

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

André Luiz Ramos Prado

**DESENVOLVIMENTO DE UM SUPERCAPACITOR LÍQUIDO
NANOESTRUTURADO FOTOSSENSÍVEL**

Cachoeira do Sul, RS
2021

André Luiz Ramos Prado

**DESENVOLVIMENTO DE UM SUPERCAPACITOR LÍQUIDO
NANOESTRUTURADO FOTOSSENSÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Jocenir Boita

Cachoeira do Sul, RS
2021

André Luiz Ramos Prado

**DESENVOLVIMENTO DE UM SUPERCAPACITOR LÍQUIDO
NANOESTRUTURADO FOTOSSENSÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 27 de setembro de 2021:

Jocenir Boita, Dr. (UFSM)
(Orientador)

Paulo César Vargas Luz, Dr (UFSM)

Glauber Rodrigues de Quadros, Dr (UFSM)

Fábio Beck, Dr (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2021

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM SUPERCAPACITOR LÍQUIDO NANOESTRUTURADO FOTOSSENSÍVEL

AUTOR: André Luiz Ramos Prado

ORIENTADOR: Jocenir Boita

Com os avanços da nanotecnologia, o aumento de adeptos ao uso de dispositivos em pequena escala está crescendo consideravelmente, podendo ser observado em produtos, como, por exemplo, os processadores em notebooks e desktops com estrutura de 7 nanômetros. A física moderna explica que, à medida que se diminui uma partícula, unicidades se tornam interessante, podendo até mesmo definir novas propriedades em sua nanoestrutura, sejam essas elétricas, químicas ou físicas. A diminuição de escala conseqüentemente pode gerar alterações nos padrões construtivos da macroestrutura, podendo gerar um material. Tendo como base de estudo as nanopartículas (NPs) de óxido de ferro, que apresentam propriedades elétricas em ascensão e melhorias nas reações químicas entre estruturas atômicas, elas apresentam-se promissoras no armazenamento de energia elétrica e possuem características fotossensíveis, o que proporciona possibilidades nas formas de transferência de cargas. Visando o armazenamento de energia elétrica, serão analisadas as possíveis interações fotônicas no nanocompósito de óxido de ferro tendo como formato um supercapacitor (SC) eletroquímico. A análise se desenvolverá por um capacitômetro digital integrado a uma plataforma gráfica para análises quantitativas sobre a capacidade de armazenamento de carga em razão da densidade de armazenamento, tendo como constantes experimentais temperatura, umidade e incidência eletromagnética no ato de leitura da capacitância.

Palavras-chave: Nanotecnologia. Óxido de ferro. Supercapacitor eletroquímico.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A PHOTSENSITIVE NANOSTRUCTURED LIQUID SUPERCAPACITOR

AUTHOR: André Luiz Ramos Prado

ADVISOR: Jocenir Boita

With the advances of nanotechnology, the increase in adepts to the use of small-scale devices is growing considerably and can be observed in products marketed with information that something was built on nanoscale, such as processors in notebooks and desktops with a structure of 7 nanometers. Modern physics explains that as a particle size decreases, unities become interesting and can even define new properties in its nanostructure, whether electrical, chemical or physical. The decrease in scale can consequently generate changes in the constructive patterns of the macrostructure and may generate a new component. Based on the study of the iron oxide nanoparticles (NPs), which have rising electrical properties and also improvements in chemical reactions between atomic structures, it is promising in energy storage and with photosensitive characteristics, which provides possibilities in the forms of charge transfer. To store energy, the possible photonic interactions in the iron oxide nanocomposite with an electrochemical supercapacitor (SC) format will be analyzed. The analysis will be developed by a digital capacimeter integrated with a graphical platform for quantitative analysis on the capacity of load storage due to storage density, having as constant experimental temperature, humidity and electromagnetic incidence in the act of measurement capacitance.

Keywords: Nanotechnology. Iron oxide. Electrochemical supercapacitor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte	14
Figura 2.2 – Comparativo da geração distribuída em 2019.....	15
Figura 2.3 – Cálice de Licurgo	16
Figura 2.4 – Jarra de Leyden	21
Figura 2.5 – Diversos tipos de capacitores	22
Figura 2.6 – Um capacitor de placas paralelas	24
Figura 2.7 – Capacitores em série	27
Figura 2.8 – Capacitores em paralelo	28
Figura 2.9 – Estrutura de camadas de um capacitor eletroquímico.....	29
Figura 2.10 – Fenômeno físico no interior dos supercapacitores.....	30
Figura 2.11 – Diagrama de Ragone.....	31
Figura 2.12 – Ponte Wheatstone.....	34
Figura 2.13 – Ponte Schering	36
Figura 2.14 – Galvanômetro.....	38
Figura 2.15 – Circuito RC série carregando o capacitor com fonte CC.....	39
Figura 2.16 – Curva de tensão do capacitor carregando em RC série.....	41
Figura 2.17 – Curva de corrente no capacitor carregando em RC série.....	42
Figura 2.18 – Curva de tensão no capacitor descarregando em RC	45
Figura 2.19 – Tempo de carregamento se torna igual a τ no circuito RC	47
Figura 2.20 – Modelos de microcontroladores.....	49
Figura 2.21 – Modelo elétrico Grove - SII145	51
Figura 2.22 – Modelo elétrico DHT11	51
Figura 4.1 – Simulação do capacitmetro em microcontrolador.....	58
Figura 4.2 – Estrutura do Blynk	59
Figura 4.3 – Criação de um Novo Projeto na plataforma Blynk	60
Figura 4.4 – Seleção do hardware e da comunicação no Projeto pelo aplicativo Blynk.....	60
Figura 4.5 – Acesso para chave <i>Auth Token</i>	61
Figura 4.6 – Ferramentas para uso no aplicativo e a escolha para utilizar no projeto do capacitmetro	62
Figura 4.7 – Funções do SuperChart e janela de medição.....	63
Figura 4.8 – Funções do menu e “tela cheia”	64
Figura 4.9 – Configuração standard e high no SuperChart	64
Figura 4.10 – Fluxo de dados do SuperChart no aplicativo teste	65
Figura 4.11 – Definições dos fluxos de dados no SuperChart.....	66
Figura 4.12 – Configurações do SuperChart para o DHT11	67
Figura 4.13 – Configurações do SuperChart para o SII145.....	67
Figura 4.14 – Configurações do SuperChart para o Capacímetro.....	68
Figura 4.15 – Configurações gerais de projeto do aplicativo	69
Figura 4.16 – Régua de sensores	71
Figura 4.17 – Hardware proposto para medição da capacitância na solução eletroquímica....	71
Figura 4.18 – Numeração dos microcontroladores para determinar suas funções de trabalho	72
Figura 4.19 – Bateria externa de 5.000mAh – 5V CC, para auxílio em modo remoto	73
Figura 4.20 – Suporte para cubetas de quartzo	73
Figura 4.21 – Exposição das ferramentas na preparação dos solutos	79
Figura 4.22 – Balança analítica para pesagem dos solutos e seu grau de precisão	79
Figura 4.23 – (a) Sulfato de ferro II, (b) citrato de sódio, (c) Polivinilpirrolidona e	

(d) ácido ascórbico	80
Figura 4.24 – Representação da adição de água deionizada no processo.....	81
Figura 4.25 – (a) Sulfato de ferro II, (b) citrato de sódio, (c) Polivinilpirrolidona e (d) ácido ascórbico em solvente (água deionizada).....	81
Figura 4.26 – Agitação dos compostos de forma individual como efeito catalizador.....	82
Figura 4.27 – Adição de (a) sulfato de ferro II em (b) citrato de sódio.....	82
Figura 4.28 – Adição de (c) Polivinilpirrolidona (PVP)	83
Figura 4.29 – Adição de (d) ácido ascórbico	83
Figura 4.30 – Solução eletroquímica supercapacitiva e fotossensível com nanopartículas	84
Figura 4.31 – Teste em composto com 0,61g e 24 horas após o preparo, amostra tipo “d”	86
Figura 4.32 – Teste em composto com 0,61g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “b”	87
Figura 4.33 – Teste em composto com 0,81g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “c”	88
Figura 4.34 – Teste em composto com 0,61g e janela superior a 40 dias, amostra tipo “a”	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Nanoaditivos para nanocompósitos e suas potencialidades.....	18
Tabela 2.2 – Constantes dielétricas para alguns materiais	25
Tabela 2.3 – Valores típicos de resistências série equivalente em supercapacitores	32
Tabela 2.4 – Valores de decaimento da tensão em resposta RC - série	46
Tabela 2.5 – Comparativo microcontroladores/microprocessadores	49
Tabela 2.6 – Estimativa de preço do capacitômetro	53
Tabela 4.1 – Materiais para o hardware de instrumentação e custo final.....	70
Tabela 4.2 – Unidades de medida do Minipa MDM-8145A.....	74
Tabela 4.3 – Medidas para capacitores de microfarad	75
Tabela 4.4 – Medidas para capacitores de nanofarad.....	75
Tabela 4.5 – Medidas para capacitores de picofarad.....	76
Tabela 4.6 – Medidas para capacitores de microfarad realizado pelo Minipa MDM-8145A..	76
Tabela 4.7 – Medidas para capacitores de nanofarad realizado pelo Minipa MDM-8145A....	77
Tabela 4.8 – Medidas para capacitores de picofarad realizado pelo Minipa MDM-8145A	77
Tabela 4.9 – Materiais da solução eletroquímica	77
Tabela 4.10 – Mistura dos reagentes para solução eletroquímica	80
Tabela 4.11 – Amostras utilizadas para os testes de capacitância do composto eletroquímico	85
Tabela 4.12 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,61g e 24 horas após o preparo, amostra tipo “d”	86
Tabela 4.13 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,61g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “b”	88
Tabela 4.14 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,81g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “c”.....	89
Tabela 4.15 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,61g e janela superior a 40 dias, amostra tipo “a”.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS

NPs	Nanopartículas
SC	Supercapacitor
UV-Vis	Luz Visível e Ultravioleta
TEM	Microscopia Eletrônica de Transmissão
XRD	Difração de Raios X
XPS	Espectroscopia de Fotoelétrons Induzidos
XAS	Espectroscopia de Absorção de Raios X
Q	Cargas
U	Urânio
Nm	Nanômetros
Au	Ouro
Ag	Prata
Si	Silício
Ddp	Diferença de potencial
SI	Sistema internacional
F	Farad
V	Volts
AC	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
RES	Resistência série equivalente
RuO ₂	Óxido de rutênio
RC	Capacitores com resistores em série
NTC	Coefficiente de Temperatura Negativo
IoT	Internet das Coisas
MIN	Minutos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.2	MOTIVAÇÃO.....	10
1.3	OBJETIVO	10
1.3.1	Objetivo geral	10
1.3.2	Objetivos específicos	10
1.4	METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	CONTEXTO	12
2.2	NANOTECNOLOGIA.....	15
2.2.1	Nanocompósitos	17
2.2.1.1	Fotossensibilidade, nanoestrutura e suas aplicações	18
2.2.1.2	Fotoelétrons e armazenadores de cargas	20
2.3	CAPACITORES.....	20
2.3.1	Supercapacitores	28
2.4	APARATO DE MEDIÇÃO	33
2.4.1	Modelos de medição para capacitância	35
2.4.1.1	Capacímetro digital proposto	38
2.4.1.2	Materiais para o capacímetro digital	48
2.5	SOLUÇÃO PROPOSTA.....	52
3	METODOLOGIA	55
4	Resultados e discussões	57
4.1	Simulação de um capacímetro por microcontrolador.....	57
4.2	Confeção do aplicativo e hardware	58
4.2.1	Aplicativo – Blynk	58
4.2.2	Hardware	69
4.2.3	Validação do capacímetro implementado	74
4.3	Confeção da solução supercapacitiva fotossensível nanoestruturada	78
4.3.1	Solução eletroquímica	78
4.3.2	Medição da capacitância da solução eletroquímica pelo capacímetro proposto	84
5	Considerações finais	91
5.1	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE A – Código simulado no proteus (capacímetro)	99
	APÊNDICE B – (1) Capacímetro	103
	APÊNDICE C – (2) Sistema de monitoramento	106
	APÊNDICE D – Diagrama elétrico multímetro	108

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo desenvolve-se o contexto que irá abordar a crescente necessidade em desenvolver armazenadores de energia, estes cada vez mais eficientes e de baixo custo. Assim como as suas possibilidades de comercialização e seus pontos que sobrepõem modelos convencionais como baterias e os capacitores eletrolíticos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas últimas décadas, aumentou-se significativamente o interesse no desenvolvimento de dispositivos de armazenamento de energia que sejam eficientes e seguros. Capazes de agregarem altas densidades de potência e energia, os supercapacitores estão encontrando cada vez mais adeptos ao seu desenvolvimento e implementação. Dado pelo crescente número de equipamentos eletrônicos portáteis e a aceitação dos veículos elétricos, o designer de um componente capaz de melhorar o desempenho através de características como elevada vida útil, dimensões reduzidas e flexibilidade, chama a atenção (NETTO; TELLES, 2016) (BOITA et al., 2017).

Em concomitante, têm-se os avanços nas técnicas desenvolvidas pela comunidade científica no que tange à confecção em nanoescala, que pode ser alcançada através de métodos de controle de síntese, como o top-down, por desgaste mecânico, ou o bottom-up, pela litografia. O uso de técnicas de caracterização de nanopartículas desenvolvidas para investigação em nanoescala auxiliam no entendimento da matéria, obtendo melhores e mais confiáveis aplicações em nanoestruturas. Dentre as técnicas de caracterização a nível atômico existem, por exemplo, a Espectroscopia de Absorção da Luz Visível e Ultravioleta (UV-Vis), a Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM), a Difração de Raios X (XRD), a Espectroscopia de Fotoelétrons Induzidos por Raios X (XPS) e a Espectroscopia de Absorção de Raios X (XAS) (RÓZ et al., 2014) (RIBEIRO et al., 2018) (TOMA, 2016).

Com os avanços da ciência voltada para investigações quânticas da matéria, os supercapacitores eletroquímicos se destacam frente aos modelos tradicionais, estes sendo os eletrolíticos e não eletrolíticos. Além disso, ainda existe uma perspectiva de o componente servir para suprir as imperfeições das baterias, como baixa vida útil, presença de material tóxico aos seres humanos e ao ecossistema, alto custo e baixa densidade de potência (TOMA, 2016). No entanto, o modelo de supercapacitor que será proposto não envolve materiais tóxicos, sendo este um ponto importante na comparação com as baterias.

1.2 MOTIVAÇÃO

Capacitores e supercapacitores compartilham um modelo de construção, que parte da disposição entre duas placas paralelas com áreas finitas separadas por um dielétrico, que ao serem submetidas a uma diferença de potencial geram um campo elétrico, o que possibilita o armazenamento de cargas (Q) (NETTO; TELLES, 2016) (PANDOLFO et al., 2013). Com o uso promissor das características elétricas e fotoelétricas de nanopartículas de óxido de ferro em estado líquido, surgem como possibilidade os meios e condições de se obter um novo conceito e capacidade de armazenamento para os supercapacitores frente aos modelos tradicionais (BOITA et al., 2017).

Com as premissas sobre o material nanoestruturado a base de óxido de ferro, será desenvolvido um modelo de estudo para complementar os modelos de supercapacitores já existentes, observando sua capacidade de armazenar cargas e possibilidades para o aumento na capacidade de uso destes componentes eletrônicos (BOITA et al., 2017) (NITHYA; ARUL, 2016).

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo geral

Propor um supercapacitor nanoestruturado eletroquímico fotossensível em forma líquida a base de óxido de ferro através de uma análise interdisciplinar das áreas de engenharia elétrica com a física experimental, sendo importante a inserção de um aparato de instrumentação que possibilite a medição de grandezas elétricas do supercapacitor, assim como seu comportamento.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Desenvolver uma solução eletroquímica que auxilie em propriedades supercapacitiva e que seja fotossensível;
- Estudo e confecção de supercapacitores eletroquímicos com metodologia simples e eficaz;

- Desenvolver um aparato de instrumentação para aquisição de grandeza capacitiva no modo *ex situ*.

1.4 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está dividido, a partir desta seção, em três capítulos. No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica necessária para a elaboração do aparato de medição da capacitância em função do espectro visível, temperatura e umidade. Assim contextualiza-se o cenário atual do universo nanométrico e suas atribuições às áreas de engenharia, determinando a grandeza elétrica de capacitância, e como se prospectou a necessidade de implementar supercapacitores eletroquímicos, assim como uma descrição detalhada de todos os componentes necessários para a elaboração do capacímetro. A proposta do nanocompósito em estado líquido é apresentada no final da seção, junto ao método de síntese do óxido de ferro que exibe uma capacitância fotossensível.

No terceiro capítulo será descrito o cronograma de atividades, a metodologia do projeto e a expectativa dos resultados, no que diz respeito ao capacímetro e a solução de óxido de ferro. Por último é apresentado o capítulo referente às conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção argumenta sobre os fundamentos teóricos necessários para a resolução do trabalho, desenvolvendo o contexto da nanociência no Brasil e no mundo, que parte da necessidade de tecnologias mais avançadas e que entram na denominação de nanotecnologia. Serão descritas as grandes possibilidades de avanços proporcionados pela nanotecnologia, na melhoria de capacitores eletroquímicos e, também, serão apresentados os diferentes tipos de capacitores disponíveis e em quais aspectos são aplicados. Para o protótipo escolhido neste trabalho, serão retratados todos os procedimentos fundamentais para a caracterização de um supercapacitor e, ao final do capítulo, é descrito o projeto a ser realizado.

2.1 CONTEXTO

Uma das grandes características do ser humano é a cultura, sendo um dos principais itens que nos torna uma espécie singular. Visto pelos traços evolutivos, a ciência é uma das poucas convicções sendo compartilhada por todas as culturas, ciência esta que possibilita a melhora na qualidade de vida e soluciona problemas das mais diversas complexidades e áreas. A sociedade moderna, sendo sustentada pelas técnicas experimentais, teorias e leis universais já iniciadas por pensadores datados dos séculos VI e V a.c, marca a humanidade com a obrigação de evoluir constantemente (DONATO, 2012). Essa incessante curiosidade e necessidade de avançar sobre conhecimentos já adquiridos, prospecta novas oportunidades para a sociedade em que vivemos, tornando-a melhor. Esses progressos podem ser analisados através das grandes contribuições das engenharias no desenvolvimento de energias renováveis, tecnologias de compartilhamento massivo do conhecimento, melhorias no combate a enfermidades, recuperação da fauna e flora que antes haviam sido degradadas e, por exemplo, a substituição de fontes energéticas derivadas do petróleo (DONATO, 2012).

Dentro do cenário atual, há grande demanda por tecnologias e equipamentos diversos como um telefone de bolso com acesso à internet aos provedores da rede ou aos embarcados em um sistema de satélite para possibilitar a globalização, tendo também a necessidade de suprir um excesso na demanda energética de uma dada distribuidora. Todas essas tecnologias se assemelham na necessidade de produzir com sustentabilidade e com viés econômico que viabilize sua implementação. Dada esta condição, existe uma demanda global por investimento em pesquisas que possibilitem uma geração de conhecimento para fortalecer um novo conceito de indústria, sendo esta rentável e que não agrida o ecossistema. Tais

informações resultam em uma união global, sendo esta fortalecida pela internet e o compartilhamento instantâneo do conhecimento para o aprimoramento das tecnologias e o avanço de teorias que antes teriam um tempo de amadurecimento e desenvolvimento mais gradual e lento.

Dado como exemplo, existe a grande dependência da humanidade em combustíveis fósseis, estes sendo combustíveis não renováveis se baseados no ciclo de vida dos seres humanos. Essa matéria prima não renovável, mas imprescindível para o mundo, traz consigo um histórico marcado por crises econômicas como em 1979, nomeado como choque do petróleo, e políticas marcadas muitas vezes por guerras civis em Estados detentores de grandes reservas de petróleo, gás e derivados (DONATO, 2012) (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2020).

O Brasil é contemplado não só por grandes reservas de minérios como o urânio (U), mas também com o petróleo, gás de xisto, matéria orgânica para queima e sendo favorecido por inúmeros recursos hídricos (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2020) (BRASIL, 2020). Diante dos grandes afluentes e mananciais de água, o Brasil detém um posto admirável como um dos maiores em matriz energética advinda de fonte renovável, sendo elas as hidroelétricas. Porém, as necessidades sobre as hidroelétricas vêm sendo gradativamente supridas por energias renováveis como a fotovoltaica, termoelétricas advindas por torres térmicas e fazendas eólicas. Isto porque as fontes hidroelétricas trazem problemáticas socioeconômicas e principalmente ambientais, visto que se necessita de grandes reservatórios e demanda de grandes áreas inundadas que antes eram reservas de fauna e flora locais ou áreas com comunidades ribeirinhas e/ou indígenas.

Esta mudança na matriz energética brasileira pode ser vista pela seguinte análise observada na Figura 2.1, que mostra a representação de oferta energética no Brasil em 2019 por tipo de matriz.

Figura 2.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.

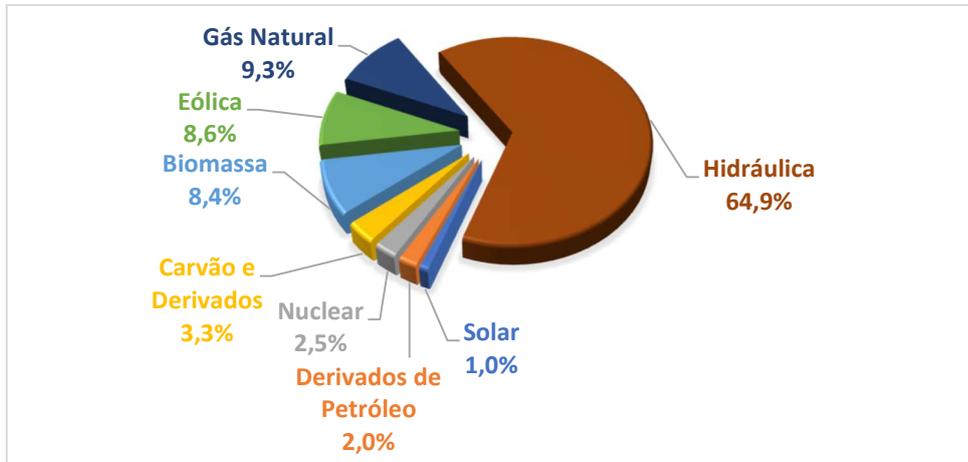


Figura: Adaptada de (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020b).

Em comparação à oferta do ano de 2018, no ano de 2019 ocorreu um aumento de 169 % na geração distribuída (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020c), como é ilustrado na Figura 2.2.

No Brasil, tem-se como projeção demográfica para o ano de 2050 um aumento de 21 milhões de habitantes, sendo o total estimado em 226 milhões de habitantes (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020d). Esse aumento populacional traz como desafio suprir toda esta demanda energética, que não pode ser resolvido simplesmente implementando fontes de geração distribuída ou matrizes hidráulicas e, muito menos, adquirindo fontes termoelétricas a base de combustíveis fósseis, visto que vai em contramão à necessidade das políticas sustentáveis para a conservação do meio ambiente (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020d).

Diante do cenário globalizado, apesar dos problemas não se limitarem mais a uma única nação, as soluções não são limitadas por fronteiras. Os grandes avanços em indústrias 4.0, o desenvolvimento de veículos híbridos e 100 % elétricos, assim como o compartilhamento de conhecimentos possibilitou uma desaceleração na degradação do ecossistema. Dado as grandes eficiências em produção, gera-se um número de descartes e resíduos industriais muito inferiores aos modelos industriais que antecedem a década de 90. Como exemplo, os veículos totalmente elétricos não demandam de nenhuma emissão de poluentes ou gases, necessitando exclusivamente de gerações complementares, obtidas de frenagens e inércia do veículo, ou uma fonte de energia elétrica já existente.

Figura 2.2 – Comparativo da geração distribuída em 2019.

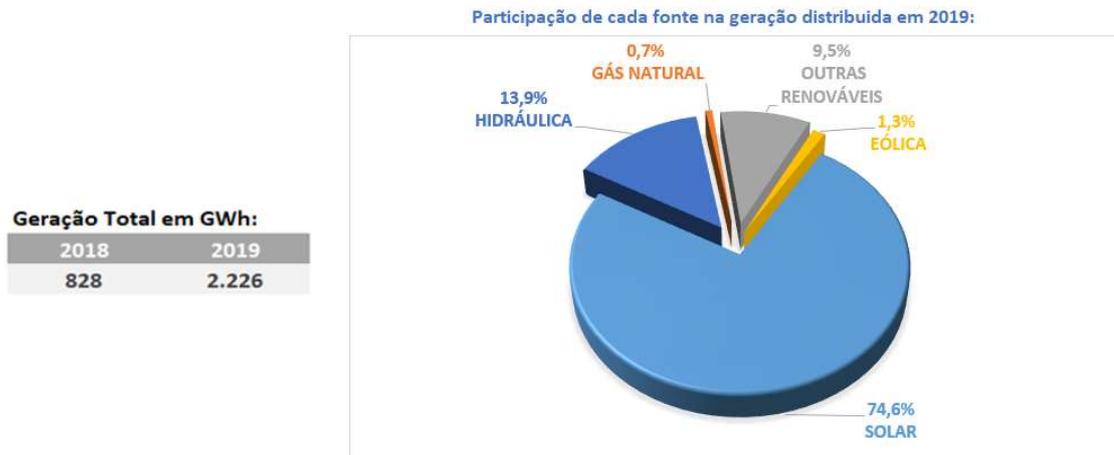


Figura: Adaptado de (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020c).

Desta forma, tendo uma janela promissora ao desenvolvimento de fontes energéticas mais eficientes, sistemas de geração distribuída para residências, comércios e indústrias, a modernização de aparatos científicos, todos, sem exceção, demandam de um componente passivo que seja capaz de conciliar uma alta densidade de energia armazenada em função de um mínimo volume (CONWAY, 1999).

Partindo da premissa apresentada, a necessidade de componentes eletrônicos passivos é primordial para produção de qualquer aparato/tecnologia, pois, seja um simples dispositivo de carregamento, como exemplo fontes chaveadas, ou um dispositivo que demande uma alta complexidade construtiva, como desenvolvimento de inversores solares para seu funcionamento adequado, é necessário um capacitor.

Dentro deste contexto, será discutido neste trabalho o armazenamento de energia por campo elétrico, apresentando os fundamentos dos supercapacitores eletroquímicos e identificando padrões na capacitância que podem ser úteis para as mais diversas áreas da ciência, impulsionando pesquisadores que desejam participar dessa área de conhecimento pouco explorada.

2.2 NANOTECNOLOGIA

Determinar uma data específica para origem da nanotecnologia é um tanto quanto controverso, pois coincide com a amplitude da globalização e interações mais intensas entre as comunidades científicas. A nanotecnologia é uma pequena parte sobre um vasto universo do mundo quântico, sendo obtida através da investigação e manipulação da matéria na escala

dos bilionésimos de um metro, denominado como nanômetros (nm). Esta ciência é atualmente grande propulsora na correlação das áreas como física, química, engenharias entre outras, que antes eram, muitas vezes, interpretadas como excludentes (ALVES, 2004) (MARQUES, 2014).

Tendo como exemplo a presença de nanopartículas, o cálice de Licurgo apresentado pela Figura 2.3, é um dos primeiros registros de nanopartículas sendo aplicada pelos seres humanos e é uma das mais famosas antiguidades romanas, datada do século IV d.c (TOMA, 2016) (RÓZ et al., 2014).

Em meados do século XIX os fenômenos físicos, químicos e ópticos da matéria em escala nanométrica foi objetivo de estudo pelo físico inglês Michael Faraday, mas foi somente no século XX que o conceito de nanotecnologia teve uma de suas primeiras aparições. Em 1959 o físico Richard Feynman apresentou conceitos que hoje fazem parte dos estudos em partículas nanométricas e, em 1974, o professor Norio Taniguchi criou o termo “nanotecnologia”, que era a caracterização de máquinas que tivessem níveis de tolerância inferiores a um micron (1000 nm) (TOMA, 2016). Em meados do século XX os pesquisadores Gerd Binnig e Heinrich Rohrer criaram o microscópio eletrônico de tunelamento, aparelho que permitiu o imageamento de átomos individuais, em 1981 (RÓZ et al., 2014) (TOMA, 2016) possibilitando o que Richard Feynman havia indagado em 1959, que era a manipulação dos átomos.

Figura 2.3 – Cálice de Licurgo.



Fonte: Adaptada de (OPTICAL METAMATERIALS, 2007).

Com os avanços das tecnologias de caracterização de materiais e, tendo como estudo o cálice de Licurgo, foi constatada a presença de partículas metálicas dispersas no vidro do

cálice. Em sua estrutura existe a presença de nanopartículas de ouro (Au) e prata (Ag), o que lhe proporcionava peculiaridades óticas aos estudiosos da época e para ciência contemporânea. Sendo analisadas, as dimensões das partículas de Au, as quais influenciam a absorção da luz, as partículas com diâmetros superiores a 20 nm deslocam a banda de absorção para comprimentos de onda maiores que 530 nm. De forma contrária, as partículas menores que 20 nm deslocam a absorção da luz para os menores comprimentos de onda (TOMA, 2016) (TOMA et al, 2018).

Dado o tamanho das nanopartículas distribuídas no vidro do cálice, observou-se a possibilidade de obter diferentes cores, como laranja, púrpura, vermelho e verde, a partir da possibilidade de controle da distribuição de tal tamanho. A cor característica do vidro Ruby é a vermelha, estando no limite do comprimento de onda em 530 nm, logo apresentando nanopartículas da ordem de 20 nm. Neste exemplo, dado pelo estudo realizado no cálice de Licurgo, pôde ser comprovado as hipóteses de que as propriedades, sejam elas elétricas, óticas ou mecânicas, estão diretamente ligadas ao tamanho das partículas (TOMA, 2016) (TOMA et al, 2018).

2.2.1 Nanocompósitos

Os nanocompósitos se apresentam como a caracterização dos materiais obtidos a partir de técnicas de síntese por meio do incremento átomo a átomo. Assim, as nanopartículas são substitutas para os aditivos macroscópicos convencionais, o que resulta em compósitos com melhores desempenhos no que diz respeito as propriedades mecânicas, elétricas, óticas entre outras. A síntese de nanocompósitos pode ser obtida por dois modelos principais, sendo o método de baixo para cima, conhecido como bottom-up, onde os materiais e dispositivos são construídos a partir de componentes moleculares que se organizam quimicamente por princípios de reconhecimento molecular (TOMA et al, 2018) (RÓZ et al., 2014). Tendo também o método de cima para baixo, conhecido como top-down, onde objetos em escala nano são construídos a partir de outros em maior escala e, por isso, acabam não tendo um controle do nível atômico.

A Tabela 2.1 exemplifica alguns nanoaditivos e suas propriedades complementares ao nanocompósito gerado.

Tabela 2.1 – Nanoaditivos para nanocompósitos e suas potencialidades.

Nanoaditivos	Propriedades
Nanopartículas de carbono	Aumento de resistência à abrasão, à tração e aumento da condutividade elétrica.
Nanotubos de carbono	São aditivos excepcionalmente fortes (na escala individual, têm cem vezes a força de tração do aço). Proporcionam maior leveza aos materiais e aumentam a condutividade elétrica/térmica.
Óxidos metálicos nanoparticulado	Têm propriedades específicas, incluindo: fotocatalise (TiO ₂), condutividade elétrica, proteção UV (ZnO, TiO ₂), atividade antimicrobiana (TiO ₂), resistência mecânica, qualidade óptica (ZrO ₂) e propriedades magnéticas (Fe ₃ O ₄ , g-Fe ₂ O ₃).
Nanopartículas metálicas	Possuem propriedades variadas, incluindo atividade antimicrobiana (Ag) e condutividade.
Argila nanoparticulada	Aumento na resistência elétrica, mecânica e química; proteção UV e atua como retardante de chama.

Fonte: Adaptada de (TOMA, 2016).

2.2.1.1 Fotossensibilidade, nanoestrutura e suas aplicações

O efeito fotoelétrico foi formalizado por estudos sobre ondas eletromagnéticas publicado por Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1894) e elucidado por Albert Einstein (1879 - 1955), onde foi observado através de um experimento que, onde havia a incidência de luz sobre o cátodo de um aparato de descargas elétricas, tais descargas se intensificavam (MANGILI, 2012). Hertz, então, descobriu o efeito fotoelétrico pela emissão de raios catódicos induzidas pela luz, sendo reforçado por estudos de própria autoria, onde justificava que um campo eletromagnético oscilante aplica uma força também oscilante sobre as partículas carregadas de um material metálico (MANGILI, 2012) (SILVA et al, 2018).

Ao longo do tempo, essas observações foram sendo complementadas à teoria do efeito fotoelétrico, observando-se a possibilidade de selecionar o comprimento de onda para um

determinado material, sendo este potencializado por meio de dopagem de materiais e fornecendo portadores de cargas majoritárias e minoritários, o que resultava em um aumento na eficiência em gerar uma corrente elétrica.

Todos os princípios quânticos desenvolvidos e intensificados pela física moderna trazem conceitos teóricos vistos experimentalmente, sendo plenamente capazes de serem reproduzidos em diversos outros materiais disponíveis na natureza. Devido aos avanços tecnológicos e o melhoramento dos aparatos de microscopia e de caracterização de materiais, podem ser observadas pela sociedade contemporânea algumas aplicações da nanotecnologia no dia a dia. Temos em larga escala a produção de processadores mais rápidos, construídos a escalas de sete nanômetros, materiais mais leves e resistentes como, por exemplo, blocos de cimento nanoestruturados, novos dispositivos armazenadores de energia como baterias, supercapacitores, e equipamentos com menor consumo energético e melhor definição de imagem, como as telas de OLEDs – Organic Light Emitting Diodes (RÓZ et al., 2014).

O aproveitamento do conhecimento das nanopartículas se intensificou a partir do ponto em que se considerou as nanoestruturas de um material. Como informado, a dopagem tornou o efeito fotoelétrico muito atrativo para uma sociedade que experimentava o desconhecido mundo quântico. As células solares, sendo produzidas para fornecer energia elétrica a partir da luz, tendo como matéria prima o silício (Si), sendo este um dos elementos mais abundantes. Estas células fotoelétricas são produzidas por uma tecnologia bem estruturada, porém ainda se apresenta dispendiosa. O custo é elevado devido as técnicas rigorosas para dopagem dos substratos de silício (Si), tendo o mínimo de variação de temperatura, umidade, pressão, assim como erros mínimos de controle do sistema de produção das células solares (NASKAR et al, 2021).

As aplicações da nanotecnologia se estendem ao desenvolvimento dos armazenadores de alta energia, sendo eles os supercapacitores eletroquímicos. Estes, em literaturas tradicionais, apresentam os eletrodos formados por nanotubos de carbono (XIE; DU, 2015), nanotubos de titânio e outras nanopartículas poliméricas, que partem do fundamento teórico de aumentar as áreas de placas do cátodo e ânodo, em que são responsáveis por armazenarem as cargas, dado um campo elétrico aplicado entre as placas. De acordo com a física moderna, as propriedades ondulatórias dos elétrons dentro da matéria são diretamente relacionadas as dimensões das partículas. A produção em nanoescala resulta na adição e/ou modificação das características, térmicas, eletroquímicas, mecânicas em sua macroestrutura, sem alterar sua base química.

2.2.1.2 Fotoelétrons e armazenadores de cargas

Ao serem observadas as projeções do efeito fotoelétrico propagando-se como partículas, hipótese desenvolvida inicialmente por Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) e interpretada por Einstein, postulou-se que o efeito fotoelétrico é a “*absorção de um fóton pela matéria, levando à ejeção de um elétron*” (MANGILI, 2012).

Os estudos recentes sobre as nanopartículas em que ocorre incidência de luz sobre essas partículas que se aproximam às dimensões de um átomo, demonstram que o fenômeno típico observado é o espalhamento difuso, conhecido como efeito Tyndall, permitindo-se observar a propagação dos raios de luz em uma suspensão ou solução coloidal (TOMA, 2016).

Entretanto, relata-se que para algumas nanopartículas metálicas o espalhamento da luz se torna dissonante ao convencional, dado a natureza eletromagnética na área superficial da partícula nanométrica. Com isto, abriu-se uma janela sobre as possibilidades de adicionar aos componentes já desenvolvidos para o armazenamento de carga, como os supercapacitores, o efeito fotoelétrico. As finalidades podem ser inúmeras, mas, por bibliografias recentes, os estudos foram fomentados para potencializar a eficiência sobre os efeitos de recarga dos supercapacitores (NASKAR et al, 2021). Isto é explicado conforme a absorção de energia, sendo esta fornecida por uma radiação eletromagnética aos eletrodos, passando-os para um estado de excitação no qual possibilita injetar elétrons na banda de condução dos substratos dos coletores/eletrodos (TOMA, 2016) (NASKAR et al, 2021).

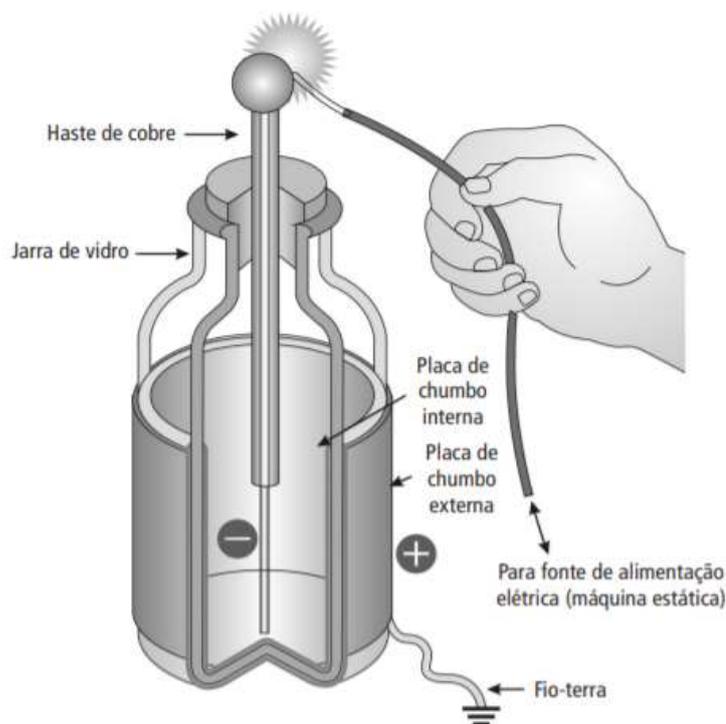
Compreendendo o efeito fotoelétrico e sua interação com nanopartículas, devemos analisar como este fenômeno pode auxiliar em um componente como os capacitores.

2.3 CAPACITORES

Capacitores é um grupo de componentes eletrônicos passivos e suas principais funções resumem-se no armazenamento de cargas (Q) na forma de energia potencial elétrica, em oposição a uma diferença de potencial (ddp) e na discriminação de frequências, sendo extremamente útil em circuitos AC (LOPES et al., 2018). Como aplicação, são encontrados em rádios para sintonia das frequências desejadas, como reguladores de tensão em fontes de carregamento CC, disparadores de flashes em câmeras fotográficas e em bancos de memória dos computadores CC.

Historicamente o conceito de armazenadores de cargas teoriza-se por volta de 1745 sendo descoberto por Ewald Georg von Kleist (1700 - 1748), em que poderia armazenar cargas elétricas em uma jarra com água. Em trabalhos independentes pelo holandês Pieter von Musschenbroek (1692 - 1761), no ano de 1746 teve-se a nomeação do primeiro capacitor como Jarra de Leyden, visto na Figura 2.4. Formado por um frasco ou jarra de vidro com um gargalo estreito, parcialmente preenchido com água, a jarra continha um condutor elétrico que atravessava uma rolha no gargalo e era imerso na água (SCHESTATSKY, 2013).

Figura 2.4 – Jarra de Leyden.



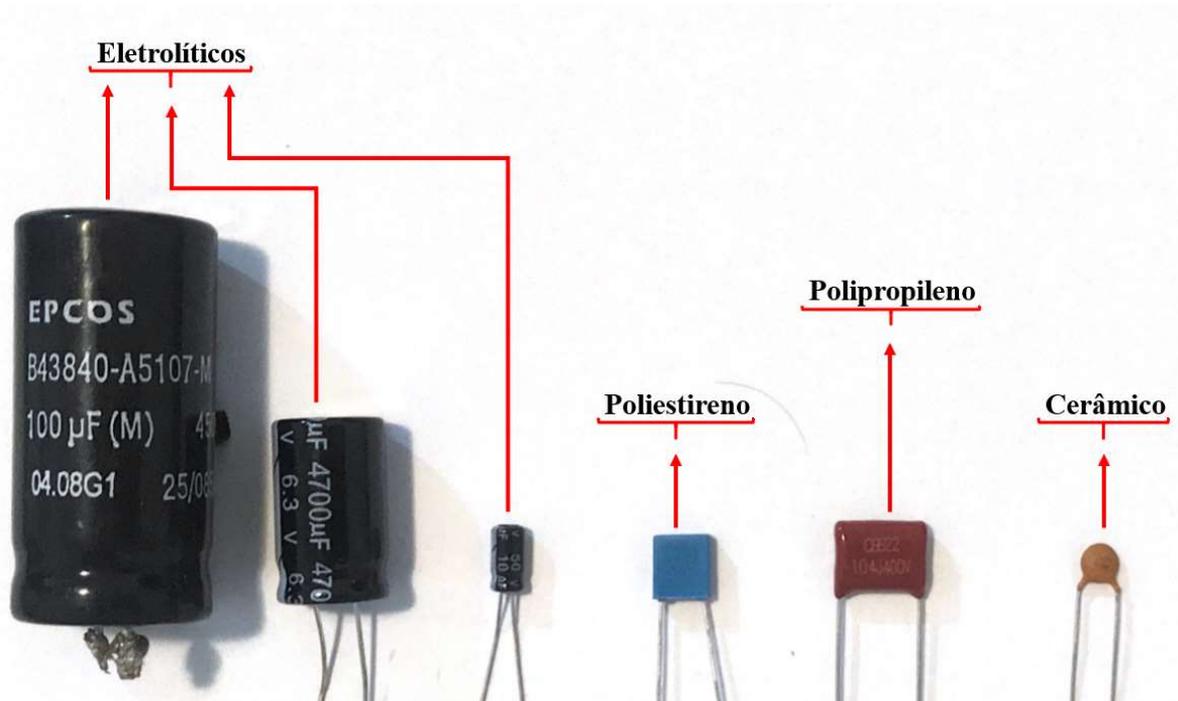
Fonte: (SCHESTATSKY, 2013).

Outras contribuições foram sendo realizadas ao decorrer do tempo, como a substituição da água por folhas condutoras por Benjamin Franklin (1706 - 1790). Alessandro Volta (1745 - 1827) o denominou como condensador de cargas elétricas e, Michael Faraday (1791 - 1867) incluiu o conceito de constante dielétrica.

Para o sistema internacional (SI), as unidades de medidas envolvidas na determinação da capacitância, derivam dos Coulombs por Volt e, em homenagem a Michael Faraday, a unidade do SI para capacitância nomeou-se como farad (F). Esta grandeza elétrica é uma propriedade dos condutores, entre cujas placas exista uma diferença de potencial elétrico,

sendo os elementos básicos de qualquer capacitor dois condutores isolados por um dielétrico que podem ter formatos arbitrários. Os condutores são denominados como eletrodos ou placas, quaisquer que sejam suas geometrias, e os capacitores podem ser apresentados numa grande variedade de tamanhos, formas e materiais como pode ser visto na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Diversos tipos de capacitores.



Fonte: Autoria própria.

Os tipos de materiais empregados, assim como sua geometria são fatores importantes para determinar a capacitância do componente, pois a permissividade do dielétrico, o distanciamento e as geometrias dos eletrodos são quem determinam de fato o potencial deste componente. Existem capacitores que possuem como dielétrico o papel, sendo folhas de kraft enroladas entre os condutores. Há também os que utilizam poliestireno, polipropileno ou poliéster como dielétrico, sendo que os de poliéster se destacam pela elevada resistência mecânica e a umidade.

Em uma escala de crescimento tecnológico os mais atualizados são os de óxido de alumínio, tântalo ou nióbio que são popularmente denominados como eletrolíticos. Os capacitores eletrolíticos de alumínio usam uma folha de alumínio gravada de alta pureza com óxido de alumínio como dielétrico. Já os eletrolíticos de tântalo usam um pellet sinterizado de pó de tântalo de alta pureza com pentóxido de tântalo como dielétrico. Os eletrolíticos de

nióbio usam pastilhas sinterizadas de nióbio de alta pureza ou óxido de nióbio em pó com pentóxido de nióbio como dielétrico.

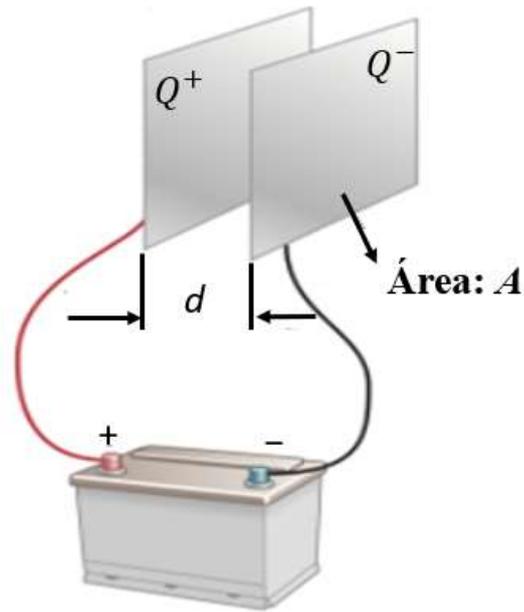
O princípio de armazenamento dos capacitores apresentados se diferencia dos capacitores eletroquímicos ou supercapacitores, nos quais o eletrólito geralmente é a conexão condutiva iônica entre dois eletrodos e o armazenamento ocorre com a capacitância da camada dupla dos eletrodos e da pseudocapacitância eletroquímica.

Como modo de operação, os eletrodos, que são chamados de placas paralelas, determinam a área que será produzido o campo elétrico, sendo separadas por um isolante. Nos capacitores, os eletrodos são carregados com cargas opostas, um polariza negativamente, denominado como ânodo (-), e outro positivamente, denominado como cátodo (+). Por serem condutores, cada um deles constitui uma superfície equipotencial com uma ddp entre elas, dada em volts (V) (HALLIDAY et al., 2020). A carga armazenada $q \left[\frac{C}{m^2} \right]$ é diretamente proporcional a força eletromotriz $[\Delta V]$ aplicada na constante de proporcionalidade $C [F]$ do capacitor, sendo representado pela Equação 2.1 (HALLIDAY et al., 2020) (NETTO; TELLES, 2016).

$$q = C \Delta V \quad (2.1)$$

O gerador tem o papel de realizar um trabalho elétrico deslocando os elétrons de um condutor a outro, o que resulta em uma ddp entre os condutores igual à diferença de potencial entre os terminais da fonte, como mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Um capacitor de placas paralelas.



Fonte: (SERWAY; JEWETT, 2018).

Quando se preenche por completo, o espaço entre as placas de um capacitor por um material dielétrico, a capacitância é acrescida por um fator ϵ_r , chamado constante dielétrica, que é uma característica do material utilizado. Estando completamente preenchida por um dielétrico, todas as equações eletrostáticas devem ser representadas por $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$. Sendo que ϵ_0 é a representação da permissividade no vácuo (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2019).

Sabendo-se que o campo elétrico \vec{E} existente entre os eletrodos relaciona-se com a carga q , temos que, para qualquer tipo de geometria, usa-se a lei de Gauss Equação 2.2 (HALLIDAY et al., 2020) (NETTO; TELLES, 2016).

$$\frac{q}{\epsilon} = \oint \vec{E} d\vec{A} \quad (2.2)$$

Trabalhando a integral, o campo elétrico pode ser reescrito da seguinte forma descrita na Equação 2.3 (HALLIDAY et al., 2020) (NETTO; TELLES, 2016).

$$E = \frac{q}{\epsilon A} \quad (2.3)$$

Já o campo elétrico é determinado pela diferença de potencial entre as placas, como é visto na Equação 2.4 (HALLIDAY et al., 2020).

$$V = (V_+) - (V_-) = \int_0^d E dl = Ed \quad (2.4)$$

Onde (V_+) é a polarização de um dos eletrodos por cargas positivas e (V_-) é a polarização de cargas negativas, o que induz o campo elétrico formado pela diferença de potencial existente nos eletrodos, cuja distância é d [m] das placas condutoras devido ao dielétrico, é possível obter pela combinação das Equações 2.3 e 2.4, a Equação 2.5 (NETTO; TELLES, 2016).

$$V = \frac{qd}{\epsilon A} \quad (2.5)$$

Levando em consideração as Equações 2.1 e 2.5, podemos determinar a capacitância pela Equação 2.6 (LOPES et al., 2018) (HALLIDAY et al., 2020).

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.6)$$

Até aqui, apresenta-se uma generalização do modelo matemático que pode ser aplicado a todos os modelos de capacitores com as devidas observações. A lei de Gauss nos permite determinar o campo elétrico independentemente da geometria dos eletrodos. A constante de permissividade do material isolante muitas vezes é atribuída por tabelas, como da Tabela 2.2, porém há estudos que possibilitam quantizar essa grandeza experimentalmente (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

Tabela 2.2 – Constantes dielétricas para alguns materiais.

Material	Constante ϵ_r
Querosene	1,8
Água pura	80
Areia	4,0
Mica	3,2
Poliéster	3,2
Papel	2
Ar	1,00054

Fonte: (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019)

A relação entre corrente e tensão para o capacitor é dada pela derivada da tensão descrita na Equação 2.7 (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2.7)$$

Pela Equação 2.1 é possível obter a expressão para corrente em função da tensão Equação 2.8 (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$\frac{di}{dt} = C \frac{dv}{dt} \quad (2.8)$$

Integrando ambos os lados chegam à Equação 2.9 (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$v = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i dt + v(t_0) \quad (2.9)$$

Sendo $v(t_0)$ a tensão nos terminais do capacitor no instante de t_0 e tendo o desenvolvimento da corrente e tensão no capacitor, é possível estimar a potência instantânea passada ao capacitor através da Equação 2.10 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$p = vi = Cv \frac{dv}{dt} \quad (2.10)$$

A energia armazenada no capacitor é vista na Equação 2.11 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = \frac{1}{2} C v^2 \Big|_{-\infty}^t \quad (2.11)$$

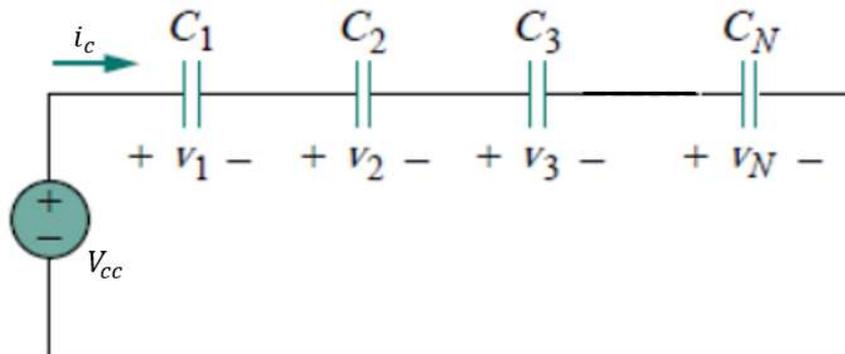
Onde $v(-\infty)$ representa o instante em que o capacitor se encontra descarregado. Esta equação representa a energia armazenada no campo elétrico de um capacitor. Considerando-se um componente ideal, não haverá perdas, assim toda energia armazenada pelo capacitor será liberada quando conduzir potência ao circuito em que está (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Em síntese, um capacitor irá se comportar de duas formas distintas, uma em que ele estará submetido a um sistema de corrente alternada (AC), tendo como determinante a

frequência de oscilações. E a outra, quando a tensão não variar com o tempo, ou seja, um sistema de corrente contínua (CC), o capacitor irá se comportar como um circuito aberto. Porém, existirá um momento em que ao ser submetido a uma fonte de tensão CC, o capacitor irá carregar seus eletrodos até o momento em que a ddp dos seus terminais se igualarem aos da fonte.

Tendo em vista os fundamentos estruturais e como é o funcionamento de um capacitor, é interessante notar o que muda em um capacitor não ideal e como ele se comporta em diferentes configurações. O capacitor que apresenta perdas tem em sua representação uma resistência em série, a fim de simular a perda e a forma do efeito joule. No que diz respeito aos modelos de configuração, o capacitor apresenta ligações com outros capacitores em série e paralelo. O modelo série é quando um número de capacitores apresenta a mesma corrente fluindo, como pode ser visto na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Capacitores em série.



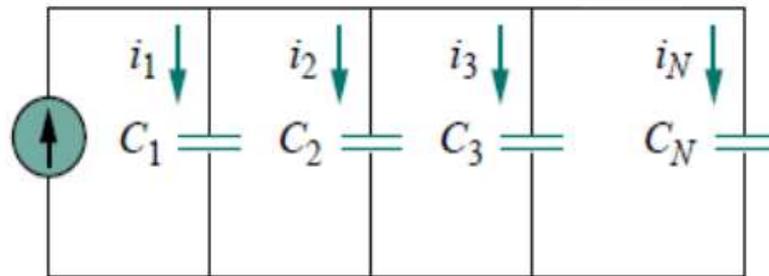
Fonte: Adaptada (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

A capacitância equivalente é determinada pela Lei da Tensão de Kirchoff, sendo a soma das tensões dos capacitores, representado pela Equação 2.12 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$\frac{1}{C_{Total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} \quad (2.12)$$

Para o modelo de ligação em paralelo, observa-se que todos os capacitores possuem a mesma amplitude de tensão em seus terminais, como pode ser visto na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Capacitores em paralelo.



Fonte: Adaptada (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

A capacitância equivalente é determinada pela Lei das Correntes de Kirchoff, sendo a soma das correntes dos capacitores, representado pela Equação 2.13 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$C_{Total} = C_1 + C_2 + \dots + C_N \quad (2.13)$$

As considerações tomadas até o momento, no que diz respeito à nanotecnologia e como é a estrutura de um capacitor e seu modo de operação, tornam-se fundamentais para o estudo de um supercapacitor. Principalmente levando-se em consideração a grande semelhança entre esses componentes.

2.3.1 Supercapacitores

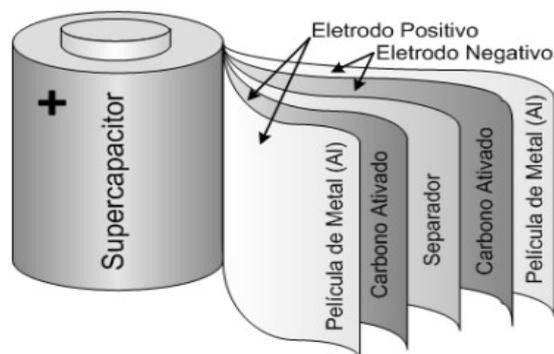
Neste momento, são investigados os conceitos dentro da física moderna com intuito de desenvolver o conhecimento sobre os supercapacitores, estes tendo como predecessores os capacitores descritos na seção anterior. Desta forma o termo supercapacitor é utilizado para descrever os capacitores eletroquímicos, sendo basicamente constituídos por dois eletrodos condutores em série e distanciados por um isolante em solução de eletrólito. Os valores elevados dos supercapacitores são obtidos por meio do aumento significativo das áreas superficiais dos eletrodos e na máxima redução da distância entre as cargas. Desta forma, são componentes capazes de armazenar uma quantidade de energia muito além do que capacitores convencionais de mesma massa ou volume.

Para determinarmos a diferença entre um supercapacitor e um capacitor convencional, seja ele eletrolítico ou de mica, é necessário entendermos sua origem. Tendo referências de

sua comercialização no final da década de 70, sua hipótese de funcionamento foi datada em 1853. O capacitor eletroquímico de dupla camada foi observado por Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz (1821 - 1894), onde descreve que uma solução condutora sujeita a uma diferença de potencial tem um limiar para conduzir corrente elétrica (GOMES, 2020). Isto pode ser complementado pela teoria das bandas de condução e de valência dos elementos, em que os elétrons na banda de valência precisam adquirir energia suficiente para se deslocarem para a banda de condução e, assim, forçando um fluxo de cargas sobre o material. Esta citação implica que, para o instante em que a solução se encontra sobre uma diferença de potencial e permanece sem conduzir corrente elétrica, o dispositivo representado pelos terminais que fornecem uma tensão para o líquido tem o comportamento de um capacitor, uma vez que é caracterizado pela não condução de cargas (FERREIRA; POMILIO, 2005).

Atualmente os eletrodos dos supercapacitores são compostos por películas metálicas, sendo revestidos por camadas de carbono ativado, sendo este gradativamente substituído pelos nanotubos de carbono, já que apresentam uma enorme área superficial alcançada devido às suas estruturas nanométricas. Porém, o uso de carvão ativo ainda é muito implementado devido ao seu custo ser relativamente inferior aos de nanotubos e apresentarem igualdades nos quesitos de condutividade elétrica e química inerte. Compondo o sistema, é complementado o uso de um isolante que impeça a condução de corrente elétrica entre os terminais, impedindo o contato eletrônico, mas que permita troca de cátions e ânions (FERREIRA; POMILIO, 2005). Como meio de elevar a concentração de íons livres, é inserido um eletrólito condutivo que permeia os eletrodos e o isolante. A Figura 2.9 representa a estrutura de um modelo de supercapacitor.

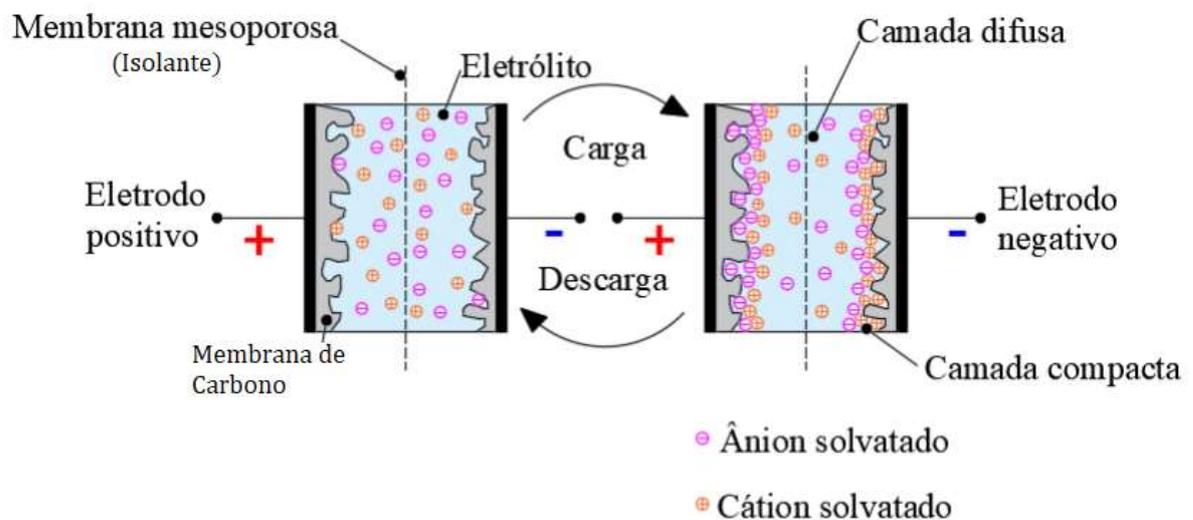
Figura 2.9 – Estrutura de camadas de um capacitor eletroquímico.



Fonte: Adaptada (FERREIRA; POMILIO, 2005).

Tendo o conhecimento sobre os capacitores quando estão carregados, sabemos que os eletrodos possuem cargas, estas induzidas pelo campo elétrico. No caso do supercapacitor o fenômeno ocorre da mesma forma, porém, com a adição das cargas do eletrólito e levando em consideração que os eletrodos estão em uma distância aproximada de 2 a 5 nm (FERREIRA; POMILIO, 2005). Somando a extensa área superficial apresentada pela membrana porosa de carbono, a capacitância se torna consideravelmente alta. Portanto, ao aplicar uma ddp sobre os terminais de um supercapacitor, o princípio das cargas é equivalente ao dos capacitores, mas o que torna interessante o modelo eletroquímico é que os íons presentes no eletrólito realizam o curso contrário de suas cargas, posicionando-se nas membranas de carbono (ZARBIN, 2017) (NUNES, 2019). Ou seja, os ânions se acumulam nos poros do eletrodo positivo, já os cátions são locados no eletrodo negativo, sendo que o processo é inerente a presença da membrana isolante. A Figura 2.10 representa o processo de carga/descarga com o fluxo de íons para os capacitores eletroquímicos, tal processo é denominado como formação da dupla camada elétrica.

Figura 2.10 – Fenômeno físico no interior dos supercapacitores.



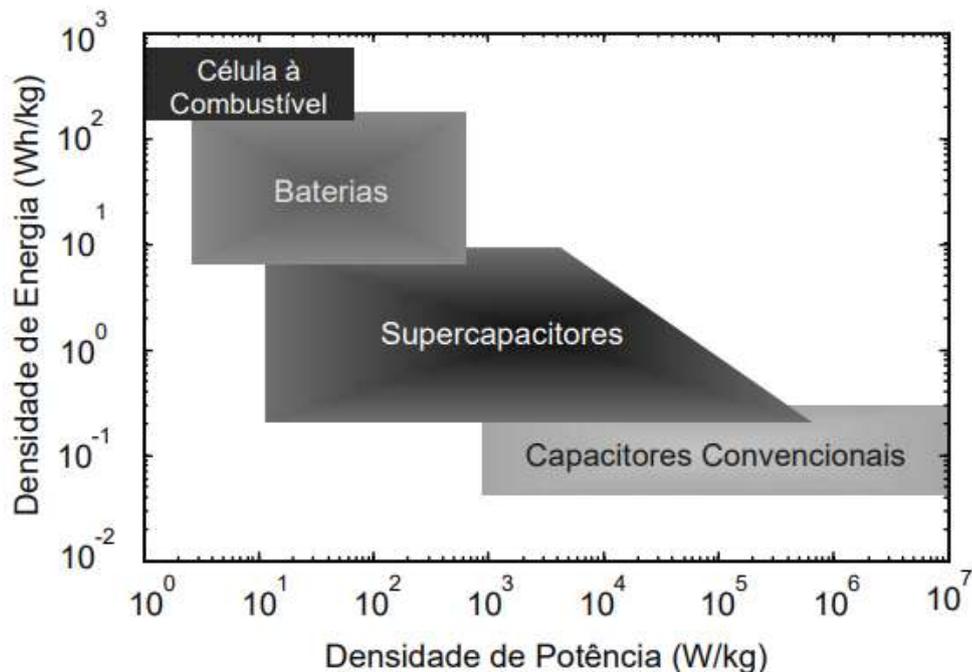
Fonte: Adaptada (NUNES, 2019).

Em ambos os processos de carga/descarga, no fenômeno eletrostático de adsorção de íons e de troca de carga nos eletrodos não ocorre reações químicas, o que o torna eficiente e com uma resistência série equivalente (RSE) muito pequena, resultando em uma corrente de carga e descarga muito elevada. O potencial de armazenamento de energia em supercapacitores consiste em reações de oxidação e redução por parte dos íons na região

eletrodo/eletrólito, forçada pela influência de uma ddp nos terminais do componente. Esta diferença de potencial induz inicialmente um fluxo de corrente através da dupla camada, sendo limitado pela difusão. A difusão sendo responsável por determinar a dinâmica dos ânions e cátions dispersos com a superfície da membrana de carbono (FERREIRA; POMILIO, 2005) (NUNES, 2019).

Vem sendo estudado para aumentar a densidade de energia dos supercapacitores o uso de metais de transição, um exemplo é o uso de óxido de rutênio (RuO_2) (NUNES, 2019) (ZARBIN, 2017) (PANDOLFO et al., 2013). Isto nos submete a comparar este modelo construtivo do supercapacitor com os outros modelos de armazenamento de energia. De forma a auxiliar um comparativo entre as diversas formas de armazenamento de energia, é necessário atentar sobre as capacidades de armazenamento e fornecimento de energia (MILLER, 2018). Um modelo tradicional para comparar a densidade de energia com a densidade de potência entre armazenadores de carga é através do diagrama de Ragone que é apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Diagrama de Ragone.



Fonte: Adaptada (FERREIRA; POMILIO, 2005).

Pelo diagrama fica evidente o potencial dos supercapacitores, que conseguem agregar uma elevada densidade de energia, como as baterias, e que conseguem oferecer elevadas

densidade de potência, como os capacitores. Além disso, são excelentes componentes para absorver ou suprir picos de corrente, devido sua baixa RSE e sua carga/descarga ser consideravelmente alta pela atuação dos íons da dupla camada elétrica. Na Tabela 2.3 pode ser observado valores típicos de RSE.

O supercapacitor tem a condição de ser carregado com quantidades aleatórias de energia, pois o armazenamento é realizado por campo elétrico e, ressaltando, sendo um processo reversível, torna-se um componente com uma vida útil considerável (FERREIRA; POMILIO, 2005) (NUNES, 2019). Como base de análise existem modelos com vida de carga projetada, sob tensão nominal de trabalho e temperatura, com modificação vistas após 10 anos e, observa-se mudanças de capacitância acima de uma vida útil projetada em 500.000 ciclos.

Como informado, estudos para aumentar a capacitância desses componentes por meio de óxidos metálicos como o rutênio (RuO_2), estão em ascensão, pois os metais de transição implementados conseguem através de processos químicos de oxirredução potencializar as trocas de cargas elétricas entre o eletrólito e as membranas do eletrodo. Porém, no caso apresentado do RuO_2 é uma solução altamente tóxica, o que é insatisfatório e somado a condição de ser muito caro para produzir (FERREIRA; POMILIO, 2005) (SOLÍS-CORTÉS et al., 2020).

Tabela 2.3 – Valores típicos de resistências série equivalente em supercapacitores.

Número da peça	ESR DC (mΩ)	ESR AC (mΩ) 1KHz	Corrente nominal (A)
<u>TPL-0.5 / 8X12F</u>	1800	700	0,36
<u>TPL-1.0 / 6X15F</u>	750	380	0,79
<u>TPL-1.0 / 8X12F</u>	700	315	0,79
<u>TPL-1.2 / 6X15F</u>	650	330	0,91
<u>TPL-50 / 18X40F</u>	20	15	33,75
<u>TPL-60 / 18X40F</u>	20	14	36,82
<u>TPL-70 / 18X45F</u>	20	13	39,38

<u>TPL-100 / 18X60F</u>	16	10	51,92
<u>TPL-100 / 22X45F</u>	15	10	54

Fonte: Adaptada (TACATE, 2021)

Pretendendo auxiliar a comunidade científica, estudos foram realizados acerca de outros óxidos metálicos para gerar possibilidades mais viáveis de implementação e que não forneça riscos para o bioma. Dentro desta janela de oportunidade é proposto pelo trabalho o estudo baseado em uma solução de nanopartículas de óxido de ferro, pois é um material fácil de ser produzido, não é tóxico e é mais barato que outros óxidos de metais de transição.

Diante do desafio de trabalhar no desenvolvimento de um eletrólito aquoso, formado por nanopartículas de óxido de ferro, a compreensão sobre os fundamentos no que diz respeito à física envolvida são fundamentais, assim como conhecer a estrutura base de um supercapacitor e suas equações de trabalho, o que acaba sendo auxiliado pelos conceitos dos capacitores. Além de compreender sua forma construtiva e suas funções, é necessário mensurar seu potencial e isso pode ser realizado por meio de instrumentação.

2.4 APARATO DE MEDIÇÃO

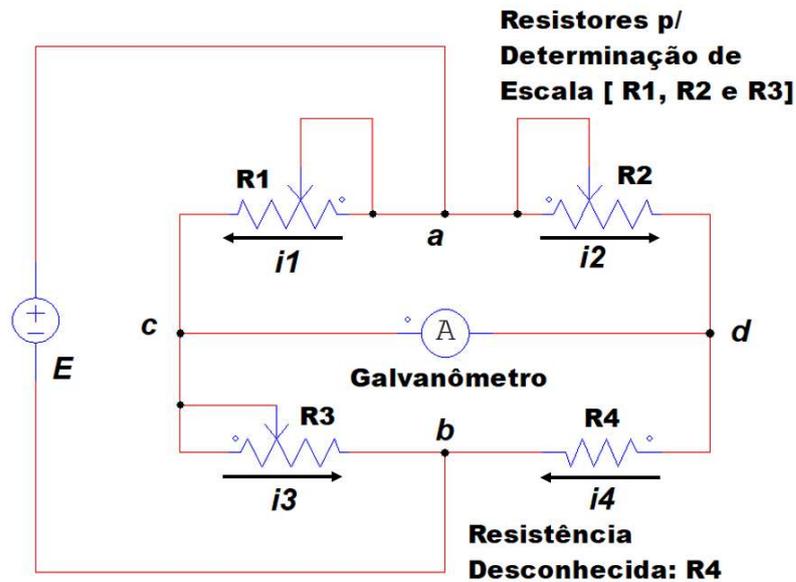
Nesta seção são descritas todas as informações necessárias para a construção de um capacímetro digital adaptado, desde a parte eletrônica até a parte de programação. Os tópicos foram separados em: modelos de medição para capacitância, capacímetro digital, materiais para confecção e plataforma de desenvolvimento.

Os componentes eletrônicos e grandezas elétricas podem ser medidas por meio de pontes de leitura. Tendo como estrutura de referência a ponte de Wheatstone, em homenagem a Sir Charles Wheatstone (1802 -1875) (WADE, 2002), difusor do uso desta configuração para medição de resistências desconhecidas. Para determinar a resistência desconhecida a ponte de Wheatstone deve ser equilibrada, apresentando uma corrente de passagem nula no galvanômetro (HELFRICK; COOPER, 1994). A ponte estando em equilíbrio, é possível ser realizado o produto cruzado das resistências conhecidas com a resistência mensurada. A Figura 2.12 apresenta o diagrama elétrico de uma ponte Wheatstone, sendo que o módulo da corrente no detector de zero, o galvanômetro, depende da ddp entre os pontos *c* e *d*. Desta forma, a ponte encontra-se equilibrada conforme descrito na Equação 2.14 (HELFRICK;

COOPER, 1994).

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (2.14)$$

Figura 2.12 – Ponte Wheatstone.



Fonte: Autoria própria.

Se o fluxo de corrente no galvanômetro é nulo, as condições descritas nas Equações 2.15 e 2.16 são satisfeitas (HELFRICK; COOPER, 1994).

$$I_1 = I_3 = \frac{E}{R_1 + R_3} \quad (2.15)$$

$$I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_4} \quad (2.16)$$

Tendo determinado as condições de equilíbrio para se ter uma corrente nula no galvanômetro e trabalhando as equações, é possível chegar à seguinte relação presente nas Equações 2.17 e 2.18.

$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_4} \quad (2.17)$$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (2.18)$$

Tendo conhecimento da expressão de equilíbrio dada pela equação 2.18 e determinando que a resistência desconhecida é a R_4 , é possível obtê-la através da Equação 2.19.

$$R_4 = R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} \quad (2.19)$$

Desta forma, os princípios básicos para modelar pontes capazes de medir outras grandezas elétricas foram o ponto de partida para construção de aparatos de medição como capacitômetro, frequencímetros, voltímetros, amperímetros e de diversas outras constantes. Tendo ainda versatilidade em modos de operação no que diz respeito a componentes em sistemas variáveis ou contínuos. A metodologia desenvolvida em pontes é a base para medição de vários métodos e de interface para muitos transdutores.

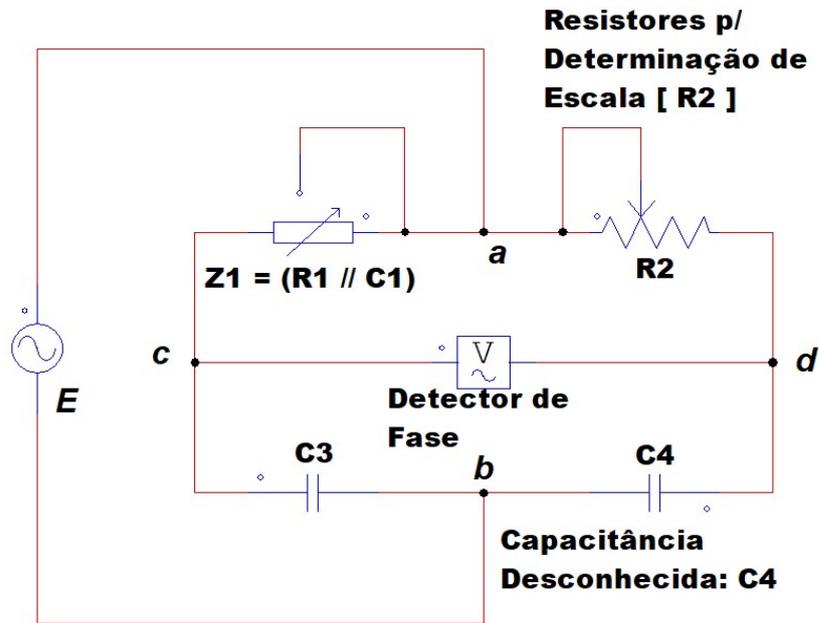
2.4.1 Modelos de medição para capacitância

Firmado nos conceitos básicos da ponte de Wheatstone, surgiram variantes do modelo para poder auxiliar na determinação de outras grandezas elétricas. Em foco ao desenvolvimento de um instrumento capaz de medir uma capacitância, obtém como referencial o conceito aplicado na ponte de Schering. Esta também é muito empregada para determinação de indutâncias, porém atentaremos ao fator capacitivo que o instrumento pode determinar. A ponte de Schering, vista na Figura 2.13, é um dos modelos construtivos mais marcantes dos medidores em corrente alternada (CA). Seu padrão construtivo tem como intuito determinar capacitâncias, mas pode ser utilizado para medição de um isolante (HELFRICK; COOPER, 1994) (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2019).

Interpretando o circuito proposto pela ponte de Schering, partimos da observação de que na seção ac tem-se uma ligação em paralelo entre um capacitor C_1 e um resistor R_1 . Um capacitor C_3 constante implementado na seção cb , é *“usualmente sendo um capacitor de alça de alta qualidade para medições gerais ou um capacitor com dielétrico de ar para medições de isolamento”* (HELFRICK; COOPER, 1994). Para obter o valor de capacitância na seção db , representado pelo capacitor C_4 , as condições de equilíbrio a ser detectado na seção dc , exigem que a soma dos ângulos de fase das seções ac junto a seção db sejam iguais a soma

dos ângulos de fase nas seções *ad* junto a seção *cb*. Por definição de projeto o capacitor C_3 tendo um ângulo de fase de 90° , a soma dos ângulos entre as seções *ad* e *cb* será a descrita na Equação 2.20 (HELFRICK; COOPER, 1994).

Figura 2.13 – Ponte Schering.



Fonte: Autoria própria.

Devido a implementação do capacitor C_1 em paralelo ao resistor R_1 , torna-se possível realizar a soma dos ângulos de fase nas seções *ac* e *db*, possibilitando o equilíbrio da soma das outras duas seções. A condição de equilíbrio pode ser representada da maneira descrita na Equação 2.21 (HELFRICK; COOPER, 1994).

$$0^\circ + 90^\circ = 90^\circ \quad (2.20)$$

$$\vec{Z}_4 = \vec{Z}_2 \vec{Z}_3 \vec{Y}_1 \quad (2.21)$$

Mudando as coordenadas, é possível obter a Equação 2.22.

$$R_4 - \frac{j}{\omega C_4} = R_2 \left(\frac{-j}{\omega C_3} \right) \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) \quad (2.22)$$

Realizando o produto na segunda etapa da igualdade se tem a Equação 2.23.

$$R_4 - \frac{j}{\omega C_4} = \frac{R_2 C_1}{C_3} - \frac{j R_2}{\omega C_3 R_1} \quad (2.23)$$

Separando as componentes reais e imaginárias obtém-se as Equações 2.24 e 2.25.

$$R_4 = R_2 \frac{C_1}{C_3} \quad (2.24)$$

$$C_4 = C_3 \frac{R_1}{R_2} \quad (2.25)$$

Em algumas situações, as pontes em CA podem apresentar desequilíbrio devido a impossibilidade de se atenderem as condições de soma dos ângulos de fase, isto para o caso específico da ponte de Schering, entretanto a ponte de Wheatstone também apresenta erros de medições. Como exemplos desses erros, pode-se ter uma baixa sensibilidade do detector de zero ou medidas incorretas devido a transferência de calor dos componentes resistivos, dado pelo efeito joule. Esta temperatura além de modificar a exatidão na leitura, pode também modificar permanentemente a constante resistiva dos componentes já conhecidos (HELFRICK; COOPER, 1994) (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2019).

Em um dado momento, os modelos de medição tradicionais, no caso as pontes que representam as grandezas medidas de forma analógica por aparatos eletromecânicos, como no caso do galvanômetro apresentado na Figura 2.14, se depararam com a explosão dos conceitos de sinais digitais, ou seja, era possível absorver variáveis analógicas e tratá-las por meio de conversão dos dados para o formato digital, através de conversores analógicos/digitais (A/D). Portanto, com os circuitos de leituras em ponte amplamente difundidos e com o advento da teoria dos sinais e sistemas sendo apresentado em tempo discreto, os aparatos que antes eram por deslocamento de ponteiros, agora apresentam um módulo na forma de bit.

Figura 2.14 – Galvanômetro.

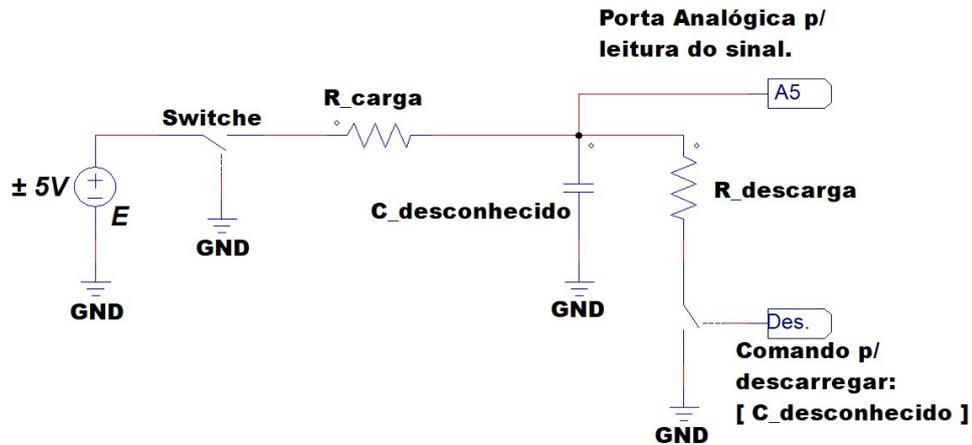


Fonte: Aatoria (DIDÁTICA, 2021).

2.4.1.1 Capacímetro digital proposto

Tendo a base teórica das pontes aplicadas para determinar grandezas elétricas de forma analógica e a possibilidade de transcrever para o tempo discreto por meio da tecnologia A/D, propõe-se como modelo de instrumentação uma análise do comportamento dos capacitores com resistores em série (RC) em um circuito de corrente contínua. Ao determinar o comportamento dos capacitores em CC, onde é possível modelar e obter a constante de tempo para carga e descarga de um capacitor por meio de uma resistência constante e conhecida, a variável de tempo contínuo poderá ser passada para o tempo discreto. Assim, determinando um módulo para a capacitância, dada em farad do componente a ser estudado. O modelo de circuito a ser implementado para estudo do capacitor em corrente CC é apresentado pela Figura 2.15.

Figura 2.15 – Circuito RC série carregando o capacitor com fonte CC.



Fonte: Autoria própria.

Para dar início ao processo de carga do capacitor, a chave é posicionada de modo que o fluxo de corrente se torna máxima no instante em que a tensão inicial é nula, gerando assim uma repulsão eletrostática também máxima nos eletrodos. O fluxo de corrente reduz gradualmente à medida que a tensão sobre os terminais do componente aumenta. Ao final do carregamento, a tensão sobre o capacitor é igualada a da fonte, o que agora implica em uma corrente nula (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009). De forma a modelar o funcionamento do circuito RC e considerando sua fonte de tensão E como uma tensão CC constante, pode-se considerar uma tensão inicial V_C^0 no capacitor. Como a tensão no capacitor não pode variar instantaneamente, sua tensão inicial é descrita pela Equação 2.26 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$V_C(0^-) = V_C(0^+) = V_C^0 \quad (2.26)$$

Onde $V_C(0^-)$ é a tensão do capacitor exatamente antes do chaveamento e $V_C(0^+)$ a tensão imediatamente após o chaveamento. Aplicando a Lei das Correntes de Kirchoff ao circuito, resulta na Equação 2.27 (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2019) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$C \frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C - E\mu(t)}{R} = 0 \quad (2.27)$$

Trabalhando a equação tem-se:

$$\frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C}{RC} = \frac{E\mu(t)}{RC} \quad (2.28)$$

De modo que V_C é a tensão no capacitor, $\mu(t)$ sendo função unitária e isolando o produto do resistor e capacitor, é possível obter a Equação 2.29 (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$\frac{dV_C}{V_C - E} = -\frac{dt}{RC} \quad (2.29)$$

Integrando ambos os lados e introduzindo as condições iniciais, sendo no instante de tempo igual a zero, tem-se as Equações 2.30 e 2.31.

$$\ln(V_C(t) - E) - \ln(V_C^0 - E) = -\frac{t}{RC} + 0 \quad (2.30)$$

$$\ln \frac{V_C - E}{V_C^0 - E} = -\frac{t}{RC} \quad (2.31)$$

Aplicando exponencial em ambos os lados, é obtida a Equação 2.32.

$$V_C = E + (V_C^0 - E)(e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2.32)$$

Distribuindo a Equação 2.32 e tendo como nota que a tenção no capacitor antes do instante zero, dado por (V_C^0) , tem valor nulo, assim, torna-se possível obter a sua forma geral para o tempo maior que zero, dada pela Equação 2.33 (NILSSON; RIEDEL, 2009).

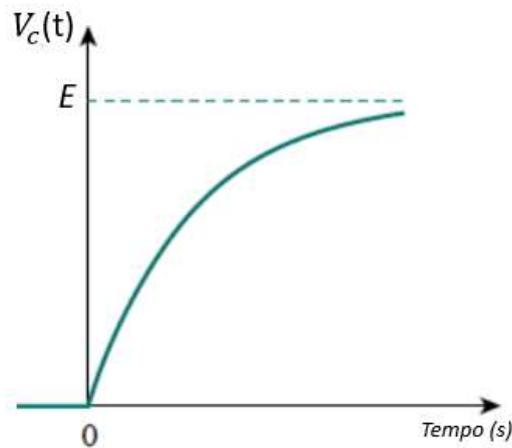
$$V_C = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (2.33)$$

Assim, é possível ter uma resposta completa do circuito RC a uma aplicação súbita de uma fonte de tensão CC, considerando uma carga inicial do capacitor, formulado pela expressão da Equação 2.34 (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$V_C(t) = \begin{cases} V_C^0, & t < 0 \\ E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), & t > 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

Com o sistema dado pelas equações anteriores de carregamento do capacitor, pode ser gerado a curva de carga deste componente, sendo vista na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Curva de tensão do capacitor carregando em RC série.



Fonte: Autoria própria.

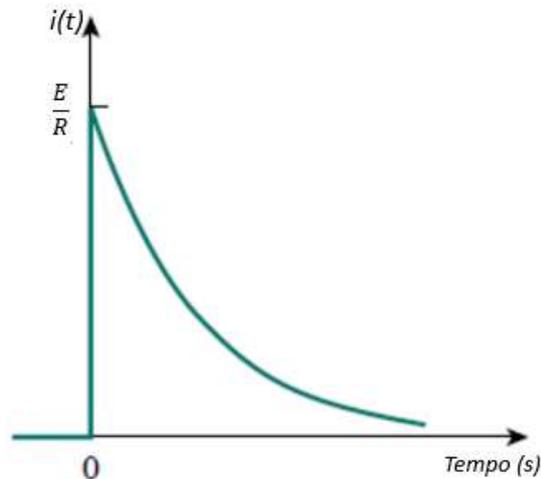
Agora, representa-se a função que determina a corrente desenvolvida no sistema apresentado de carregamento do capacitor. O fluxo de corrente é dado pela Equação 2.35 (BALBINOT; BRUSAMARELO, 2019).

$$i(t) = C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{C}{RC} E e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.35)$$

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.36)$$

A curva formada pela expressão que representa o fluxo de corrente no sistema pode ser observada na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Curva de corrente no capacitor carregando em RC série.



Fonte: Autoria própria.

As curvas obtidas de carregamento podem variar conforme o valor de resistência, pois, se a resistência implementada for muito pequena o fluxo de corrente será elevado e o tempo de carregamento do capacitor será menor, já para um valor de resistência maior o conceito da curva é o oposto. O tempo de carga de um capacitor também é determinado pela sua capacidade de armazenamento, sendo um componente de capacitância muito elevada o tempo estimado para total capacidade também será maior. No que diz respeito ao carregamento do capacitor em CC, a partir do momento em que ele se encontra com seu valor de tensão nos terminais igual ao da fonte, o capacitor irá se comportar como um circuito aberto, isto apenas durante o momento em que não haja caminho para os eletrodos serem descarregados (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Tratando agora da etapa de descarregar o capacitor, como dito anteriormente, as cargas armazenadas nos eletrodos pelo campo elétrico só irão ser descarregadas se fornecido um caminho condutivo. Pode-se então analisar a Figura 2.15, já apresentada anteriormente.

Conectando a chave de forma a isolar o sistema RC, os elétrons armazenados em um dos eletrodos são atraídos pelas cargas positivas do outro eletrodo, desta forma é induzido um fluxo de corrente elétrica originada pela diferença de potencial das placas do capacitor. As cargas armazenadas percorrem o resistor em série até o total descarregamento do capacitor, levando sua tensão de terminais a zero. Este modelo de circuito apresentado na Figura 2.15 faz com que o capacitor se comporte como uma bateria, mesmo tendo princípios de operação diferentes (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Considerando a combinação série do resistor com o capacitor inicialmente carregado e a tensão nos terminais do capacitor $V_C(t)$, é possível determinar que no tempo igual a zero a tensão nos terminais do capacitor é zero, a tensão inicial é dada pela Equação 2.37.

$$V_C(0) = E + (V_C^0(0) - E)(e^{-\frac{0}{RC}}) \quad (2.37)$$

Tem-se uma energia armazenada e para o momento de descarga essa energia pode ser representada pela Equação 2.38 (NILSSON; RIEDEL, 2009) (LOPES et al., 2018).

$$w(0) = \frac{1}{2} C (V_C^0)^2 \quad (2.38)$$

Novamente, pela Lei das Correntes de Kirchoff é possível obter a soma das correntes:

$$i_C + i_R = 0 \quad (2.39)$$

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (2.40)$$

$$i_r = \frac{V_C}{R} \quad (2.41)$$

É possível obter as equações diferenciais de primeira ordem, da primeira derivada da tensão no capacitor e no resistor (Equações 2.42 e 2.43).

$$C \frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C}{R} = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C}{RC} = 0 \quad (2.43)$$

Para resolver esta equação diferencial, é necessário reorganizar os termos da Equação 2.43, o que resulta na Equação 2.44.

$$\frac{dV_C}{V_C} = -\frac{1}{RC} dt \quad (2.44)$$

Integrando ambos os lados da Equação 2.44, é obtido a Equação 2.45.

$$\ln(V_c) = -\frac{t}{RC} + \ln(A) \quad (2.45)$$

Sendo que A determinamos como uma constante positiva de integração, então a Equação 2.45 pode ser reescrita pela Equação 2.46.

$$\ln\left(\frac{V_c}{A}\right) = -\frac{t}{RC} \quad (2.46)$$

Aplicando exponencial em ambos os lados da Equação 2.46, resulta na Equação 2.47.

$$V_c(t) = A \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (2.47)$$

Para as condições iniciais do capacitor, onde:

$$V_c(0) = A = V_c^0 \quad (2.48)$$

O que resume a Equação 2.48 na seguinte expressão 2.49:

$$V_c(t) = E \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (2.49)$$

O estudo sobre medidas em engenharia elétrica até o presente momento deste capítulo teve como objetivo traçar uma relação do comportamento de carga/descarga de um capacitor, pois, dado estas considerações matemáticas sobre seus princípios físicos, é possível obter uma semelhança entre as variáveis que determinam o funcionamento de um capacitor. O fator determinante entre os modos de operação e objeto de estudo pode ser visto nas equações como constante RC (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009). Esta relação entre o produto da resistência com a capacitância apresentada pelo componente, é considerada como constante de tempo, representada pela letra grega τ (Equação 2.50).

$$\tau = RC \quad (2.50)$$

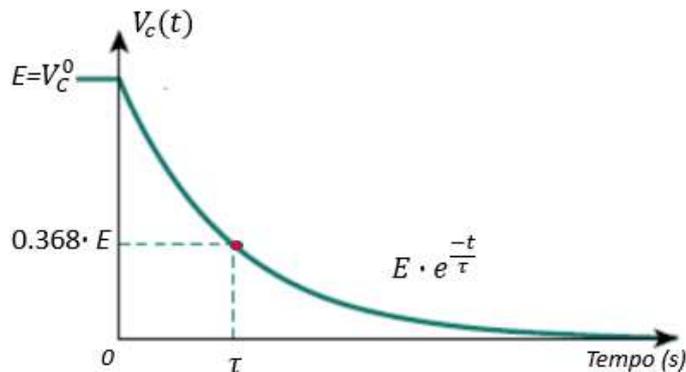
Encontrada esta constante de tempo, obtém-se uma janela de possibilidade para se mensurar a capacitância do componente pelo seu tempo de carga/descarga. No que diz respeito ao carregamento e com a constante de tempo, é possível analisar o efeito de RC na curva de descarga do capacitor. Se observa que, para o instante inicial de trabalho onde o tempo é igual a zero e conforme o tempo aumenta, a tensão dos terminais decai até o momento em que se tornará nula. A velocidade com a qual a tensão diminui é expressa em termos da constante de tempo (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Se substituirmos o tempo (t) pela constante τ na equação (2.49), é possível obter a Equação 2.51.

$$V_c(\tau) = E \left(e^{-\frac{\tau}{RC}} \right) = E e^{-1} \cong 0.3678E \quad (2.51)$$

Ou seja, a constante de tempo de um circuito é o tempo necessário para que a resposta caia por um fator de 36,8 % do valor de início. Na Figura 2.18 pode ser visto a curva de decaimento influenciada pelo fator τ .

Figura 2.18 – Curva de tensão no capacitor descarregando em RC.



Fonte: Autoria própria.

Se tabelarmos a proposta de medir a tensão de decrescimento no capacitor em função da constante de tempo, teremos a seguinte Tabela 2.4.

A Tabela 2.4 apresentada deixa claro que quanto maior for a constante de tempo, mais lento será o processo de carga/descarga do capacitor. O contrário ocorre para valores de τ muito pequenos. Nesse sentido, um circuito que apresenta uma constante de tempo muito

pequena fornece uma resposta muito rápida, fazendo com que a dissipação de energia no capacitor alcance seu estado permanente para carga/descarga (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Tabela 2.4 – Valores de decaimento da tensão em resposta RC - série.

tempo	$\frac{V_c(t)}{E}$
τ	0,367879
2τ	0,135335
3τ	0,049787
4τ	0,018316
5τ	0,006738
6τ	0,002479
7τ	0,000912

Fonte: Autoria própria.

Ainda analisando o modelo de funcionamento do capacitor em um circuito CC e, já adquirido as equações de tensão e correntes no capacitor, é possível determinar com a tensão $V_c(t)$, a corrente que flui no resistor, como pode ser visto na Equação 2.52.

$$i_R(t) = \frac{V_c(t)}{R} = \frac{V_c^0(t)}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.52)$$

Com o fluxo de corrente determinado, é possível representar a dissipação de potência no resistor em série pela Equação 2.53 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$p(t) = V_c i_R = \frac{(V_c^0)^2}{R} e^{-\frac{2t}{RC}} \quad (2.53)$$

Já a energia absorvida pelo resistor é expressa pela Expressão 2.54 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).:

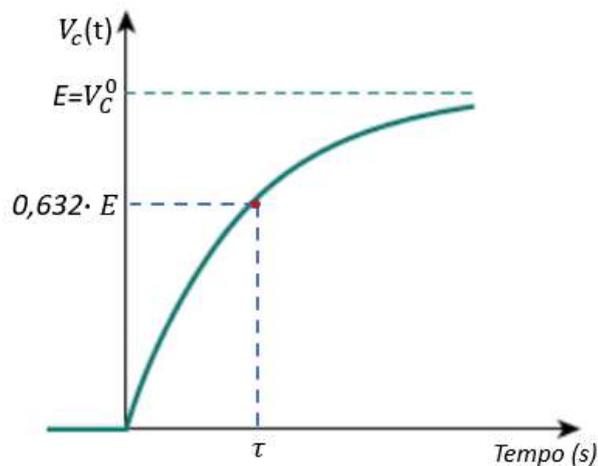
$$w_R(t) = \int_0^t p dt = \int_0^t \frac{(V_c^0)^2}{R} e^{-\frac{2t}{RC}} dt \quad (2.54)$$

É possível obter a energia absorvida através do cálculo da integral da expressão 2.54, para o intervalo de zero até o instante t , o que é representado pela Equação 2.55 (LOPES et al., 2018) (NILSSON; RIEDEL, 2009).

$$w_R(t) = -\frac{\tau(V_c^0)^2}{2R} e^{\frac{-2t}{RC}} \Big|_0^t = \frac{1}{2} C (V_c^0)^2 \left(1 - e^{\frac{-2t}{RC}}\right) \quad (2.55)$$

Para um período muito grande, a energia absorvida pelo resistor é igual a energia que foi armazenada no capacitor, tendo como referência um modelo ideal sem perdas. Desta forma, se aproxima da possibilidade de mensurar uma capacitância sem a necessidade dos modelos de ponte. Pois existe a possibilidade de determinar que a carga do capacitor em farad pode ser mensurada ao chegar no limiar de carregamento do componente em cerca de 63,21 % de sua carga total. Este valor representa o momento exato em que o tempo de carregamento é igual a constante de tempo do circuito RC em série. A Figura 2.19 representa o ponto exato em que o tempo se torna igual a contate τ .

Figura 2.19 – Tempo de carregamento se torna igual a τ no circuito RC.



Fonte: Autoria própria.

Desta forma, através do circuito RC em série é possível determinar o tempo em que o capacitor leva para chegar a 63,21 % de sua carga, pois, através da resistência e por meio de manipulações algébricas em linguagem de programação, é possível determinar a capacitância

no componente.

2.4.1.2 *Materiais para o capacitmetro digital*

De forma a tornar possível a medição de uma capacitância por meio da configuração resistor em série com capacitor, será necessário o uso de um sistema de leitura analógico e um instrumento útil são os microcontroladores. Nesta seção é feita a explicação de como é possível e como é feita a etapa de leitura analógica do carregamento de um capacitor.

Microcontrolador/Microprocessador:

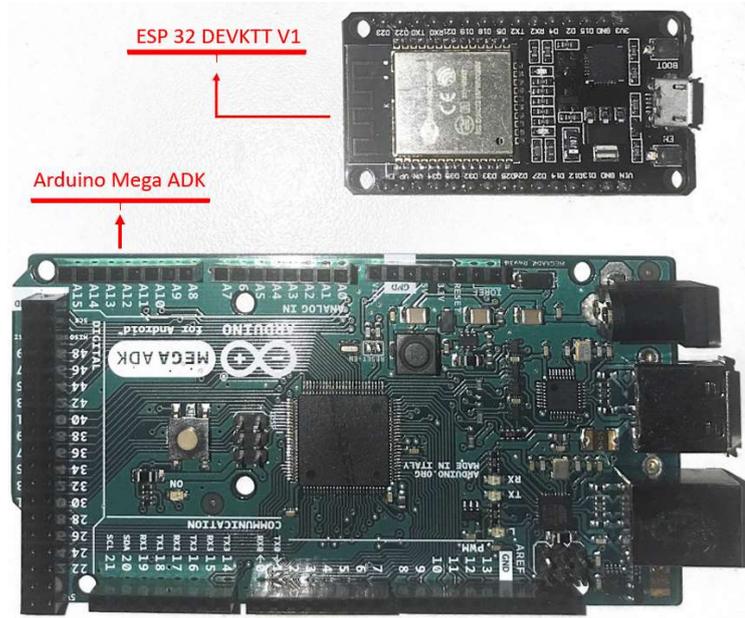
O microcontrolador a ser adotado terá como principal objetivo mensurar a capacitância da solução a ser desenvolvida. Através de suas propriedades construtivas, os microcontroladores são capazes de obter sinais analógicos/digitais de forma simultânea e realizar o processamento de algoritmos pré-instalado em sua memória. A programação deverá obter a contagem do tempo necessária para atingir 63,21 % da carga de um capacitor, isto por meio de uma porta analógica que estará em ligação ao *nó* entre o resistor de carga e o capacitor. No que diz respeito as portas analógicas, o microcontrolador a ser utilizado deverá ter um número considerável, pois será realizado um modelo capaz de mensurar e mudar a escala de medição, em unidade de farad, de forma automática. Modelos de microcontroladores podem ser vistos na Figura 2.20 como exemplo a serem utilizados.

O microcontrolador deverá conter em sua placa no mínimo três portas digitais para possibilitar uma comunicação por meio de protocolo I²C. Este protocolo, inventado pela Philips no início da década de 90, se baseia em um barramento de comunicação serial com apenas dois fios (UNIVASF, 2021). Este modelo de comunicação serial é um dos mais simples, de baixo custo e práticos com disponibilidade no mercado, além de sua característica em proteger o sistema e os sensores de maneira isolada. Outro fator importante é a resolução A/D do microcontrolador, é através da conversão que se tornará possível quantizar o sinal analógico de forma viável, de modo que os resultados apresentados na medição da capacitância estejam o mais próximo do real.

Tendo traçado medidas para levar em consideração na escolha de um sistema de controle, optou-se em analisar quatro modelos de microcontrolador/microprocessador aptos a serem utilizados, sendo estes, Arduino Mega ADK, Arduino UNO, ESP32 e Raspberry Pi Zero W. Estes quatro modelos foram selecionados, também, pela capacidade de interação com outras tecnologias como, interfaces gráficas em computadores, pelas linguagens de programação e pelo seu baixo custo. Na Tabela 2.5 foi realizado um comparativo entres os

modelos em pauta.

Figura 2.20 – Modelos de microcontroladores.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2.5 – Comparativo microcontroladores/microprocessadores.

Modelo	Entradas analógicas	I/O digitais	Resolução A/D (bits)	Corrente DC de pino I/O (mA)	Microcontrolador /Microprocessador
Arduino Mega ADK	16	54	16	40	ATmega2560
Arduino UNO	6	14	10	20	ATmega328P
ESP32	18	34	12	500	Xtensa®32-bit LX6
Raspberry Pi Zero W	17	9	32	16	Broadcom BCM2835

Fonte: Autoria própria.

Analisando os dados da Tabela 2.5 é possível estimar que o Arduino Mega ADK e o ESP32 podem ser utilizados para o projeto de leitura do capacitômetro, pois em suas

características, estes apresentam muitas portas analógicas e digitais que possibilitaram o projeto. As escolhas entre os modelos de microcontroladores/microprocessadores vistos na Tabela 2.5 é pelo fato de serem modelos já em acervo para uso neste trabalho, assim como é levado em consideração o nível de conhecimento no modelo de linguagem dessas placas, como também na compatibilidade com as plataformas de desenvolvimento de aplicativos. Além disso, no que diz respeito a resolução A/D, ambos apresentam um fator considerável e suficiente para o modelo de instrumentação proposto.

Sensores DHT11 e SII145:

Outro fator importante a ser considerado é obter o máximo de controle das variáveis que submetem o desenvolvimento do supercapacitor líquido nanoestruturado fotossensível. Isto remete a necessidade de ter a aptidão de se obter as condições, tanto de controle no ato de desenvolver a medição da capacitância, como também saber a que condições se encontra o objeto de estudo. No que diz respeito ao conhecimento das variáveis naturais de temperatura ambiente, umidade relativa e incidência de ondas eletromagnéticas na faixa do visível. Esta última sendo possível controlar as ondas incidentes por meio da construção de uma capsula escura, onde será disposto uma cubeta de quartzo que será o recipiente do experimento, desta forma, será proposto o uso de dois modelos de sensores integrando o encapsulamento.

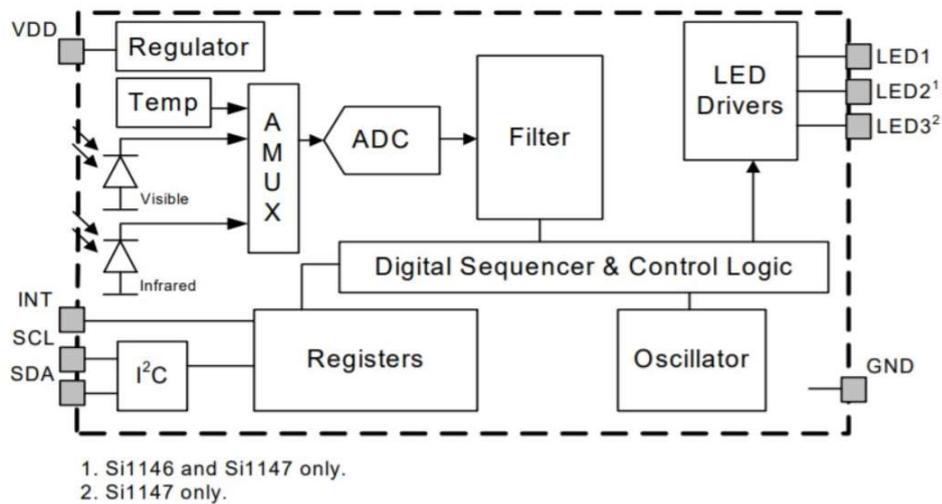
O uso dos sensores, dado as possibilidades de trabalho simultâneo pelos microcontroladores, poderão ser implementados junto ao capacímetro de porta analógica. Dito isto, será utilizado um sensor de temperatura e umidade classificado como DHT11, já para o sensor de ondas eletromagnéticas, será utilizado o Grove - SII145.

Para ser possível fazer a leitura de qual é o nível UV que incide sobre o material, é necessário utilizar um sensor capaz de detectar todo o espectro que será estudado de forma precisa. O sensor Grove - SII145, escolhido para este projeto, é capaz de detectar as luzes ultravioleta, visível e infravermelha, possuindo uma faixa de detecção de comprimentos de ondas que varia de 280 a 950 nm. O princípio de funcionamento do sensor Figura 2.21 é através da utilização de dois fotodiodos, o primeiro sendo sensível para luz infravermelha e o segundo para a luz visível. Após a detecção pelos fotodiodos é emitida uma tensão analógica AUX_DATA linearmente relacionada à intensidade UV medida (mW/cm^2), em que esta irá conter um valor de 16 bits que representa 100 vezes o índice do ultravioleta da luz solar e, quando o código processar o sinal filtrado do AUX_DATA, o sensor irá enviar os dados coletados para o microcontrolador através do protocolo I²C. (AOSONG, 2010)

Em paralelo, o sensor DHT11 será responsável por mensurar a temperatura e umidade da atmosfera em que a solução de óxido de ferro se encontra. Este sensor mede a temperatura

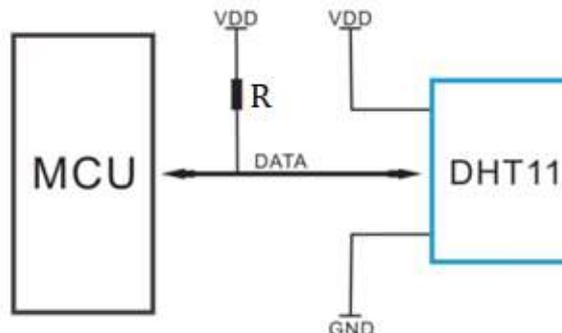
através de um termistor que é um semicondutor sensível a luz do tipo NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo), que significa que a resistência diminui com o aumento da temperatura. Este sensor tem uma faixa de leitura entre 0 até 50 graus celsius (°C). Sendo também capaz de medir a umidade relativa do ar entre os intervalos de 20 % até 90 %, tal medição é por meio de um resistor sensível a umidade, denominado como HR202, de modo que quanto maior a umidade menor será a resistência. O modelo de circuito para ao DHT11 pode ser observado na Figura 2.22.

Figura 2.21 – Modelo elétrico Grove - SI1145.



Fonte: (SILICON LABS, 2013).

Figura 2.22 – Modelo elétrico DHT11.



Fonte: Autoria própria.

A partir desse momento torna-se necessário a utilização de um ambiente de

desenvolvimento integrado (IDE), permitindo a implementação do algoritmo responsável por interpretar os sinais A/D. Para que seja possível obter as variáveis investigadas como a temperatura, umidade, capacitância e realizar comunicação em suas portas de entrada analógica, assim como o protocolo I²C., é de grande importância a escolha de uma plataforma cuja a linguagem de programação seja compatível com a interpretada pelo microcontrolador.

Plataforma de desenvolvimento:

Uma IDE possível de se utilizar é da Arduino, a qual permite a implementação em código próprio, este sendo muito semelhante ao código C++, porém com algumas modificações, além da linguagem de programação ser compatível com os modelos de microcontroladores apresentados, inclusive de outras fabricantes como é o caso do ESP32. O ambiente de desenvolvimento da Arduino é responsável por ser o ambiente em que é realizado o código de leitura/comandos, assim como o de compilar o algoritmo na memória dos microcontroladores. Uma oportunidade contrária ao modelo de programação da Arduino é utilizar um software interativo de alta performance para cálculo numérico. Este software é conhecido como MatLab, da empresa de plataformas computacionais MathWorks Inc. Em que, com o MatLab é possível programar tanto os microcontroladores da Arduino como também microprocessadores, em referência ao Raspberry. Tendo a condição de gerar o código em ambas as plataformas, torna-se possível o desenvolvimento de respostas gráficas ao longo do tempo.

2.5 SOLUÇÃO PROPOSTA

A obtenção de nanopartículas de óxido de ferro será feita por meio de ferramentas disponíveis no laboratório LSCNano. A confecção das NPs será através do método poliol em meio aquoso, sendo o óxido de ferro sintetizado via rota hidrotérmica, como descrito na Patente BR 102016006952-1.

Assim, as NPs de óxido de ferro em meio líquido, poderão caracterizar o supercapacitor e com isto poderá ser feito comparativos com os padrões já estudados pela comunidade científica com os resultados sob influência de irradiação fotoelétrica de luz visível.

Para obtenção de resultados de capacitância será desenvolvido um protótipo de baixo custo para caracterização de variáveis referentes as nanoestruturas de óxido de ferro susceptível as irradiações de ultravioleta e visível (UV-Vis), tratadas pelo LSCNano, Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul.

A coleta dos dados será pelo uso de pontas de prova destinadas a medir tensão, para uso em líquidos ou sólidos. Com o uso de microcontroladores e/ou microprocessadores, serão realizados o controle e a leitura dos dados fornecidos pelo nanomaterial, tendo um aplicativo com interface gráfica interativa podendo ser pelo software MatLab. Para o processamento e controle das possíveis variáveis em estudo, assim como da implementação do controle de irradiação de UV-Vis sobre o material, deverá ser utilizado o sensor de luz SI1145 condicionado a ler os comprimentos de ondas entre 280 *nm* até 950 *nm*.

Na Tabela 2.6 foi feita uma estimativa de preço do custo para produzir um capacitômetro digital, não sendo limitado em medir apenas capacitância, mas também temperatura ambiente e umidade relativa do ar.

Tabela 2.6 – Estimativa de preço do capacitômetro.

ITEM	UNIDADES	CUSTO
ESP32 DOIT V1	2	R\$ 90,00
Conector USB-A 2.0	1	R\$ 5,00
Conector Micro-B 2.0 Serial	1	R\$ 15,00
Bateria de 5.000mAh - 5V	1	R\$ 55,00
Conector Soquete DE15 INPUT	1	R\$ 1,50
Conector Soquete DE15 OUTPUT	1	R\$ 1,50
DHT11	1	R\$ 12,00
SI145	1	R\$ 48,00
TRIMMERS 1 Khoms	1	R\$ 0,80
TRIMMERS 10 Khoms	1	R\$ 0,85
TRIMMERS 100 Khoms	1	R\$ 0,95
TRIMMERS 1000 Khoms	1	R\$ 1,15
TRIMMERS 545 homs	1	R\$ 0,55
Protoboard	1	R\$ 18,00
Placa de Fenolite 80mmx60mm	1	R\$ 7,80
Placa de Fenolite 130mmx15mm	1	R\$ 4,20
Total	16	R\$ 262,30

Fonte: Autoria própria.

Antecedendo ao uso do capacitômetro, que será desenvolvido, para obter os dados esperados de supercapacitância da solução eletroquímica, será realizado a calibração e diminuição dos erros de exatidão e precisão do aparato, para que possa trazer os resultados mais próximos da realidade. O método de calibração do capacitômetro será dividido em três etapas, uma sendo realizado a precisão das escalas de medição por meio físico, ou seja, pela modificação das resistências conhecidas através de Tripomt de 1K Ohms, 10K Ohms, 100K

Ohms, 1M Ohms e 512 Ohms. A segunda etapa será através do controle por algoritmo buscando a melhor eficiência entre a obtenção analógica do sinal e sua conversão para o sinal digital a ser apresentado. E por último, não menos importante, será equiparado os valores da capacitância em capacitores comerciais, estes analisados e quantificados por osciloscópio, modelo possível através de um circuito RC e um gerador de sinais que fornecerá uma onda quadrada de 1K Hz.

O procedimento de obtenção do supercapacitor se dará após testes com o aparelho de medição proposto, em que poderá ser quantizado os valores de capacitância em função a uma radiação fotoelétrica, temperatura de medição e umidade relativa.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão discutidos e apresentados os passos necessários para a concepção da proposta do aparato, demonstrando sua acurácia para comprovar o desenvolvimento do supercapacitor fotossensível nanoestruturado em solução. A ordem do projeto se dá inicialmente pela simulação de um capacitômetro desenvolvido por microcontroladores com algoritmo de controle, posteriormente tem-se o desenvolvimento do aparelho em forma física, em que são feitas leituras num acervo de 107 unidades de capacitores, sendo 23 grupos distintos em capacitância. Após análise do acervo pelo capacitômetro desenvolvido é realizada uma comparação com um modelo comercial, sendo o Minipa MDM-8145A. Após a prova de validação é preparado em laboratório as NPs através do método poliol em meio aquoso, sendo o óxido de ferro sintetizado via rota hidrotérmica, como descrito na Patente BR 102016006952-1.

A metodologia implementada para o desenvolvimento do hardware multifuncional e da solução supercapacitiva foi separada em duas partes. Inicialmente é realizado o modelo de respostas a serem obtidas da solução capacitiva, isto é, após a aquisição das variáveis, sendo estas a umidade relativa do ambiente, temperatura, incidência por ondas eletromagnéticas dentro do espectro visível e da capacitância obtida na solução. Esses dados serão enviados a uma base de dados em nuvem, sendo o servidor em nuvem da © 2021 Blynk Inc. poderá armazenar e apresentar todos os dados obtidos pelo hardware e seus sensores para uma plataforma/aplicativo desenvolvido através de interface e widgets oferecidos pela própria plataforma.

A Blynk© foi projetada para a internet das coisas (IoT), podendo controlar hardwares remotamente, exibir dados de sensores, armazenar dados, visualizá-los e oferecendo capacidade de integração através de três componentes principais da plataforma. O aplicativo Blynk permite a criação de interfaces para o projeto usando ferramentas disponíveis, enquanto o servidor Blynk é responsável por todas as comunicações entre o smartphone e o hardware, o que gera opções como a utilização da nuvem Blynk ou até mesmo executar o seu próprio servidor local. É um sistema de código aberto, sendo capaz de trabalhar com dezenas de dispositivos simultaneamente. Há também as bibliotecas Blynk, capazes de se integrarem em inúmeras plataformas de hardwares populares, inclusive com os propostos no projeto, sendo duas unidades do microcontrolador ESP32 DOIT V1, das quais essas bibliotecas permitem a comunicação com o servidor e processam todos os comandos de entrada e saída dos microcontroladores, assim como do aplicativo no smartphone.

Uma vez maximizado o projeto, este é incrementado em paralelo ao desenvolvimento do código de controle do hardware multifuncional, responsável por tratar as variáveis analógicas obtidas pelos sensores e pela ponta de prova, pela comunicação com o servidor Blynk e envio ao aplicativo no smartphone. Em função da parte inicial do projeto executado, será dado início a elaboração da solução eletroquímica a ser estudada.

Neste ponto do projeto incrementa-se no laboratório de síntese e caracterização de nanomateriais a solução eletroquímica, a qual se encontra em condições de preparo não controlados no que tange à umidade e temperatura ambiente. O composto eletroquímico será armazenado e testado em cubetas de quartzo, escolhidas por serem inertes ao composto supercapacitivo e às ondas eletromagnéticas. A solução eletroquímica será dividida em três unidades distantes em tempo de preparo, a fim de se observar possíveis curvas de crescimento ou decaimento na capacitância, assim como preparadas em quantidades idênticas para análises quantitativas e qualitativas da capacitância em função da massa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

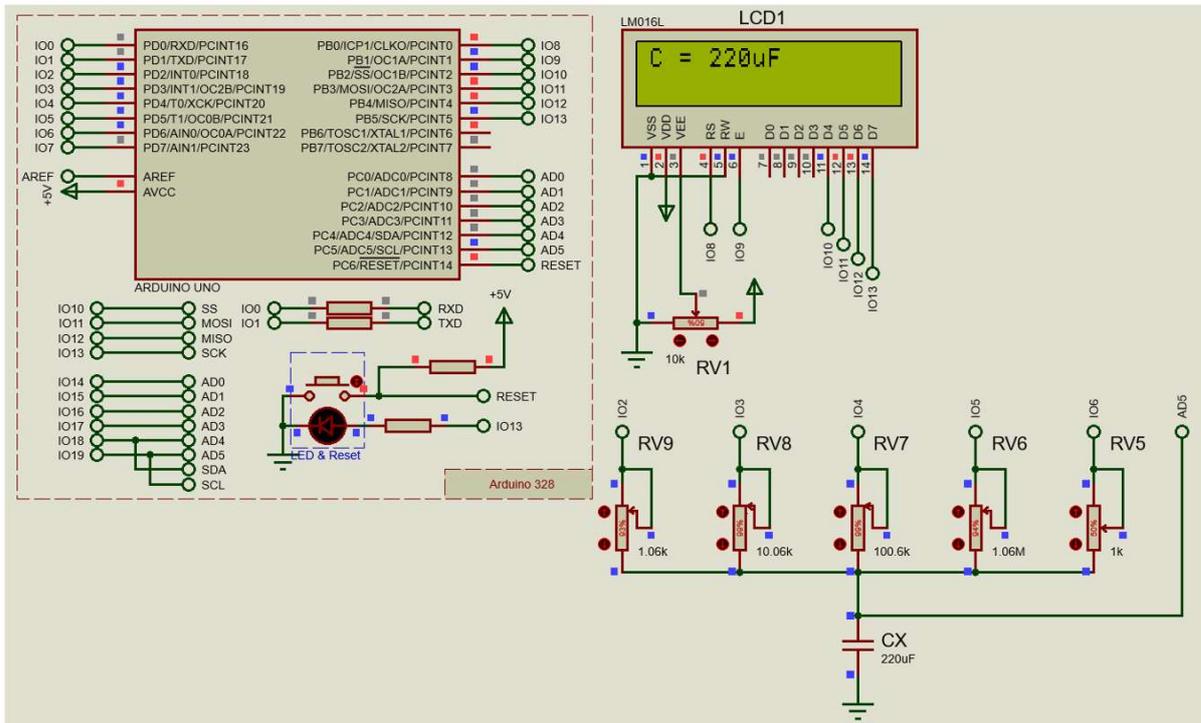
Neste capítulo serão discutidos e apresentados os passos necessários que foram feitos para concretizar o desenvolvimento da proposta do hardware de monitoramento, demonstrando sua acurácia para comprovar o desenvolvimento do supercapacitor fotossensível nanoestruturado em solução. A ordem do projeto se dá inicialmente pela simulação de um capacitômetro desenvolvido por microcontroladores com seu algoritmo de controle, posteriormente tem-se o desenvolvimento do aparelho em forma física, assim são efetuadas leituras no acervo dos capacitores. O mecanismo será comparado com um modelo comercial, o Minipa MDM-8145A, após a prova de validação do hardware, sendo então as NPs preparadas em laboratório. Será analisado então o desempenho do composto eletroquímico através do aparato multifuncional desenvolvido e discutido com modelos comerciais.

4.1 SIMULAÇÃO DE UM CAPACÍMETRO POR MICROCONTROLADOR

Foi simulado no software Proteus Design Suite 8.11, fornecido pela © Labcenter Electronics, a possibilidade de confeccionar um leitor de capacitância com o uso de um microcontrolador e um circuito RC série. Na Figura 4.1, pode ser visto a simulação e comprovação do medidor desenvolvido, sendo utilizado um Arduino Uno, chamado de Arduino 328, seis trimmers sendo de 1.06KOhms, chamado de RV9, 10.06KOhms, chamado de RV8, 10KOhms, chamado de RV1, 100.06KOhms, chamado de RV7, 1.06MOhms, chamado de RV6, 1KOhms, chamado de RV5, um display LCD, chamado de LCD1, para visualização da capacitância medida e um capacitor de teste, determinado com CX com valor de 220uF.

O código de controle pôde ser implementado no próprio software Proteus, script que pode ser visto no apêndice A. Tendo a implementação do código e do circuito proposto ao executar a simulação do Proteus é visto no LCD a apresentação do valor atribuído ao capacitor de teste CX. De modo que, com a validação da proposta em medir a capacitância do componente através de um microcontrolador e em regime RC série, é dada margem para executar a confecção do hardware proposto para medição de capacitâncias. Para os sistemas de sensores, no caso do DHT11 e do SI145, não se fez necessária uma simulação dos circuitos, pelo fato de serem sistemas já amplamente difundidos e implementados pela comunidade acadêmica, até mesmo comercialmente.

Figura 4.1 – Simulação do capacitômetro em microcontrolador.



Fonte: Autoria própria.

4.2 CONFEÇÃO DO APLICATIVO E HARDWARE

Neste tópico o desenvolvimento da parte física dos circuitos do novo medidor é executado paralelamente a criação do aplicativo e do sistema de controle. Inicia-se este tópico pela forma como foi previsto obter os dados a serem medidos, sendo eles a umidade, temperatura, incidência de ondas eletromagnéticas e capacitância.

4.2.1 Aplicativo – Blynk

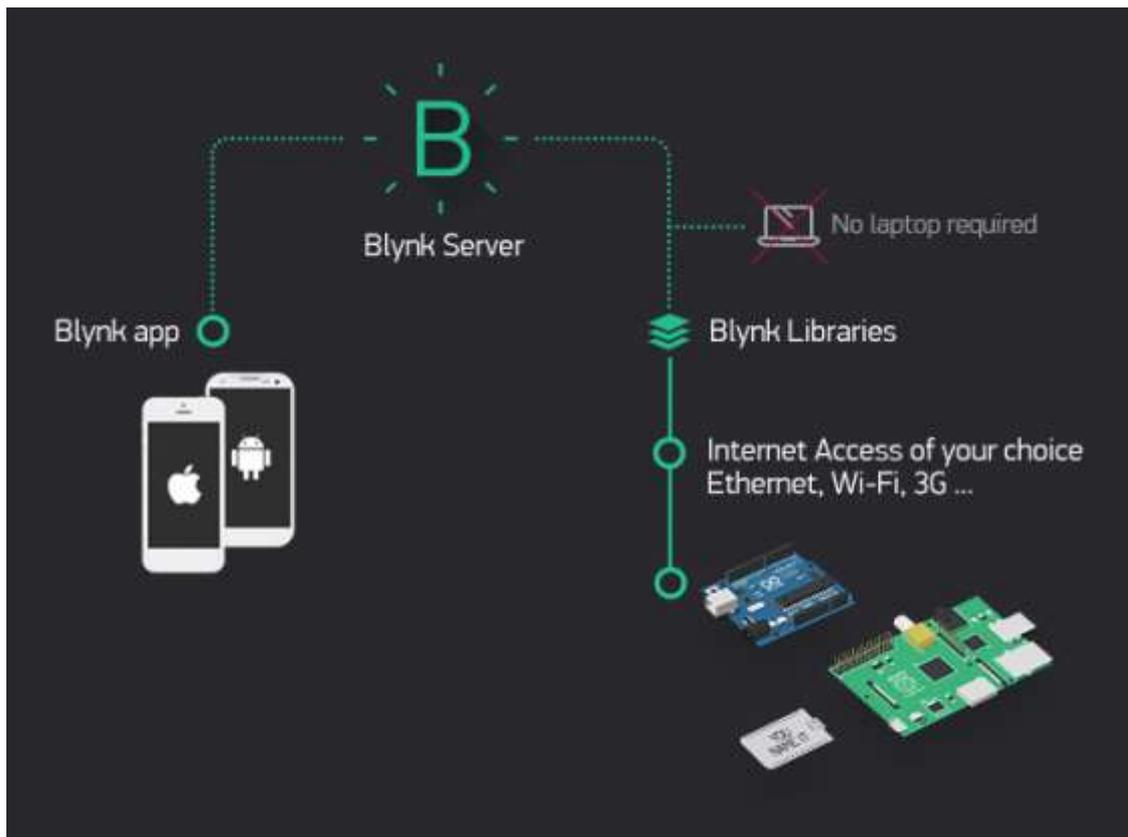
Sendo uma plataforma projetada para IoT, a Blynk é suportada em três níveis de integração, sendo Blynk App, Blynk Server e as Blynk Library, conforme o esquema da Figura 4.2.

O *App Blynk* é um aplicativo disponível para Android e IOS que permite, por meio do usuário, o desenvolvimento de aplicações que interagem com o hardware. Ele possui duas placas de implementação compatível com o Blynk, sendo os microcontroladores do tipo ESP32 DOIT V1, e trata-se de um dispositivo com conectividade Bluetooth, BLE e Wi-Fi. Dessa forma, com a IDE do Arduino já com suporte à placa escolhida e um smartphone com o

aplicativo Blynk instalado, e com acesso à internet, obtêm-se as condições para o desenvolvimento do projeto.

Após criar uma conta e entrar no aplicativo Blynk, pelo smartphone, cria-se um projeto, clicando na opção New Project, como visto na Figura 4.3.

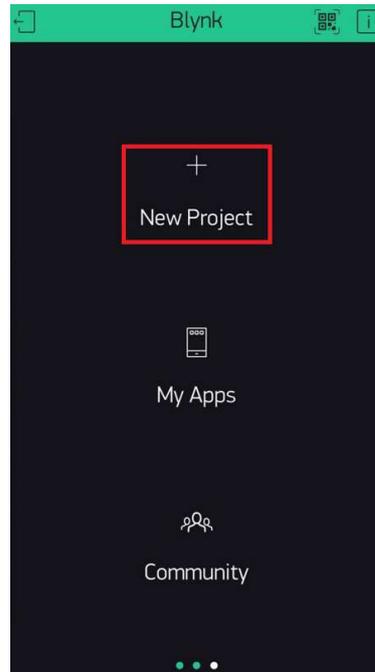
Figura 4.2 – Estrutura do Blynk.



Fonte: Tirado da Site (Blynk, 2017).

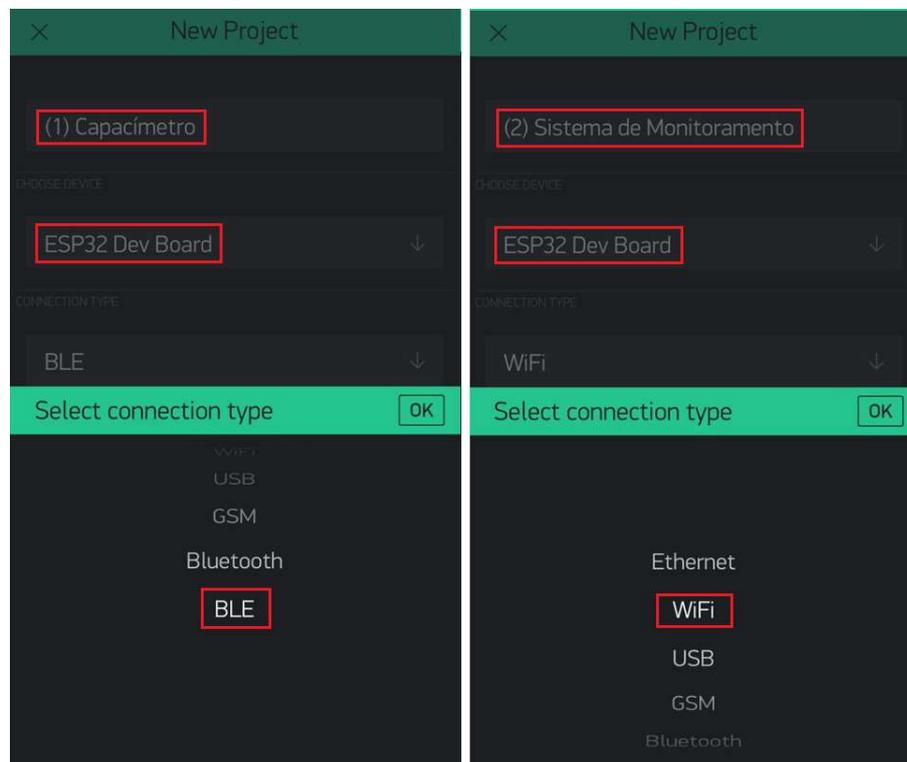
Tendo como escolha o hardware a ser utilizado no projeto, assim como sua forma de comunicação com o aplicativo, foram utilizados dois ESP32 DOIT V1 para o capacímetro, sendo que um é responsável pela obtenção das variáveis de umidade, temperatura e ondas do espectro visível e ultravioleta. Já o segundo microcontrolador é responsável pela obtenção da capacitância aferida, dessa forma, um irá se comunicar com o aplicativo pela rede de internet e o outro pelo Bluetooth Low Energy (BLE), respectivamente. A configuração no aplicativo para esse modelo de projeto pode ser vista na Figura 4.4.

Figura 4.3 – Criação de um Novo Projeto na plataforma Blynk.



Fonte: Autoria própria.

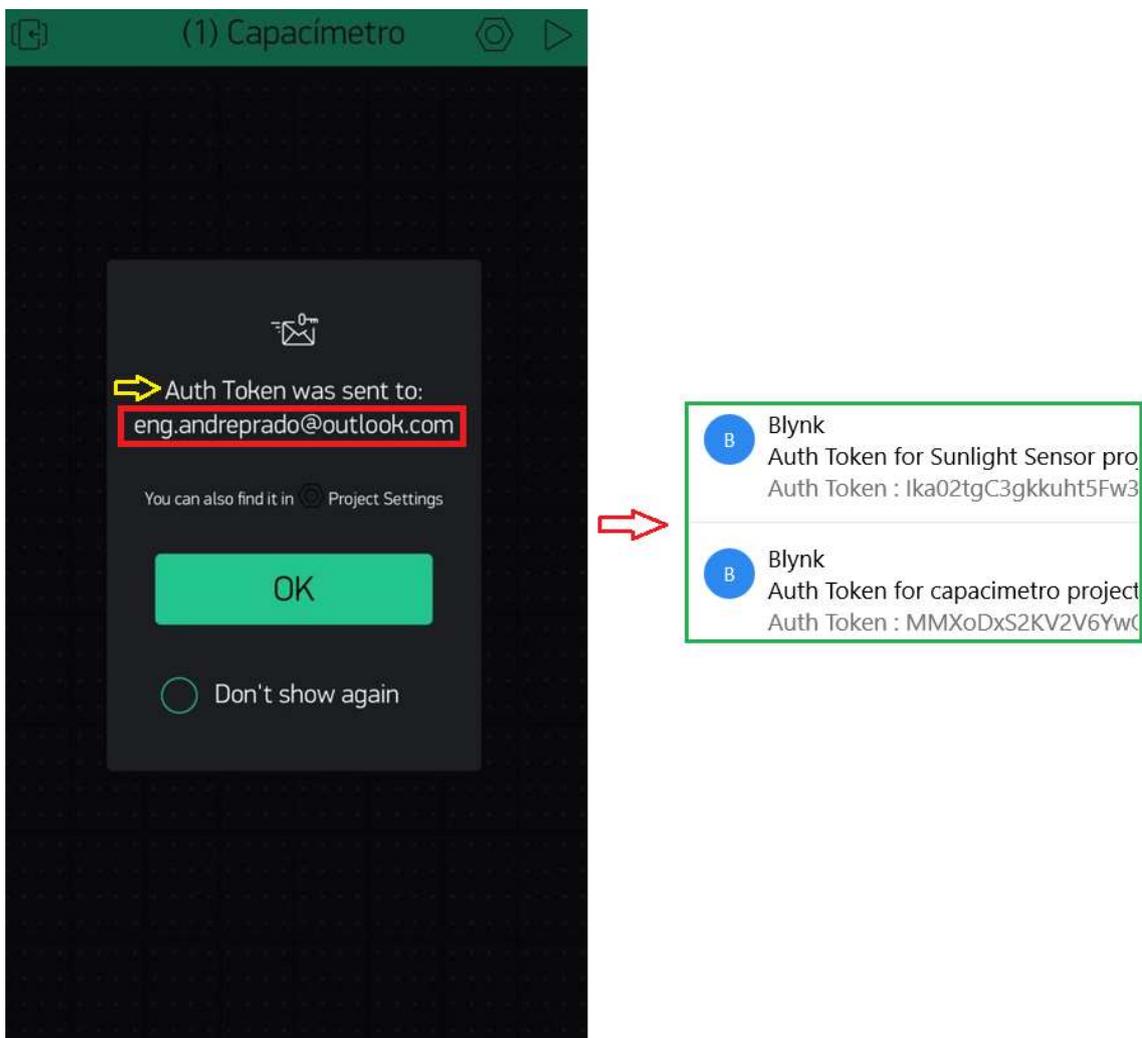
Figura 4.4 – Seleção do hardware e da comunicação no Projeto pelo aplicativo Blynk.



Fonte: Autoria própria.

Após as configurações das placas de desenvolvimento são criadas as áreas de trabalho, espaço em que é desenvolvido o aplicativo customizado. Paralelamente, é enviado o código de liberação através de um e-mail– o *auth token* – previamente cadastrado no aplicativo, o que pode ser visto na Figura 4.5. Este código será necessário na implementação do *scrip* no IDE do Arduino, a fim de possibilitar a comunicação entre as placas de desenvolvimento, o servidor Blynk e o aplicativo.

Figura 4.5 – Acesso para chave *Auth Token*.

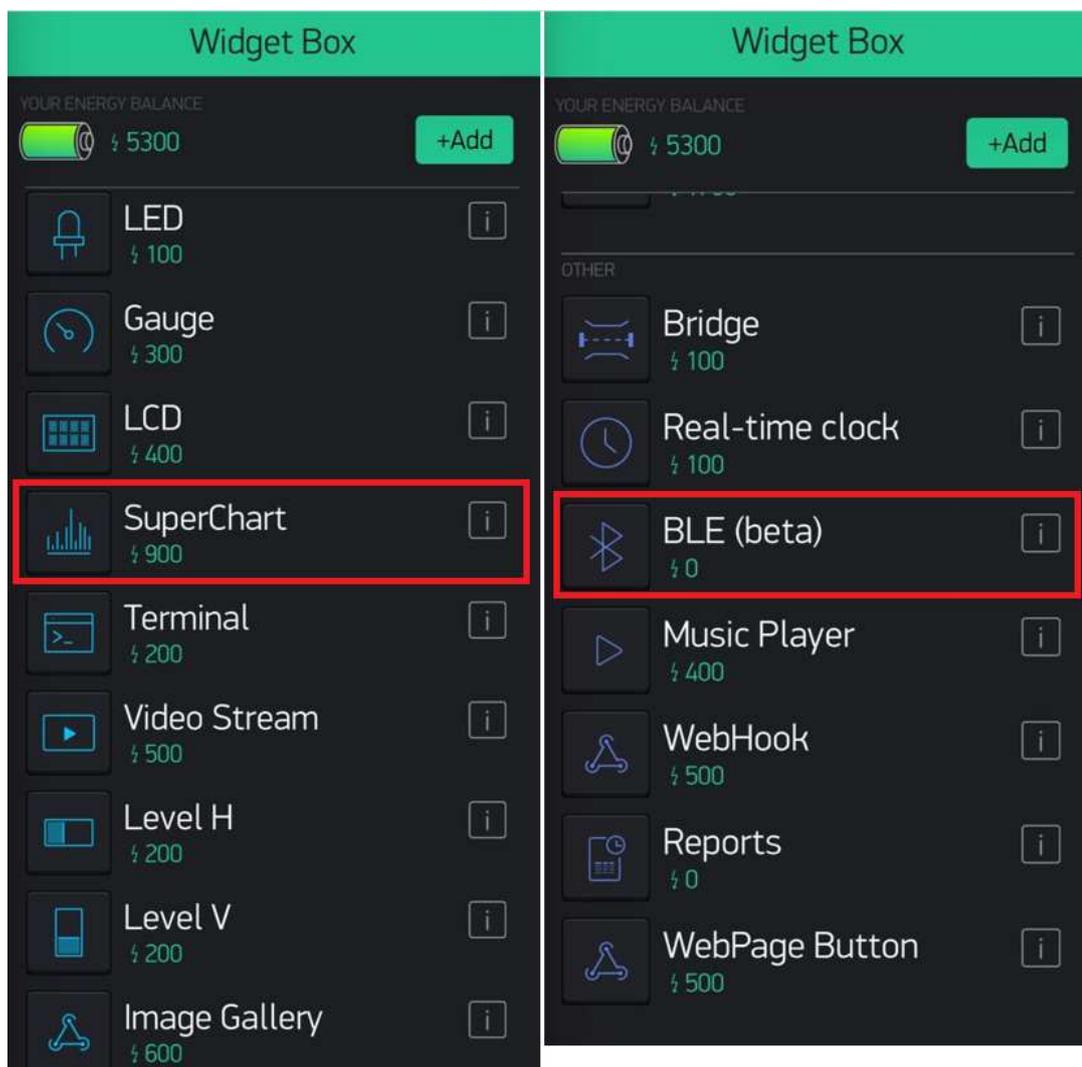


Fonte: Autorial própria.

Uma vez no espaço do projeto, ao clicar em qualquer ponto da tela, uma lista com os itens disponíveis é aberta. Itens estes que podem ser inseridos no menu do projeto e representam funções de controle, de leitura e interface com os hardwares, o que pode ser visto na Figura 4.6. Para o projeto do aparato de medição, é adicionado três SuperChart, modelo o

qual apresenta funções importantes, sendo representação gráfica em função do tempo, possibilidade de escolher até quatro variáveis para o mesmo gráfico e principalmente, possibilita exportação dos dados em CSV para o e-mail cadastrado. Também é inserido a ferramenta BLE (beta) para que o microcontrolador se comunique com o aplicativo através do Bluetooth no smartphone.

Figura 4.6 – Ferramentas para uso no aplicativo e a escolha para utilizar no projeto do capacitômetro.

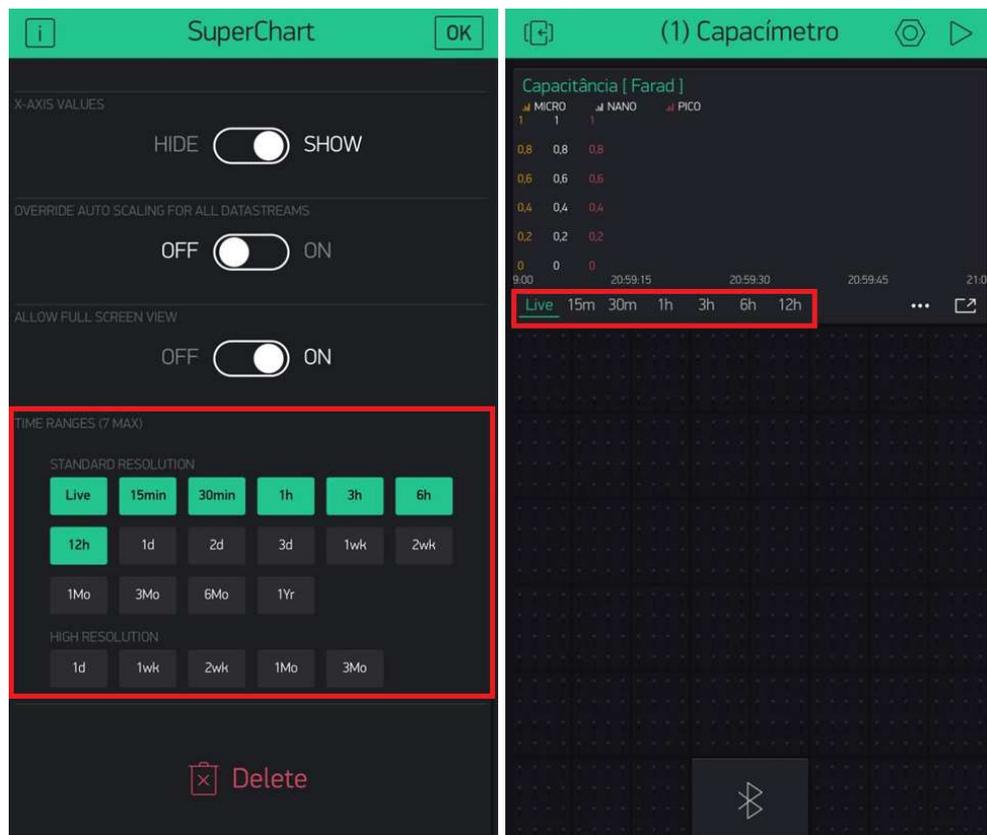


Fonte: Autoria própria.

Clicando sobre o item SuperChart e BLE (beta), visto na Figura 4.6 anterior, os dados serão inseridos na área do projeto, dada a implementação do SuperChart, que é utilizado para visualizar dados históricos e ao vivo. Para complementar esta ferramenta, é preciso enviar os dados do hardware com o intervalo desejado usando temporizadores da biblioteca Blynk. Este

modelo foi escolhido conforme suas funções como a possibilidade de alternar entre intervalos de tempo e o modo ao vivo, tocando na parte inferior desta ferramenta para alternar os intervalos de tempo, como pode ser visto na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Funções do SuperChart e janela de medição.



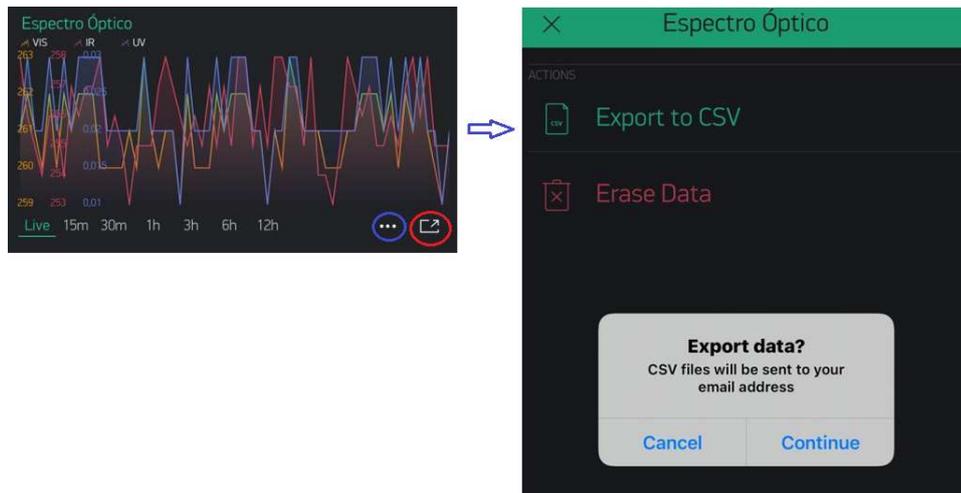
Fonte: Autoria própria.

Também é possível mostrar ou ocultar fluxos de dados, revelar dados anteriores com o deslize rápido da esquerda para direita sobre o gráfico, e pressionando o botão “tela cheia” é possível ter a visualização do gráfico em tela cheia no smartphone e então, o botão menu abre funções como exportar para CSV ou apagar dados no servidor, conforme pode ser visto na Figura 4.8.

As configurações do SuperChart foram determinadas da seguinte maneira, títulos dos gráficos, apresentar eixo x (tempo), sendo que a seleção dos períodos necessários foram 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 3 horas, 1 dia e 1 semana. A resolução define a precisão dos dados amostrados e, no momento, o gráfico suporta dois tipos de resolução, sendo a standard e a high. A resolução também depende do período selecionado, por exemplo, a resolução

standard para 1 dia significa que será fornecido 24 pontos por dia (1 por hora), com a resolução high será obtido 1440 pontos por dia (1 por minuto). Essa configuração pode ser verificada na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Funções do menu e “tela cheia”.



Fonte: Autorial própria.

Figura 4.9 – Configuração standard e high no SuperChart.



Fonte: Autorial própria.

Um segundo tópico a ser discutido é a respeito do uso de três SuperChart para todo o funcionalismo do aplicativo/hardware, que pode ser visto na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Fluxo de dados do SuperChart no aplicativo teste.



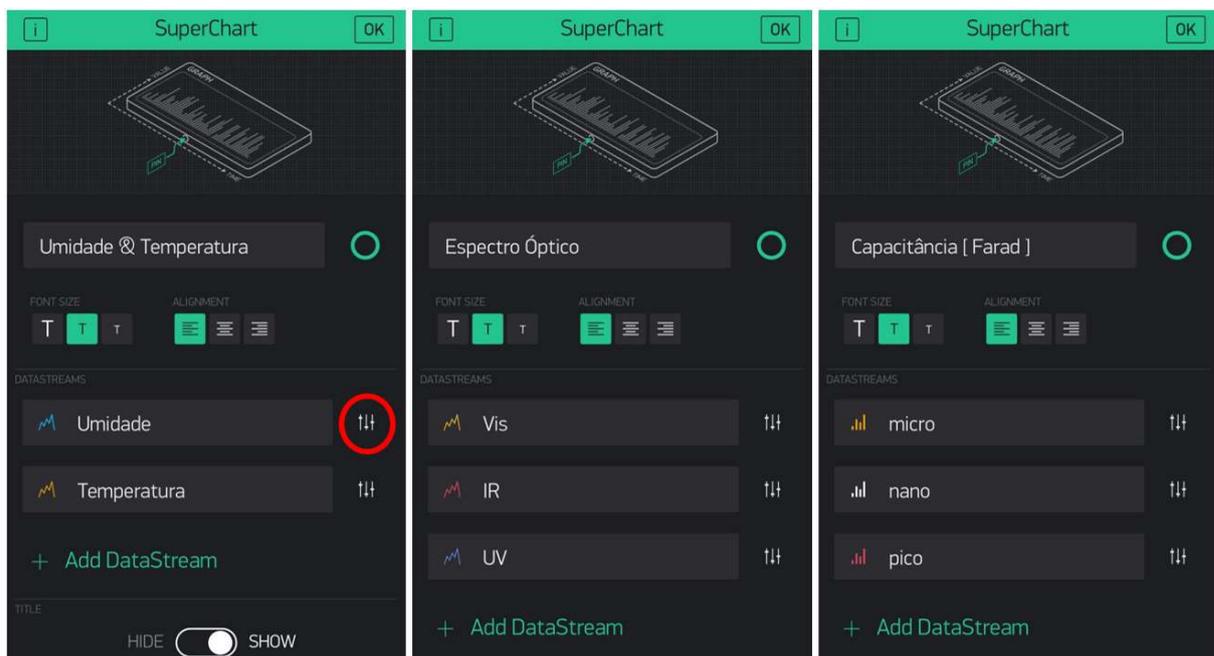
Fonte: Autoria própria.

Esta escolha de utilizar três unidades do SuperChart foi feita com base no requisito de ter uma análise dos dados de forma mais limpa, isto é, sem a sobreposição de várias informações num mesmo gráfico. Essa ferramenta suporta até quatro fluxos de dados e seus ajustes podem ser feitos de maneira individual apenas clicando no ícone de configurações, como pode ser visto na Figura 4.11.

No que tange as definições dentro dos gráficos disponíveis como linha, área, barra e binário, cores sólidas ou gradientes, assim como entrada dos dados disponibilizados pelo hardware, o Blynk carrega o mapeamento dos pinos disponíveis, permitindo o controle destes diretamente do aplicativo. Desta forma, os pinos descritos como *Digital* e *Analog*, referem-se

diretamente aos pinos disponíveis do hardware de nossa placa de desenvolvimento. Por vezes, no entanto, é necessário implementar outras funções que não podem ser diretamente mapeadas em pinos do hardware e, para tal, tem-se também o conceito de *Virtual Pins*. Os pinos virtuais podem, por exemplo, ser usados como uma condição para determinada ação no software.

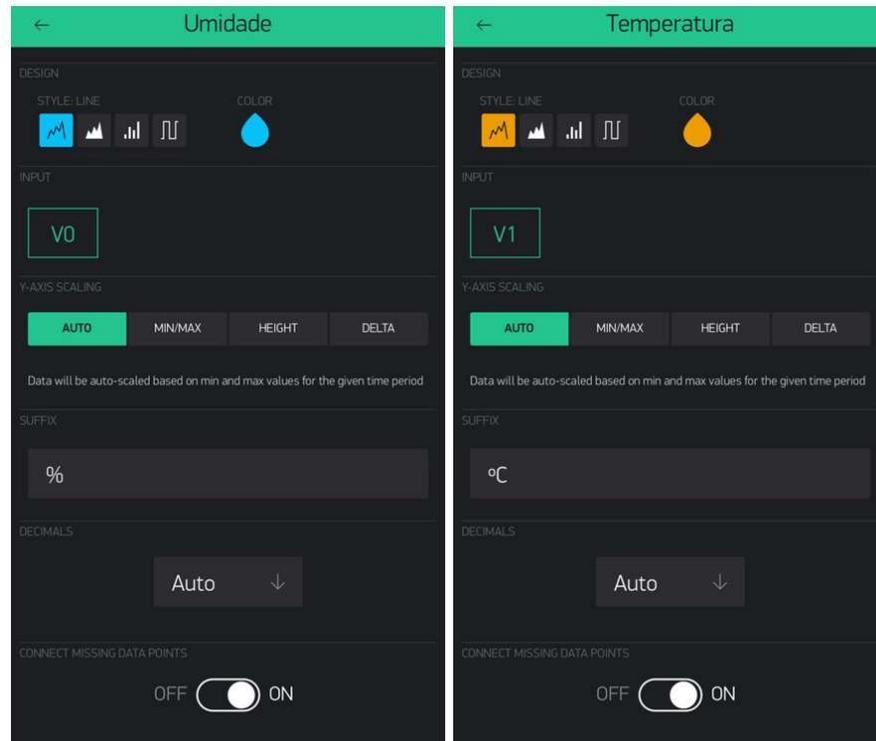
Figura 4.11 – Definições dos fluxos de dados no SuperChart.



Fonte: Autoria própria.

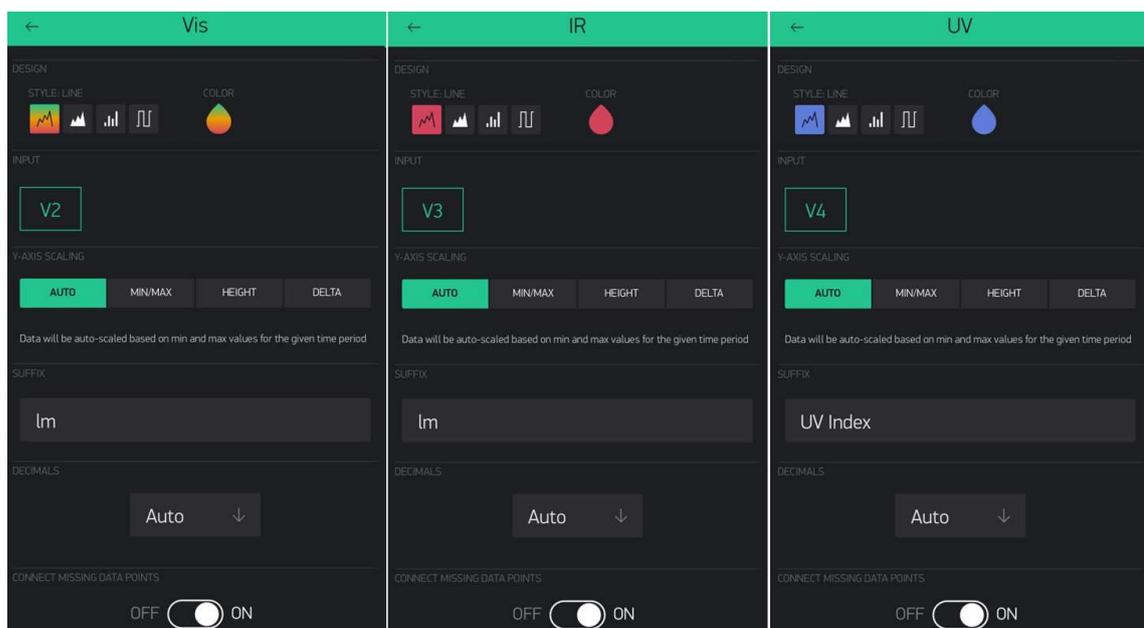
Ou seja, nesta etapa escolheu-se os pinos virtuais respectivos aos pinos que são determinados no código feito no IDE do Arduino. Os pinos, virtual V0 e virtual V1 irão apresentar os dados obtidos pelo sensor DHT11, sendo umidade e temperatura, respectivamente. Os virtuais V2, V3 e V4 são os pinos que irão fornecer os valores obtidos pelo sensor SI145, sendo luz visível, infravermelho e ultravioleta, respectivamente. Os pinos virtuais V10, V11 e V12 são os responsáveis por fornecer os valores obtidos da ponta de prova responsável por obter a capacitância da solução eletroquímica. As escolhas do tipo de gráfico, cores, preenchimentos, pinos de entrada dos dados, dos sufixos, escala do eixo Y e se existe a conexão dos dados amostrados nos gráficos, pode ser visto nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14.

Figura 4.12 – Configurações do SuperChart para o DHT11.



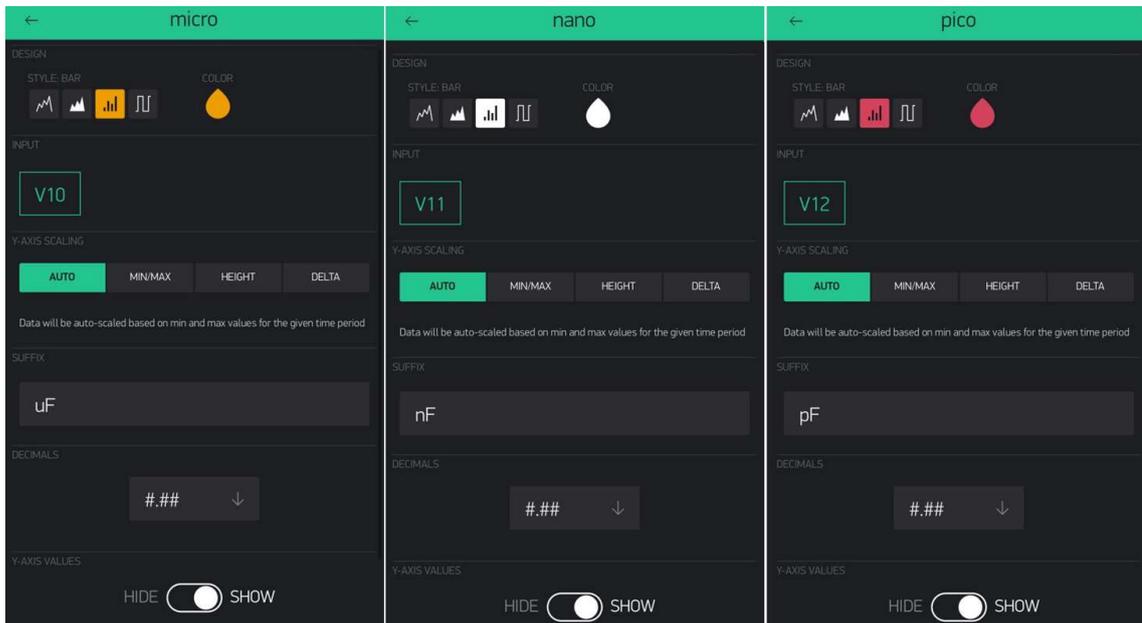
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.13 – Configurações do SuperChart para o SI1145.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14 – Configurações do SuperChart para o Capacímetro.



Fonte: Autoria própria.

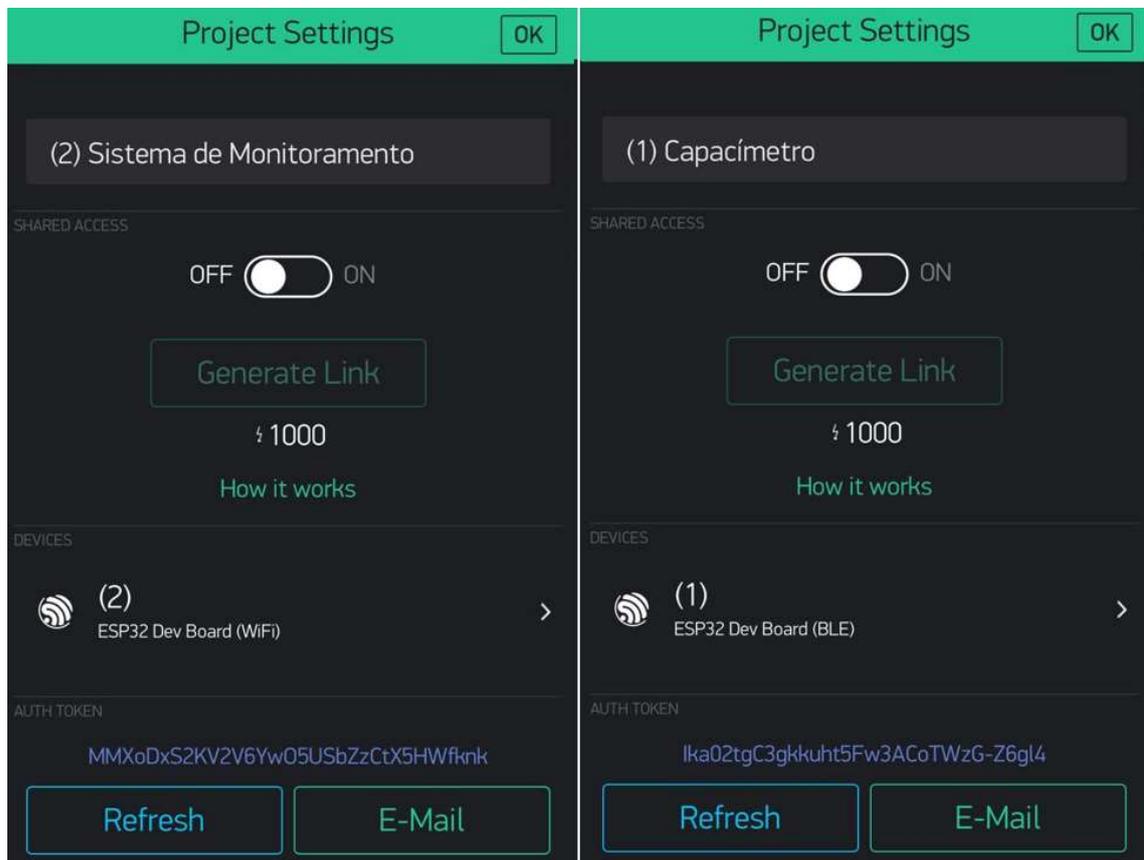
Nas configurações feitas nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 já apresentadas, salienta-se uma etapa onde também se configura o dimensionamento dos dados ao longo do eixo y, onde os dados automáticos serão escalonados automaticamente com base nos valores mínimo e máximo do período determinado. A escolha dos decimais, visto na Figura 4.14, define a formatação do valor gráfico quando este é pressionado em um determinado ponto por um período mais longo.

Discutido anteriormente, o uso dos pinos virtuais no aplicativo está em funcionamento simultâneo com o código implementado no IDE do Arduino e instalado no ESP32 DOIT V1, sendo que para ver os dados no gráfico é necessário usar ferramentas com intervalo de leitura de frequência (nesse caso, utiliza-se o `Blynk.virtualWrite`). Esse comando é armazenado no servidor automaticamente. Esta configuração das linhas de códigos originados da biblioteca Blynk para comunicar com o servidor e finalmente ser apresentado no aplicativo, pode ser visto no apêndice B e apêndice C.

Também já comentado, o *auth token* é uma etapa importante, podendo ser confirmada na parte de configurações do projeto e deve ser inserido no código de controle dos ESP32 DOIT V1, tanto no hardware com a comunicação em Wi-Fi, quanto pelo Bluetooth. O desenvolvimento das linhas de código no IDE do Arduino referentes a habilitação do *auth token* pode ser visualizado nos apêndices B e C. Pode ser observado na Figura 4.15 as

configurações de projeto do aplicativo para uma comunicação com os hardwares e suas atribuições.

Figura 4.15 – Configurações gerais de projeto do aplicativo.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Hardware

O aplicativo é uma parte do projeto que é correlacionada ao desenvolvimento do hardware responsável pela obtenção das variáveis discutidas neste trabalho, para que, dessa forma, seja possível determinar a proposta do supercapacitor fotossensível nanoestruturado em solução.

A escolha do microcontrolador ESP32 DOIT V1 para o desenvolvimento do aparato de medição está fundamentada em alguns fatores importantes. Inicialmente é um modelo de microcontrolador compacto, se comparado aos outros modelos no mercado e, ainda tendo em sua estrutura um circuito integrado que disponibiliza comunicação sem fio, algo que aumenta as possibilidades de implementações. Um segundo fator importante são os números de portas

para comunicação, sendo 30 unidades, como exemplos portas analógicas, digitais, seriais como SCL responsável pelo clock e SDA para envio e recebimento de sinais. Outro ponto a se considerar é o número de bits do controlador, para ESP32 utilizado, sendo de 12bits, o que possibilita uma melhor resolução das leituras analógicas e do tempo de resposta.

Para manter o conceito de compacto do ESP32, foram utilizados os seguintes itens nesse projeto, os quais podem ser vistos na Tabela 4.1.

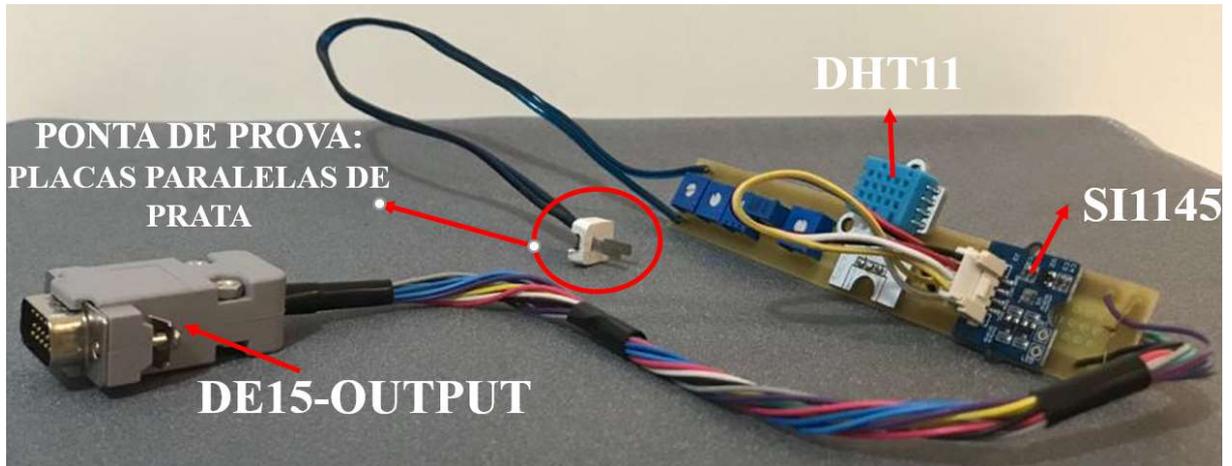
Tabela 4.1 – Materiais para o hardware de instrumentação e custo final.

ITEM	UNIDADES	CUSTO
ESP32 DOIT V1	2	R\$ 90,00
Conector USB-A 2.0	1	R\$ 5,00
Conector Micro-B 2.0 Serial	1	R\$ 15,00
Bateria de 5.000mAh - 5V	1	R\$ 55,00
Conector Soquete DE15 INPUT	1	R\$ 1,50
Conector Soquete DE15 OUTPUT	1	R\$ 1,50
DHT11	1	R\$ 12,00
SI145	1	R\$ 48,00
Protoboard	1	R\$ 18,00
TRIMMERS 1 Khoms	1	R\$ 0,80
TRIMMERS 10 Khoms	1	R\$ 0,85
TRIMMERS 100 Khoms	1	R\$ 0,95
TRIMMERS 1000 Khoms	1	R\$ 1,15
TRIMMERS 545 homs	1	R\$ 0,55
Placa de Fenolite 80mmx60mm	1	R\$ 7,80
Placa de Fenolite 130mmx15mm	1	R\$ 4,20
Total	16	R\$ 262,30

Fonte: Autoria própria.

Os sensores DHT11, SI145 e os trimmers foram soldados na placa de Fenolite de 130mm por 15mm, de forma a gerar uma barra contemplando todas as funções de aquisição de variáveis, sendo inclusive implementada uma ponteira de prova para ser utilizada na medição da solução eletroquímica. Com todos os componentes da régua de sensores já inseridos, é introduzido um conector do tipo soquete DE15 – OUTPUT, tornando o agrupamento dos sensores independente e reduzindo os erros de conexão com o hardware final, ou seja, o capacitômetro. Essa implementação pode ser vista na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Régua de sensores.



Fonte: Autoria própria.

Como parte principal desta unidade tem-se o desenvolvimento do capacímetro, sendo através da soldagem do conector USB-A 2.0 na placa de Fenolite, junto aos dois ESP32 e, análogo a régua de sensores foi inserido um conector tipo soquete DE15 – INPUT, como pode ser visto na Figura 4.17.

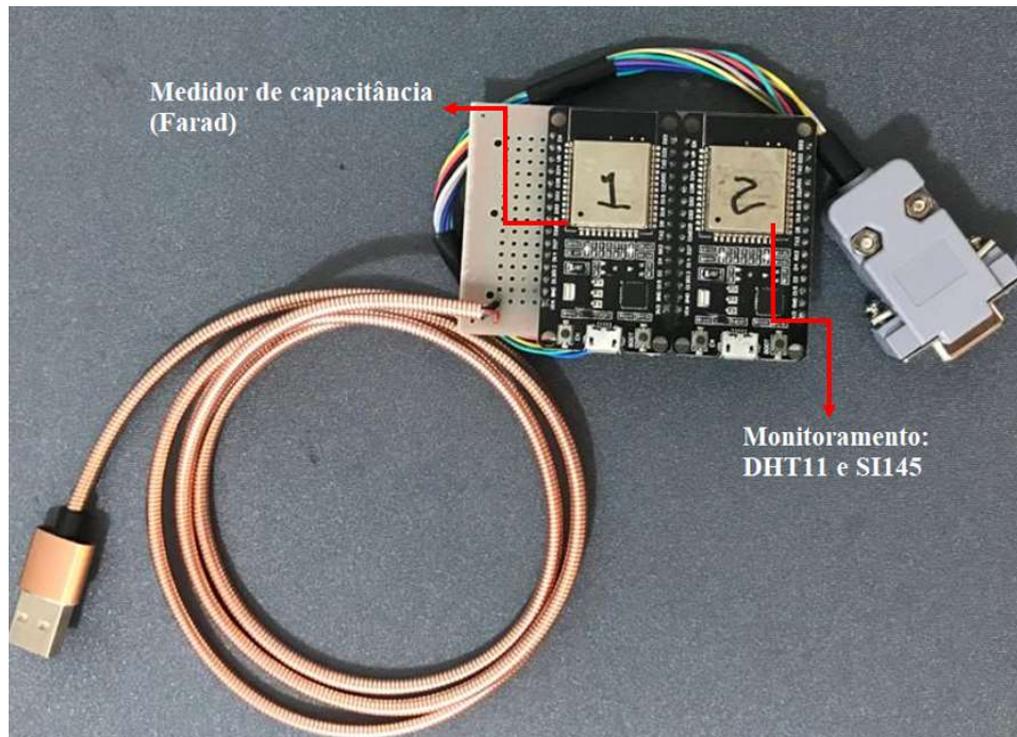
Figura 4.17 – Hardware proposto para medição da capacitância na solução eletroquímica.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.18 temos o detalhamento em numeração dos ESP32, um sendo marcado como número 1 e o segundo sendo marcado como número 2, de modo que se auxilia na inclusão dos códigos de controle nos seus respectivos microcontroladores.

Figura 4.18 – Numeração dos microcontroladores para determinar suas funções de trabalho.



Fonte: Autoria própria.

O ESP32 marcado como 1 tem seu código apresentado no apêndice B, já o ESP32 marcado como 2 tem seu código apresentado no apêndice C. Respectivamente, um fará a requisição dos valores de capacitância paralelamente ao segundo, o qual obterá os valores dos sensores DHT11 e SI145.

O uso do conector USB-A é para que o capacímetro proposto seja utilizado de forma 100% remota, sem a necessidade de estar conectado a um dispositivo local, seja um desktop, notebook ou até mesmo pela alimentação serial dos ESP32. É importante salientar que há possibilidade de manter a aquisição dos dados por uma das unidades de controle em um momento que está sendo realizado a manutenção/atualização do código de controle na outra unidade. Para isso é necessário ter o uso de uma fonte externa, que para o projeto foi utilizado uma bateria externa de 5.000mAh e 5V de tensão CC, que pode ser visto na Figura 4.19. Além do mais, o uso de uma fonte externa CC, torna-se interessante pela redução de interferências por ruídos da rede, fontes chaveadas, que normalmente são utilizadas por notebooks, desktops e smartphones.

Figura 4.19 – Bateria externa de 5.000mAh – 5V CC, para auxílio em modo remoto.



Fonte: Autoria própria.

Por último, é desenvolvido em impressora 3D com filamento em ABS um suporte para o uso de cubetas de quartzo, sendo uma ferramenta não menos importante, pois os testes são feitos em estado líquido do composto eletroquímico, o que torna primordial o uso destes recipientes que são inertes ao composto e não interferem na passagem da luz. O suporte desenvolvido pode ser visto na Figura 4.20.

Figura 4.20 – Suporte para cubetas de quartzo.



Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Validação do capacitômetro implementado

Neste tópico é realizado uma análise estatística quantitativa com a finalidade de obter um comparativo do dispositivo de medição desenvolvido neste trabalho com um modelo de bancada comercial, sendo este um Minipa MDM-8145A. Tal modelo é utilizado no laboratório da Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, campus de Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

O comparativo foi feito com medições em um acervo de 107 capacitores, sendo um total de 23 grupos distintos de capacitância com três modelos de materiais construtivos sendo eletrolíticos, poliéster e cerâmicos. Analisando o modelo Minipa MDM-8145A observa-se uma medição para capacitância vista na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Unidades de medida do Minipa MDM-8145A.

Unidade de capacitância – Farad.	
nF: Nanofarad.	1 x 10 ⁻⁹ ou 0,000000001 Farad
µF: Microfarad.	1 x 10 ⁻⁶ ou 0,000001 Farad
mF: Milifarad	1 x 10 ⁻³ ou 0,001 Farad

Fonte: Retirado do Manual (MINIPA, 2021).

Após analisar a faixa de medição do Minipa foi dado início aos testes nos capacitores do acervo. Primeiro foi utilizado o aparato desenvolvido neste trabalho para adquirir os valores de capacitância de todos os 107 capacitores e independente de seus valores ou modelos, foram obtidas dez medidas de cada capacitor. Desta forma, foi gerado um banco de dados com 1070 medições de capacitâncias, estas que forneceram valores de média aritmética para cada capacitância, desvio padrão e uma variância para cada componente com dez medições. Isso pode ser visto nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 que se distinguem em medições de microfarad, nanofarad e picofarad, respectivamente.

Tabela 4.3 – Medidas para capacitores de microfarad.

Capacímetro - MicroFarad				
UNIDADES	Item (uF)	Média Aritmética	Desvio Padrão	Variância (%)
4	4700	4251,486	33,499	0,78793
1	2200	2215,219	53,704	2,42431
3	110	109,823	0,975	0,88762
1	105	103,741	0,429	0,41399
1	100	89,351	0,265	0,29709
17	47	43,505	0,286	0,65661
20	10	11,434	0,221	1,93551
4	4,7	5,957	0,101	1,70129

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.4 – Medidas para capacitores de nanofarad.

Capacímetro – NanoFarad				
UNIDADES	Item (nF)	Média Aritmética	Desvio Padrão	Variância (%)
3	547	543,214	9,704	1,78632
3	110	111,778	2,070	1,85153
9	105	107,535	4,748	4,41526
3	100	91,493	0,278	0,30414
1	97	102,601	0,816	0,79568
10	75	74,834	4,765	6,36785
1	65	64,896	0,584	0,89994
3	57	57,882	1,334	2,30453
3	55	54,444	2,608	4,78983
1	47	51,569	0,429	0,83112
10	11	12,090	0,564	4,66363
2	1	1,077	0,054	5,05856

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.5 – Medidas para capacitores de picofarad.

Capacímetro - PicoFarad				
UNIDADES	Item (pF)	Média Aritmética	Desvio Padrão	Variância (%)
1	515	515,286	3,283	0,6370
2	417	427,100	23,261	5,4463
4	60	61,184	4,930	8,0582

Fonte: Autoria própria.

As medidas obtidas pelo aparato desenvolvido neste trabalho podem gerar uma base de informações atribuídas a este modelo de leitura e seu desempenho se comparado a outros modelos que, neste caso, utilizado como comparativo o Minipa MDM-8145A. Com este intuito, foram realizadas as mesmas medições dos 107 capacitores através do Minipa, o que apresentou resultados presentes nas seguintes Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8.

Tabela 4.6 – Medidas para capacitores de microfarad realizado pelo Minipa MDM-8145A.

Minipa MDM-8145A – MicroFarads			
UNIDADES	Item (uF)	Média Aritmética	Erro entre Capacímetro e Minipa
4	4700	4258,000	0,15299
1	2200	2208,000	0,32695
3	110	108,450	1,26633
1	105	104,382	0,61409
1	100	91,210	2,03825
17	47	43,610	0,24156
20	10	11,573	1,19945
4	4,7	5,868	1,51102

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.7 – Medidas para capacitores de nanofarad realizado pelo Minipa MDM-8145A.

Minipa MDM-8145A – NanoFarads			
UNIDADES	Item (nF)	Média Aritmética	Erro entre Capacímetro e Minipa
3	547	542,345	0,16015
3	110	111,235	0,48859
9	105	107,296	0,22233
3	100	91,79	0,32377
1	97	102,354	0,24143
10	75	74,921	0,11650
1	65	64,368	0,82028
3	57	57,813	0,11868
3	55	54,485	0,07525
1	47	51,354	0,41884
10	11	12,137	0,38568
2	1	1,027	4,85085

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.8 – Medidas para capacitores de picofarad realizado pelo Minipa MDM-8145A.

Minipa MDM-8145A – PicoFarads			
UNIDADES	Item (pF)	Média Aritmética	Erro entre Capacímetro e Minipa
1	515	515,235	0,00984
2	417	427,958	0,20049
4	60	61,161	0,03795

Fonte: Autoria própria.

Analisando as Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 foi observado pelos dados obtidos das amostras, valores de desvio padrão e variância que ao mesmo tempo que destacam a acurácia do modelo de medição proposto, através de microcontrolador, também apresentam uma melhora em medidas em níveis de grandezas na casa de nanofarads e picofarads. Destaca-se que este modelo de instrumentação, visto na Figura 4.18, ainda fornece o aumento de possibilidades em aplicações por modo remoto e automatizado, sendo necessário apenas ligar o aparato no caso de estudo, tendo como potencial o controle dos dados obtidos por aplicativo como também a exportação dos dados para trabalhar em CSV.

Nesta etapa é observada a semelhança nos dados fornecidos entre o modelo de medição proposta neste trabalho com um modelo já utilizado comercialmente e com

certificação, tornando-se possível o uso deste aparato para obtenção da supercapacitância na solução eletroquímica incrementada conforme dados obtidos.

4.3 CONFEÇÃO DA SOLUÇÃO SUPERCAPACITIVA FOTOSSENSÍVEL NANOESTRUTURADA

Neste capítulo é desenvolvida a solução eletroquímica formada por nanopartículas e sua quantização de capacitância através do aparato de medição atrelado a este trabalho, tendo como requisitos a observação de variáveis ambientais do projeto da solução, sendo elas a umidade, temperatura e ondas do espectro visível que incidem. Sendo assim, inicia-se com o desenvolvimento da solução.

4.3.1 Solução eletroquímica

A obtenção de nanopartículas de óxido de ferro será feita por meio de ferramentas disponíveis no laboratório LSCNano como uma balança analítica com estufa, placa de aquecimento com agitador magnético, quatro béqueres de 50ml, um béquer de 100ml, cinco espátulas químicas, luvas para as mãos, máscaras N95, jaleco, pipeta, cubeta de quartzo e um termômetro por infravermelho.

A confecção das NPs será através do método poliol em meio aquoso, sendo o óxido de ferro sintetizado via rota hidrotérmica, como descrito na Patente BR 102016006952-1.

Sua confecção pode ser analisada em três etapas, sendo que a primeira é através da utilização da balança analítica com estufa, do béquer de 50ml e das cinco espátulas químicas, sendo usados para pesagem dos materiais a serem utilizados. Na Tabela 4.9 podem ser vistos os materiais e suas medidas.

Tabela 4.9 – Materiais da solução eletroquímica.

MATERIAL	MASSA (g)	ORDEM
Sulfato de Ferro II	1	1
Citrato de Sódio	0.6	2
Polivinilpirrolidona	0.8	3
Ácido Ascórbico	1	4

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 4.21 pode ser observada a estrutura e as ferramentas no laboratório LSCNano para o desenvolvimento do composto com nanopartículas, sendo elas as chapas de agitação, pipeta, frasco com água deionizada, espátulas e balança analítica. Neste momento utiliza-se quatro béqueres de 50ml para a pesagem dos solutos apresentados na Tabela 4.9 e, posteriormente ser adicionado o solvente, sendo este a água deionizada.

Figura 4.21 – Exposição das ferramentas na preparação dos solutos.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.22 pode ser observado o modelo de balança analítica utilizada e grau precisão nas medidas dos solutos.

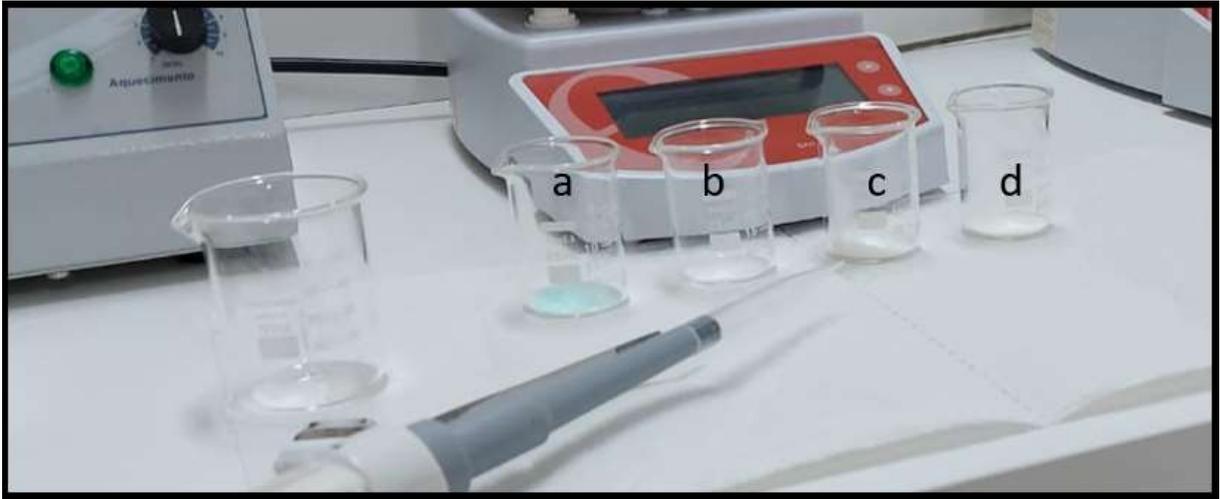
Figura 4.22 – Balança analítica para pesagem dos solutos e seu grau de precisão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.23 pode ser observado a exposição dos compostos, a partir deste momento terá início a segunda etapa do processo em confeccionar as nanopartículas dispersas em solução.

Figura 4.23 – (a) Sulfato de ferro II, (b) citrato de sódio, (c) Polivinilpirrolidona e (d) ácido ascórbico.



Fonte: Autoria própria.

Na segunda parte é realizado o incremento dos solutos, separados anteriormente, em um solvente que neste caso é água deionizada, suas proporções podem ser vistas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Mistura dos reagentes para solução eletroquímica.

SOLUTO	SOLVENTE (ÁGUA DEIONIZADA) (ml)	RECIPIENTE (ml)
Sulfato de Ferro II	4	50ml
Citrato de Sódio	4	
Polivinilpirrolidona	4	
Ácido Ascórbico	8	

Fonte: Autoria própria.

Pode ser visto na Figura 4.24 o procedimento de adição da água deionizada, através de uma pipeta milimetrada.

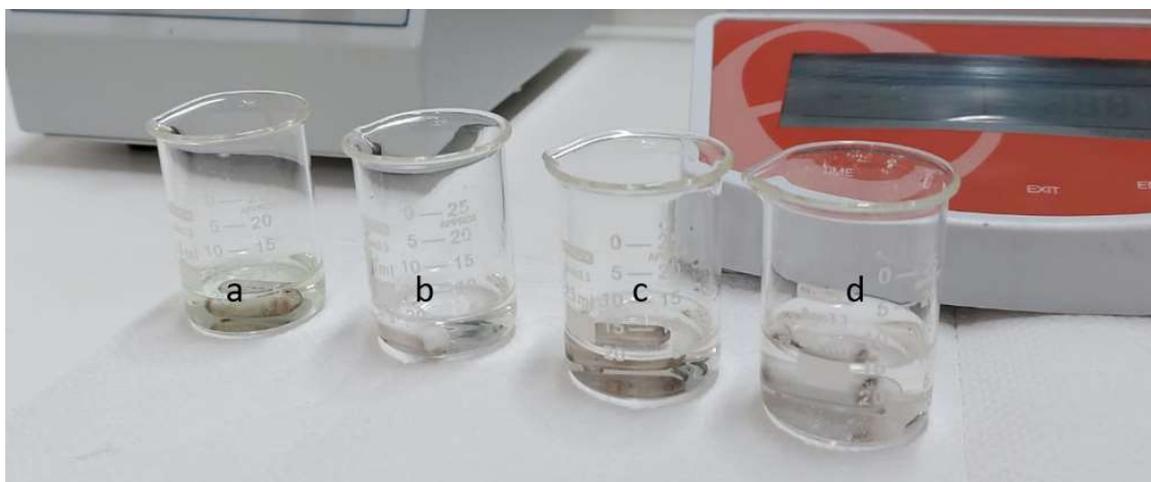
Figura 4.24 – Representação da adição de água deionizada no processo.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.25 está representado os respectivos recipientes com as quatro soluções químicas designadas como reagentes para o desenvolvimento do composto supercapacitivo.

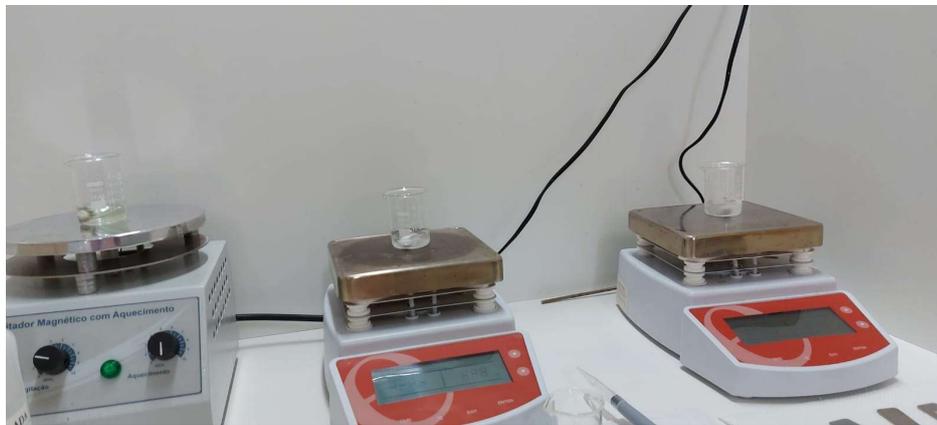
Figura 4.25 – (a) Sulfato de ferro II, (b) citrato de sódio, (c) Polivinilpirrolidona e (d) ácido ascórbico em solvente (água deionizada).



Fonte: Autoria própria.

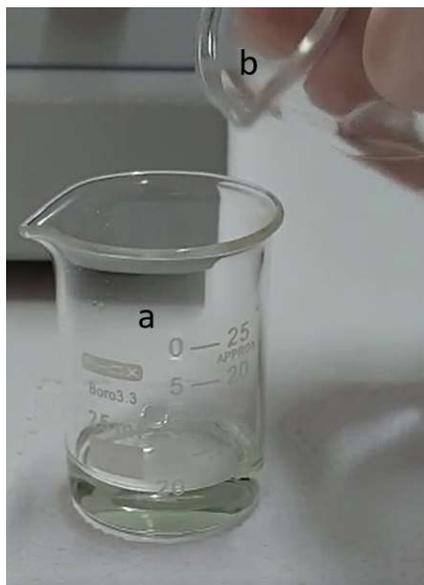
Na terceira etapa ocorre a mistura dos reagentes sendo de forma sequencial, prevista pela Tabela 4.9, num beaker de 100ml. Após a mistura ser feita, é inserido um agitador magnético, sendo posteriormente colocado sobre a chapa de aquecimento com agitador magnético. Neste momento a chapa será aquecida a 45 °C enquanto ocorre a mistura pelo agitador, de modo que através do termômetro com infravermelho é possível monitorar a temperatura exata da chapa e da solução sendo preparada. A terceira etapa pode ser verificada nas Figura 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30.

Figura 4.26 – Agitação dos compostos de forma individual como efeito catalizador.



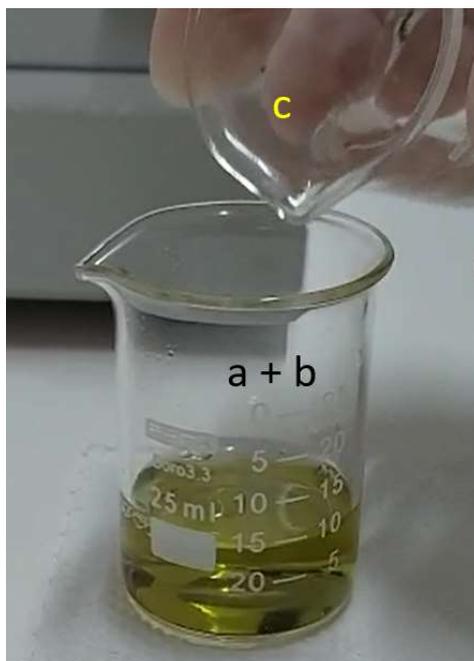
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.27 – Adição de (a) sulfato de ferro II em (b) citrato de sódio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.28 – Adição de (c) Polivinilpirrolidona (PVP).



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.29 – Adição de (d) ácido ascórbico.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.30 apresenta o modelo final da solução supercapacitiva fotossensível a base de nanopartículas, uma etapa importante para a reação química deste composto é realizada pelo agitador magnético com chapa de aquecimento. Este processo é um catalizador no desenvolvimento do composto supercapacitivo, auxiliando no aumento da energia fornecida para as reações químicas existentes entre os materiais, reações estas já discutidas.

Figura 4.30 – Solução eletroquímica supercapacitiva e fotossensível com nanopartículas.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Medição da capacitância da solução eletroquímica pelo capacitmetro proposto

Neste tópico são descritos os resultados a respeito do uso do instrumento de medição para capacitância da solução eletroquímica proposta, tendo variáveis em observação como a umidade, temperatura e ondas eletromagnéticas na faixa do visível e quais as suas interferências na capacitância da solução.

No desenvolvimento da análise do composto eletroquímico, foram realizadas medições em 3 momentos diferentes da solução, no que diz respeito a sua data de preparo e

um teste em relação ao aumento da densidade em teste. Na Tabela 4.11, pode-se observar os parâmetros dos testes.

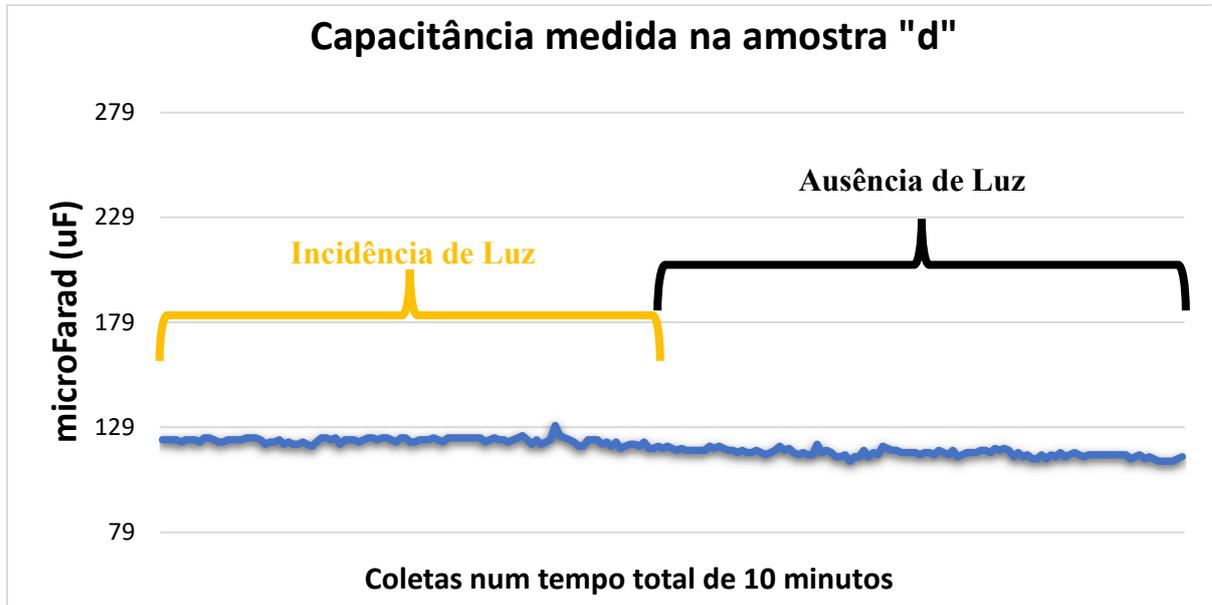
Tabela 4.11 – Amostras utilizadas para os testes de capacitância do composto eletroquímico.

Quadro de análise				
AMOSTRA	MASSA (g)	IDADE DA SOLUÇÃO (dias)	TEMPO DE TESTAGEM (minuto)	INTERFERÊNCIAS
a	0,61	> 40	10	Temperatura = 20°C Umidade = 55% Com/Sem Luz
b	0,61	40 > ↔ > 20	10	Temperatura = 20°C Umidade = 55% Com/Sem Luz
c	0,81	40 > ↔ > 20	10	Temperatura = 20°C Umidade = 55% Com/Sem Luz
d	0,61	1	10	Temperatura = 20°C Umidade = 55% Com/Sem Luz

Fonte: Autoria própria.

Para as condições propostas na Tabela 4.11 foram obtidos valores de capacitância que podem ser analisados pelas Figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34, estas que representam os testes realizados nas amostras. Como critério de avaliação da solução eletroquímica temos em um eixo Y os valores obtidos de capacitância num tempo total de medição de 10 minutos, sendo esse tempo o eixo X. Dentro dessa janela de 10 minutos adquirindo valores de capacitância optou-se por testar a influência da luz, de modo que dentro do tempo total utilizado para obter valores de capacitância utilizou-se um tempo de 5 minutos para medir valores de capacitância com incidência indireta de luz artificial, sendo duas fontes fluorescente de 40Watts por unidade. Ainda dentro da janela de 10 minutos para aquisição dos valores de capacitância, destinou-se 5 minutos para realizar a leitura sem o uso das fontes artificiais de luz, esses momentos com uso de fontes de luz artificiais foram nomeados nos gráficos das Figuras 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 como períodos de incidência e ausência de luz.

Figura 4.31 – Teste em composto com 0,61g e 24 horas após o preparo, amostra tipo “d”.



Fonte: Autoria própria.

Complementando os gráficos é proposto o uso das Tabelas 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 para uma análise quantitativa e para auxiliar na análise de influência fotônica nas respostas das amostras testadas.

Tabela 4.12 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,61g e 24 horas após o preparo, amostra tipo “d”.

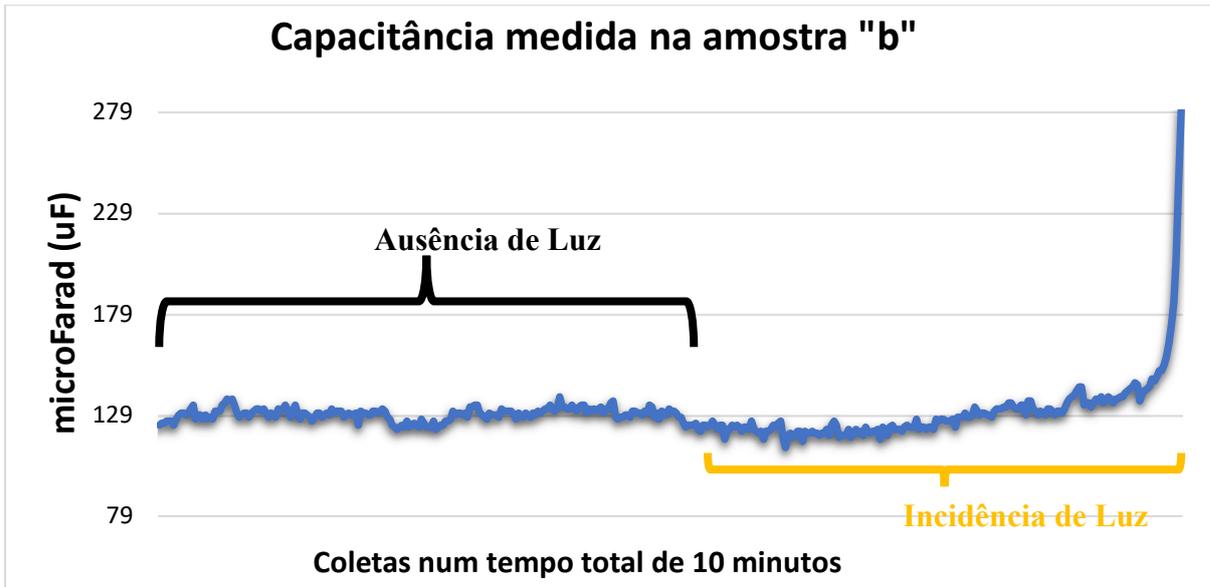
Dados obtidos das leituras feitas na amostra tipo “d”			
DADOS	10 minutos de coleta	5 minutos com incidência de luz	5 minutos com ausência de luz
Média Aritmética	119,593 uF	122,8 uF	116,899 uF
Desvio Padrão	3,387	1,4	1,889
Variância	0,0283	0,0114	0,01616

Fonte: Autoria própria.

Analisando a amostra do tipo “d” pelo gráfico da Figura 4.31, observa-se uma redução nos valores de capacitância, eixo Y, quando é retirada a fonte de luz artificial, mesmo que esta luz seja de forma indireta. Nota-se também, concomitante a Figura 4.31, a diferença na média aritmética das capacitâncias no tempo total de medição, sendo este tempo dado pelo eixo X, e

tal diferença na média aritmética é observada na medição com incidência de luz e com ausência da luz, apresentado pela Tabela 4.12.

Figura 4.32 – Teste em composto com 0,61g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “b”.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.32 constatou-se ao analisar a amostra tipo “b” um aumento médio de 10 microfarads, tendo como única variável modificada o tempo de saturação da solução eletroquímica, o que implicou uma resposta capacitiva superior ao modelo de amostra tipo “d”, o que também pode ser observado na Tabela 4.13, onde é possível comparar a média aritmética no tempo total de coleta da amostra tipo “b” com a do tipo “d”.

Ao final do tempo de medição para amostra do tipo “b” observou-se no gráfico um aumento na capacitância no período de 5 minutos finais, com uso de luz indireta, observado por um pico máximo de 279 microfarads. Dado a discordância dos valores medidos até o instante do valor desse valor máximo, destinou-se uma testagem para uma melhor análise da solução com uma janela de saturação na faixa de 20 a 40 dias após sua confecção.

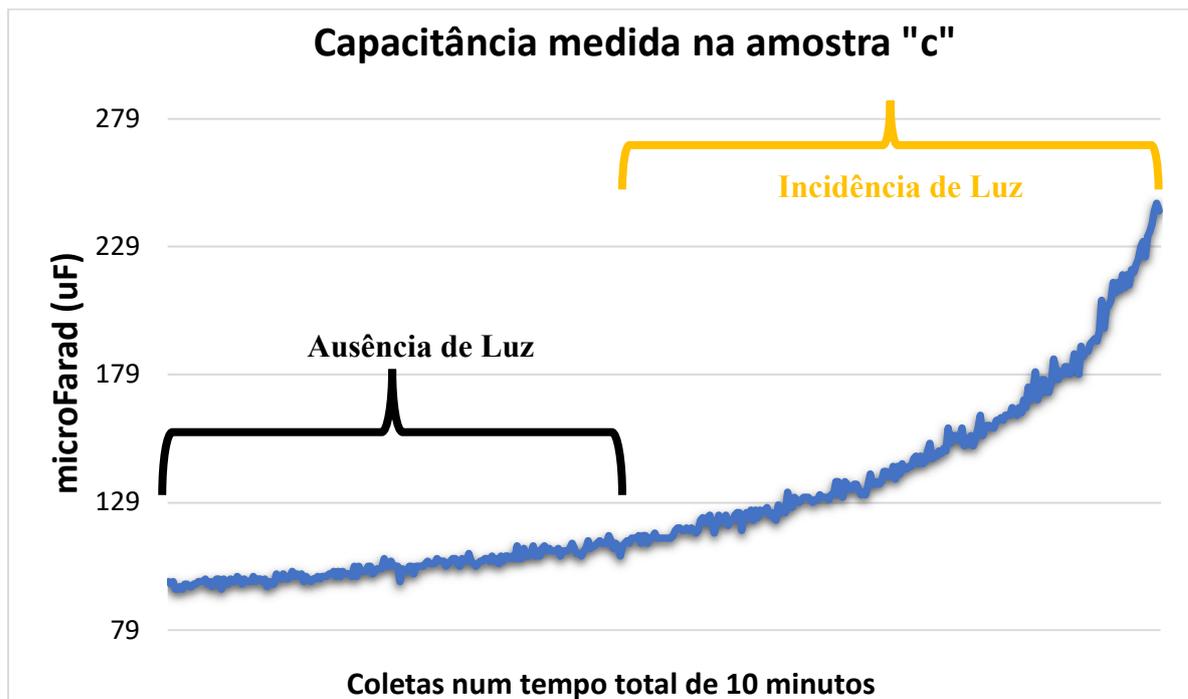
Tabela 4.13 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,61g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “b”.

Dados obtidos das leituras feitas na amostra tipo “b”			
DADOS	10 minutos de coleta	5 minutos com incidência de luz	5 minutos com ausência de luz
Média Aritmética	129,901 uF	130,303 uF	129,497 uF
Desvio Padrão	12,291	17,103	3,048
Variância	0,0946	0,1313	0,0235

Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.33 representa o desempenho da amostra tipo “c”, de modo que esta testagem é realizada para melhorar a análise sobre a amostra do tipo “b”, tendo como única variável modificada a densidade utilizada para teste. No modelo tipo “b” tínhamos uma amostra com tempo de saturação entre 20 e 40 dias e com uma massa de 0,61 gramas, já para o modelo tipo “c” acrescentou-se 0,2 gramas e mantendo o tempo de confecção desta solução eletroquímica.

Figura 4.33 – Teste em composto com 0,81g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “c”.



Fonte: Autoria própria

No gráfico da Figura 4.33 é notável o rápido desempenho em aumentar os valores de capacitância sendo lidos dentro da janela de medição de 10 minutos, e ainda melhorando o crescimento da capacitância quando é inserido uma fonte de luz artificial indireta. De modo a auxiliar, na Tabela 4.14 pode ser comparado os valores de médias aritméticas das capacitâncias para o tempo total de leitura, e para os intervalos destinados a observar a influência da luz na amostra, com os valores da Tabela 4.13, da amostra tipo “b”.

Nos valores médios de capacitâncias para o tempo total de 10 minutos o modelo de amostra tipo “b” apresentou o mesmo desempenho que o tipo “c”, mas no que se refere a uma resposta de valores de capacitâncias influenciadas por incidência de luz, o tipo “c” apresenta uma resposta maior a esse modelo de estímulo externo. Ainda sobre a amostra do tipo “c” nota-se o desempenho no crescimento da capacitância ao longo do tempo similar a uma curva exponencial, e dado ao modelo de análise adotado para esta pesquisa, a janela de tempo de 10 minutos destinado a leitura de capacitâncias pode não determinar o real desempenho em saturação da amostra tipo “c”.

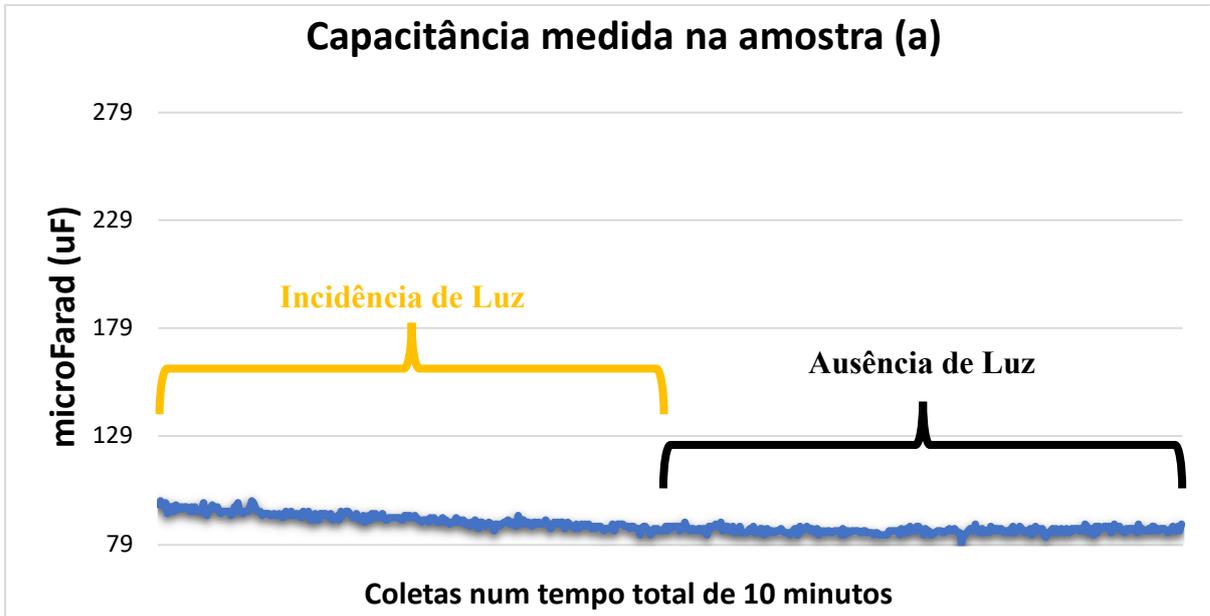
Tabela 4.14 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,81g e janela superior a 20 dias e inferior a 40 dias, amostra tipo “c”.

Dados obtidos das leituras feitas na amostra tipo “c”			
DADOS	10 minutos de coleta	5 minutos com incidência de luz	5 minutos com ausência de luz
Média Aritmética	129,113 uF	163,557 uF	104,361 uF
Desvio Padrão	33,770	48,950	5,570
Variância	0,262	0,2993	0,0534

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.34 encontra-se a curva de dados obtidos ao longo de 10 minutos de leitura para a amostra do tipo “a”, que se difere com os tipos anteriores em seu tempo de saturação que neste caso é de 40 dias. Para o modelo do Figura 4.34 é observado um desempenho na capacitância média total inferior aos tipos “d”, “b” e “c”, em contrapartida pode ser observado uma maior estabilidade, ou seja, uma das menores variâncias ao longo da janela de tempo para apuração das capacitâncias.

Figura 4.34 – Teste em composto com 0,61g e janela superior a 40 dias, amostra tipo (a).



Fonte: Autoria própria.

Pela Tabela 4.15 pode ser feito um comparativo com o desempenho observado no gráfico da Figura 4.31, constatando tanto pelo desvio padrão como pela variância a estabilidade da amostra tipo “a”, e que mesmo tendo apresentado um desempenho inferior aos modelos anteriores para mesma massa testada manteve a resposta em aumento da capacitância sobre influência de uma fonte de luz, por mais que seja de forma artificial e indireta.

Tabela 4.15 – Análise quantitativa dos testes no composto com 0,61g e janela superior a 40 dias, amostra tipo (a).

Dados obtidos das leituras feitas na amostra tipo (a)			
DADOS	10 minutos de coleta	5 minutos com incidência de luz	5 minutos com ausência de luz
Média Aritmética	87,841 uF	90,188 uF	85,12 uF
Desvio Padrão	3,636	3,370	1,264
Variância	0,0414	0,0373	0,0148

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, o modelo eletroquímico representado na Figura 4.31 performou de forma satisfatória nos quesitos de estabilidade sem interferência da luz, entretanto é observado que

seu desempenho em ganho de capacitância sobre interferência de fótons é intermediário se comparado aos modelos das Figuras 4.33 e 4.34.

Já o modelo representado pela Figura 4.32, reflete um ponto importante na pesquisa, que se refere a janela de tempo que o composto tem, o que acaba refletindo, como observado na Tabela 4.13, uma instabilidade na sua aferição. Por mais que apresente uma capacitância superior aos modelos das Figuras 4.31, 4.33 e 4.34 sua sensibilidade fotoelétrica é desconsiderada, tendo em vista os valores adquiridos em testagem e sua instabilidade para um valor conciso.

O composto eletroquímico desenvolvido na Figura 4.33 é uma proposta para observar o desempenho com relação ao acréscimo de material sendo testado, isto referente ao modelo com uma janela de tempo superior a 20 dias e inferior a 40 dias, assim como da Figura 4.32, porém tendo um aditivo de 0,2g. Tanto pelo gráfico da Figura 4.33 e da Tabela 4.14 nota-se um aumento significativo no desempenho do composto no que tange a sua responsividade a incidência de luz performando acima do modelo na Figura 4.32.

Na Figura 4.34 tem representado a solução, já com uma janela de tempo superior a 40 dias, onde pode ser observado uma estabilidade comparável ao modelo da Figura 4.31. Na Tabela 4.15, que se refere ao modelo da Figura 4.34, é notável sua resposta a incidência de fótons acima do modelo visto na Figura 4.32, sendo de mesma massa. Entretanto apresentou uma capacitância relativamente inferior aos outros modelos, o que pode estar correlacionado a saturação do desenvolvimento das nanopartículas em influência aos fótons incidentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho buscou-se apresentar a possibilidade de melhoria dos modelos atuais de construção dos supercapacitores, sendo possível através da utilização de ferramentas e componentes eletrônicos facilmente encontrados no mercado brasileiro, para instrumentação como também para desenvolver um supercapacitor.

Foi mostrado que é possível ter o desenvolvimento de uma pesquisa a respeito de supercapacitores através da eletrônica e IoT, no qual pode ser desenvolvido um aparelho de instrumentação capaz de quantificar a capacitância de forma concisa e fornecer esses dados em modo remoto. Através da internet das coisas, o desenvolvimento de um medidor de capacitância, temperatura, incidência de luz e umidade tornou-se possível, viabilizando a confecção de um composto eletroquímico tendo nanopartículas de óxido de ferro em suspensão.

O aparato de medição teve em seu desenvolvimento a criação de um aplicativo móvel, também disponível em página web, para monitoramento através de uma comunicação via servidor em nuvem, da plataforma Blynk, com microcontroladores ESP32 DOIT V1. Os microcontroladores são responsáveis pela dinâmica entre o sistema de controle gerado pelos algoritmos de execução sob influência dos sensores implementados neste trabalho. Este aparato posiciona-se frente a modelos comercializados de forma interessante, visto que seu desempenho e acurácia equilibrou-se com o modelo de bancada Minipa MDM-8145A. Tal fato o torna vantajoso, visto pela ótica de possibilidades de incrementos/ferramentas a serem inseridos com um baixo custo e facilidade. Uma grande vantagem é oferecida pela plataforma escolhida no desenvolvimento do aplicativo, uma vez que é gratuita para uma grande gama de funcionalidades, além do sistema de servidor em nuvem.

Com o desenvolvimento deste modelo de aparato para instrumentação utilizando microcontroladores torna-se possível automatizar e flexibilizar o uso de laboratórios e tempo gasto em aquisição de dados de experimentos. O multímetro proposto neste trabalho é flexível e prático, pois além de ser utilizado em modo remoto fornece a possibilidade de incrementar novas ferramentas, não tendo como fator limitante uma única funcionalidade.

O multímetro proposto provou-se essencial para o desenvolvimento da proposta obtida neste trabalho, sendo ela a confecção de um supercapacitor nanoestruturado líquido fotossensível. Este componente desenvolvido no laboratório de síntese e caracterização de nanomateriais, da Universidade Federal de Santa Maria, se manifestou promissor, visto suas capacitâncias e suas respostas a incidência de fótons, trazendo questionamentos quanto a sua contribuição no armazenamento de Energia. Pois as soluções eletroquímicas feitas com óxidos metálicos, desenvolvidas para construção de supercapacitores geralmente vem em união aos eletrodos que para alcançar o desempenho no armazenamento de energia como um supercapacitor, é necessário ser de nanotubos de carbono ou ligas metálicas com processos construtivos que acabam gerando resíduos nocivos a natureza e até mesmo aos seres humanos.

Já para o modelo eletroquímico proposto neste trabalho sua confecção não promove a geração de resíduos nocivos tanto para a natureza como para as pessoas, tem um baixo custo, matéria prima acessível no mercado brasileiro, apresenta valores de capacitância em uma grandeza de microfarads, apresenta um aumento no desempenho em crescer a capacitância média tanto pelo aumento da sua concentração como através da influência de fótons. A solução eletroquímica proposta apresenta uma possibilidade na forma como se utiliza os óxidos metálicos na fabricação de supercapacitores, trazendo uma chance de desenvolver

estes componentes por meio de processos mais baratos e fáceis. No que diz respeito as suas possibilidades de implementação, se caso obtiver na confecção dos supercapacitores um aumento da resistência serie equivalente, esse componente pode competir com as baterias, já para modelos que apresentarem um valor mais elevado para sua tensão de trabalho, esse componente pode ser utilizado para bancos destinados a filtragem de ruídos, reguladores para controle de reativo em sistemas elétricos.

É perceptível no desenvolvimento do presente estudo o grande acervo de novos conhecimentos, no que diz respeito a física moderna e de materiais, assim como de engenharia elétrica. Podem ser exercitados conceitos de algoritmos e programação, eletrônica, instrumentação, circuitos elétricos, obtendo-se o aprofundamento em conceitos da física moderna e suas áreas de influência nas engenharias.

Pelos resultados obtidos no decorrer desta proposta, é plausível declarar que os objetivos gerais e específicos foram alcançados com êxito e, trazendo um olhar promissor ao que diz respeito a nanotecnologia discutida neste trabalho.

5.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Entendendo a complexidade da física é prudente ressaltar a existência de inúmeras formas em corroborar com a proposta neste trabalho tanto no que tange a instrumentação quanto no desenvolvimento de supercapacitância em nanomateriais.

Pode-se pleitear para o capacitômetro o uso de sistemas com microprocessadores embarcados para uso de linguagens de programação e controle menos complexas como python, mas que exigem um poder de processamento maior. Um modelo interessante seria o uso de RaspeBerry Pi 4B, modelo esse que apresenta bom desempenho em processamento de códigos, versatilidade em operar IoT, maior gama de operadores de entrada e saída físicas.

Outro ponto de empenho seria no desenvolvimento de um aplicativo em servidor local, como também através de armazenar em cartões de memória, pelo fato de diminuir os conflitos de comunicação em servidores na nuvem, declarado pela Blynk como “inundações”. Essa problemática faz com que o hardware que está operando em modo rede seja desconectado do servidor, sendo um transtorno na aquisição de dados.

No desenvolvimento de um supercapacitor nanoestruturado líquido fotosensível, deve-se priorizar uma análise inicialmente qualitativa do material, compreendendo sua estrutura cristalina, sua morfologia e reatividade. Uso de análises como microscopia de força atômica, tunelamento e espectroscopia de raios-X, assim como um estudo na junção de

componentes faradaicos ou pseudo-capacitivos, provendo a troca de cargas elétricas entre eletrodo e eletrólito, aumentando a capacitância do dispositivo. Com isso é possível aplicar técnicas de instrumentação mais fácil e com uma acurácia maior a respeito dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Oswaldo Luiz. **Nanotecnologia, nanociência e nanomateriais**: quando a distância entre presente e futuro não é apenas questão de tempo. Campinas: Parecerias Estratégicas, 2004. 9 v.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2019. 2 v.
- BOITA, Jocenir; et al. Controlled growth of metallic copper nanoparticles. **New Journal Of Chemistry**, [S.L.], v. 41, n. 23, p. 14478-14485, 2017. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c7nj03056h>.
- BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda., 2013.
- BRASIL (org.). **Brasil retoma produção de urânio**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/12/brasil-retoma-producao-de-uranio>. Acesso em: 02 dez. 2020.
- CONWAY, Be. **Supercapacitores eletroquímicos**: fundamentos científicos e aplicações tecnológicas. New York: Springer Us, 1999. 698 p.
- DIDÁTICA, Hidro. **HD74 GALVANÔMETRO - MILIAMPERÍMETRO**. 2021. Disponível em: <http://www.hidrodidatica.com.br/hd-74-galvanometro.php>. Acesso em: 08 jan. 2021.
- DONATO, Vitório. **Logística para a Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis**: estudo das redes logísticas estruturadas para atuarem em sistemas complexos de produção. São Paulo: Érica Ltda., 2012.
- AOSONG. Datasheet: **(DHT11 Humidity & Temperature Sensor)**. D-Robotics UK, 2010. Disponível em: https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_DHT11.pdf#_ga=2.73347984.2078546443.1497268937-758355933.1447343143. Acesso em: 17 dez 2020.
- SILICONLABS. Datasheet: **SI1145/46/47 PROXIMITY/UV/AMBIENT LIGHT SENSOR IC WITH I2C INTERFACE**, 2013. Disponível em: https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-Sunlight_Sensor/res/Si1145-46-47.pdf. Acesso em: 17 dez 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Cenários de Demanda para o PNE 2050**. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/Cen%C3%A1rios%20de%20Demanda.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2020.
- _____. **Balanco Energético Nacional 2020**. 2020. Ano base 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 02 dez. 2020.

_____. **Balço Energético Nacional 2020:** brazilian energy balance. BRAZILIAN ENERGY BALANCE. 2020. Ano base 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 02 dez. 2020.

_____. **Balço Energético Nacional 2020.** 2020. Ano base 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf. Acesso em: 02 dez. 2020.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos. 11. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. P. 550-552.

_____. **Plano Nacional de Energia 2050.** 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2020.

FERREIRA, André Augusto; POMILIO, José Antenor. ESTADO DA ARTE SOBRE A APLICAÇÃO DE SUPERCAPACITORES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Departamento de Sistemas e Controle de Energia - Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica**, Campinas, v. 10, n. 2, p. 1-8, 23 maio 2005.

GOMES, Aláine. **Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz (1821 – 1894).** 2020. Disponível em: <https://www3.unicentro.br/petfisica/2016/11/13/hermann-ludwig-ferdinand-helmholtz-1821-1894/>. Acesso em: 28 dez. 2020.

HALLIDAY, David et al. **Fundamentos de Física:** eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2020. 3 v.

HELFRICK, Albert D.; COOPER, William D. **Instrumentação Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição.** Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil Ltda., 1994.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL (org.). **Onde ficam as unidades produtoras de urânio no Brasil?** 2020. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/onde-ficam-as-unidades-produtoras-de-uranio-no-brasil?Origem=426>. Acesso em: 02 dez. 2020.

LOPES, Guilherme de Lima et al. **ELETROMAGNETISMO.** Porto Alegre: © Sagah Educação S.A., 2018.

MANGILI, Arthur Issa. **Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico:** Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula. v. 6, n. 8, p. 32-48, 13 dez. 2012.

MARQUES, Eduardo Figueira. Da nanociência à nanotecnologia. **Revista de Ciência Elementar**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 1-7, 30 out. 2014. ICETA. <http://dx.doi.org/10.24927/rce2014.058>.

MILLER, John R. Perspective on electrochemical capacitor energy storage. **Applied Surface Science**, [S.L.], v. 460, p. 3-7, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.018>.

NASKAR, Pappu et al. Chemical supercapacitors: a review focusing on metallic compounds and conducting polymers. **Journal Of Materials Chemistry A**, [S.L.], 2021. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d0ta09655e>

NETTO, João Mongelli; TELLES, Dirceu D'Alkmin. **Física com aplicação tecnológica: eletrostática, eletricidade, eletromagnetismo e fenômenos de superfície**. São Paulo: Blucher, 2016. 3 v.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos Elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

NITHYA, V. D.; ARUL, N. Sabari. Progress and development of Fe₃O₄ electrodes for supercapacitors. **Journal Of Materials Chemistry A**, [S.L.], v. 4, n. 28, p. 10767-10778, 2016. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c6ta02582j>.

NUNES, Willian Gonçalves. **Desenvolvimento de capacitores eletroquímicos para armazenamento de Energia**. 2019. 110 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. Cap. 2.

OPTICAL METAMATERIALS. St Andrews: Nature Publishing Group, v. 1, n. 207, abr. 2007. Disponível em: <http://www.nature.com/naturephotonics>. Acesso em: 17 dez. 2020.

PANDOLFO, Tony et al. General Properties of Electrochemical Capacitors. **Supercapacitors**, [S.L.], p. 69-109, 5 mar. 2013. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527646661.ch2>.

RIBEIRO, Emerson Schwingel et al. Princípios básicos de XAS e XPS. **Revista Chemkeys**, [S.L.], n. 2, p. 1-23, 17 set. 2018. Universidade Estadual de Campinas. <http://dx.doi.org/10.20396/chemkeys.v0i2.9610>.

RÓZ, Alessandra Luzia da et al. **NANOESTRUTURAS: princípios e aplicação**. Rio de Janeiro: Gen Ltc, 2014. 1 v.

SCHESTATSKY, Pedro. INTRODUÇÃO E HISTÓRICO DA NEUROMODULAÇÃO NÃO INVASIVA. [s. l.], p. 20-21, 13 dez. 2013.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John. **Física para cientistas e engenheiros: eletricidade e magnetismo**. 9. ed. São Paulo: Guacira Simonelli, 2018. 3 v.

SILVA, Fabricio Ströher da et al. **ELETRÔNICA I**. São Paulo: Sagah Educação S.A., 2018.

SOLÍS-CORTÉS, D. et al.. A solid-state integrated photo-supercapacitor based on ZnO nanorod arrays decorated with Ag₂S quantum dots as the photoanode and a PEDOT charge storage counter-electrode. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 5712-5721, 2020. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c9ra10635a>.

TACATE GROUP. Datasheet: **TYPE TPL: General purpose radial lead ultracapacitor cells**. 2021. Disponível em:

https://www.tecategroup.com/products/data_sheet.php?t=SERIES&i=TPL. Acesso em: 25 Jan 2021.

TOMA, Henrique Eisi. **Nanotecnologia Molecular**: materiais e dispositivos. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2016. 6 v.

TOMA, Henrique E. et al. **NANOTECNOLOGIA EXPERIMENTAL**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2018.

UNIVASF. **Protocolo I2C**: Datasheet. 2021. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~romulo.camara/novo/wp-content/uploads/2013/11/Barramento-e-Protocolo-I2C.pdf>. Acesso em: 17 dez 2020.

ESPRESSIF SYSTEMS. Datasheet: ESP32 DOIT V1. 2018. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1148023/ESPRESSIF/ESP32.html>. Acessado em: 25 jun. 2021.

BLYNK. ©2021 Blynck In. Last Update on November 6, 2017. Disponível em: <http://blynk.io/>. Acessado em 25 jun. 2021.

MINIPA ELETRONICS USA INC. Datasheet: Minipa MDM - 8145A. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/images/Manual/MDM-8145A-1102-BR.pdf>. Kinghurst #220 Houston – Texas 77099 – USA. Acessado em 29 jun. 2021.

WADE, Nicholas J. Charles Wheatstone (1802 – 1875). **Perception**, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 265-272, mar. 2002. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1068/p3103ed>.

XIE, Yibing; DU, Hongxiu. Electrochemical capacitance of a carbon quantum dots–polypyrrole/titania nanotube hybrid. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 5, n. 109, p. 89689-89697, 2015. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c5ra16538e>.

ZARBIN, Aldo J. G.. Química de (nano)materiais. **Química Nova**, [S.L.], v. 30, n. 6, p. 1469-1479, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422007000600016>.

APÊNDICE A – CÓDIGO SIMULADO NO PROTEUS (CAPACÍMETRO)

```

/* Main.ino file generated by New Project wizard
 *
 * Created:   ter oct 10 2020
 * Processor: Arduino Uno
 * Compiler:  Arduino AVR (Proteus)
 */

```

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```

#define analogPin    A5
#define chargePin1   2
#define chargePin10  3
#define chargePin100 4
#define chargePin1000 5
#define dischargePin 6
#define resistorValue1 1000.0F
#define resistorValue10 10000.0F
#define resistorValue100 100000.0F
#define resistorValue1000 1000000.0F
#define selfCapacitance 0.000248F
unsigned long startTime;
unsigned long elapsedTime;
float microFarads;
float nanoFarads;
float picoFarads;
unsigned char chargePin = 0;
float resistorValue;

```

```
void descarregaCap();
```

```
LiquidCrystal lcd(8, 9, 10, 11, 12, 13);
```

```
void setup() {
```

```

pinMode(chargePin1, INPUT);
pinMode(chargePin10, INPUT);
pinMode(chargePin100, INPUT);
pinMode(chargePin1000, INPUT);

```

```

Serial.begin(115200);
lcd.begin(16, 2);
lcd.print(F("C = "));

```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
chargePin = 0;
do {

  descarregaCap();

  switch (chargePin) {

    case 0:
      pinMode(chargePin1, OUTPUT);
      pinMode(chargePin10, INPUT);
      pinMode(chargePin100, INPUT);
      pinMode(chargePin1000, INPUT);
      digitalWrite(chargePin1, HIGH);
      resistorValue = resistorValue1;
      break;

    case 1:
      pinMode(chargePin1, INPUT);
      pinMode(chargePin10, OUTPUT);
      pinMode(chargePin100, INPUT);
      pinMode(chargePin1000, INPUT);

      digitalWrite(chargePin10, HIGH);
      resistorValue = resistorValue10;
      break;

    case 2:
      pinMode(chargePin1, INPUT);
      pinMode(chargePin10, INPUT);
      pinMode(chargePin100, OUTPUT);
      pinMode(chargePin1000, INPUT);
      digitalWrite(chargePin100, HIGH);
      resistorValue = resistorValue100;
      break;

    case 3:
      pinMode(chargePin1, INPUT);
      pinMode(chargePin10, INPUT);
      pinMode(chargePin100, INPUT);
      pinMode(chargePin1000, OUTPUT);
      digitalWrite(chargePin1000, HIGH);
      resistorValue = resistorValue1000;
      break;
  }
  startTime = micros();

  while (analogRead(analogPin) < 648);
```

```

    elapsedTime = micros() - startTime;
    chargePin++;
} while (elapsedTime < 2000 && chargePin !=4);

microFarads = ((float)elapsedTime / resistorValue) - selfCapacitance;

lcd.setCursor(4, 0);
lcd.print(F("      "));
lcd.setCursor(4, 0);

if (microFarads > 1) {
  lcd.print((long)microFarads);
  lcd.print(F("uF"));
  Serial.print((long)microFarads);
  Serial.print(F("uF"));
  Serial.println();
} else {
  nanoFarads = microFarads * 1000.0;
  if (nanoFarads > 1) {
    lcd.print((long)nanoFarads);
    lcd.print(F("nF"));
    Serial.print((long)nanoFarads);
    Serial.print(F("nF"));
    Serial.println();
  } else {
    picoFarads = nanoFarads * 1000.0;
    lcd.print((long)picoFarads);
    lcd.print(F("pF"));
    Serial.print((long)picoFarads);
    Serial.print(F("pF"));
    Serial.println();
  }
}

  descarregaCap();
  delay(500);
}

void descarregaCap() {
  pinMode(chargePin10, INPUT);
  pinMode(chargePin100, INPUT);
  pinMode(chargePin100, INPUT);
  pinMode(chargePin1, INPUT);
  pinMode(dischargePin, OUTPUT);
  digitalWrite(dischargePin, LOW);
  while (analogRead(analogPin) > 0);
}

```

```
pinMode(dischargePin, INPUT);  
  
}
```

APÊNDICE B – (1) CAPACÍMETRO

```

#define analogPin      14
#define chargePin1     32
#define chargePin10    33
#define chargePin100   25
#define chargePin1000  26
#define dischargePin   27
#define resistorValue1 1000.0F
#define resistorValue10 10000.0F
#define resistorValue100 100000.0F
#define resistorValue1000 1000000.0F
#define selfCapacitance 0.000288F
#include <BlynkSimpleEsp32_BLE.h>
#include <BLEDevice.h>
#include <BLEServer.h>
char auth[] = "Ika02tgC3gkkuht5Fw3ACoTWzG-Z6gl4";
unsigned long startTime;
unsigned long elapsedTime;
float microFarads;
float nanoFarads;
float picoFarads;
unsigned char chargePin = 0;
float resistorValue;
BlynkTimer timer;
void descarregaCap();
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(chargePin10, INPUT);
  pinMode(chargePin100, INPUT);
  pinMode(chargePin1000, INPUT);
  pinMode(chargePin1, INPUT);
  Blynk.begin(auth);
  Blynk.setDeviceName("Blynk");
  timer.setInterval(1500L, myTimerEvent);
}
void myTimerEvent()
{
  chargePin = 0;
  do {

    descarregaCap();

    switch (chargePin) {
      case 0:
        pinMode(chargePin10, INPUT);
        pinMode(chargePin100, INPUT);

```

```

pinMode(chargePin1000, INPUT);
pinMode(chargePin1, OUTPUT);
digitalWrite(chargePin1, HIGH);
resistorValue = resistorValue1;
break;
case 1:
pinMode(chargePin1, INPUT);
pinMode(chargePin100, INPUT);
pinMode(chargePin1000, INPUT);
pinMode(chargePin10, OUTPUT);
digitalWrite(chargePin10, HIGH);
resistorValue = resistorValue10;
break;
case 2:
pinMode(chargePin1, INPUT);
pinMode(chargePin10, INPUT);
pinMode(chargePin1000, INPUT);
pinMode(chargePin100, OUTPUT);
digitalWrite(chargePin100, HIGH);
resistorValue = resistorValue100;
break;
case 3:
pinMode(chargePin1, INPUT);
pinMode(chargePin10, INPUT);
pinMode(chargePin100, INPUT);
pinMode(chargePin1000, OUTPUT);
digitalWrite(chargePin1000, HIGH);
resistorValue = resistorValue1000;
break;
}
startTime = micros();
while (analogRead(analogPin) < 2587);
elapsedTime = micros() - startTime;
chargePin++;
} while (elapsedTime < 2000 && chargePin != 4);
microFarads = ((float)elapsedTime / resistorValue) - selfCapacitance;
Serial.print(elapsedTime);
Serial.print(" uS ");
Blynk.virtualWrite(V9, (float)elapsedTime);

if (microFarads > 1) {
  Serial.print((float)microFarads);
  Serial.println(" microFarads");
  Blynk.virtualWrite(V10, (float)microFarads);
}
else
{
  nanoFarads = microFarads * 1000.0;
  if (nanoFarads > 1) {

```

```
Serial.print((float)nanoFarads);
Serial.println(" nanoFarads");
Blynk.virtualWrite(V11, (float)nanoFarads);
} else {
  picoFarads = nanoFarads * 1000.0;
  Serial.print((float)picoFarads);
  Serial.println(" picoFarads");
  Blynk.virtualWrite(V12, (float)picoFarads);
}

}
descarregaCap();
}
void descarregaCap() {
  pinMode(chargePin10, INPUT);
  pinMode(chargePin100, INPUT);
  pinMode(chargePin1000, INPUT);
  pinMode(chargePin1, INPUT);
  pinMode(dischargePin, OUTPUT);
  digitalWrite(dischargePin, LOW);
  while (analogRead(analogPin) > 0);
  pinMode(dischargePin, INPUT);
}
void loop()
{
  Blynk.run();
  timer.run();
}
```

APÊNDICE C – (2) SISTEMA DE MONITORAMENTO

```

#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include "Arduino.h"
#include "SI114X.h"
SI114X SI1145 = SI114X();
char auth[] = "MMXoDxS2KV2V6YwO5USbZzCtX5HWfknk";
char ssid[] = "AndroidAP";
char pass[] = "fgbg9446";
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
BlynkTimer timer;
void sendSensor()
{
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();
  if (isnan(h) || isnan(t)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }
  Blynk.virtualWrite(V0, h);
  Blynk.virtualWrite(V1, t);
}
void sendSensor2() {
  float vis = SI1145.ReadVisible();
  float ir = SI1145.ReadIR();
  float uv = ((float)SI1145.ReadUV() / 100);
  while (!SI1145.Begin()) {
    Serial.println("Si1145 is not ready!");
  }
  Serial.println("Si1145 is ready!");
  Blynk.virtualWrite(V2, vis);
  Blynk.virtualWrite(V3, ir);
  Blynk.virtualWrite(V4, uv);
}
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);
  dht.begin();
  timer.setInterval(1000L, sendSensor);
  timer.setInterval(1000L, sendSensor2);
}

```

```
void loop()
{
  Blynk.run();
  timer.run();
}
```

APÊNDICE D – DIAGRAMA ELÉTRICO MULTÍMETRO

