_{esp} = \frac{2C_{cel}}{m} \quad (4.4)$$

Onde m é a massa de material ativo do eletrodo, dado em gramas (TRIGUEIRO, 2014).

A *ESR*, quando muito alta, aumenta o tempo tanto da carga quanto da descarga do SC, pois limita a corrente no SC (FERREIRA, 2022). Para calcular a *ESR*, é necessário realizar um teste chamado método da interrupção de corrente:

O valor da resistência em série equivalente (*ESR*) pode ser calculado a partir do valor instantâneo da queda de potencial produzido pela interrupção de corrente auxiliada por uma corrente de descarga constante (corrente controlada), ou seja: após o capacitor estar carregado faz-se uma alteração instantânea no valor de corrente de descarga livre por meio de uma chave comutadora ou gatilho eletrônico, o que permite que uma corrente de, por exemplo, décimos de microampère passe a ser de algumas centenas de microampère durante alguns milésimos de segundo, o que caracteriza uma queda abrupta de potencial. (FERNANDEZ, 2016, p. 50)

A seguir, as Equações 4.5 e 4.6 são utilizadas para o cálculo da *ESR* durante o teste de interrupção de corrente:

$$V_{fall} = v_{sc}(tf') - v_{sc}(tf'') \quad (4.5)$$

$$ESR = \frac{V_{fall} + i_{amp}(tf') \cdot R_{amp} - I_{amp} \cdot R_{amp}}{(i_{amp}(tf') - I_{amp})} \quad (4.6)$$

Onde V_{fall} é o valor da diferença entre o potencial ao termino do processo de descarga livre e ao início do processo de descarga controlada, $v_{sc}(tf')$ é o valor da tensão ao final do processo de descarga livre, $v_{sc}(tf'')$ é o valor da tensão no início do processo de descarga controlada, $i_{amp}(tf')$ é o valor da corrente de descarga livre do SC através do osciloscópio, I_{amp} é o valor da corrente de descarga controlada do SC através da resistência variável, R_{amp} é a resistência do amperímetro e *ESR* é o valor da resistência equivalente em série (FERNANDEZ, 2016).

A densidade de energia e a densidade de potência são calculadas seguindo a Equação 4.7 e Equação 4.8, respectivamente:

$$E = \frac{C_{esp} V^2}{(2)(3,6)} \quad (4.7)$$

$$P = \frac{V^2}{4M \cdot ESR} \quad (4.8)$$

Onde V é a tensão máxima de carregamento e M é a massa total dos dois eletrodos (TRIGUEIRO, 2014; ALEXANDRE, 2019).

A densidade de energia é a quantidade de energia que o componente consegue armazenar, já a densidade de potência é a quantidade de energia que ele consegue fornecer por unidade de tempo (FERREIRA, 2022). Quanto maior a densidade de energia, mais tempo o sistema consegue fornecer energia ao sistema, já quanto maior a densidade de potência, mais energia ele consegue fornecer em um intervalo curto de tempo. Os

cálculos da densidade de energia e da densidade de potência também podem ser feitos seguindo as Equações 4.9 e 4.10:

$$E = \frac{i_c \int_{t(v_{max})}^{t(v_{min})} V dt_{desc}}{m} \quad (4.9)$$

$$P = \frac{3,6E}{\Delta t} \quad (4.10)$$

Onde i_c é a corrente de carregamento e Δt é o tempo de descarga (ALEXANDRE, 2019; JAIN; KANUNGO; TRIPATHI, 2019; FERREIRA, 2022).

Outras características usadas para a caracterização da amostra são a eficiência coulombica e a eficiência energética. A eficiência coulombica é usada para avaliar a eficiência de consumo de corrente que estão relacionados aos processos que degradam a célula como a decomposição do eletrodo/eletrolito a presença de pequenos curtos-circuitos e a processos de autodescarga (ORTEGA, 2017; COSTA, 2021). Já a eficiência energética quantifica a energia consumida em perdas energéticas envolvidas em processos irreversíveis, resistências internas presentes no dispositivo e pequenos curtos-circuitos. A baixa eficiência energética implica que o dispositivo consome mais energia na carga que fornece na descarga (ORTEGA, 2017). Sendo a eficiência coulombica calculada segundo a Equação 4.11 e a eficiência energética segundo a equação 4.12:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{\Delta t_{carg}} .100 \quad (4.11)$$

$$\eta = \frac{\int V dt_{desc}}{\int V dt_{carg}} .100 \quad (4.12)$$

Onde, Δt_{carg} é o tempo da carga e $\int V dt_{carg}$ é o cálculo da integral da curva de carga.

4.6 Modelo de circuito

Os circuitos equivalentes aplicados aos supercapacitores são de grande importância, pois servem para modelar e prever comportamentos dinâmicos dentro de circuitos eletrônicos (KANG et al., 2014). Como esses dispositivos são eletroquímicos, isso faz com que seus circuitos não sejam muito bem conhecidos (SHI; CROW, 2008). No entanto, com o uso constante desses dispositivos, vários modelos de circuitos foram propostos para SC EDLC (SHI; CROW, 2008; KANG et al., 2014).

Esses modelos foram divididos em classificações e cada classificação considera uma característica específica. Uma das classificações é baseada na abordagem de modelagem, dividida em três categorias: modelo matemático, modelo de circuito elétrico e modelo não elétrico, sendo o modelo de circuito elétrico o mais utilizado pelos engenheiros (SHI; CROW, 2008). Eles também podem ser classificados de acordo com o grau de complexidade, divididos em três categorias: circuito equivalente simples, modelo matemático complexo e modelo robusto (FERREIRA, 2022). Há também uma classificação relacionada à faixa de frequência de aplicação, dividida em duas categorias: aplicação de longo termo e aplicação altamente dinâmica (FERREIRA, 2022). Finalmente, a classificação de acordo com a forma de identificação é dividida em três categorias: modelos no domínio do tempo, modelos no domínio da frequência e modelo térmico eletroquímico (SEDLAKOVA et al., 2015).

Neste trabalho, o circuito equivalente utilizará modelos no domínio do tempo, representados por circuitos RC equivalentes, incluindo o modelo de circuito com dois ramos em paralelo para SCs proposto por Faranda (FARANDA, 2010) e adaptado por Ferreira para microssupercapacitores (FERREIRA, 2022), mostrado na Figura 18; e o circuito equivalente usando o modelo de redistribuição de cargas por difusão, proposto por Sedlakova (SEDLAKOVA et al., 2015), apresentado na Figura 19.

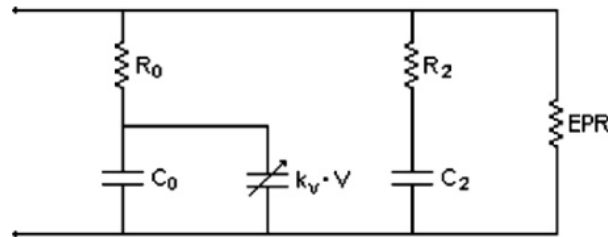


Figura 18 – Circuito equivalente modelo de dois ramos em paralelo (FARANDA, 2010)

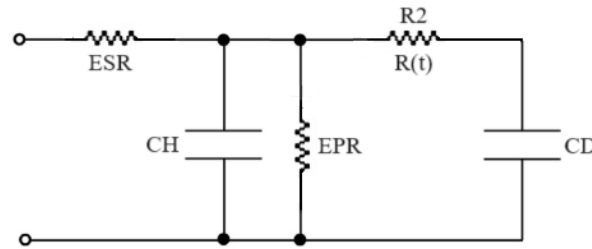


Figura 19 – Circuito equivalente modelo de redistribuição de cargas por difusão (SEDLAKOVA et al., 2015)

Para calcular esses modelos, o teste realizado é o de carga e autodescarga, que gera a curva da Figura 20. Este teste, também chamado de dissipação de energia, mostra a perda de energia armazenada pelo SC quando este não se encontra em uso (JARA, 2018; FERREIRA, 2022). Este é um processo indesejável em dispositivos que armazenam energia, pois o dispositivo perde carga elétrica mesmo desconectado de qualquer outro componente (JARA, 2018). Esse processo ocorre por inúmeras variáveis, mas a principal delas é a morfologia do eletrodo (JARA, 2018).

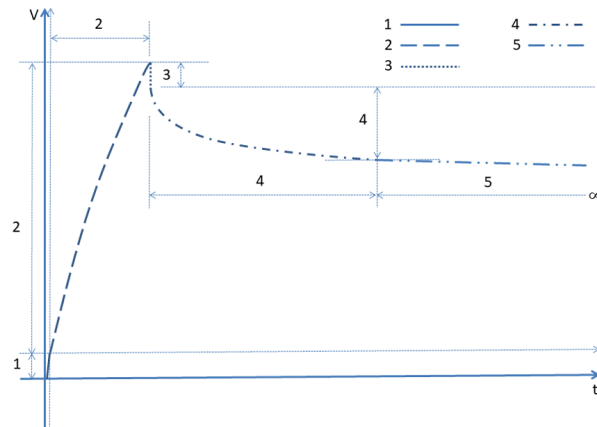


Figura 20 – Curva de carga e autodescarga (FERREIRA, 2022)

Para fazer o teste de autodescarga, é necessário carregar o SC com uma certa quantidade de carga, que

pode ser verificada pela DDP e pela corrente ao final do processo de carga (FERNANDEZ; FARIA JÚNIOR, 2016). Deve-se desconectar o SC e medir a variação do potencial ao longo de um intervalo de tempo, durante o qual ele permanecerá isolado de qualquer componente que possa descarregá-lo (FERNANDEZ; FARIA JÚNIOR, 2016). A tensão usada neste trabalho é a tensão nominal do capacitor e o tempo de autodescarga considerado foi de 40 minutos (FERREIRA, 2022). Com esses dados, é possível traçar a curva de carga e autodescarga, da qual se extraem os parâmetros do circuito equivalente.

A Figura 20 está dividida em 5 partes, em que cada parte corresponde a um componente do modelo de circuito de dois ramos em paralelo (FARANDA, 2010). Os segmentos 1 e 2 correspondem à carga e os segmentos 3 a 5 correspondem à autodescarga, Figura 21 (FERREIRA, 2022). O primeiro segmento é utilizado para o cálculo de R_0 , pois parte-se da premissa que a carga das capacitâncias ainda não iniciou, e a equação usada para esse cálculo é a 4.13 (FARANDA, 2010; FERREIRA, 2022; CAMPOS et al., 2023):

$$R_0 = \frac{\Delta v}{i_c} \quad (4.13)$$

Onde Δv é a diferença de tensão entre o instante t_0 e o instante t_1 .

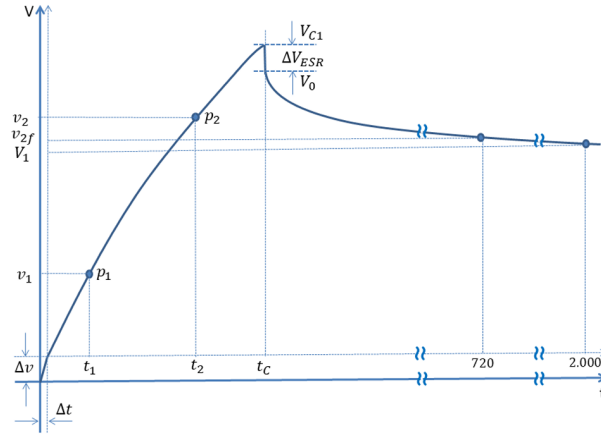


Figura 21 – Curva de carga e autodescarga (FERREIRA et al., 2023)

Ao passar para o segundo segmento, temos o carregamento das capacitâncias do primeiro ramo, C_0 e k_v . Para o cálculo dessas duas capacitâncias, é necessário usar os pontos p_1 e p_2 , sendo que p_1 representa aproximadamente 40% e p_2 aproximadamente 80% da tensão nominal (Figura 21) (FARANDA, 2010; FERREIRA et al., 2023). As equações usadas para o cálculo são as 4.14 e 4.15 (FARANDA, 2010; FERREIRA, 2022):

$$C_0 = \frac{t_1}{v_1} - \frac{v_1 t_2 - t_1 v_2}{v_2^2 - v_1 v_2} \quad (4.14)$$

$$k_v = 2 \frac{v_1 t_2 - t_1 v_2}{v_1 v_2^2 - v_1^2 v_2} \quad (4.15)$$

Já no terceiro segmento, observa-se uma queda brusca na tensão entre os terminais assim que se desliga a fonte, e o SC começa a descarregar na autodescarga (FERREIRA, 2022). Essa queda de tensão está

relacionada ao valor de R_2 , sendo essa parte relacionada com a redistribuição de carga por difusão e não pelo modelo de dois ramos (FERREIRA, 2022). Para o cálculo de R_2 , considera-se $\tau_2 = R_2 C_2 = 240$ segundos (FERREIRA, 2022). A equação para o cálculo de R_2 é apresentada pela equação 4.16 (FARANDA, 2010):

$$R_2 = \frac{\tau_2}{C_2} \quad (4.16)$$

No quarto segmento, o capacitor C_2 começa a ser carregado pelos capacitores do primeiro ramo, C_0 e k_v , até que as tensões nos três capacitores se igualem (FERREIRA, 2022). Para o cálculo de C_2 , o tempo usado é de 720 segundos e o valor da tensão é o de v_{2f} , Figura 21. Dessa forma, C_2 é dado por 4.17 (FARANDA, 2010; FERREIRA, 2022):

$$C_2 = \frac{i_c t_c - (C_0 + \frac{k_v v_{2f}}{2})}{v_{2f}} \quad (4.17)$$

Onde t_c é o tempo de carga do SC.

No quinto segmento, a inclinação da curva é dada pela resistência paralela equivalente (*Equivalent Parallel Resistance - EPR*), também chamada de R_{leak} , e se for maior que $2000 \text{ k}\Omega$, é possível considerar essa curva como uma reta (FERREIRA, 2022). A *EPR* é constante e considera apenas a fuga ôhmica para a autodescarga (FERREIRA, 2022). O cálculo da *EPR* é dado pela equação 4.18 (FERREIRA, 2022):

$$EPR = \frac{V_n}{i_l} \quad (4.18)$$

Onde V_n é a tensão nominal do SC e i_l é a corrente de fuga fornecida no *datasheet*.

Para o cálculo da *ESR*, relacionado ao segmento 3 da Figura 20, pode-se usar o modelo de redistribuição de cargas por difusão, mostrado na Figura 19. O cálculo da *ESR* é dado pela queda de tensão nos terminais do SC (ΔV_{ESR}) quando o circuito é desligado, dividido por i_c , conforme a seguinte equação 4.19 (SEDLAKOVA et al., 2015; FERREIRA, 2022):

$$ESR = \frac{\Delta V_{ESR}}{i_c} \quad (4.19)$$

Seguindo com o modelo de difusão, o cálculo de C_H , que está relacionado ao segmento 2 da Figura 20, é feito de acordo com a equação 4.20 (SEDLAKOVA et al., 2015; FERREIRA, 2022):

$$C_H = \frac{i_c t_c}{V_0} \quad (4.20)$$

Onde t_c é o tempo de carga.

O cálculo de C_D , que também está relacionado ao segmento 2 da Figura 20, é dado pela seguinte equação 4.21 (SEDLAKOVA et al., 2015; FERREIRA, 2022):

$$C_D = \frac{i_c t_c}{V_1} - C_H \quad (4.21)$$

Onde V_1 é a tensão no estado estacionário, após a redistribuição de carga.

Para o cálculo de R_2 no modelo de redistribuição, relacionado ao segmento 4 da Figura 20, o cálculo segue a equação 4.22 (SEDLAKOVA et al., 2015; FERREIRA, 2022):

$$R_2 = \frac{2V_0\sqrt{\tau_2}}{C_D V_1} \sqrt{t} \quad (4.22)$$

Segundo Sedlakova (2015), a *EPR* varia entre 100 kΩ e 1 MΩ, sendo considerado neste trabalho o valor de 100 kΩ em temperatura ambiente. A *EPR* representa as fugas de corrente no dispositivo, devido às características do eletrólito (FERREIRA, 2022).

4.7 Considerações finais do capítulo

Como a célula supercapacitiva aplicada à eletrônica de baixa potência vai trabalhar em ambiente espacial, algumas observações devem ser feitas quanto ao material de construção da célula. Para o eletrodo, os materiais mais interessantes são os de carbono, pois têm baixo custo de produção, um processo industrial de produção bem estabelecido. E, quando aplicados em SCs juntamente com eletrólitos aquosos e orgânicos, como o líquido iônico, eles possuem grande área de contato, disponibilidade, e processo de produção de eletrodos bem estabelecido, tornando-os candidatos ideais para a aplicação (KÖTZ; CARLEN, 2000; HALPER; ELLENBOGEN, 2006; GONZÁLEZ et al., 2016).

Seguindo esse raciocínio, não é interessante que a célula seja feita de eletrólito líquido aquoso, visto que o ponto de ebulição e de congelamento são os da água (ZHONG et al., 2015), o que obrigaria prever no projeto um sistema de proteção térmica para ela. Já o eletrólito líquido não aquoso, tipo poli(líquido iônico), possui ponto de fusão inferior de 100 °C e se mantém assim em uma ampla faixa de temperatura. Ele possui boa estabilidade eletroquímica e térmica, elevadas densidades, inflamabilidade desprezível, alta janela de tensão, ampla janela eletroquímica de potencial, baixa toxicidade, volatilidade negligenciável, alta condutividade iônica, e são resistentes à redução e oxidação, melhorando o desempenho, durabilidade, variedade de aplicações do SC, além de força mecânica (TRIGUEIRO, 2014; ZHONG et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2016; PAL et al., 2019). O eletrólito sólido possui uma capacitância menor, visto que a área de contato eletrodo-eletrólito é menor e a condutividade iônica é baixa (ZHONG et al., 2015). Em relação ao eletrólito redox-ativo, ele possui maior capacitância, maior densidade de energia e atinge tensões de trabalho maiores (ZHONG et al., 2015). Entretanto, como o objetivo deste trabalho é aplicar o SC a eletrônica de baixa potência, o SC redox-ativo não é interessante.

Em relação ao separador, a célula supercapacitiva aplicada à eletrônica de baixa potência não possui separador, e as características elétricas dela, assim como seu comportamento, serão verificados em testes realizados em laboratório. Os testes a serem realizados são a ciclagem galvanostática e a carga e autodescarga, que serão realizados a temperatura ambiente e com aumento de temperatura. Dessa forma, será possível verificar o comportamento dela através da observação das curvas traçadas, cálculo das características elétricas e dos modelos de circuito. Com esses dados, é possível atualizar o projeto do Sistema de Aquisição de Sinais Elétricos para Caracterização de Supercapacitores (SAAES^{SC}), que será testado e validado usando SCs

comerciais. A Tabela 5 mostra os materiais que mais se enquadram para a produção do SC e as características a serem calculadas.

Materiais	Eletrodo Eletrólito	Materiais de Carbono PLI - LI
Figuras de Mérito	Capacitância da célula para SC simétrico	$\frac{I}{\frac{\Delta V}{\Delta t}}$
	Variação da tensão pela variação do tempo	$\frac{V_{max}-\frac{V}{2}.V_{max}}{T_2-T_1}$
	Capacitância da célula para SC assimétrico	$C_{cel} = \frac{i \int V dt_{desc}}{V_{desc}^2}$
	Capacitância específica	$\frac{2.C_{cel}}{m}$
	Densidade de energia	$\frac{C_{esp} \cdot V^2}{2}$
	Densidade de potência	$\frac{E}{\Delta t}$
	ESR	$\frac{\Delta V_{ESR}}{i_c}$
Modelos de Circuitos	Dois ramos em paralelo	$R_0 = \frac{\Delta v}{i_c}$
		$C_0 = \frac{t_1}{v_1} - \frac{v_1 t_2 - t_1 v_2}{v_2^2 - v_1 v_2}$
		$k_v = 2 \frac{v_1 t_2 - t_1 v_2}{v_1 v_2^2 - v_1^2 v_2}$
		$R_2 = \frac{T_2}{C_2}$
		$C_2 = \frac{i_c t_c - (C_0 + \frac{k_v v_2 f}{2})}{v_2 f}$
	Modelo de redistribuição de cargas por difusão	$EPR = \frac{V_n}{i_l}$
		$ESR = \frac{\Delta V_{ESR}}{i_c}$
		$C_H = \frac{i_c t_c}{V_0}$
		$C_D = \frac{i_c t_c}{V_1} - C_H$
		$R_2 = \frac{2V_0 \sqrt{\tau_2}}{C_D V_1} \sqrt{t}$
		EPR = 100 kΩ

Tabela 5 – Características do SC (autor)

5 PROTOCOLO DE TESTES

Esta etapa do trabalho tem como objetivo apresentar o protocolo de testes para validação da carga útil. Para embarcar a célula, é necessário saber quais são os testes que simulam o ambiente espacial e quais os padrões usados internacionalmente para esses testes. Portanto, neste capítulo, são apresentados os testes padrão realizados em CubeSats, pois esses mesmos testes devem ser aplicados à carga útil.

Todo componente deve ser testado antes de ser embarcado em qualquer equipamento para evitar que ele cause algum dano à máquina, à operação e aos operadores, o que poderia causar grandes prejuízos (RICARDO, 1999; ANDRECIOLI, 2002; LIMA et al., 2010). Esses testes são realizados em ambiente controlado que simula as condições de operação do equipamento, fornecendo resultados que mostram como o componente se comportaria naquele ambiente específico de operação. Com isso, é possível prever falhas, possibilitando um melhor projeto. Para que os testes ocorram, é necessário que equipamentos e que metodologias de teste sejam desenvolvidos para que seja possível realizar as simulações.

Tendo em vista a importância da tecnologia dos SCs e observando a criação de novos materiais a serem empregados nesses dispositivos, vê-se também a necessidade de ter equipamentos que consigam extrair os dados para a caracterização desses materiais de forma precisa e confiável. Para isso, foi desenvolvido o SAAE^{SC}, com o objetivo de fazer a caracterização elétrica de SCs através da ciclagem galvanostática de carga e descarga a corrente constante e da carga e autodescarga.

Desse modo, torna-se possível extrair a capacitância, densidade de potência, densidade de energia e o modelo de circuito. As características elétricas são extraídas através do teste de ciclagem galvanostática de corrente contínua e os modelos de circuito através da carga e autodescarga (FERREIRA; SAUD; SALLES, 2021; CAMPOS et al., 2023). Em relação ao tamanho, ele é ideal para aplicações em bancadas e embarque em locais onde o espaço é restrito, pois trata-se de um equipamento portátil. Como será empregado em um CubeSat, isso é de extrema importância, visto que o espaço dentro desse tipo de satélite é restrito.

Outro ponto a ser observado são os testes e a metodologia a ser utilizada. No caso de CubeSat, os testes dinâmicos consistem em assinatura (ressonância), vibração senoidal, vibração randômica, testes de choque e quase estático; compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility - EMC*); testes de ambiente em termo-vácuo (*Thermal Vacuum - TVAC*) e inspeção visual. Caso seja necessário, outros testes podem ser realizados (BÜRGER, 2014). Os testes devem atender aos requisitos do lançador e, se o veículo de lançamento não for conhecido, devem seguir os padrões *General Environmental Verification Standard* (GEVS, GSFC-STD-7000A) e SMC-S-016 (JOHNSTONE, 2022).

Há também outras normas que podem ser usadas, como a *Space Engineering Verification* (ECSS-E-ST-10-02C) (2009) e a *Space Engineering Testing* (ECSS-E-ST-10-03) (2012), que são as normas europeias (BÜRGER, 2014). Contudo, como se trata de um SC novo, é necessário que outros testes sejam realizados para obter algumas características do SC, como temperatura máxima e mínima para degradação do eletrodo ou do eletrólito, assinatura, teste de aceleração, teste de vibração senoidal, e teste de radiação (CHIN; GREEN; BRANDON, 2018; HE; WANG; ZHANG, 2021).

Os testes seguem um fluxo de testes para CubeSat, começando pela qualificação, que é realizada em unidades idênticas ao modelo de voo do CubeSat; o *protoflight*, que é o *hardware* de voo (COAN; HIRSHORN; MORELAND, 2017); a aceitação, parte dos testes extras após a integração do sistema; e o voo, que é o lançamento do CubeSat (JOHNSTONE, 2022). A Figura 22 mostra o fluxo de testes de um CubeSat.

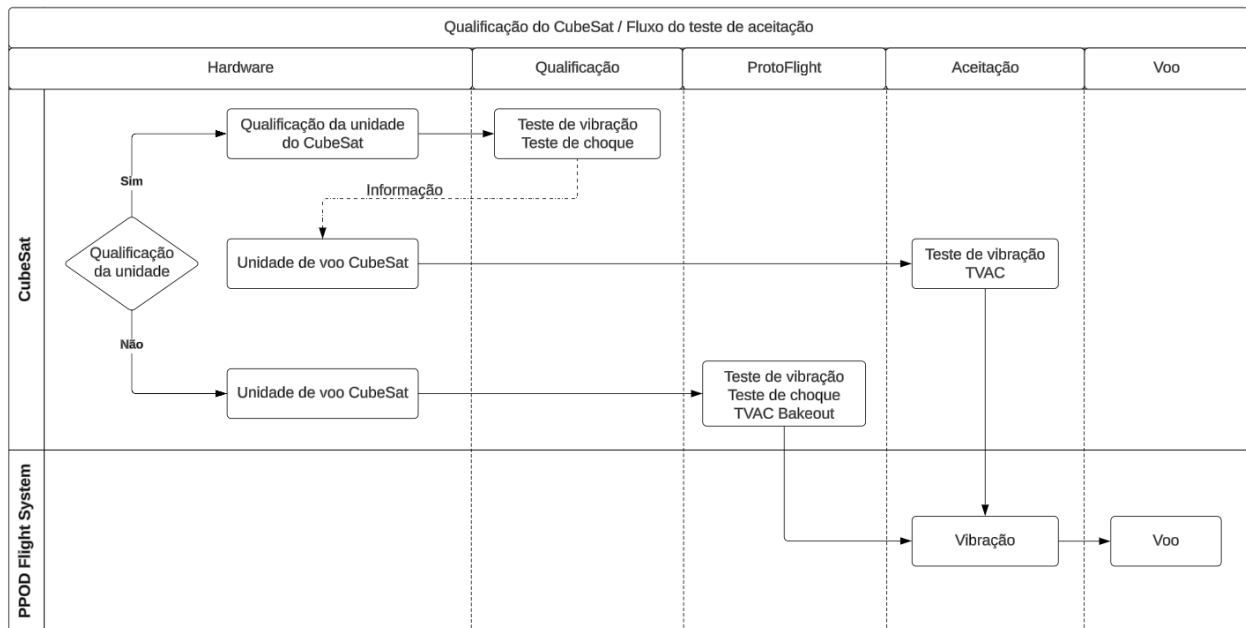


Figura 22 – Diagrama geral do fluxo de teste de CubeSat (JOHNSTONE, 2022)

Os testes são divididos em três tipos: ambientais (testes que simulam as condições em que o equipamento irá operar, englobando ambientes naturais ou induzidos), funcionais (verificam se houve alguma avaria no sistema elétrico do CubeSat durante o transporte ou algum teste feito), e de desempenho (verifica se o sistema elétrico e mecânico sofrem alguma avaria quando submetidos a condições iguais ou mais brandas que as descritas no projeto). Esses testes possuem três níveis, sendo eles: desenvolvimento (avaliação prévia do projeto), qualificação (testes ambientais, funcionais e de desempenho, com um nível mais intenso que o ambiente operacional, aplicados a um modelo idêntico ao de voo, porém inviabilizam o voo desse dispositivo) e o teste de aceitação (testes funcionais e ambientais que avaliam o desempenho do *hardware* de voo, para verificar se há algum defeito sem estressar o modelo de voo) (BÜRGER, 2014).

Para o desenvolvimento dos testes, há alguns requisitos a serem seguidos que determinam o tipo de instalação a ser usada, para garantir a qualidade dos testes, sendo: sala limpa, instalações de teste de vibração, instalações de teste acústico, instalação de propriedades de massa; câmara de termo-vácuo, instalações de teste de compatibilidade eletromagnética, instalações de testes magnéticos, instalações de testes de radiofrequência, instalação do local de lançamento para processamento de carga útil e instalação do local de lançamento para procedimentos perigosos (BÜRGER, 2014).

5.1 Descrição dos testes a serem realizados em CubeSat

Os testes a serem realizados em um CubeSat são os testes dinâmicos, que consistem em assinatura (ressonância), vibração senoidal, vibração randômica, teste de choque e quase estático; compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility - EMC*); testes de ambiente termo-vácuo (*Thermal Vacuum - TVAC*) e inspeção visual (BÜRGER, 2014). Para o teste de radiação, é necessário saber em qual órbita o CubeSat irá operar, pois isso determina o tipo de radiação a que ele estará sujeito. Para todos os testes, é necessária proteção contra descarga elétrica estática (*Electro Static Discharge - ESD*).

Como o SC estará embarcado no CubeSat, ele também estará sujeito às mesmas condições. Portanto,

é necessário que ele seja submetido aos mesmos testes para verificar a necessidade de proteção contra as adversidades do ambiente hostil a que estará submetido. A descrição dos testes do CubeSat a serem realizados no SC, com o acréscimo dos testes de temperatura, estático e dinâmico, está apresentada. A sequência completa de testes está representada na Figura 23.

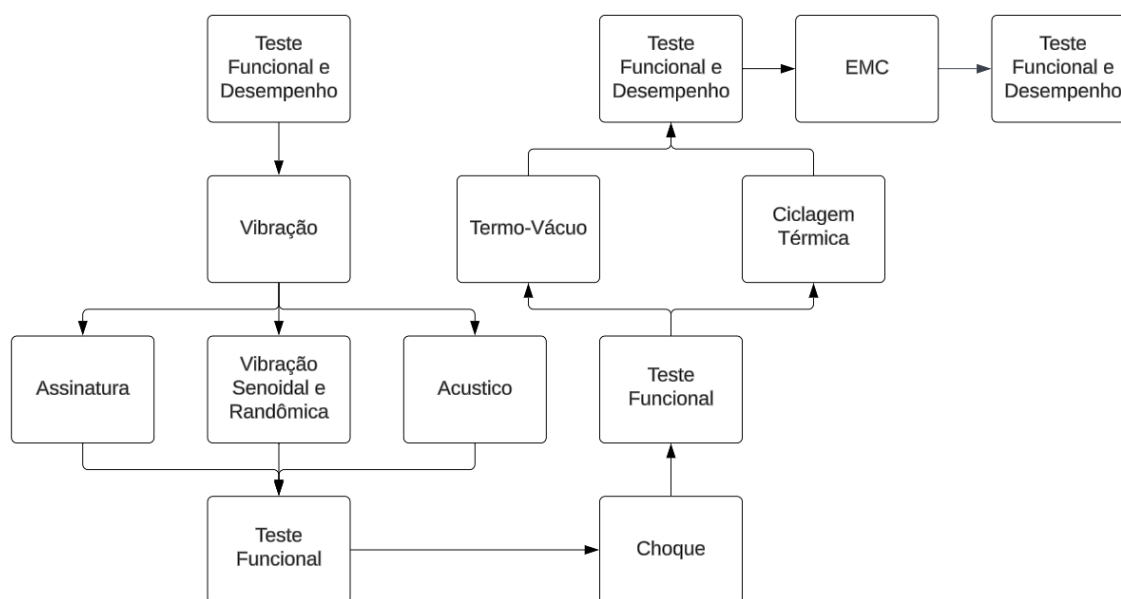


Figura 23 – Sequência de teste adaptado (WERTZ et al., 1999; BÜRGER, 2014)

5.1.1 Testes dinâmicos

Os testes dinâmicos consistem no teste de assinatura, também chamado de ressonância, nos testes de vibração senoidal, no teste de vibração randômica, no teste de choque e no quase estático. Como em todo teste, é necessário que haja uma tolerância, que pode ser vista na Tabela 6 (BÜRGER, 2014). Todas as informações desta seção foram obtidas do trabalho de Bürger (2014).

5.1.1.1 Teste de assinatura (ressonância)

O teste de assinatura é feito para definir em quais frequências o equipamento entra em ressonância. Para determinar as primeiras frequências, é necessário realizar um teste de busca senoidal com baixos níveis de amplitude, variando de 5 Hz a 2000 Hz de frequência, com 0.5 g de amplitude e taxa de varredura de 2 oct/min. Os parâmetros são os mesmos tanto para o teste de qualificação quanto para o teste de aceitação, e a vibração natural de um CubeSat deve ser maior que 90 Hz.

5.1.1.2 Teste de vibração senoidal

Este teste tem a finalidade de realizar simulações com excitações quase harmônicas de baixa frequência relacionadas ao lançamento, na faixa de 5 Hz a 100 Hz. A Tabela 7 mostra as frequências de teste.

5.1.1.3 Teste de vibração randômica

O teste de vibração randômica simula cargas geradas do ambiente acústico do lançador que surgem durante os seus diferentes estágios. Ele depende do tipo de lançador usado. Para o lançador Falcon 9, por exemplo, a

Teste	Parâmetros	Tolerância
Vibração Senoidal	Frequência	+/- 2% ou 1 Hz (seja qual for maior)
	Amplitude	+/- 10%
	Taxa de varredura	+/- 5%
Vibração Randômica	Frequência	+/- 5% ou 1 Hz (seja qual for maior)
	PSD de 20 Hz a 500 Hz	-1 / 3 dB para Qualificação
	(largura de banda do filtro 25 Hz ou menos)	-3 / 1.5 dB para Aceitação
	PSD de 20 Hz a 500 Hz	-1 / 3 dB para Qualificação
	(largura de banda do filtro 50 Hz ou menos)	-3 / 1.5 dB para Aceitação
	Geral aleatória Grms	+/- 10%
Teste de Choque	Tempo de teste	0 / + 10%
	Amplitude do espectro de resposta (frequência central 1/6 oitava)	+/- 6 dB (com 30% das amplitudes de frequência centrais de resposta espectral maiores que especificações nominais de teste)
	Duração do choque	0 / + 20%
	<= 20 ms	0 / + 10%
	>20 ms	0 / + 10%
	Nível de choque	0 / + 20%

Tabela 6 – Tolerância aceita nos testes (BÜRGER, 2014)

Frequência (Hz)	Amplitude (g) para Qualificação	Amplitude (g) para Aceitação
5	0,93	0,5
10	3,75	2
100	3,75	2
Taxa de varredura	2 oct/min	4 oct/min

Tabela 7 – Frequência e tempo do teste de vibração senoidal (BÜRGER, 2014)

Tabela 8 mostra os parâmetros do teste.

Frequência (Hz)	PSD (g^2/Hz)	
	Qualificação	Aceitação
20	0,026	0,013
20-50	6 dB/oct	6 dB/oct
50-800	0,16	0,8
800-2000	-6 dB/oct	-6 dB/oct
2000	0,026	0,013
RMS	14.1 Grms	10 Grms
Tempo de ensaio	2 min/eixo	1 min/eixo

Tabela 8 – Frequência e tempo do teste de vibração randômica para Falcon 9 (BÜRGER, 2014)

5.1.1.4 Teste de choque

O teste de choque, também chamado de *pyroshock*, simula as cargas de choque aplicadas no CubeSat, ocorridas durante eventos de separação pirotécnica. A Tabela 9 mostra os parâmetros de teste.

5.1.1.5 Teste quase estático

O teste quase estático tem como objetivo simular as cargas quase estáticas que serão geradas principalmente durante a ascensão do veículo lançador, e, para CubeSat, as cargas máximas previstas são de 20 g aplicadas

Frequência (Hz)	Amplitude (g) para Qualificação
100	50
1000	2000
10000	2000
Número de choques	5/eixo

Tabela 9 – Parâmetros para o teste de choque (BÜRGER, 2014)

em cada eixo ortogonal de forma não simultânea.

5.1.2 Teste de ambiente termo-vácuo

Os testes de temperatura são divididos em dois tipos: o *bake-out*, que é o único obrigatório, e o teste de ciclagem térmica com vácuo, que é usado apenas quando necessário (BÜRGER, 2014). Todas as informações desta seção foram obtidas do trabalho de Bürger (2014).

5.1.2.1 Teste de *bake-out*

O teste de *bake-out* deve ser combinado com o teste de ciclagem térmica com vácuo. Esse teste será realizado no vácuo $< 10^{-5}$ Pa com uma temperatura de 70 °C durante uma hora.

5.1.2.2 Teste de ciclagem térmica com vácuo

Para este teste, aplica-se uma taxa de variação de temperatura < 20 °C/min e a sequência de testes deve seguir a Tabela 10 e as Figuras 24 e 25. A Tabela 11 descreve a legenda da sequência de teste.

	Qualificação	Aceitação
Número de ciclos	8	4
Temperatura MIN	Tmin = -55 °C	Tmin = -40 °C
Temperatura MAX	Tmax = 130 °C	Tmax = 120 °C
Duração na Tmin	45 min	45 min
Duração na Tmax	45 min	45 min
Taxa de Temperatura (aquecimento)	~2 - 4 °C/min	
Taxa de Temperatura (resfriamento)	~0,7 - 1 °C/min	
Pressão	$< 10^{-5}$ Pa	
Critério de Estabilização	1 °C / 10 min	

Tabela 10 – Níveis de teste vácuo térmico adaptado (BÜRGER, 2014)

5.1.3 Teste de radiação

Segundo Holmes-Siecle (2002) citado por Claro e Santos (2005), o ambiente das radiações no espaço é composto pelos raios cósmicos, plasmas de prótons e elétrons contidos no espaço, radiação aprisionada no campo magnético da Terra e pelas erupções solares. Dentre as possíveis fontes de radiação capazes de causar danos aos componentes eletrônicos presentes em um CubeSat em LEO, a mais preocupante fonte de radiação são os prótons e elétrons que se encontram presos na região interna do cinturão de Van Allen, na magnetosfera, segundo Mayanbari et al. (2011) citado por Carmo, Mooreira e Menea (2021).

Os efeitos da radiação nos componentes embarcados podem ser divididos em três categorias diferentes, sendo elas: Dose Total Ionizante (*Total Ionizing Dose – TID*), que é a “degradação cumulativa de longo

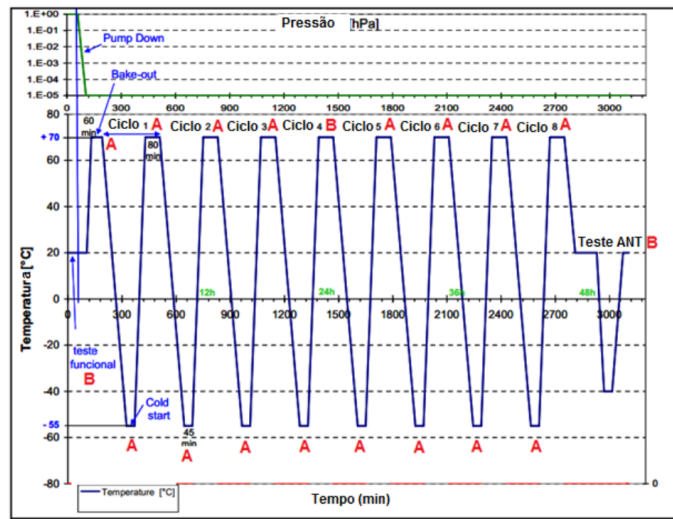


Figura 24 – Perfil de teste de ciclagem térmica com vácuo (BÜRGER, 2014)

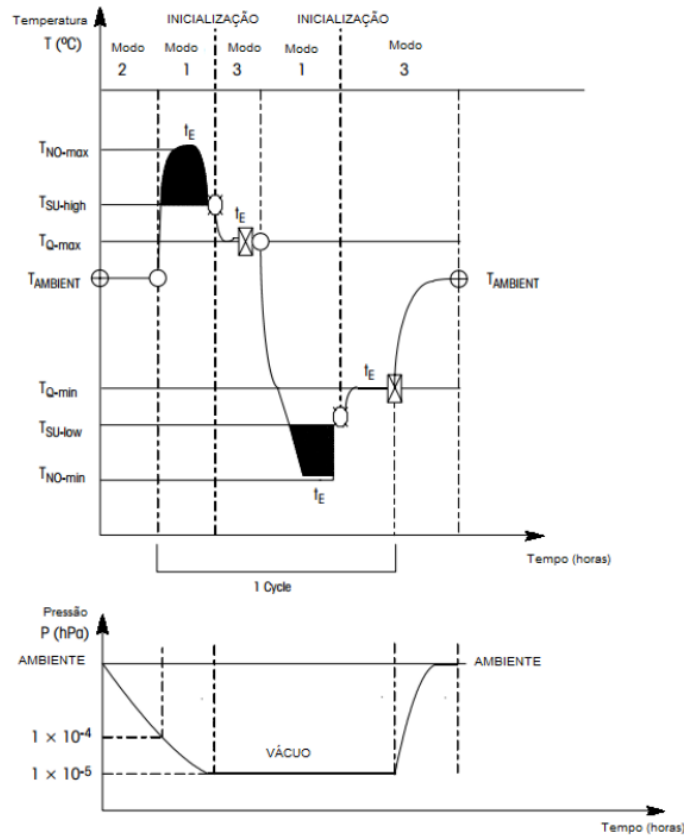


Figura 25 – Parâmetros de qualificação e sequência de teste de ciclagem térmica com vácuo (BÜRGER, 2014)

prazo”; Efeito de Evento Único (*Single Event Effects – SEE*), que ocorre “quando uma partícula ionizante incidente deposita energia suficiente para causar um efeito no componente”, podendo causar um efeito não destrutivo ou destrutivo; Dano por Deslocamento (*Displacement Damage – DD*), que é a “interação entre os núcleos dos elementos”, causando o “espalhamento da rede cristalina que compõe o componente” (CARMO; MOREIRA; MANEA, 2021).

Símbolo	Descrição
T	Temperatura do item de teste
$T_{AMBIENTE}$	Temperatura Ambiente
T_{NO-max}	Temperatura máxima não operacional
T_{NO-min}	Temperatura mínima não operacional
$T_{SU-high}$	Temperatura máxima de inicialização
T_{SU-low}	Temperatura mínima de inicialização
T_{Q-max}	Temperatura máxima de qualificação
T_{Q-min}	Temperatura mínima de qualificação
P	Pressão
MODE 1	Item não energizado
MODE 2	Funcionamento parcial
MODE 3	Funcionamento completo
⊕	Teste funcional e de desempenho inicial e final
⊗	Teste funcional e de desempenho intermediário
t_E	Tempo de espera
□	Inicialização
○	Desligamento

Tabela 11 – Legenda da sequência de testes (BÜRGER, 2014)

Apenas os conceitos teóricos não são capazes de prever o comportamento dos componentes eletrônicos quando submetidos à radiação. Isso faz com que seja necessário realizar testes de irradiação nos componentes. Entretanto, é difícil simular o ambiente espacial dentro dos laboratórios devido à quantidade combinada de vários tipos de radiação e à interação delas com os materiais que compõem a estrutura presente. Outro ponto a ser observado é que, na maioria das vezes, em laboratório, os espectros de energia obtidos representam somente faixas discretas do espectro total (CLARO; SANTOS, 2005). Para avaliar os danos de TID, que são os mais fáceis de serem reproduzidos, podem-se usar fontes de raios-X, raios gama ou elétrons; já para avaliar o SEE são usados aceleradores de partículas; e para DD utilizam-se aceleradores de elétrons ou prótons de baixa energia.

5.1.4 Inspeção visual

A inspeção visual consiste em verificar se alguma avaria visual é percebida no componente após cada teste. Ela se inicia com a verificação inicial da amostra, antes dos testes começarem, para identificar se está em condições de teste, e uma verificação ao final dos testes para constatar se ocorreu algum dano perceptível visualmente na amostra.

5.2 Considerações finais do capítulo

Os testes descritos neste capítulo resumem os testes aos quais um CubeSat é submetido, para verificar se ele suporta as condições ambientais simuladas. Juntamente com os testes de caracterização do SC, esses testes formam a base para o protocolo de testes do projeto da carga útil desse trabalho. Com os resultados desses testes, é possível prever o funcionamento da carga útil durante a missão e, assim, providenciar proteção a ela, caso seja necessário. Entretanto, esses testes não serão feitos na sua totalidade neste trabalho. O teste ambiental a ser realizado neste trabalho é o de aumento de temperatura de forma gradativa, pois é necessário entender o funcionamento da amostra de célula supercapacitiva aplicada à eletrônica de baixa potência, para

depois testá-la em condições ambientais simuladas. Os testes do protocolo de testes estão organizados na Tabela 12.

Testes dinâmicos	Teste de assinatura (ressonância)
	Teste de vibração senoidal
	Teste de vibração randômica
	Teste de choque
	Teste quase estático
Teste em ambiente termovácuo	Teste de <i>bake-out</i>
	Teste térmico com vácuo
Teste de radiação	Teste de raio X
	Teste em acelerador de partículas
	Teste em acelerador de elétrons ou prótons
Inspeção visual	-

Tabela 12 – Testes a serem realizados na carga útil antes do voo (autor)

6 PROTOCOLO DE VALIDAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO SAAES^{SC}

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar os resultados dos testes feitos na carga útil responsável pela interface entre o computador de bordo e a célula supercapacitiva com eletrólito sólido flexível aplicada à eletrônica de baixa potência. Esse dispositivo foi desenvolvido ao longo do processo de aquisição de materiais para a confecção da amostra da célula supercapacitiva com eletrólito de (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de (r-GO). Entretanto, não foi possível usar o SAAES^{SC} para realizar as medidas na amostra de célula supercapacitiva selecionada, pois a amostra precisava ser testada para fornecer os parâmetros elétricos para atualização do dispositivo de teste. Só após a adaptação do circuito ele será capaz de testar a amostra.

Ao validar ou extrair dados de algum equipamento ou componente, é necessário verificar quais são os testes usados e escolher quais testes são os de maior interesse. Para este trabalho, os testes escolhidos são o de ciclagem galvanostática de carga e descarga, que fornece características como a capacitância, densidade de energia, densidade de potência, eficiência coulombica e eficiência energética do SC; e o teste de carga e autodescarga, que fornece os circuitos equivalentes do SC. Para a validação do SAAES^{SC}, foram usados dois SCs comerciais, identificados por SCMR22D155PRBB0, fabricados pela AVX, cujas características de operação são 5.4 V de tensão nominal e 1.5 F de capacitância nominal (AVX,). Esses dois SCs foram chamados de SC1 e SC2.

Para a validação do equipamento projetado, o teste usado foi a ciclagem galvanostática, feito no SC1 e no SC2, usando o equipamento potenciostato multicanal VMP3, da empresa BioLogic, e o SAAES^{SC}. Ambos os testes foram feitos com tensão de 3.5 V e corrente de descarga de 200 mA, e a temperatura ambiente não foi controlada, variando entre 19 °C e 27 °C (INMET, 2023). Para o teste de ciclagem galvanostática, foram traçadas 21 curvas no VMP3, sendo que os valores dos parâmetros elétricos foram extraídos da 21ª curva.

Para o teste realizado pelo SAAES^{SC}, foram traçadas 55 curvas de ciclagem galvanostática, sendo as 20 primeiras descartadas e as 35 restantes usadas para extrair os parâmetros elétricos com os devidos estudos estatísticos. Para a extração desses parâmetros e dados estatísticos, uma rotina de programação foi desenvolvida no MATLAB e os dados foram comparados com os dados e curvas extraídos pelo potenciostato multicanal VMP3.

Posteriormente, os mesmos testes de ciclagem galvanostática foram feitos no SC2, porém usando a tensão nominal do SC, 5.4 V, e a corrente de carga e descarga de 500 mA. Assim, os dados extraídos foram comparados com os parâmetros especificados pelo fabricante.

Após a validação, o teste de carga e autodescarga, feito apenas no SC1, teve o intuito de extrair a curva do teste para que o circuito equivalente fosse extraído seguindo o modelo de dois ramos em paralelos (FARANDA, 2010). Essas medições foram feitas em ambiente não controlado, como as demais medições desse teste.

6.1 Teste e resultado experimental para a validação do SAAES^{SC}

Para a validação do SAAES^{SC}, usaram-se dois SCs modelo SCMR22D155PRBB0, chamados de SC1 e SC2, produzidos pela AVX, cujos valores de V_N e capacitância são 5.4 V e 1.5 F, respectivamente (AVX,).

Para a validação do SAAES^{SC}, usou-se o VMP3 Potenciostato/Galvanostato Multicanal, produzido pela Biologic, e a curva usada foi a da ciclagem galvanostática de carga e descarga (CAMPOS et al., 2023).

No processo de validação, foram traçadas 55 curvas, sendo as 20 primeiras curvas descartadas e as 35 curvas restantes usadas para a extração dos parâmetros estatísticos, calculados por uma rotina de programação desenvolvida no MATLAB, que foram posteriormente comparadas com a curva traçada pelo VMP3 Potenciostato/Galvanostato. A temperatura de teste não foi controlada, variando no dia entre 19 °C e 27 °C (INMET, 2023). Para o SC1 e o SC2 foi feito um primeiro teste cuja tensão usada foi de 3.5 V e corrente de carga e descarga de 200 mA, e para o SC2 foi feito um segundo teste cuja tensão usada foi a nominal, de 5.4 V, e corrente de carga e descarga de 500 mA. As curvas extraídas pelo SAAES^{SC} do SC1 e SC2 no primeiro teste foram comparadas à curva extraída do VMP3, e os dados calculados no segundo teste do SC2 foram comparados aos fornecidos pelo manual. A Equação usada para o cálculo da capacitância da célula foi a 4.1.

Ao realizar o teste de ciclagem galvanostática de carga e descarga no SC1 e no SC2 e comparar a curva traçada pelo VMP3, observa-se que as curvas estão praticamente iguais, com um desvio padrão muito baixo, como pode ser visto na Figura 26. Observa-se que o desvio padrão máximo é de 0.101 V e se encontra no ponto de inflexão da curva. Isso ocorre porque o sistema pode acabar pegando um ponto um pouco depois ou um pouco antes do ponto de inflexão. Para resolver esse problema, a solução seria aumentar o número de pontos medidos nesse intervalo de tempo.

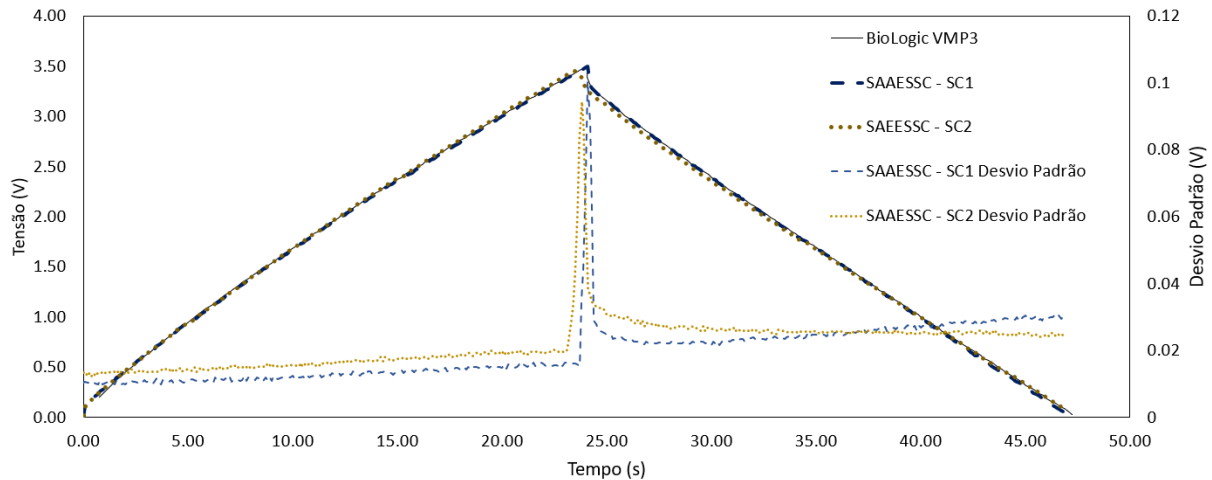


Figura 26 – Gráfico de Tensão X Tempo da ciclagem galvanostática de carga e descarga do SAAES^{SC} e do VMP3 com o desvio padrão, sendo que a curva preta representa a curva traçada pelo VMP3, é considerada a medida ouro, a curva azul escura, tracejada e grossa representa a medida da média das 35 curvas traçadas pelo SAAES^{SC} para o SC1, a curva bege escura, pontilhada e grossa representa a média das 35 curvas traçadas pelo SAAES^{SC} para o SC2, a curva azul clara, fina e tracejada representa o desvio padrão das 35 curvas traçadas pelo SAAES^{SC} para o SC1 e a curva bege clara, fina e pontilhada representa o desvio padrão das 35 curvas traçadas pelo SAAES^{SC} para o SC2 (CAMPOS et al., 2023)

Outra observação a ser feita é em relação à curva gerada no desvio padrão, desvio que é inerente ao equipamento. Ela se comporta quase como uma reta decrescente, sendo menor no início da medição e um pouco maior no final da medição. Observa-se também que, através da repetibilidade e do desvio padrão, o sistema é preciso e exato, ou seja, ele gera resultados praticamente iguais com a repetição do processo e com valores praticamente iguais aos do VMP3. Isso ocorre porque a repetibilidade no SC1 foi de 0,0033 e no SC2

foi de 0,0037. Juntamente com o erro relativo entre o SAAES^{SC} e o VMP3 de 0,02% e o erro absoluto entre eles de 0.0003 V, para o SC1. Para o SC2, o erro absoluto em relação ao *datasheet* foi de 5,55% e o erro relativo de -0.833 V, que se encontram dentro da tolerância do fabricante.

Ao fazer os testes no SC1, que seguiram o padrão de testes do VMP3, a capacitância encontrada foi de 1.4469 F pelo VMP3 e de 1.4472 F pelo SAAES^{SC}, valores que são praticamente iguais, reforçando a precisão do equipamento. Quanto ao SC2, este foi testado seguindo os parâmetros do fabricante. Segundo o *datasheet*, a capacitância nominal é de 1.5 F, com tolerância de +100%/-0%, e a do equipamento foi de 1.5833 F, dentro da tolerância do fabricante, corroborando para a precisão do SAAES^{SC}.

Após a validação usando o VMP3, foi feita e verificada a viabilidade de se usar o modelo de circuito equivalente de dois ramos em paralelo (Figura 18). Para isso foi usado o SC1, sendo extraído dele a curva de carga e autodescarga usando o SAAES^{SC} e um algoritmo em Python. A curva de carga e autodescarga coletada pelo SAAES^{SC} foi comparada a curva gerada na simulação do circuito equivalente e o que se observou foi uma similaridade entre essas curvas, mostrando que esse circuito atende aos objetivos desse trabalho. A Figura 27 mostra a curva gerada pelos dados coletados pelo SAAES^{SC} (V_s) e a curva simulada do circuito equivalente (V_{sim}), juntamente com a curva de diferença entre elas (V_{dif}). Baseando-se na curva extraída os valores do circuito equivalente foram $R_0 = 1.3256 \Omega$, $C_0 = 0.7668 \text{ F}$, $k_v = 0.2653 \text{ F} \cdot \text{V}$, $R_2 = 857.1428 \Omega$, $C_2 = 2.482 \text{ F}$ e $EPR = 50 \text{ k}\Omega$, o circuito está representado na Figura 28.

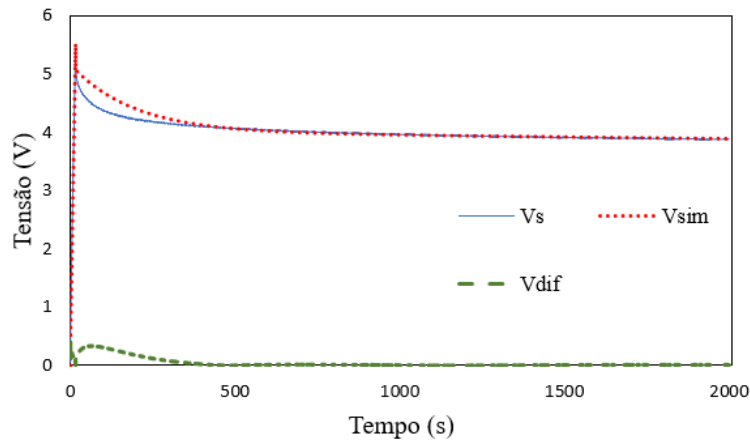


Figura 27 – Gráfico de Tensão X Tempo da carga e autodescarga (CAMPOS et al., 2023)

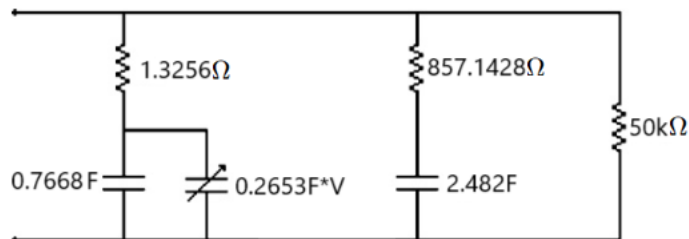


Figura 28 – Circuito equivalente pelo modelo de dois ramos em paralelo com os valores calculados (autor)

6.2 Considerações finais do capítulo

Esse dispositivo apresentou-se muito preciso e exato, com um desvio padrão muito pequeno quando comparado com os valores extraídos pelo VMP3 e com o valor fornecido pelo fabricante. O SAAES^{SC} apresentou valores de erro menores que 1% em relação ao valor medido pelo VMP3 e de 5,55% quando comparado ao fabricante, permanecendo dentro da tolerância especificada pelo fabricante. O equipamento também apresenta uma dinâmica de funcionamento onde o desvio padrão vai aumentando ao longo do teste, mas esse aumento não foi capaz de interferir na qualidade da medição feita. Outro ponto importante é a repetibilidade que o dispositivo forneceu, o que mostra que o equipamento projetado consegue repetir os testes com a mesma qualidade. Observa-se também que o circuito equivalente extraído apresentou curvas bem próximas às coletadas, o que implica que o modelo de circuito analisado pode ser usado para representar SC em circuitos de simulação. É importante salientar que as características de operação do SAAES^{SC} apresentado neste trabalho (Tabela 4) devem ser observadas para seu uso. Para caracterização de amostras com parâmetros distintos deve-se considerar outro equipamento de medição.

7 PROTOCOLO DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA SELECIONADA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados dos testes da amostra de célula supercapacitiva que será uma das cargas úteis testada em ambiente espacial, sendo uma das missões do PdQSat, CubeSat usado neste trabalho. Como essa célula supercapacitiva com eletrodo sólido flexível aplicada à eletrônica de baixa potência, cujo eletrólito de ionogel possui como matriz polimérica o poli(bis(trifluorometilsulfonil)imideto de N-alil-N-metilpirolidínio) e LI o bis(trifluorometilsulfonil)imideto de 1-metil-3-propil-pirolidínio) (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) e o eletrodo é de grafeno reduzido (r-GO) na proporção 90:10. É uma célula nova, seu comportamento não é completamente conhecido. Dessa forma, viu-se a necessidade de testar a amostra à temperatura ambiente e, posteriormente, com aumento de temperatura para verificar seu comportamento. Como a amostra ainda precisava ser testada para verificar as características elétricas e de funcionamento, não foi possível usar o SAAES^{SC} para caracterização elétrica dela, mas os resultados obtidos nos testes fornecerão dados para a adaptação do circuito do SAAES^{SC}.

Com a drástica variação de temperatura experimentada pelos componentes empregados em CubeSats, viu-se a necessidade de testá-los em diferentes temperaturas com o intuito de observar seu comportamento. A fim de verificar o funcionamento da célula supercapacitiva aplicada à eletrônica de baixa potência, a (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de (r-GO), foi realizada a variação de temperatura. O teste consiste em aumentar a temperatura de forma gradativa até atingir 120 °C, temperatura máxima atingida em LEO. Esse aumento parte da temperatura ambiente de 21 °C, subindo em degraus para 40 °C, depois 80 °C, até chegar a 120 °C. Em cada temperatura, o SC deve permanecer por um tempo sem que haja testes para que ele estabilize termicamente. Após atingir essa estabilidade, devem ser feitos testes de caracterização elétrica. Após o fim de cada rodada de testes a uma determinada temperatura, eleva-se a temperatura e o processo se repete. Dessa forma, é possível verificar como cada temperatura interfere no funcionamento da célula supercapacitiva. O teste é descrito na Figura 29.

7.1 Metodologia de teste feitos nas amostras

Para o teste, foi usada uma amostra. A metodologia foi dividida em seis etapas, sendo elas: a descrição da manufatura do dispositivo, a descrição do dispositivo e sua particularidade de massa, a descrição dos equipamentos usados, a montagem do experimento, a coleta de dados e o processamento dos dados coletados.

7.1.1 Descrição da Manufatura do Dispositivo (SC)

O SC foi produzido manualmente no laboratório do Grupo de Materiais Poliméricos do Departamento de Química (DQ) da UFMG, empregando um processo artesanal. A fabricação do SC envolveu duas etapas principais: a deposição dos eletrodos e a deposição do eletrólito.

• Deposição dos Eletrodos:

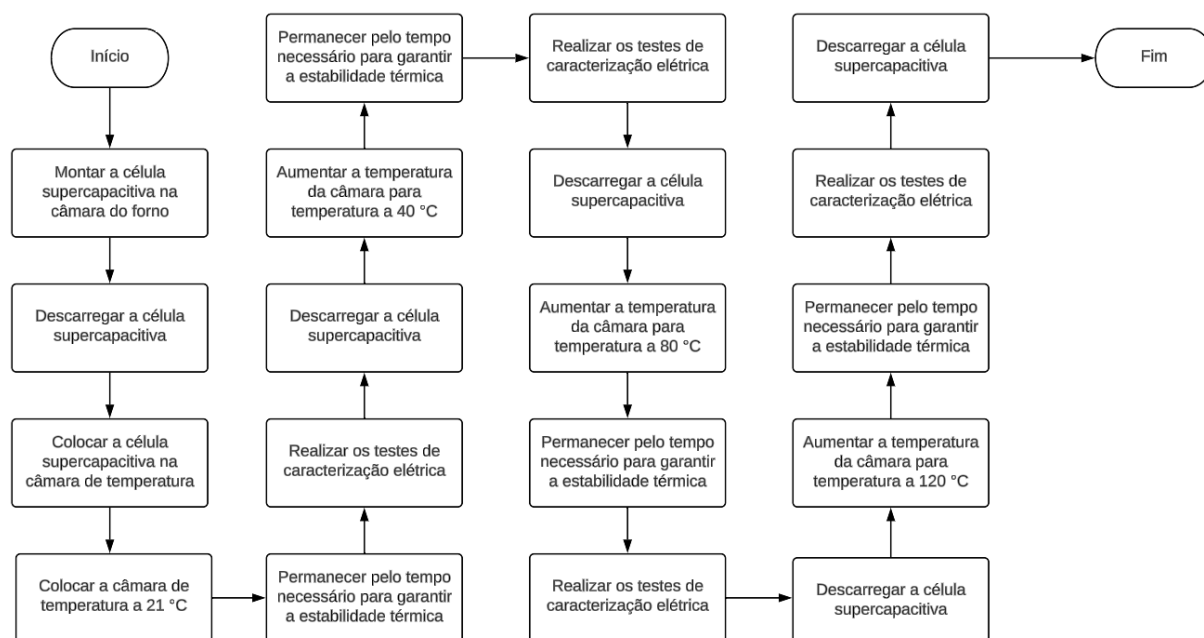


Figura 29 – Esquemático do teste de elevação de temperatura realizado na amostra (PLI/[A2M2Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de (r-GO) (autor)

o Os eletrodos foram produzidos "via *casting*", Figura 30, "com dispersão de 9 mg de material carbonoso em 15 ml de dispersante em ultrassom de banho por 3 h/25 °C" (ALEXANDRE, 2019). Ele foi depositado manualmente sobre o tarugo e o parafuso, componentes metálicos que servem como coletores de corrente.

o A massa dos coletores de corrente foi medida antes e depois da deposição para calcular a massa total do eletrodo depositado.



Figura 30 – Esquemático do preparo do eletrodo via *casting* (ALEXANDRE, 2019)

• Deposição do Eletrólito:

o O eletrólito, também em forma líquida, foi cuidadosamente depositado sobre os eletrodos (ALEXANDRE, 2019).

o Espera-se o tempo para a evaporação da acetona, usada para solubilizar o PLI/LI (ALEXANDRE, 2019).

• Descrição da montagem do SC:

o Após o eletrólito seco os lados do SC são dispostos um sobre o outro no formato que se assemelha a um

“sanduíche” (ALEXANDRE, 2019).

7.1.2 Descrição do Dispositivo

Três amostras de SCs foram fabricadas em tarugos e parafusos Figura 31. Entretanto, somente uma amostra foi usada para análise, a amostra escolhida apresentou as seguintes características de massa:

- **Amostra**

- o Massa total do material ativo dos eletrodos: 1.47 mg

- o Tarugo: 0.62 mg

- o Parafuso: 0.85 mg

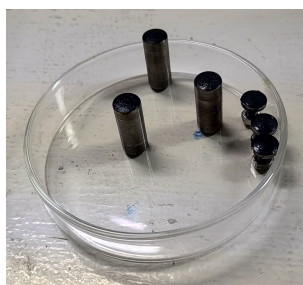


Figura 31 – SCs desmontados em tarugo e parafuso, prontos para serem montados e colocados no equipamento de medição (autor)

A amostra foi produzida com uma pequena variação de massa entre os eletrólitos devido ao método artesanal, resultando em assimetria entre os lados do SC. Essa assimetria gera uma polarização preferencial, onde o lado com maior deposição de eletrodo é escolhido para ser o negativo devido ao maior número de portadores.

7.1.3 Descrição dos Equipamentos Usados nos Testes

Os experimentos foram conduzidos usando o *Solartron Analyticals* 1287 A, o *Solartron Analytical* 1255 B e o forno AN 1048, sendo que as informações descritas foram retiradas dos respectivos manuais (ANALYTICAL, 2017b; ANALYTICAL, 2017a; GALURA, 1996). O SAAES^{SC} não foi usado para a caracterização das amostras, pois os parâmetros de teste fornecidos por ele não eram compatíveis com os parâmetros de teste da amostra selecionada.

- ***Solartron Analytical* 1287 A:**

- o Analisador de frequência que realiza impedanciometria, voltametria cíclica, e atua como potencios-tato/galvanostato.

- o Fornece testes AC/DC quando acoplado a um analisador de resposta em frequência.

- o Possui precisão de $1\mu\text{V}$ para eletrodos de referência e $1\mu\text{A}$ para eletrodo de trabalho.

- o Realiza testes com 2, 3 e 4 pontas.

- o Trabalha na faixa de frequência de $10\mu\text{Hz}$ a 1MHz .

o Este equipamento está representado na Figura 32 a) superior.

- **Solartron Analytical 1255 B:**

o Potenciostato usado para realizar testes de frequência e impedanciometria.

o Usa a técnica de seno para medir ganho e fase entre dois pontos do sistema.

o Ele mede ganho, fase e grupo de atraso com precisão de 0,2%, 0,02 dB, 0,2°, com faixa dinâmica profunda de 130 dB com escala automática, faixa de frequência de 10 μ Hz a 1 MHz e resolução de frequência ultrafina de até 1 em 65 milhões.

o Possui varreduras automáticas de frequência, amplitude ou polarização CC, rejeição automática de ruídos e harmônicos e controle de *software* do painel frontal.

o Quando associado ao 1287 podem ser usados para aplicações como testes para desenvolvimento de eletrólitos sólidos.

o O equipamento é representado na Figura 32 a) inferior.

- **Forno AN1048:**

o Um forno vertical tubular com capacidade para suportar três SCs simultaneamente, equipado com uma unidade de controle de temperatura e saídas coaxiais para conexões.

o Diâmetro da câmara quente: 62 mm.

o Comprimento aquecido: 200 mm.

o Temperatura máxima: 1100 °C.

o Potência: 1000 W.

o Alimentação: 200 VCA – 60 Hz.

o Tensão de alimentação: 127 V.

o Peso aproximado: 12 kg.

o Equipamento representado na Figura 32 b).

o Realiza apenas testes com configuração de 2 terminais.

Os softwares CorrWare e ZPlot foram utilizados para a comunicação dos equipamentos de teste e a coleta de dados.

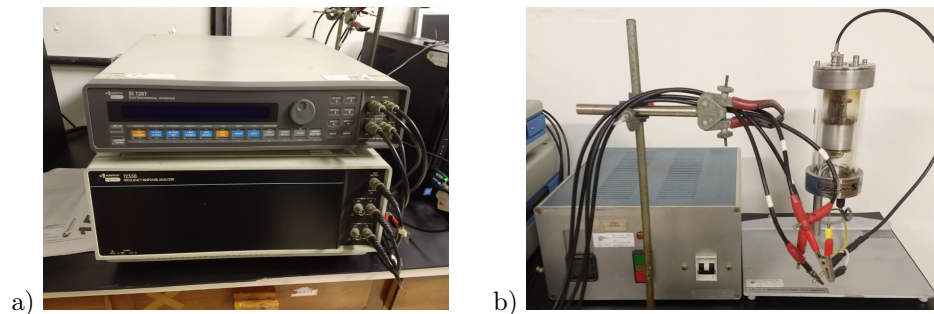


Figura 32 – a) *Solartron analytical 1287 A*, superior, e *Solartron analytical 1255B*, inferior e b) *AN1048* (autor)

7.1.4 Montagem do Experimento

A montagem do experimento envolveu os seguintes passos:

o O tarugo e parafuso foram colocado na base circular do forno, onde o parafuso é parafusado e o tarugo encaixado por cima. Após encaixados, o suporte superior é colocado e as molas são ajustadas para gerar a pressão necessária, garantindo assim que o SC esteja bem montado e que haja a conexão elétrica. Depois de completar essa etapa da montagem, o sistema é encaixado no forno e parafusado, deixando os acessos para os cabos coaxiais livres. A sequência da montagem é mostrada na Figura 33

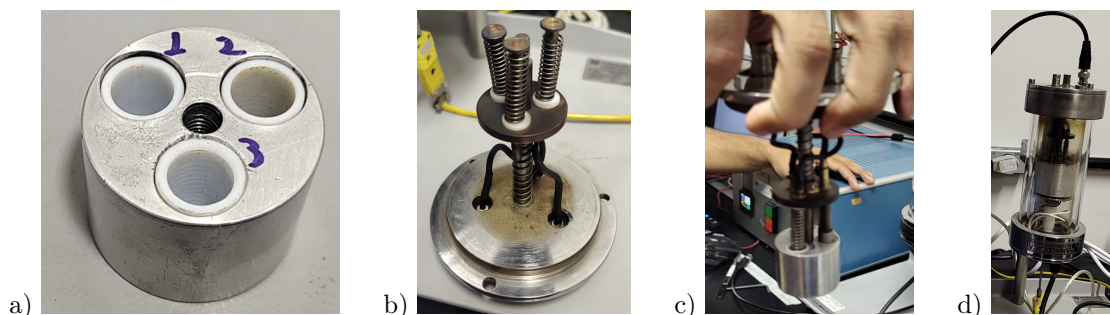


Figura 33 – a) Base cilíndrica que recebe o parafuso do SC, b) parte superior que possui as molas para garantir a montagem correta do SC e a conexão elétrica, c) é a estrutura com a base cilíndrica e a parte superior montadas e a d) é a montagem do forno (autor)

o Cada amostra foi posicionada dentro do forno AN1048, conectando-se ao sistema através de cabos coaxiais. Sendo analisadas uma por vez, visto que os equipamentos de medição *Solartron Analytical* 1287 A e o 1255 B possuem capacidade de teste de apenas uma amostra por teste.

o As conexões entre o *Solartron Analytical* 1287 A e o 1255B foram feitas utilizando cabos coaxiais, para a ligação entre si e com o forno AN1048, e com cabo USB ao computador para coleta de dados.

o A montagem foi ajustada de modo que apenas uma amostra fosse testada por vez, garantindo medições controladas.

o A Figura 34 mostra a montagem completa do experimento.

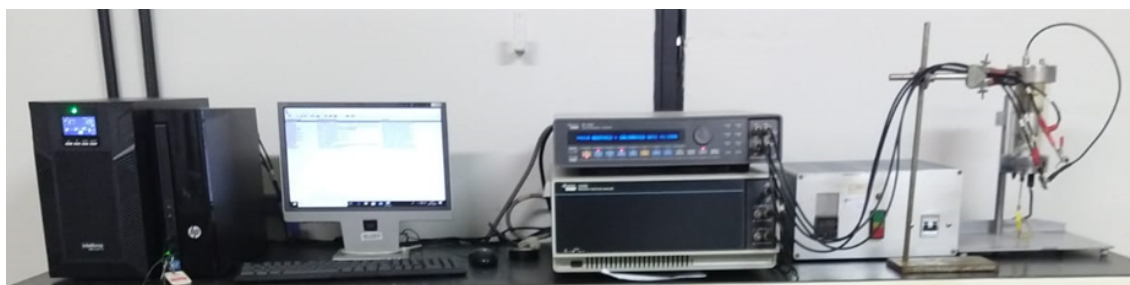


Figura 34 – Montagem da aparelhagem para o teste do SC (autor)

7.1.5 Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada sob diferentes condições para avaliar o desempenho dos SCs:

- **Condições de Temperatura:**

- o Foram testadas quatro temperaturas: 21 °C, 40 °C, 80 °C e 120 °C.
- o A estabilidade térmica da amostra foi garantida ao deixá-las em repouso por 5 minutos após atingir a temperatura desejada no forno.

● Testes Realizados:

- o Ciclagem Galvanostática: 25 ciclos foram realizados para garantir a estabilidade dos SCs.
- o Testes de Carga e Autodescarga: Implementados para determinar o circuito equivalente por modelo de dois ramos e modelo de redistribuição de cargas por difusão. Nesse teste foi feito apenas um ciclo de 40 minutos.
- o Foram realizadas duas rodadas de teste na amostra selecionada, sendo que a 120 °C foram realizadas apenas 17 ciclos de ciclagem galvanostática e a ciclagem de carga e autodescarga foi realizada completa apenas no segundo ciclo. Isso aconteceu pois o tempo de teste estava ultrapassando mais de 3 h por temperatura de teste. A carga e autodescarga a 21 °C também foi realizada somente na segunda rodada de testes.
- o Os testes de ciclagem galvanostática e de carga e autodescarga foram realizados para cada temperatura, sendo a ciclagem galvanostática realizada primeiro e depois a carga e autodescarga.
- o A amostra selecionada passou por um ciclo de recozimento lento antes de cada rodada de teste, onde a temperatura foi elevada em degraus, 40 °C, 80 °C e 120 °C, permanecendo nessas temperaturas por aproximadamente 3 h.
- o O teste de 120 °C da amostra da primeira rodada de testes foi realizado no dia seguinte, sendo necessário que amostra fosse submetida a uma elevação de temperatura gradativa em que ficou aproximadamente 3 h antes de atingir a temperatura de 120 °C.

● Tempo de Teste:

- o Cada rodada de testes em cada temperatura durou mais que 3 horas, variando conforme a temperatura que a amostra estava submetida.
- o Os testes de autodescarga foram padronizados em 40 minutos.
- o A amostra não completou todos os testes a 120 °C devido à alta resistência, o que impactou o tempo de teste.
- o A amostra passou por um ciclo de aquecimento lento indo de 21 °C à 120 °C em patamar, permanecendo aproximadamente 3 h em cada temperatura de teste antes de ser submetida ao primeiro teste de aquecimento de temperatura.
- o A segunda medida realizada na amostra aconteceu 1 mês e meio depois da primeira rodada de teste em que ela foi submetida.

● Parâmetros de Medição:

- o Tensão máxima: 2.5 V.
- o Corrente máxima: 100 μ A.
- o O valor de tensão escolhido se deve ao valor usado nos testes feitos pelo pesquisador que desenvolveu o eletrólito (ALEXANDRE, 2019), enquanto a corrente foi escolhida empiricamente, tendo em vista que o valor máximo de tensão escolhido para os testes.

7.1.6 Processamento dos Dados Coletados

Os dados coletados foram processados da seguinte forma:

- o Os equipamentos transmitiram os dados para o computador em formato numérico.
- o Os dados foram salvos em arquivos CSV e importados para o Excel para tratamento inicial e visualização.
- o Em seguida, os dados foram transferidos para o MATLAB para processamento avançado e análise estatística.

o O foco do processamento foi verificar a estabilidade e o desempenho dos SCs em diferentes condições de temperatura, analisando curvas de ciclagem galvanostática, variação de capacitância específica, densidade de energia, densidade de potência e comportamento do circuito equivalente.

7.2 Resultados e discussões do teste de temperatura do SC

Com os testes feitos, algumas observações puderam ser feitas em relação à amostra. Primeiramente, os dados extraídos serão analisados, posteriormente os cálculos das figuras de mérito serão feitos, após os circuitos equivalentes serão calculados e apresentados. Dessa forma, será possível traçar as características elétricas da amostra selecionada e testada. Primeiro, serão analisados os testes de ciclagem galvanostática e, depois, os testes de carga e autodescarga. Outro ponto a ser definido é que o dia 04 de junho de 2024 será considerado o dia 0.

Ao fazer a primeira ciclagem galvanostática a 21 °C, observou-se que os primeiros ciclos apresentaram curvas com um tempo maior, sendo que o primeiro ciclo apresenta uma tensão menor para a tensão máxima de teste. Isso provavelmente se deve ao fato de que a amostra ainda não havia passado por nenhum teste elétrico, sendo ainda uma amostra virgem. Outra observação é que o tempo de teste segue aumentando nos quatro últimos ciclos, o que pode indicar que a amostra ainda não havia adquirido estabilidade eletroquímica. Essas observações podem ser vistas na Figura 35.

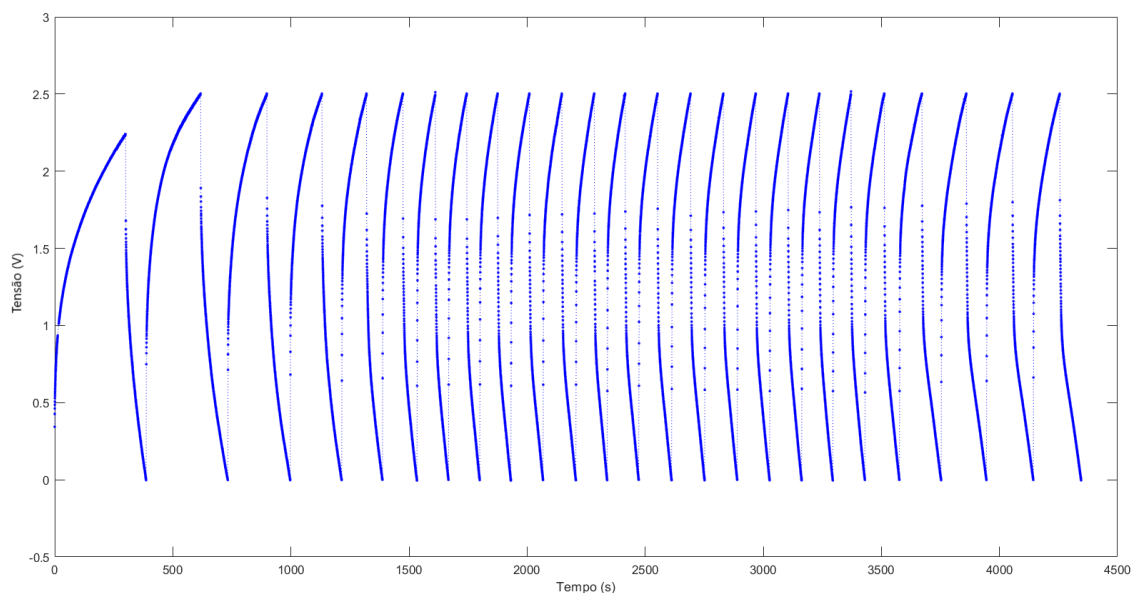


Figura 35 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 21 °C do dia 0 (autor)

Já ao observar o segundo teste de ciclagem galvanostática a 21 °C, nota-se que o primeiro ciclo do teste apresenta um tempo maior, e depois esse tempo vai diminuindo. No 16º ciclo, o tempo começa a aumentar e

aparentemente estabiliza, o que pode indicar que a amostra pode ter alcançado a estabilidade eletroquímica nas condições do teste. As observações podem ser vistas na Figura 36.

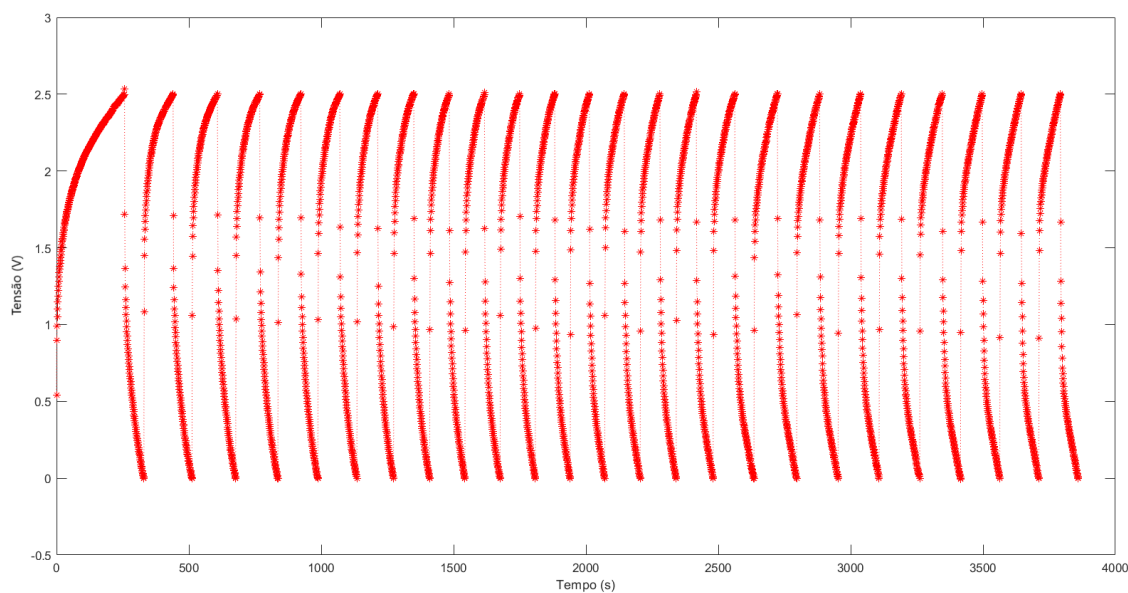


Figura 36 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 21 °C do dia 112 (autor)

Ao observar as curvas geradas no teste de ciclagem galvanostática a 40 °C, nota-se que a curva gerada no primeiro ciclo do teste apresentou um tempo maior, e esse tempo foi caindo ao longo dos ciclos. Observa-se que, no primeiro teste a 40 °C, o tempo de teste parece estabilizar no 16° ciclo, e para o segundo teste a 40 °C, aproximadamente no 16° ciclo também. Isso pode ser visto nas Figuras 37 e 38.

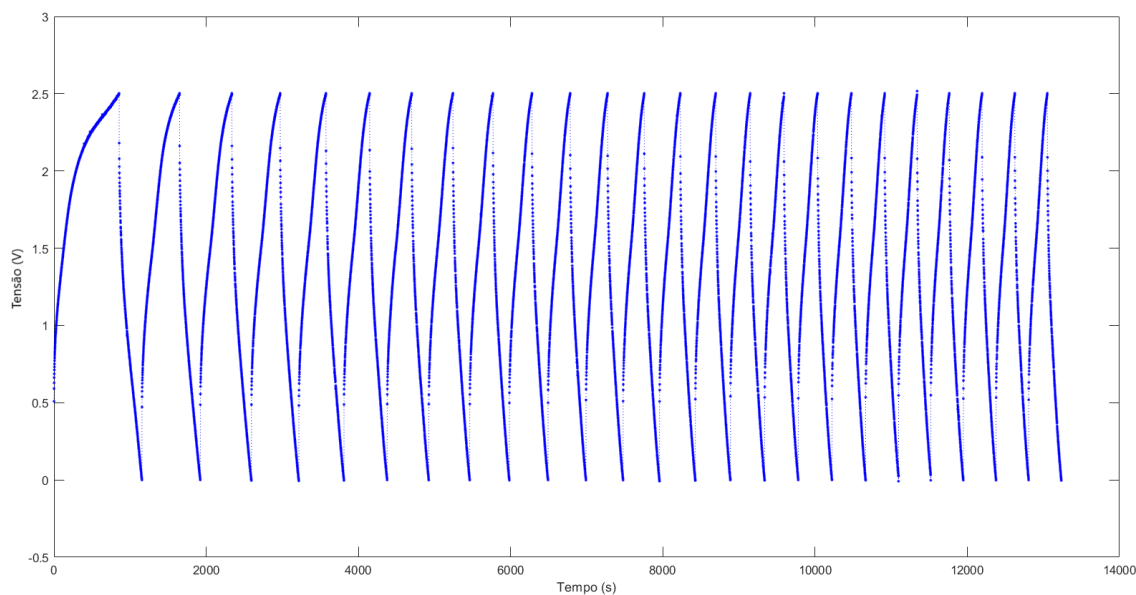


Figura 37 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 40 °C do dia 28 (autor)

Os testes a 80 °C apresentam o primeiro ciclo menor que os demais testes, juntamente com um intervalo de tempo aparentemente mais próximo que nos demais testes. Essa característica pode indicar que a amostra chegou mais rápido à estabilidade nesse teste do que nos demais. Isso pode ser observado nas Figuras 39 e 40.

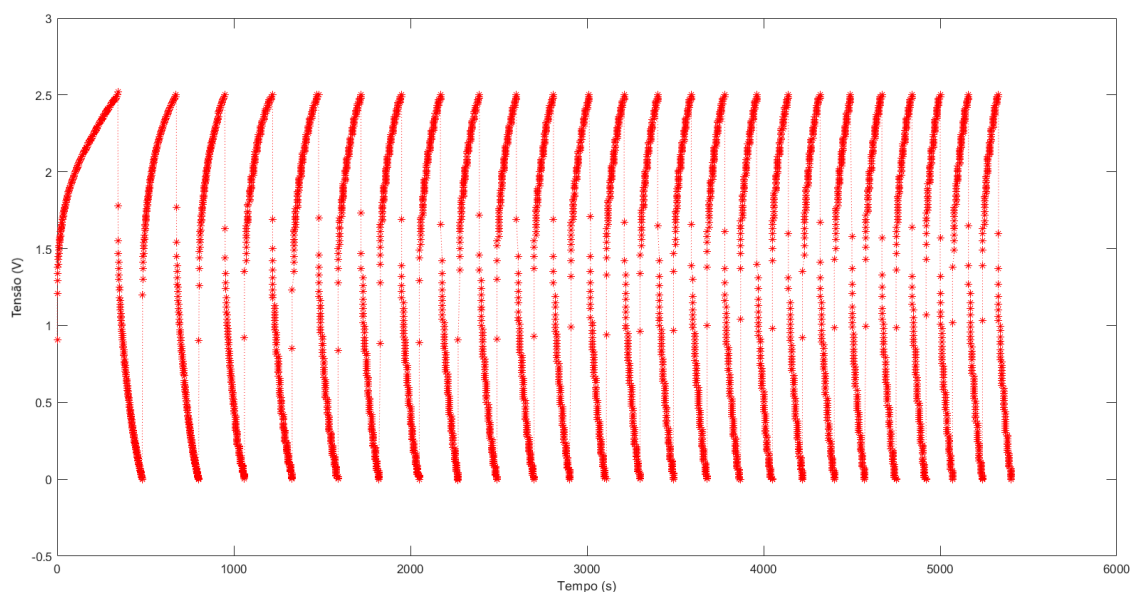


Figura 38 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 40 °C do dia 105 (autor)

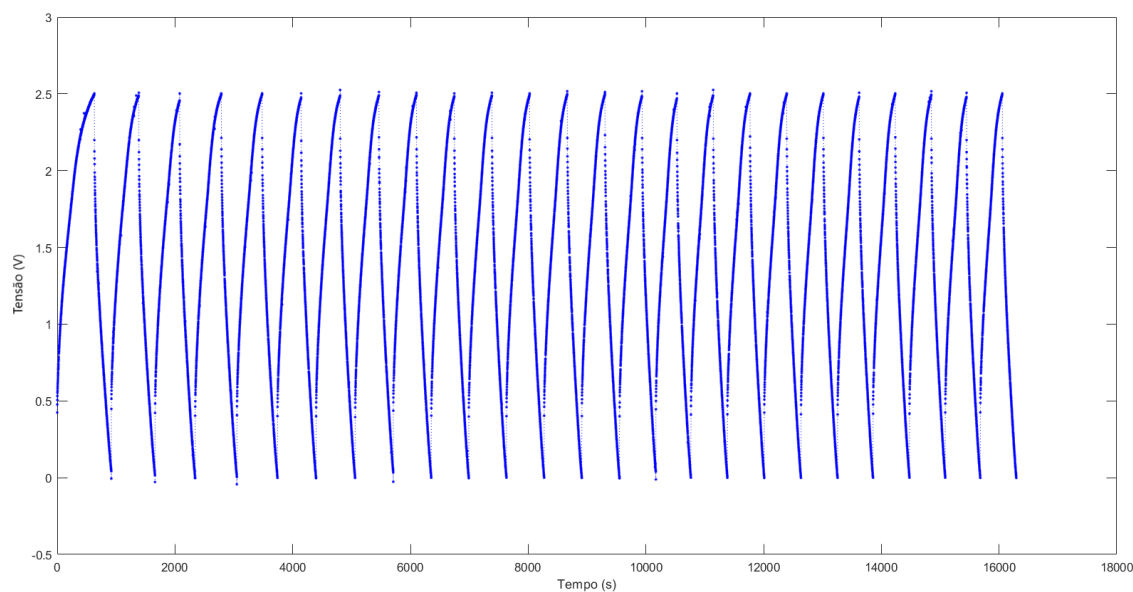


Figura 39 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 80 °C do dia 28 (autor)

Com o aumento da temperatura, o tempo de teste também aumentou, inviabilizando que os 25 ciclos fossem feitos a 120 °C, sendo realizados apenas 17 ciclos. Com os ciclos feitos, o que se pode observar no primeiro teste foi que a amostra possui o primeiro ciclo e o terceiro com um tempo mais elevado, e depois parece estabilizar o tempo de teste. Entretanto, os últimos 4 ciclos do primeiro teste apresentam um tempo muito elevado, o que pode sugerir que a amostra estaria se degradando a essa temperatura. No entanto, no segundo teste a 120 °C, a amostra mostrou um comportamento diferente, apresentando o primeiro ciclo com um tempo um pouco maior que os demais, e nos ciclos seguintes a amostra parece ter estabilizado o tempo de teste. Outro ponto observado são a última medida do primeiro ciclo de testes e as últimas quatro curvas da segunda rodada de testes, elas apresentam uma instabilidade, mostrando curvas cerrilhadas, esse

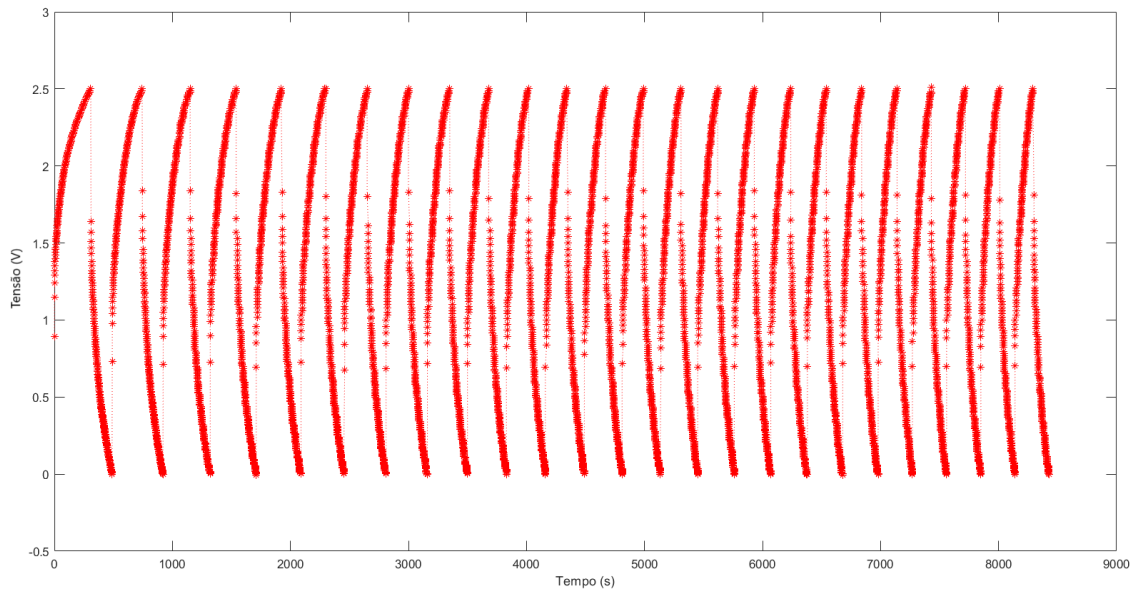


Figura 40 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 80 °C do dia 105 (autor)

comportamento pode ser ocasionado por uma instabilidade na amostra a essa temperatura. Para verificar isso, mais testes devem ser realizados na amostra. Essas observações podem ser vistas nas Figuras 41 e 42.

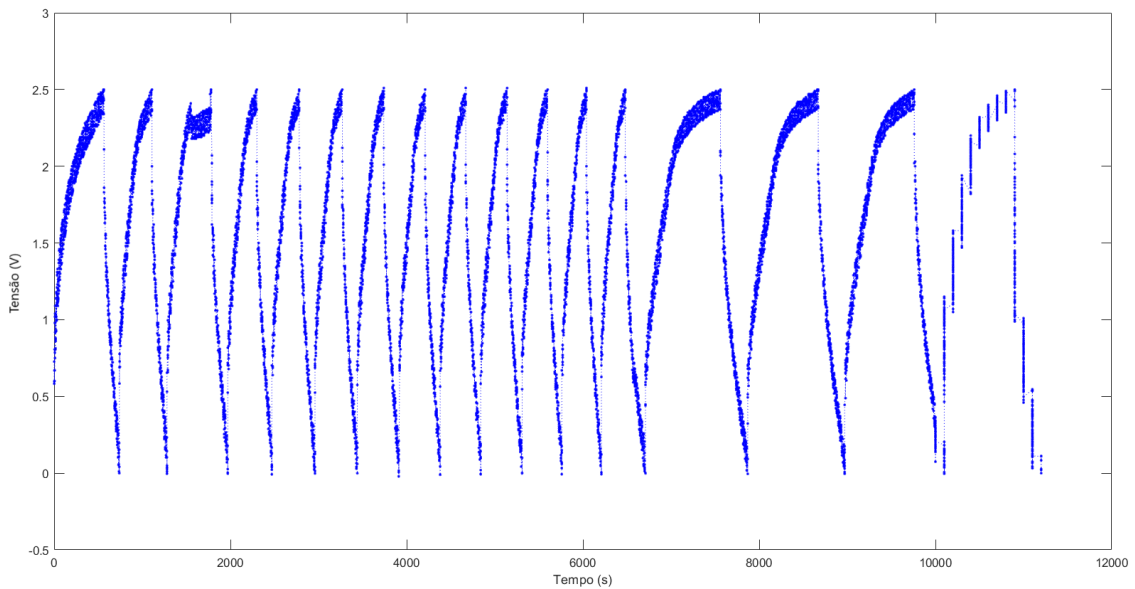


Figura 41 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 120 °C do dia 29 (autor)

Mudando agora para o teste de carga e autodescarga, observa-se que o teste realizado a 21 °C no dia 112 apresentou uma curva que caracteriza um SC muito resistivo, porém a amostra já se encontrava bastante estressada devido aos testes anteriores. A característica de uma curva de autodescarga capacitiva é uma exponencial, o que não é o caso da curva apresentada. Entretanto, essa foi a última curva coletada, o que pode sugerir que essa célula supercapacitiva já estava degradada e, por isso, apresentou esse perfil de curva. Essa curva não foi coletada no início do teste porque a amostra já se apresentava muito resistiva, o que inviabilizou

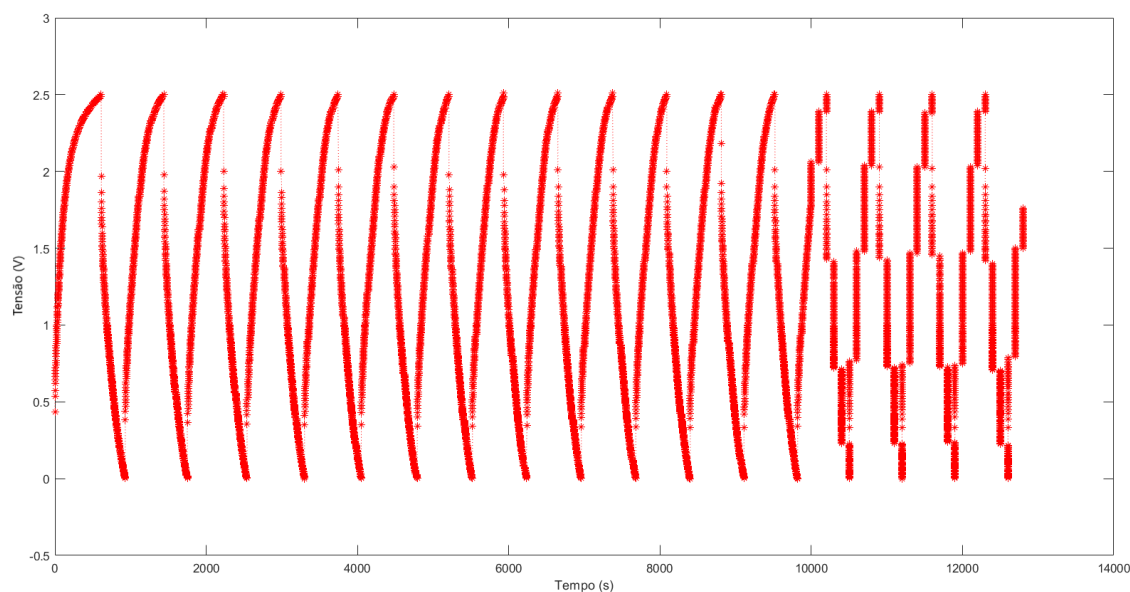


Figura 42 – Perfil da ciclagem galvanostática para o teste a 120 °C do dia 105 (autor)

o tempo de teste na primeira rodada dos testes. Observa-se também uma queda ôhmica muito acentuada, o que sugere uma alta *ESR*, que limita a corrente no SC, aumentando o tempo de teste. Nota-se que para essa temperatura não houve ruído no teste. A curva de carga e autodescarga a temperatura de 21 °C pode ser vista na Figura 43.

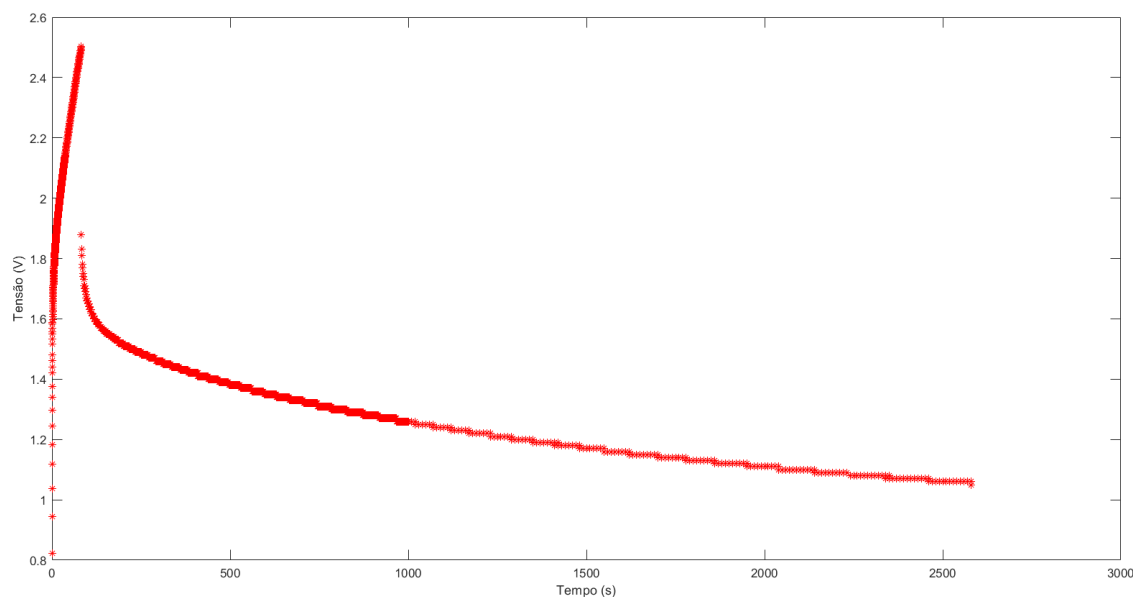


Figura 43 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 20 °C do dia 112 (autor)

Já no teste de carga e autodescarga a 40 °C, foram traçadas duas curvas: uma no primeiro teste (curva em azul com pontos) e uma no segundo teste (curva em vermelho com asteriscos). O que se pode observar é que, no primeiro teste, a amostra apresenta uma curva na autodescarga mais próxima de uma exponencial, o que indica um funcionamento supercapacitivo, diferente da segunda curva. Já a segunda curva tem uma queda

ôhmica muito acentuada, que sugere uma *ESR* elevada, o que limita a corrente no SC. Outro ponto a ser observado é que a curva de autodescarga no segundo teste não se aproxima tanto a uma exponencial, o que sugere um SC mais resistivo. Isso pode indicar que a célula supercapacitiva sofreu uma degradação entre um teste e outro. Observa-se também que alguns ruídos começam a aparecer no segundo teste. As curvas podem ser vistas na Figura 44.

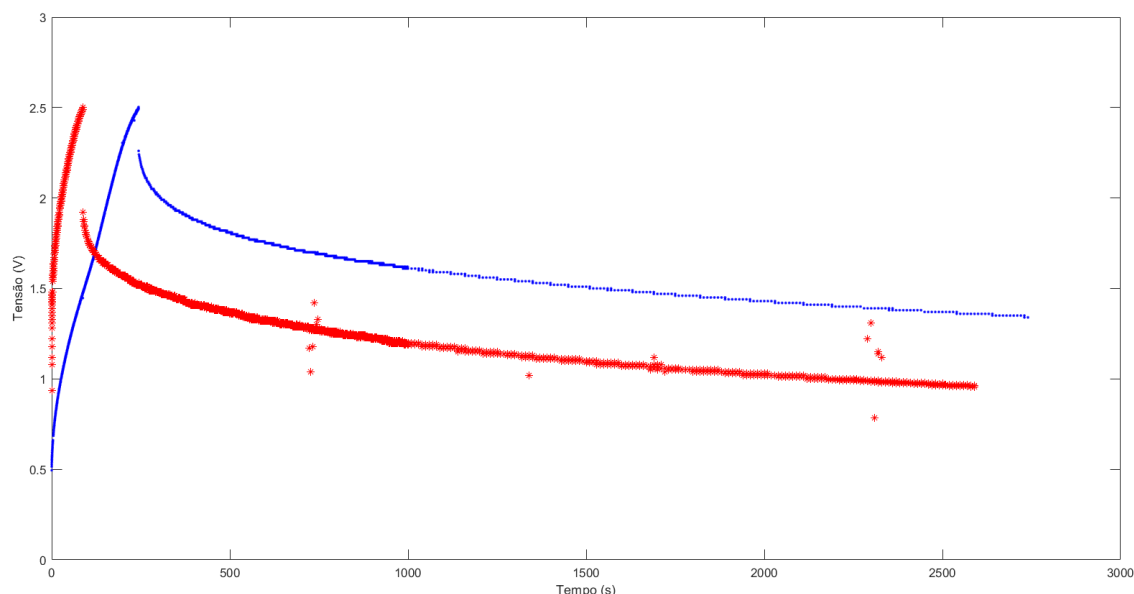


Figura 44 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 40 °C, sendo a curva em azul com marcadores de pontos o teste realizado no dia 28 e a curva vermelha com marcadores em asterisco o teste realizado no dia 105 (autor)

Quanto ao teste de carga e autodescarga a 80 °C, pode-se fazer a mesma observação em relação ao teste a 40 °C. O primeiro teste (curva em azul com pontos) apresentou uma curva mais próxima de uma exponencial, o que caracteriza uma célula supercapacitiva mais capacitiva. Já no segundo teste (curva em vermelho com asteriscos), o que se pode observar é uma curva um pouco menos parecida com uma exponencial, o que sugere que a amostra se tornou mais resistiva, ou seja, que ela sofreu uma degradação de um teste para o outro. Observa-se também a queda ôhmica acentuada no segundo teste, o que indica um aumento da *ESR*, que limita a corrente no SC. Nota-se também que os ruídos aumentaram no segundo teste. A Figura 45 mostra as duas curvas.

Ao analisar a curva de carga e autodescarga a 120 °C, deve-se levar em conta que essa curva foi coletada na segunda rodada de teste. O motivo foi o mesmo da curva coletada a 21 °C: o tempo de teste ficou muito elevado, inviabilizando a coleta dessa curva na primeira rodada de teste. Analisando a curva coletada, pode-se observar que ela se aproxima mais de uma exponencial do que as demais curvas coletadas durante o segundo teste. Isso indica que a capacitância aumentou, mantendo o SC mais capacitivo do que resistivo em relação as outras curvas coletadas na segunda rodada de testes. Esse aumento se deve ao fato de que o número de portadores aumenta com a elevação da temperatura, aumentando assim a capacitância e, consequentemente, diminuindo a resistência. Isso ocorre porque a viscosidade do eletrólito aumenta e isso faz com que a mobilidade dos íons aumente também. Observa-se também que há um aumento nos ruídos nas leituras do equipamento usado para as medições. A Figura 46 mostra a curva de carga e autodescarga do teste a 120 °C.

Após a análise das curvas obtidas nos testes, será feita agora a análise dos cálculos das figuras de mérito

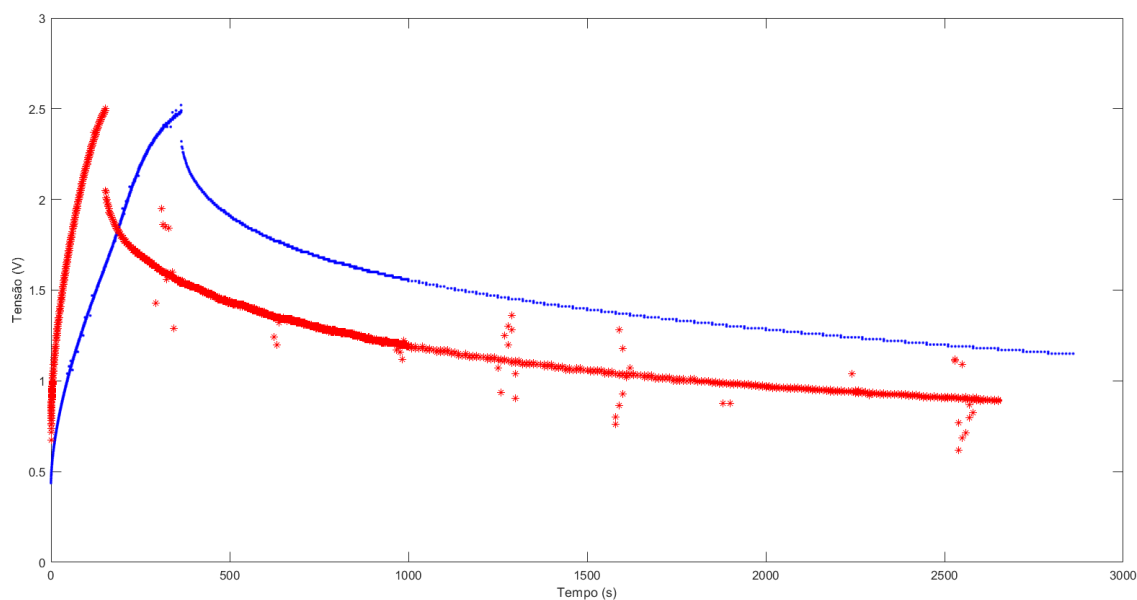


Figura 45 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 80°C , sendo a curva em azul com marcadores de pontos o teste realizado no dia 28 e a curva vermelha com marcadores em asterisco o teste realizado no dia 105 (autor)

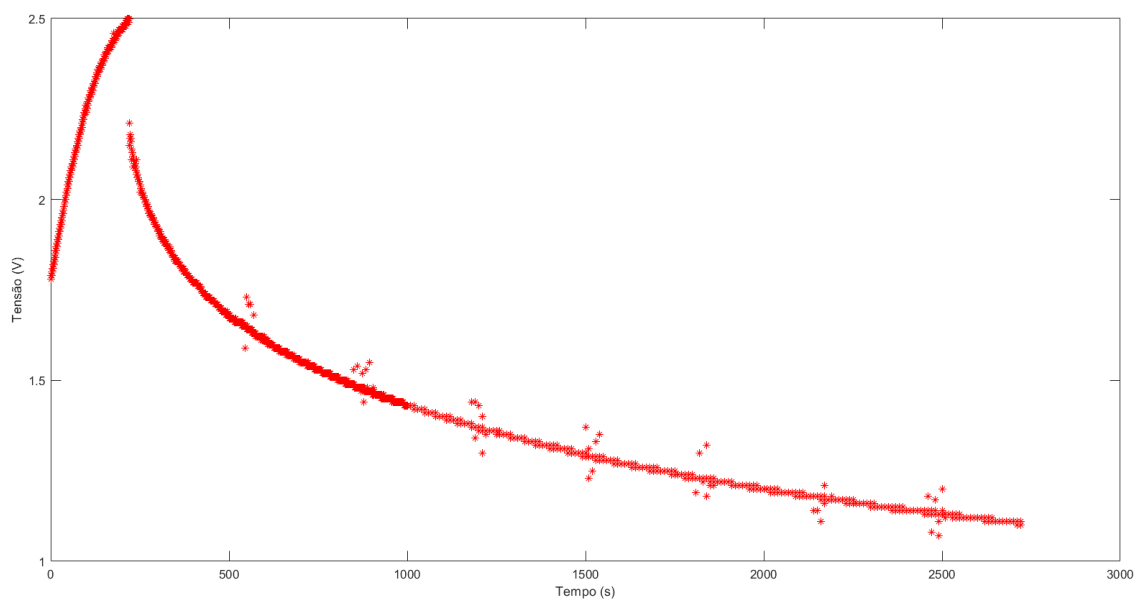


Figura 46 – Perfil da carga e autodescarga para o teste a 120°C do dia 105 (autor)

da amostra e posteriormente o cálculo dos circuitos equivalentes. A amostra selecionada apresentou o funcionamento como esperado, aumentando a capacitância, a densidade de energia e a densidade de potência com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque há um aumento no número de portadores com o aumento da temperatura, pois com esse aumento de temperatura há uma diminuição na viscosidade do eletrólito e com isso, também, há o aumento da mobilidade dos íons através dele.

Outra observação a ser feita é quanto à estabilidade do SC: os testes feitos no laboratório descartam as 19 primeiras curvas e utilizam apenas as curvas posteriores, pois o SC leva alguns testes para adquirir

estabilidade eletroquímica. No teste realizado, observou-se o funcionamento do dispositivo em todas as curvas traçadas, permitindo observar se o o SC já apresenta funcionamento estável na vigésima curva. Viu-se que ele já se encontra estável na vigésima curva, pois o desvio padrão apresentado na comparação dos seis últimos pontos da capacitância específica e da densidade de energia foram menor que um, e os pontos se apresentam com pouca variação de valor. Essas observações foram feitas em relação à variação da capacitância específica e da densidade de energia, apresentadas nas Figuras 47 e 48 e pela Tabela 13. As análises de valores da capacitância específica, densidade de energia e densidade de potência levaram em conta os seis últimos pontos para as temperaturas de 21 °C, 40 °C e 80 °C, para 120 °C foram analisados os quatro últimos pontos.

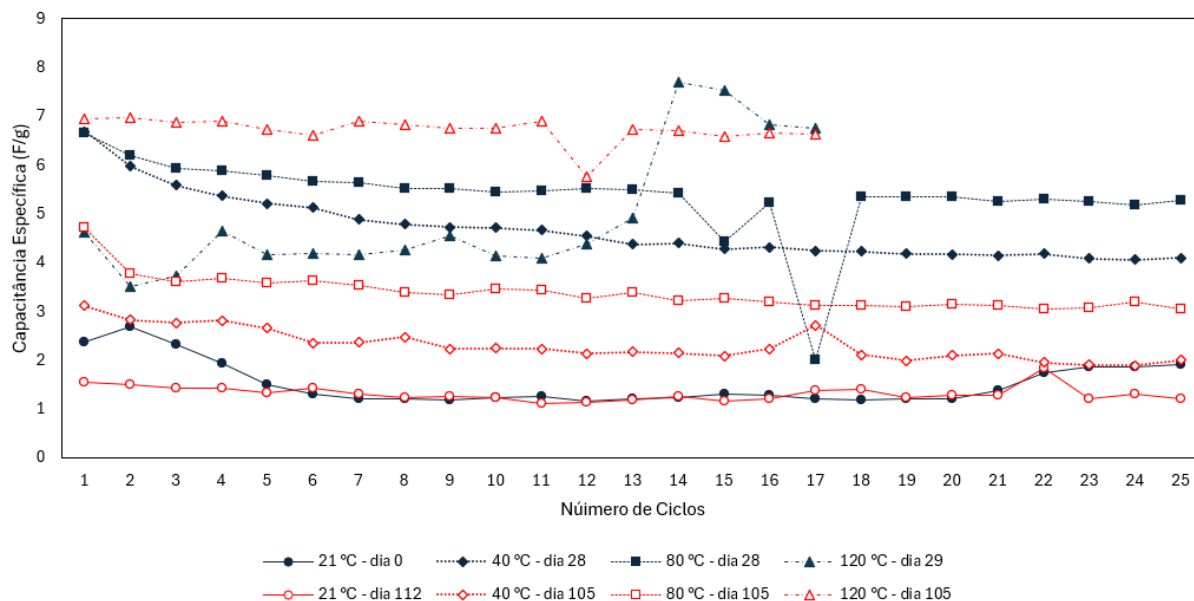


Figura 47 – Gráfico de Capacitância Específica X Número de Ciclos da amostra selecionada (autor)

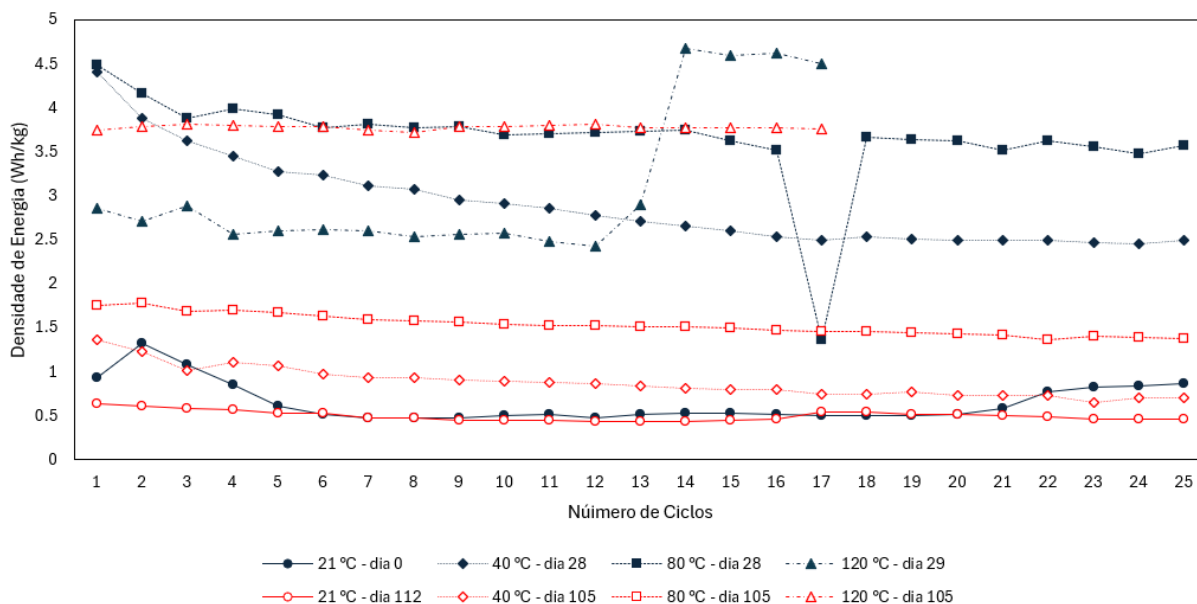


Figura 48 – Gráfico de Densidade de Energia X Número de Ciclos da amostra selecionada (autor)

	Temperatura							
	21 °C		40 °C		80 °C		120 °C	
	Dia 0	Dia 112	Dia 28	Dia 105	Dia 28	Dia 105	Dia 29	Dia 105
Capacitância Específica (F/g)	1,8 ± 0,27	1,28 ± 0,22	4,12 ± 0,04	1,95 ± 0,09	5,26 ± 0,05	3,1 ± 0,05	7,17 ± 0,14	6,64 ± 0,05
Densidade de Energia (Wh/kg)	0,79 ± 0,13	0,47 ± 0,02	2,49 ± 0,01	0,72 ± 0,03	3,56 ± 0,05	1,39 ± 0,02	4,61 ± 0,06	3,77 ± 0,004
Densidade de Potência (W/g)	0,034 ± 0,001	0,025 ± 0,001	0,049 ± 0,001	0,033 ± 0,001	0,054	0,038 ± 0,0004	0,054 ± 0,001	0,045

Tabela 13 – Resultado da capacitância específica, densidade de energia e densidade de potência da amostra com a variação de temperatura (autor)

Outra observação feita foi que a capacitância a 21 °C na primeira rodada de testes apresenta uma variação elevada do 1° ciclo ao 6° ciclo e isso se deve ao fato que a amostra ainda era virgem e não havia sofrido nenhum ciclo de ciclagem galvanostática anteriormente. Após o 6° ciclo não apresentou muita variação, porém ao chegar no 21° ciclo sofreu um aumento e depois do 23° ciclo aparentou atingir a estabilidade novamente. Entretanto essa variação não foi tão significativa, visto que o desvio padrão apresentado na capacitância específica foi de 0,27, tendo o valor da capacitância específica na primeira rodada de testes a 21 °C apresentado o valor de $1,8 \pm 0,27$ F/g. Já a segunda rodada de testes a 21 °C observou-se que o valor da capacitância desde o início sofreu pouca variação, e sua capacitância específica foi de $1,28 \pm 0,22$ F/g. Nota-se que a capacitância específica fica próxima de uma rodada para outra entre o 5° ao 21° ciclo, após isso a capacitância específica na primeira rodada de testes aumenta, ao passo que na segunda rodada entre o 21° e o 22° há um aumento e posteriormente uma queda, mas isso não gerou um impacto expressivo, visto que o desvio padrão para as seis ultimas curvas foi de 0,22. As observações foram feitas de acordo com a Figura 47 e com a Tabela 13. Ao analisar a capacitância específica dos testes a 21 °C seguidos, Figura 49, observou-se que houve variação durante os testes, porém, ao observar os seis últimos ciclos a variação não foi significativa pois o desvio padrão se mantém abaixo de 1.

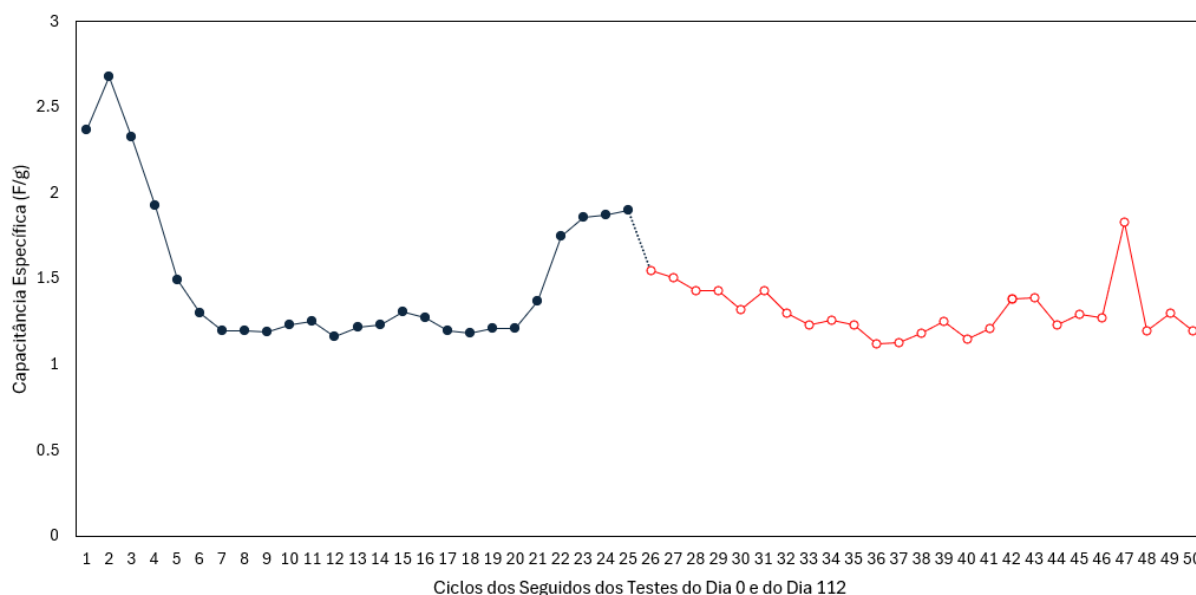


Figura 49 – Gráfico de Capacitância Específica X Número de Ciclos da amostra selecionada dos dois testes a 21 °C seguidos, sendo a parte azul com marcadores preenchidos a primeira rodada de testes e a parte vermelha com marcadores sem preenchimento a segunda rodada de testes (autor)

Ao analisar os testes a 40 °C, observou-se que o valor da capacitância específica na primeira rodada de testes ficou maior que o valor encontrado a 21 °C, porém na segunda rodada de testes esse valor ficou muito próximo do valores calculados a 21 °C. Entretanto, nota-se que a capacitância específica a 40 °C apresenta variação no seu valor de uma rodada de testes para a outra, isso pode indicar que a amostra sofreu degradação de uma rodada de testes para a outra, Figura 47. Isso pode ser visto quando comparamos os valores da capacitância específica, para a primeira rodada de testes ela foi de $4,12 \pm 0,04$ F/g e na segunda rodada de testes ela foi de $1,97 \pm 0,09$ F/g, Tabela 13.

Quando observa-se a capacitância específica para a primeira rodada de testes a 80 °C ela se apresenta maior que a segunda rodada de testes e maior que as calculadas em ambas as rodadas de testes a 40 °C. Já o

valor calculado para a capacitância específica na segunda rodada de testes se apresentou menor que o valor da capacitância específica calculada para a primeira rodada de testes a 40 °C, indicando uma possível degradação da amostra. Os valores apresentados para a capacitância específica calculada na primeira rodada de testes a 80 °C foi de $5,26 \pm 0,06$ F/g e de $3,1 \pm 0,05$ F/g para a segunda rodada de testes, reafirmando que a amostra se encontrava degradada de uma rodada de testes para a outra. Essas informações podem ser vistas na Figura 47 e na Tabela 13.

Para 120 °C o comportamento se apresentou diferente das demais temperaturas em relação as 17 curvas traçadas em cada teste. Os 13° primeiros pontos calculados na primeira rodada de testes apresentaram capacitância específica menor que as capacitâncias específicas calculadas para a 40 °C e 80 °C na mesma rodada de testes e em relação aos mesmos pontos a 120 °C na segunda rodada de testes. Porém, o valor sofre um aumento, ultrapassando o valor a 80 °C e 40 °C da primeira rodada de testes e a 120 °C da segunda rodada de testes. Após esse aumento, a capacitância específica inicia uma queda, mesmo assim se mantém maior que as demais medidas. Já para os dados obtidos a 120 °C na segunda rodada de testes, os valores se apresentaram maiores que os das demais curvas em todos os pontos, exceto nos pontos citados a 120 °C do primeiro teste. O valor da capacitância específica para a primeira rodada de testes foi de $7,17 \pm 0,14$ F/g e para a segunda rodada de testes foi de $6,64 \pm 0,05$ F/g. Isso pode ser visto na Figura 47 e na Tabela 13.

A densidade de energia apresenta o mesmo comportamento da capacitância específica para todas as temperatura, segue aumentando com o aumento de temperatura. Porém, de uma rodada de testes para a outra o valor da densidade de energia diminui. Isso indica que a amostra sofreu degradação. Os valores calculados para a primeira rodada de teste foram para $0,79 \pm 0,13$ Wh/kg, para 21 °C; $2,49 \pm 0,01$ Wh/kg, para 40 °C; $3,56 \pm 0,05$ Wh/kg, para 80 °C; e $4,61 \pm 0,06$ Wh/kg, para 120 °C. Já para a segunda rodada de testes os valores apresentados foram, $0,47 \pm 0,02$ Wh/kg, para 21 °C; foi $0,72 \pm 0,03$ Wh/kg, para 40 °C; foi $1,39 \pm 0,02$ Wh/kg para 80 °C; e foi $3,77 \pm 0,004$ Wh/kg, para 120 °C. Observa-se que os valores para a primeira rodada de testes foram maiores que os valores apresentados na segunda rodada de testes, o que reafirma a degradação da amostra. Observa-se também que quanto maior a temperatura, maior é a densidade de energia, mostrando que a amostra apresenta melhora no funcionamento com o aumento da temperatura. Essas observações e valores podem ser vistos na Figura 48 e Tabela 13.

Com relação a densidade de potência, observa-se que ela se mantém com valores próximos na primeira rodada de testes e mais espaçados na segunda rodada de testes. Contudo, os valores da primeira rodada de testes apresentam-se maiores que os da segunda rodada de testes, exceto para 120 °C que se mantém maior que todos os valores. Porém, mesmo com esse comportamento, os valores se apresentaram próximos de acordo com o gráfico apresentado na Figura 50. Os valores calculados para a primeira rodada de testes foram $0,034 \pm 0,001$ W/g, para 21 °C; $0,049 \pm 0,001$ W/g, para 40 °C; $0,054$ W/g, para 80 °C; e $0,054 \pm 0,001$ W/g, para 120 °C. Já para a segunda rodada de testes os valores encontrados foram $0,025 \pm 0,001$ W/g, para 21 °C; $0,033 \pm 0,001$ W/g, para 40 °C; $0,038 \pm 0,0003$ W/g, para 80 °C; e $0,045$ W/g, para 120 °C. Esses valores se encontram na Tabela 13.

Ao falar dos circuitos equivalentes do modelo de dois ramos em paralelo e do modelo de redistribuição de cargas por difusão, apresentaram-se algumas características da amostra testada. O primeiro dado extraído foi a constante de tempo τ , que foi de 1.57 s para a amostra. Após isso, foram extraídos os demais dados referentes aos circuitos equivalentes. Com esses dados, foi possível observar que a amostra é muito resistiva. Isso pode ser observado através da *ESR*: quanto mais alta ela for, mais o SC demora a carregar, visto que ela limita a corrente de entrada do SC. Já a *EPR*, quanto maior ela for, mais isoladas as placas do SC se encontram, logo, a corrente de fuga se torna menor. Entretanto, para calculá-la, é necessário conhecer a

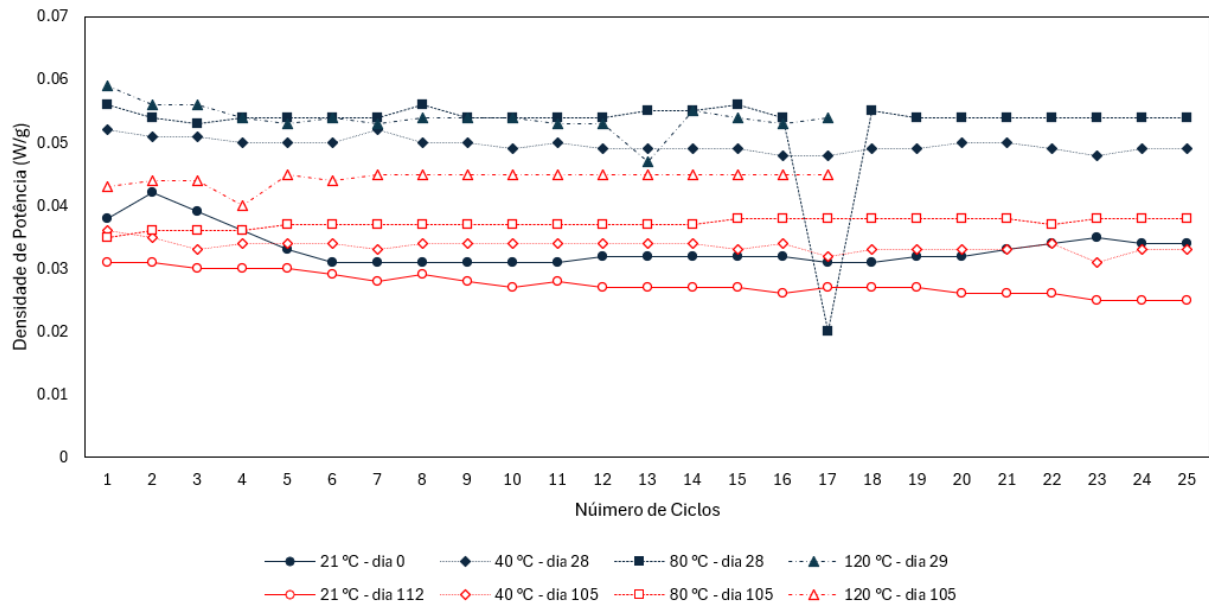


Figura 50 – Gráfico de Densidade de Potência X Número de Ciclos da amostra selecionada (autor)

corrente de fuga do SC, dado que o equipamento usado para medição não fornece, inviabilizando o cálculo da mesma. Para resolver esse problema, a *EPR* será considerada 100 k Ω .

Para o modelo de circuito de dois ramos, nota-se que as resistências tendem a cair com o aumento da temperatura e as capacitâncias tendem a aumentar com o aumento da temperatura. Isso se deve ao aumento no número de portadores que ocorre com a elevação da temperatura, pois com o aumento de temperatura a viscosidade do eletrólito diminui, isso faz com que haja um aumento na mobilidade dos íons dentro dele. O mesmo fenômeno também pode ser observado para o modelo de circuito de redistribuição de cargas por difusão. Outro ponto observado foi que no geral os valores das capacitâncias obtidas no primeiro teste foram maiores que os valores obtidos no segundo teste e que os valores das resistências foram menores nos primeiros testes, indicando que a célula sofreu degradação ao longo dos testes realizados. A Tabela 14 apresenta os parâmetros extraídos para o modelo de circuito de dois ramos em paralelo e a Tabela 15 apresenta os parâmetros extraídos para o modelo de circuito de redistribuição de cargas por difusão.

Temperatura	Data	R_0 (Ω)	C_0 (F)	k_v (F)	C_2 (F)	R_2 (Ω)	<i>EPR</i> (k Ω)
210 °C	Dia 112	2170	113,88	222,88	197,65	1,21	-
40 °C	Dia 28	420	262	1052	512,97	0,47	-
	Dia 105	1450	157,42	293,92	268,92	0,89	-
80 °C	Dia 28	210	171	1242	522,34	0,46	-
	Dia 105	440	290,8	678,8	561,27	0,43	-
120 °C	Dia 105	100	1618,18	1818,18	1952,93	0,12	-

Tabela 14 – Modelo de circuito equivalente de dois ramos em paralelo (autor)

As considerações gerais para a amostra são que ela estava muito resistiva, o que impactava diretamente no tempo de carga e descarga da amostra, assim como observa-se na curva gerada na autodescarga. O tempo de autodescarga estava maior que 13 horas, o que inviabilizou a realização completa do teste. No entanto, os testes foram realizados com o tempo mínimo necessário para a coleta de dados. A amostra apresentou degradação com as ciclagens térmicas, mas essa degradação encontra-se dentro do aceitável, indicando que a

Temperatura	Data	EPR (k Ω)	ESR (Ω)	C_H (F)	C_D (F)	R_2 (Ω)
21 °C	Dia 112	-	6200	0,04	0,04	37214,35
40 °C	Dia 28	-	2300	0,11	0,07	20031,22
	Dia 105	-	5800	0,04	0,05	33359,62
80 °C	Dia 28	-	1700	0,16	0,16	10482,67
	dia 105	-	4500	0,07	0,1	19064,18
120 °C	Dia 105	-	2900	0,1	0,1	16703,27

Tabela 15 – Modelo de circuito equivalente por redistribuição de cargas por difusão (autor)

célula não precisará de proteção contra temperaturas elevadas.

7.3 Considerações finais do capítulo

Apesar da amostra (PLI/[A₂M₂Am][TFSI]:LI/[EPPy][TFSI]) com eletrodo de (r-GO), ter apresentado seu melhor funcionamento a 120 °C, observou-se que houve uma degradação da mesma entre os testes. Isso pode ser observado no formato da curva de autodescarga a 40 °C e a 80 °C, quando comparados os dois testes, quando verificamos o comportamento da capacitância específica, densidade de energia, densidade de potência e quando se observam os circuitos equivalentes. As curvas perdem o formato de uma exponencial, assemelhando-se à curva produzida por um sistema altamente resistivo. Isso pode ser visto também quando se observa o aumento das resistências nos circuitos equivalentes e a diminuição das capacitâncias dos modelos.

Outro ponto a ser observado é que a célula supercapacitiva apresenta uma melhora no funcionamento com o aumento da temperatura, devido ao aumento do número de portadores com a elevação da temperatura. Com isso, pode-se afirmar que a célula consegue trabalhar a 120 °C, não necessitando de proteção térmica para essa temperatura para o embarque no CubeSat usado neste trabalho.

Outra observação a ser feita é quanto à resistência apresentada pela amostra: ela se mostrou muito resistiva, o que implica a necessidade de aprimorar o processo de produção para que a *ESR* diminua, visto que ela limita a corrente no dispositivo.

Observação: o SAAES^{SC} não foi usado na caracterização da amostra, pois sua janela de tensão de trabalho é de 50 mV a 10 V e a janela de corrente de trabalho é de 5 mA a 1 A no SC. Contudo, a tensão de trabalho da célula supercapacitiva foi de 2.5 V e a corrente de trabalho de 100 μ A, o que impossibilitou o uso do equipamento.

8 CONCLUSÃO

Observando o funcionamento do SAAES^{SC}, notou-se que o sistema é eficiente quanto à aquisição de dados para a caracterização de SC. Os resultados obtidos por ele foram comparados com os resultados obtidos pelo equipamento VMP3 Multicanal Potenciostato/Galvanostato, da companhia BioLogic, e com os valores fornecidos pelo fabricante dos SCs comerciais usados e foram satisfatórios.

Ao comparar o erro relativo da capacitância do SC1 obtida pelo SAAESSC ao valor obtido pelo VMP3, foi menor que 1%, o que mostra a precisão do equipamento projetado. Comparando o mesmo parâmetro obtido com o SAAESSC com o datasheet do fabricante, o erro relativo foi de 5,55%, que se encontra dentro da tolerância fornecida pelo fabricante do SC.

Outro ponto observado foi o desvio padrão, que se manteve próximo de zero. Entretanto, quando a curva se encontra no ponto de inflexão entre o fim da carga e o início da descarga, atinge o valor mais alto do desvio padrão. Isso se deve ao atraso de comutação do relé e ao tempo de amostragem do sistema. Observa-se também que a curva do desvio padrão durante toda a descarga sofre um aumento, devido à resistência R6 (Figura 8), pois se trata de um resistor que possui maiores incertezas.

Quanto à repetibilidade, conclui-se que o SAAESSC é um equipamento conciso, visto que os valores de erro calculados foram muito pequenos e o desvio padrão se manteve muito baixo, permitindo afirmar que o equipamento desenvolvido consegue manter a repetibilidade da medição. Dessa forma, é possível afirmar que os dados coletados e os cálculos dos parâmetros extraídos pelo SAAESSC são precisos e exatos, permitindo a extração de dados elétricos com alta qualidade.

Pode-se concluir que a versão apresentada do SAAES^{SC} conseguiu extrair as curvas, permitindo assim calcular os dados usados para o circuito equivalente do SC1 segundo o modelo de circuito de dois ramos em paralelo. Isso possibilitou simular a curva de carga e autodescarga do modelo de circuito que foi extraído. Essa curva apresentou uma diferença aceitável em relação à curva extraída pelo SAAES^{SC}, sendo possível usar os circuitos para simulação em diversas aplicações.

Algumas alterações são necessárias para o embarque do SAAES^{SC}, sendo elas, substituir os relés, prever outro valor de resistor (R6), prover outras soluções de circuito para caracterização de impedância, trabalhar com dispositivos de precisão e robustos à variações de temperatura, pressão e radiação. O circuito condicionador de sinal analógico terá um filtro passa baixa, que será construído passando o capacitor C3 para depois da R9, melhorando assim a qualidade do sinal. Todas as alterações visam melhorar no funcionamento do dispositivo e reduzir o tamanho e a massa.

Em relação aos testes realizados na amostra, o SAAESSC opera com tensão entre 50 mV e 10 V e corrente entre 5 mA e 1 A. Para os testes realizados na amostra selecionada, não foi possível usar o SAAESSC para fazer a aquisição dos dados, pois a amostra apresentou alta resistência em série, limitando a corrente a 100 μ A. Quanto à amostra selecionada, a capacitância específica aumenta com o aumento da temperatura, assim como a densidade de energia. Isso se deve ao eletrólito, pois o aumento de temperatura diminui a viscosidade, dessa forma a portabilidade dos íons aumenta, aumentando assim o número de portadores. Percebe-se também que os valores obtidos nos primeiros testes são maiores que os valores apresentados no segundo teste, tanto para a capacitância específica quanto para a densidade de energia.

Já a densidade de potência aumenta com o aumento de temperatura, mas esse aumento não é muito grande quanto as características anteriores. Porém, da primeira rodada de testes para a segunda a amostra

apresenta valores menores para as três características analisadas, isso indica a degradação da amostra com o passar dos testes. Entretanto, essa diferença está dentro do valor aceitável, sendo considerada pequena para a aplicação em que será empregada.

Outra observação a ser feita da amostra escolhida é em relação aos modelos de circuitos equivalentes que foram extraídos. Observa-se também que, para o circuito equivalente de dois ramos em paralelo e no modelo de redistribuição de cargas por difusão, no geral as capacitâncias específicas apresentaram uma elevação nos valores com o aumento da temperatura e as resistências diminuíram. Ao observar as capacitâncias de um teste para o outro nos dois modelos, no geral as capacitâncias específicas tenderam a diminuir assim como as resistências a aumentar da primeira rodada para a segunda rodada de testes. Esse comportamento das capacitâncias e das resistências de um teste para o outro corrobora a afirmação de que a amostra sofreu uma degradação entre as rodadas de teste.

A amostra testada apresenta uma resistência em série muito elevada, acima de $1.7\text{ k}\Omega$, o que implica em uma amostra muito resistiva. Essa característica interfere no tempo de carga e descarga da amostra, tornando esse tempo muito longo, o que inviabilizou o teste completo a 120°C de ciclagem galvanostática, pois o tempo de teste extrapolou 3 horas. Em relação à autodescarga, foi inviável descarregar o SC completamente, pois o teste duraria mais de 13 horas. Dessa forma, os testes foram feitos com o tempo mínimo estabelecido pela literatura, sendo possível extrair todos os dados necessários para os circuitos equivalentes analisados.

Por fim, a amostra de SC selecionada para o PdQSAT, CubeSat usado neste trabalho, consegue trabalhar na temperatura máxima atingida dentro do CubeSat, sendo essa temperatura a de melhor operação para o dispositivo. Isso ocorre porque é a temperatura em que apresenta as maiores capacitâncias, menores resistências, maiores densidades de energia e densidade de potência. Isso implica que não há a necessidade de prover proteção térmica para essa temperatura de trabalho.

9 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguindo a linha de pesquisa deste trabalho, são sugeridas outras linhas de pesquisa:

- Adicionar ao SAAES^{SC} a funcionalidade de voltametria cíclica e o teste para corrente de fuga.
- Ampliar a faixa de trabalho de tensão e de corrente do SAAES^{SC} para 2.5 V e 100 μ A.
- Adaptar o circuito do SAAES^{SC} para aplicações espaciais.
- Realizar os testes de ciclagem galvanostática de carga e descarga juntamente com o teste de carga e autodescarga em ambiente espacial simulado em laboratório na amostra de célula supercapacitiva selecionada.
- Desenvolver a melhor relação de massa entre eletrodo e eletrólito para alcançar as maiores capacitâncias possíveis para o componente.

Referências

- ABRASAT, A. B. das Empresas de Telecomunicação por S. Tipos de órbitas e seus satélites. 2014/2024.
- ABUROUK, T. et al. Design, fabrication, and testing of an electrical double-layer capacitor-based 1u cubesat electrical power system. *J. Small Satell.*, v. 7, n. 1, p. 701–717, 2018.
- ADETUNJI, J. Earth's got a new 'moon' - here's what to expect. *The Conversation*, The Open University, 2021.
- ALEXANDRE, S. A. *Preparo e caracterização de materiais de eletrodos e eletrólitos para aplicação em supercapacitores flexíveis*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- ALEXANDRE, S. A. et al. A highly adhesive pil/il gel polymer electrolyte for use in flexible solid state supercapacitors. *Electrochimica Acta*, Elsevier, v. 299, p. 789–799, 2019.
- ALKALI, M. et al. Laboratory verification of electric double layer capacitor based power system for a simple cubesat mission. *International Journal of Electrical Energy*, International Journal of Electrical Energy, v. 3, n. 3, p. 122–129, 2015.
- ALVES, F. E.; SILVA, P. P.; GUERRA, W. Metais do grupo da platina: história, propriedades e aplicações. *Revista da Sociedade Portuguesa de Química*, v. 119, p. 27–33, 2010.
- ANALYTICAL, S. 1255 *B LF Frequency Response Analyzer*. [S.l.], 2017.
- ANALYTICAL, S. 1287 *A Electrochemical Interface*. [S.l.], 2017.
- ANDRECIOLI, R. Uso de parametrização em problemas de inferência do tempo de vida de equipamentos com teste acelerado. *Salão de iniciação Científica (14.: 2002: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2002.*, 2002.
- AS, R. C. B.; JR, A. L. X. Em direção a uma taxonomia unificada para satélites com base em massa e tamanho. *II congresso Aeroespacial Brasileiro*, 2019.
- AVX, K. G. C. *SCM Series Series-Connected Super Capacitor Modules*. [S.l.].
- BOUWMEESTER, J.; GUO, J. Survey of worldwide pico-and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, Elsevier, v. 67, n. 7-8, p. 854–862, 2010.
- BUGRYNIEC, P. Cubesat: The need for more power to realise telecommunications. *final report of mini project, University of Sheffield*, 2016.
- BÜRGER, E. E. *Proposta de método para AIT de pico e nanossatélites*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2014.
- CAETANO, C. Sistmeas de informações gerenciais. In: *Aula 2, disponível em* <<http://www2.ic.ufl.br/ccaetano/aulas/SIG-Aula2.pdf>>, Acesso em 18 fev. 2025. [S.l.: s.n.], 2025.
- CAMPOS, M. D. S. et al. Supercapacitor portable system for automatic acquire of electrical signals, characterization and electrical schematic modeling for microelectronic device application. In: *IEEE. 2023 7th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. [S.l.], 2023. p. 1–6.
- CARMO, T. A. do; MOREIRA, J. de Q.; MANEA, S. Análise de blindagem à radiação “tid” e “seu” em memória do tipo sram em orbita leo (low earth orbit). 2021.

- CARVALHO, E. O. d. *Estudo do processo de aprendizagem significativa sobre órbitas de satélites e o imageamento da superfície terrestre num curso técnico em agrimensura*. Dissertação (Mestrado) — Insitituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
- CARVALHO, J. P. S. Consequências da exploração espacial: detritos espaciais. In: *Aula 10, Disponível em: <<http://www.inpe.br/a-engenharia-das-missoes-espaciais/arquivos/aula10.pdf>, Acesso em: 30 de dez. 2024*. [S.l.: s.n.], 2024.
- CHEN, H. et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science*, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 291–312, 2009.
- CHIN, K. et al. Li-ion battery and super-capacitor hybrid energy system for low temperature smallsat applications. 2014.
- CHIN, K. B. et al. Flight demonstration of a hybrid battery/supercapacitor energy storage system in an earth orbiting cubesat. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, IEEE, v. 36, n. 5, p. 24–36, 2021.
- CHIN, K. B. et al. Energy storage technologies for small satellite applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 106, n. 3, p. 419–428, 2018.
- CHIN, K. C.; GREEN, N. W.; BRANDON, E. J. Evaluation of supercapacitors for space applications under thermal vacuum conditions. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 379, p. 155–159, 2018.
- CLARO, L. H.; SANTOS, J. A. Danos de radiação em componentes eletrônicos nas aplicações aeroespaciais. In: *International Nuclear Atlantic Conference-INAC*. [S.l.: s.n.], 2005.
- COAN, M. R.; HIRSHORN, S. R.; MORELAND, R. A review of nasa’s protoflight policies and practices. In: *IEEE. 2017 IEEE Aerospace Conference*. [S.l.], 2017. p. 1–11.
- CORRÊA, C. M. *Novos líquido iônico e poli (líquido iônico) para aplicação em dispositivos eletroquímicos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.
- COSTA, K. H. d. A. M. d. *Desenvolvimento de supercapcitores híbridos epregando eletrodos compósitos de nanotubos de carbono/nanofibrilas de celulose e eletrólitos poliméricos géis*. Dissertação (Mestrado) — Centro Federqal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2021.
- COSTA, R. L.; SOUZA, P. N.; SCHUCH, N. J. Subsistema de suprimento de energia para o nanosatc-br: GeraÇão e armazenamento de energia. 2009.
- DECEA, D. d. C. d. E. A. Aes - estação terrestre de aeronave. In: *Glossário, disponível em <<https://www.decea.mil.br/index.cfm?i=utilidadesp=glossariosingle=2145>>, Acesso em 21 de fev. 2025*. [S.l.: s.n.], 2025.
- ENDO, É. Y. M. *Desenvolvimento de recobrimento de supercapacitores pelo método de sol-gel utilizando óxido de rutênio*. Universidade Federal do Pampa, 2017.
- FAPESP. Saturno tem mais luas que júpter. *Revista Pesquisa*, FAPESP, v. 285, p. 13, 2019.
- FARANDA, R. A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 80, n. 4, p. 363–371, 2010.
- FERNANDEZ, A. P. R. *Estudo das características elétricas e microestruturais de supercapacitores para armazenamento de energia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- FERNANDEZ, A. P. R.; FARIA JÚNIOR, R. N. d. *Estudo das características elétricas e microestruturais de supercapacitores para armazenamento de energia*. 2016.
- FERREIRA, P. et al. Tuning key parameters of electric circuit model for application in solid-state supercapacitors. In: *IEEE. 2023 7th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. [S.l.], 2023. p. 1–5.

FERREIRA, P. A. *Modelos de Circuitos Elétricos Para Simulação e Caracterização de Microsupercapacitores*. 2022.

FERREIRA, P. A.; SAUD, H. S.; SALLES, L. P. Portable system for automatic acquisition of electrical signals for supercapacitor characterization. In: IEEE. *2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. [S.l.], 2021. p. 1–6.

FLORENZANO, T. G. *Os satélites e suas aplicações*. [S.l.]: Sindicato dos servidores Públicos Federais na Área de Ciências e Tecnologia, 2008.

GALURA. *Impedanciometria complexa - 200 °C : célula de teste unidade de programação e controle de temperatura - manual de operação*. [S.l.], 1996.

GONTIJO, J. M. *Fabricação e caracterização de supercapacitores flexíveis com eletrodos compostos por multicamadas de grafeno e filmes finos de óxido metálico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2018.

GONZALEZ-LLORENTE, J. et al. In-orbit feasibility demonstration of supercapacitors for space applications. *Acta Astronautica*, Elsevier, v. 174, p. 294–305, 2020.

GONZÁLEZ, A. et al. Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 58, p. 1189–1206, 2016.

GUARESCHI, W. d. N. *Desenvolvimento de uma plataforma para teste e controle de cargas-úteis baseada em arquitetura reconfigurável*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

GUILHERME, R. B. *Projeto e Análise de Órbita para o PdQSat*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2022.

HALPER, M. S.; ELLENBOGEN, J. C. Supercapacitors: A brief overview. *The MITRE Corporation, McLean, Virginia, USA*, v. 1, 2006.

HE, Y.; WANG, Z.; ZHANG, Y. The design, test and application on the satellite separation system of space power supply based on graphene supercapacitors. *Acta Astronautica*, Elsevier, v. 186, p. 259–268, 2021.

INMET, I. N. de M. Balanço de dezembro de 2022 em belo horizonte - mg. 2023.

JAIN, D.; KANUNGO, J.; TRIPATHI, S. K. Characterization of supercapacitor for the development of energy storage units. In: IEEE. *2019 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*. [S.l.], 2019. p. 264–270.

JARA, F. G. B. *Estudo das microestruturas e características elétricas de supercapacitadores com eletrodos de carbono ativado e grafeno produzido via HDDR e eletrólito biocompatível para aplicações energéticas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.

JOGADE, S. et al. Mocvd of cobalt oxide using co-actylacetate as precursor: Thin film deposition and study of physical properties. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, Sumy State University, Journal of Nano-and Electronic Physics, v. 3, n. 1, p. 203, 2011.

JOHNSTONE, A. *CubeSat Desing Specification (1U - 12U) Rev 14.1 CP-CDS-R14.1*. [S.l.], 2022.

JÚLIO FILHO, A. C. et al. Desenvolvimento de um cubesat para detecção de descargas atmosféricas: Projeto raiosat. In: *Congresso Aeroespacial Brasileiro*, 2. [S.l.: s.n.], 2019.

KANG, J. et al. Development of an equivalent circuit model for electrochemical double layer capacitors (edlcs) with distinct electrolytes. *Electrochimica Acta*, Elsevier, v. 115, p. 587–598, 2014.

KNAP, V.; VESTERGAARD, L. K.; STROE, D.-I. A review of battery technology in cubesats and small satellite solutions. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 16, p. 4097, 2020.

- KOUCHACHVILI, L.; YAİCI, W.; ENTCHEV, E. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 374, p. 237–248, 2018.
- KUMAR, A. A.; KUMAR, V. D.; BERDIMURODOV, E. Recent trends in noble-metals based composite materials for supercapacitors: A comprehensive and development review. *Journal of the Indian Chemical Society*, Elsevier, v. 100, n. 1, p. 100817, 2023.
- KÖTZ, R.; CARLEN, M. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica acta*, Elsevier, v. 45, n. 15-16, p. 2483–2498, 2000.
- LIMA, A. G. de et al. Fadiga em componentes mecânicos: estudo para redução de perdas econômicas e de vidas. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, 2010.
- LINDEN, D.; REDDY, T. B. *Handbook of Batteries*. [S.l.]: WcGraw-Hill Companies, 2002.
- LU, M. *Supercapacitors: materials, systems, and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- LUKATSKAYA, M. R.; DUNN, B.; GOGOTSI, Y. Multidimensional materials and device architectures for future hybrid energy storage. *Nature communications*, Nature Publishing Group UK London, v. 7, n. 1, p. 12647, 2016.
- LYNCH, B.; WALLACE, C. Cubesat electronic power system. Santa Clara: Santa Clara University, 2014., 2014.
- MACENO, F. E. P. d. *Roteamento em redes de satélites de uma constelação de baixa órbita com vistas a redução do consumo energético*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, 2019.
- MARTINS, T. *Avaliação da colheita de energia termoelétrica para microsatélites*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- MICHELI, M.; SCHWAB, E. Mpec 2020-d104:2020cd3:temporarily captures object. The Inetrnational Astronomical Unnion, 2020.
- MONTEIRO, J. et al. Mecse: a cubesat mission aiming to measure and manipulate the ionospheric plasma layer. *Adv Astronaut Sci*, v. 163, n. December, p. 69–81, 2018.
- MOREIRA, A. M. Materiais compósitos. *Instituto Politécnico de Tomar, Portugal*, 2009.
- MÜLLER, A. et al. Estudo de sistemas elétricos de potência para satélites com Ênfase em nanossatélites da classe cubesats e desenvolvimento do balanço de potência do nanosatc-br2. 2017.
- NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. [S.l.]: Editora Blucher, 2016.
- NOORI, A. et al. Towards establishing standard performance metrics for batteries, supercapacitors and beyond. *Chemical Society Reviews*, Royal Society of Chemistry, v. 48, n. 5, p. 1272–1341, 2019.
- ORTEGA, P. F. R. *Desenvolvimento de novos supercapacitores e dispositivos híbridos baseados em líquidos iônicos para armazenamento de energia*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
- PAL, B. et al. Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review. *Nanoscale Advances*, Royal Society of Chemistry, v. 1, n. 10, p. 3807–3835, 2019.
- PAULA, E. d. S. F. de; MAGALHÃESB, R. O. de. Análise de balanço de potência, projeto preliminar de painel solar e dimensionamento de bateria de um cubesat 3u para detecção de raios. II Congresso Aerospacial Brasileiro, 2019.
- PEREIRA, M. C. P. d. F. d. et al. Pdqsat i - projeto e construção de um cubesat acadêmico para fins de sensoriamento remoto e demonstração tecnológica. Proposta de projeto submetida a Agência Espacial Brasileira, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- POSIELEK, T. An energy management approach for satellites. In: *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. [S.l.: s.n.], 2018.

- PRADO, A. F. B. d. A.; KUGA, H. K. *Fundamentos de tecnología espacial*. [S.l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2001.
- RIBEIRO, G. F. A. *Modelação de Sistemas de Propulsão Para Cubesats: Estudos Sobre o Eletrospray*. Dissertação (Mestrado) — Universidade da Beira Interior (Portugal), 2019.
- RICARDO, L. C. H. *Estimativa da vida sob fadiga de amplitude variável de um componente mecânico*. Dissertação (Mestrado) — INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 1999.
- RICHTER, J. H. *Electronic Properties of Metal Oxide Films Studied by Core Level Spectroscopy*. Dissertação (Mestrado) — Acta Universitatis Upsaliensis, 2006.
- ROTHERY, D. A surpreendente descoberta de 'minilua' que orbita a terra há três anos. *BBC News Brasil*, BBC News, 2020.
- SAMPAIO, E. J. P. *Óxido de Nb nanotubular aplicado como eletrodo de supercapacitor*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.
- SATPATHY, S. et al. An in-depth study of the electrical characterization of supercapacitors for recent trends in energy storage system. *Journal of Energy Storage*, Elsevier, v. 57, p. 106198, 2023.
- SEDLAKOVA, V. et al. Supercapacitor equivalent electrical circuit model based on charges redistribution by diffusion. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 286, p. 58–65, 2015.
- SHAO, Y. et al. Design and mechanisms of asymmetric supercapacitors. *Chemical reviews*, ACS Publications, v. 118, n. 18, p. 9233–9280, 2018.
- SHI, L.; CROW, M. Comparison of ultracapacitor electric circuit models. In: IEEE. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.], 2008. p. 1–6.
- SHIMIZU, T.; UNDERWOOD, C. Super-capacitor energy storage for micro-satellites: Feasibility and potential mission applications. *Acta Astronautica*, Elsevier, v. 85, p. 138–154, 2013.
- SILVA, E. H. d.; LOPES, J. L. D. Proposta de um cubesat universitário para desenvolvimento de tecnologias espaciais nacionais. 2020.
- SILVA, M. Metodologia para desenvolvimento de cubesat 1u acadêmico. *Final Paper II. Universidade Federal de Minas Gerais*, 2018.
- SILVA, R. C. B. A. d.; XAVIER JUNIOR, A. L. A unified satellite taxonomy proposal based on mass and size. *Advances in Aerospace Science and Technology*, Scientific Research Publishing, v. 4, n. 04, p. 57, 2019.
- SISNIEGAS, A. J. C. *Novel Designs of an Electrical Power Supply for CubeSats based on SuperCaps*. Tese (B.S. thesis) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.
- SOUZA, P. N. d. Satélites e plataformas espaciais. Instituto Nacional de Pesquisa - INPE, 2007.
- TOSTO, S. G. et al. Geotecnologias e geoinformação: o produtor pergunta, a embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa, 2014., 2014.
- TOTU, M. An innovative cubesat power system. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, v. 436, p. 40–46, 2013.
- TOTU, M.; DONȚU, O.; TOTU, E. E. Development of a nanosatellite electrical power system using li-ion supercapacitors. *UPB Sci Bullet Ser C: Electr Eng Comput Sci*, v. 79, p. 157–168, 2017.
- TRIGUEIRO, J. P. C. *Desenvolvimento de supercapacitores de alto desempenho baseados em eletrodos nanoestruturados e eletrólitos de líquidos iônicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

VANGARI, M.; PRYOR, T.; JIANG, L. Supercapacitors: review of materials and fabrication methods. *Journal of energy engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 139, n. 2, p. 72–79, 2013.

VRINDAVANAM, J. et al. Design and implementation of super capacitor energy storage in satellite applications. In: IEEE. *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*. [S.l.], 2020. p. 1–5.

WERTZ, J. R. et al. *Space mission analysis and design*. [S.l.]: Springer, 1999. v. 8.

WESLING, B. N. et al. Estruturas de carbono como eletrodos para supercapacitores de dupla camada elétrica. 2020.

YAN, Y. et al. Noble metal-based materials in high-performance supercapacitors. *Inorganic Chemistry Frontiers*, Royal Society of Chemistry, v. 4, n. 1, p. 33–51, 2017.

ZHONG, C. et al. A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, Royal Society of Chemistry, v. 44, n. 21, p. 7484–7539, 2015.

ZORNITTA, R. L. *Dessalinização usando tecnologia de deionização capacitiva*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2015.