

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



Wallastan Melo da Silva Junior

**Levantamento da curva de carga e determinação da  
capacitância e resistência série de supercapacitores  
utilizando Arduino e Python**

Vitória-ES

Novembro/2018

Wallastan Melo da Silva Junior

## **Levantamento da curva de carga e determinação da capacitância e resistência série de supercapacitores utilizando Arduino e Python**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Wallastan Melo da Silva Junior, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Novembro/2018

Wallastan Melo da Silva Junior

## **Levantamento da curva de carga e determinação da capacitância e resistência série de supercapacitores utilizando Arduino e Python**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Wallastan Melo da Silva Junior, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 04, de Dezembro de 2018.

### **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Professor Msc. Vinicius Secchin de Melo**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

**Professora Dra. Jussara Fardin**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Coorientadora

---

**Professor Dr. André Ferreira**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

---

**Professor Msc. Alexandre Secchin de Melo**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Examinador

Vitória-ES

Novembro/2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, o Senhor da ciência e da vida, pelo seu imenso amor e pela sua misericórdia. Sem ELE, não seria possível realizar essa etapa que levarei por toda minha vida. Agradeço também aos meus pais, Wallastan Melo e Claudiana Bautz, pela dedicação, apoio e esforço. Pois, graças a eles tive todo suporte necessário para concluir essa graduação. A vitória dessa etapa também é deles. Não posso esquecer da minha caçulinha, Joyce, que em toda essa etapa aguentou meus dias estressantes e que me manteve acordado todas manhãs no caminho para universidade.

Em especial quero agradecer a minha esposa, Rafaela Lacerda Dutra Melo. Sim, minha Esposa, pois a partir do dia 08 de Dezembro seremos uma só carne. Certamente seria muito mais difícil sem o companheirismo e apoio dela, quando ainda eramos apenas amigos. Obrigado pelas palavras que sempre me incentivaram a continuar e não desistir desse único momento nas nossas vidas.

Agradeço por toda ajuda que recebi da minha Madrinha, Rosa Melo, pois com isso pude comprar livros, xerox e almoços que por sinal foram muitos em todos esse período. Conte também com ajuda de toda minha família, amigos e irmãos da IEBI(Igreja Evangélica Batista em Itaparica), que sempre torceram pelo sucesso deste curso. Além deles, há dois grandes amigos desblindados, Ricardo Salvador e Pedro Catelán, pois em todo momento dividimos desafios e conhecimentos que levaremos por toda vida. Por fim quero agradecer meu Orientador Vinicius Secchin de Melo e minha Coorientadora Jussara Fardin, que com muita paciência e apoio me ajudaram a concluir este trabalho. Longos meses de muita dedicação e crescimento no conhecimento, e por isso agradeço a eles por seus esforços. Foram anos difíceis, mas que chegaram ao fim.

## RESUMO

Com o crescimento das novas tecnologias, novas formas de geração de energia e desenvolvimento de automóveis elétricos, sistemas de controle e armazenamento de energia precisaram acompanhar esse crescimento. Logo, muito tem se investido no aperfeiçoamento das baterias e em maneiras mais eficientes e duradouras para serem utilizadas. Pensando nisso, a integração entre baterias e supercapacitores num sistema de armazenamento de energia tem sido muito explorado, pois estes apresentam alta densidade de potência e capacidade de se carregar e descarregar. Assim, os supercapacitores podem auxiliar as baterias em momentos transitórios e em momentos de carga e descarga repetitivos e de curta duração (SEIM, 2011). Portanto, é importante e necessário conhecer todas as características dos supercapacitores além de se conseguir quantificar seus parâmetros construtivos. Então, esse trabalho pretende construir uma bancada, que consiste em fonte de corrente e módulo de captura de sinais, para encontrar os valores de Capacitância(C) e Resistência Série(ESR) de alguns supercapacitores. Além disso, serão abordadas maneiras de se carregar supercapacitores, tipos de supercapacitores e fontes de corrente que contribuíram para a realização desse projeto.

**Palavras-chave:** Baterias; Supercapacitores; Parâmetros; Capacitância; Resistência Série.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento Da Potência Instalada de Placas Solares . . . . .	9
Figura 2 – Sistema Híbrido de Baterias . . . . .	10
Figura 3 – Supercapacitor . . . . .	10
Figura 4 – Modelo de Capacitor para Baixa Frequência . . . . .	11
Figura 5 – Representação do Capacitor . . . . .	13
Figura 6 – Estrutura do Supercapacitor . . . . .	13
Figura 7 – Circuito Simplificado do capacitor como fonte de tensão . . . . .	14
Figura 8 – Estrutura do capacitor de dupla camada . . . . .	16
Figura 9 – Estrutura do Pseudocapacitor . . . . .	17
Figura 10 – Estrutura do capacitor híbrido . . . . .	18
Figura 11 – Circuito RC com fonte de tensão constante . . . . .	18
Figura 12 – Curva de carga com tensão constante . . . . .	19
Figura 13 – Circuito RC com fonte de corrente constante . . . . .	20
Figura 14 – Curva de carga com corrente constante . . . . .	21
Figura 15 – Fonte de alimentação de corrente constante . . . . .	21
Figura 16 – Estrutura do Transistor <i>npn</i> . . . . .	24
Figura 17 – Simbologia do Transistor <i>npn</i> . . . . .	24
Figura 18 – Fonte de Corrente com transistor . . . . .	25
Figura 19 – Malha da tensão . . . . .	25
Figura 20 – Fonte de Corrente com Amp op . . . . .	27
Figura 21 – Malha de tensão no Amplificador . . . . .	28
Figura 22 – Diagrama em Blocos do Protótipo . . . . .	29
Figura 23 – Fase da Fonte de Corrente . . . . .	30
Figura 24 – Malha de tensão no coletor-emissor . . . . .	30
Figura 25 – Circuito da fonte controlada . . . . .	32
Figura 26 – Sinal Analógico . . . . .	33
Figura 27 – Esquema de ligação do DAC-Arduino . . . . .	34
Figura 28 – Fase de Leitura da Corrente . . . . .	35
Figura 29 – Módulo Sensor de Corrente . . . . .	35
Figura 30 – Função da Tensão de Saída . . . . .	36
Figura 31 – Ligação do Sensor ACS712 . . . . .	36
Figura 32 – Relação inteiro por tensão . . . . .	37
Figura 33 – Erro de <i>Offset</i> Positivo . . . . .	38
Figura 34 – Erro de <i>Offset</i> Negativo . . . . .	38
Figura 35 – Tensão de Offset Ajustado . . . . .	39
Figura 36 – Esquema em Blocos da Bancada de Corrente e seus Auxiliares . . . . .	42

Figura 37 – Ligação do Sensor e o DAC no Arduino . . . . .	42
Figura 38 – Banco de Resistores . . . . .	43
Figura 39 – Banco de Transistores TIP142 . . . . .	43
Figura 40 – Amplificador do circuito da Figura 25 . . . . .	43
Figura 41 – Fase da Malha de Controle . . . . .	44
Figura 42 – Malha de controle . . . . .	44
Figura 43 – Fase de Aquisição da Tensão . . . . .	45
Figura 44 – Tensão Capturada . . . . .	46
Figura 45 – Circuito de Amplificador Diferencial . . . . .	46
Figura 46 – Banco de Captura da Tensão . . . . .	48
Figura 47 – Circuito de Instrumentação . . . . .	48
Figura 48 – Diagrama em Blocos Completo . . . . .	49
Figura 49 – Fase de Plotagem dos dados de Carga . . . . .	51
Figura 50 – Capacitor Maxwell de 5F BCAP005 . . . . .	52
Figura 51 – Resposta de Carga do capacitor . . . . .	53
Figura 52 – Intervalo de carga do capacitor . . . . .	54
Figura 53 – Queda da Tensão devido à ESR . . . . .	55
Figura 54 – Circuito para simulação . . . . .	55
Figura 55 – Resposta da Simulação . . . . .	56
Figura 56 – Capacitor EATON HV de 25F HV1625-2R7256-R . . . . .	56
Figura 57 – Resposta de Carga do capacitor . . . . .	57
Figura 58 – Intervalo de carga do capacitor . . . . .	58
Figura 59 – Queda da Tensão devido à ESR . . . . .	59
Figura 60 – Circuito para simulação com 22,53 F . . . . .	59
Figura 61 – Resposta da Simulação com 22,53 F . . . . .	60
Figura 62 – Capacitor EATON de 400 F XV3560-2R7407-R . . . . .	60
Figura 63 – Resposta de Carga do Capacitor . . . . .	62
Figura 64 – Intervalo de carga do Capacitor . . . . .	63
Figura 65 – Queda da Tensão devido à ESR . . . . .	64
Figura 66 – Circuito para simulação . . . . .	64
Figura 67 – Resposta da Simulação . . . . .	65
Figura 68 – Circuito de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 4,67 F . . . . .	66
Figura 69 – Curva sobreposta de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 4,67 F . . . . .	66
Figura 70 – Circuito de Carga com Tensão Constante para Capacitor de 22,53 F . . . . .	67
Figura 71 – Curva sobreposta de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 22,53 F . . . . .	67
Figura 72 – Circuito de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 346,98 F . . . . .	68

Figura 73 – Curva sobreposta de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 346,98 F . . . . .	68
--	----



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Dados do capacitor Maxwell HC5F/2,7V . . . . .	52
Tabela 2	–	Dados do capacitor EATON HV25F/2,7V . . . . .	57
Tabela 3	–	Capacitor EATON XV400F/2,7V . . . . .	61
Tabela 4	–	Performance do Capacitor EATON XV400F/2,7V ao longo do tempo sem Carga . . . . .	61
Tabela 5	–	Valores de Capacitância e Resitência Série Equivalente encontrados com as curvas de carga . . . . .	65

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>1.1</b>	<b>Capacitor</b>	<b>12</b>
1.1.1	Princípio de Funcionamento	13
<b>1.2</b>	<b>Supercapacitor</b>	<b>15</b>
1.2.1	Dupla camada	15
1.2.2	Pseudocapacitor	16
1.2.3	Capacitor Híbrido	17
<b>1.3</b>	<b>Carregamento de capacitor</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b>	<b>22</b>
1.4.1	Objetivos específicos	22
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Texto</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>24</b>
2.1	Fonte de corrente	24
<b>3</b>	<b>INFRAESTRUTURA DO PROTÓTIPO</b>	<b>29</b>
3.1	Fonte de Corrente	29
3.2	Leitura do sensor	34
3.2.1	Média Móvel	39
3.3	Malha de controle	43
3.4	Aquisição da tensão sob o capacitor	45
3.5	Algoritmos para plotagem das Curvas de Carga	50
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTOS E RESULTADOS</b>	<b>52</b>
4.1	Supercapacitor de 5 F	52
4.2	Supercapacitor de 25 F	56
4.3	Supercapacitor de 400 F	60
4.4	Avaliação e comparação dos resultados obtidos	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>69</b>
	Referências Bibliográficas	70
	<b>APÊNDICES</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO PARA ARQUIVAMENTO DOS DADOS</b>	<b>73</b>

APÊNDICE B – CÓDIGO PARA PLOTAGEM DOS DADOS E PARA OBTENÇÃO DE FUNÇÃO DO INTERVALO DE CARGA . . . . .	76
APÊNDICE C – CÓDIGO NO ARDUINO PARA CONTROLE DA FONTE E CAPTURA DOS DADOS . . . . .	80

# 1 INTRODUÇÃO

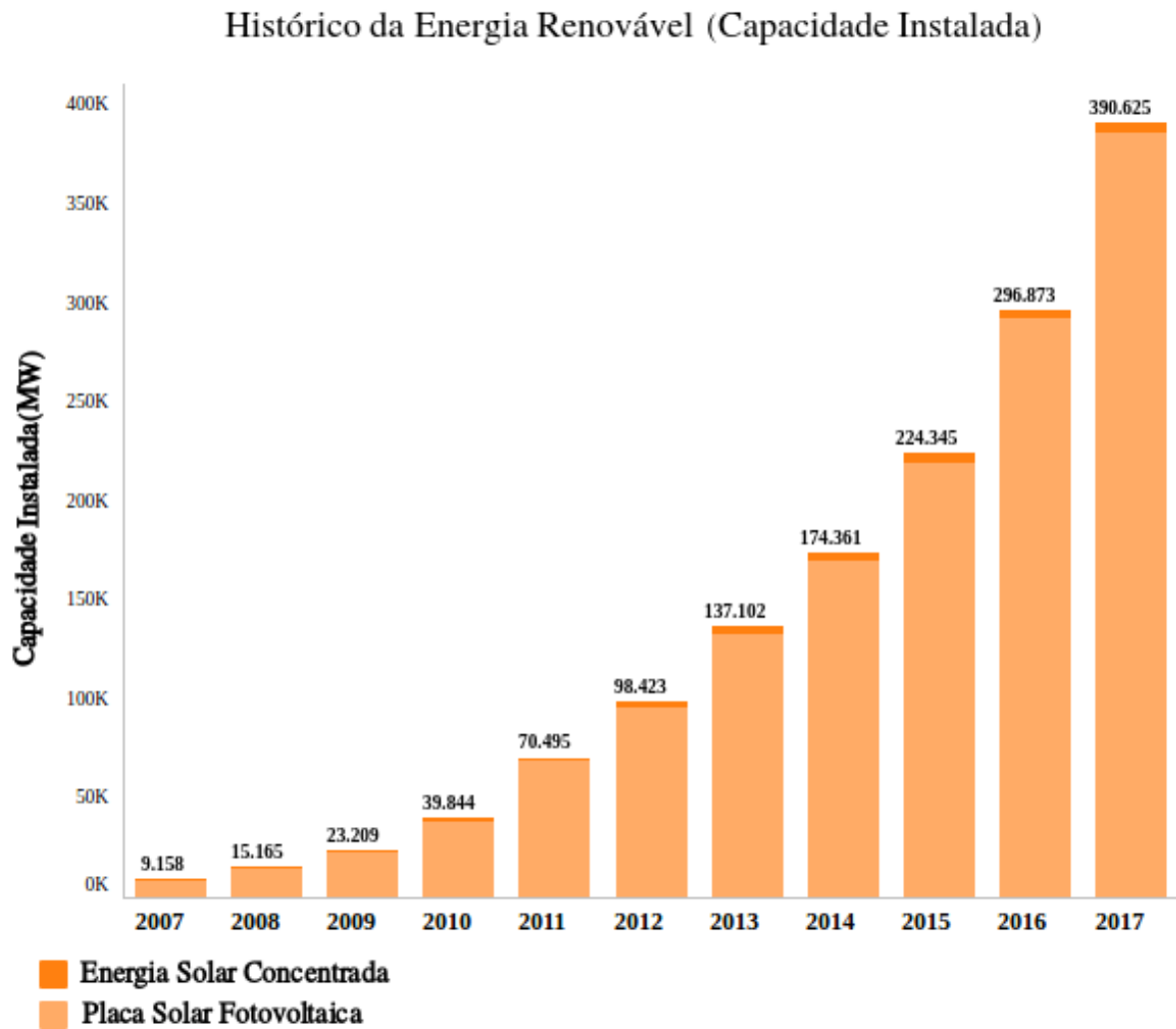
Não é novidade que há muitos anos a luta pela hegemonia econômica e energética no mundo tem movimentado estudos, investimentos e até mesmo guerras. Nessa corrida, a alta demanda e a reserva esgotável de petróleo e seus derivados tem revelado quão frágeis estão os pilares energéticos ao redor do mundo. Logo, não demorou muito para ser percebido que era necessário investir em fontes de energia que fossem mais eficientes, renováveis e limpas.

Nesse sentido, foi divulgado pela Associação de Energia Eólica da China em 2012 que o país tinha alcançado a marca de 100 bilhões de quilowatt-hora (Kwh) em energia eólica, ficando atrás do carvão e da hidrelétrica como principais fontes de energia do país (TRIGUEIRO, 2013). Já em 2013, os Estados Unidos divulgaram que a capacidade de geração eólica foi de 167,7 milhões de megawatts-hora (MWh) (AWEA, 2014). Não é coincidência que esses dados são dos maiores emissores de gases poluentes no mundo, pois isso revela também a preocupação com o bem estar e a qualidade de vida dos seus habitantes, além de demonstrar que tem ocorrido investimentos nesse setor.

Em se tratando de energia solar, a Agência Internacional de Energia Renovável, divulgou que nos últimos 10 anos a capacidade instalada cresceu mais de 42 vezes, como pode ser visto no gráfico da Figura 1. Isso revela a importância e o quanto a energia solar está presente no dia-a-dia da sociedade. Além disso, no início do ano de 2018, a frota de carros elétricos no mundo tinha ultrapassado a casa dos 3,2 milhões de automóveis, representando um crescimento de 55% em relação ao mesmo período do ano anterior (WELLE, 2018).

Nos últimos anos o mercado de carros elétricos tem crescido de forma vertiginosa. No mês de julho deste ano o site do programa Auto Esporte da Rede Globo divulgou a seguinte manchete: “ Tesla atinge meta de produzir 5 mil unidades do Model 3 em uma semana” (G1, 2018). Antes, apenas carros de luxo como o sedã Model S e o SUV Model X eram comercializados, mas hoje já é possível encontrar nas ruas o Model 3, que é considerado um veículo popular de médio porte. A quantidade de carros como o Model 3 comercializados se deve graças ao aumento da eficiência e do custo-benefício das baterias elétricas que compõe esses veículos, promovendo a inserção deles no mercado automobilístico.

Figura 1 – Crescimento Da Potência Instalada de Placas Solares



Fonte: <http://www.irena.org/solar>.

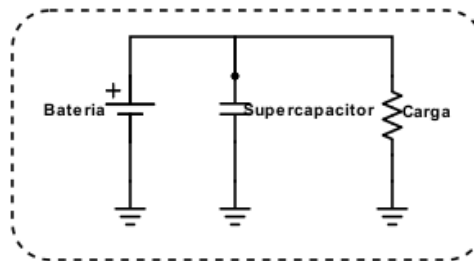
Adaptado pelo autor.

Em veículos elétricos, adicionam-se baterias de chumbo-ácido ou lítio as quais são responsáveis pela alimentação dos motores elétricos. Naturalmente, em um trajeto ocorrem inúmeras variações de velocidade nos motores por meio de frenagem, aceleração ou trânsito de automóveis que contribuem para diminuição da vida útil da bateria e aumento da temperatura operacional. Pois os repetitivos processos de carga e descarga na bateria diminuem sua eficiência.

Ao adicionar um supercapacitor em paralelo com a bateria, como mostrado na Figura 2, a alta densidade de potência e baixa resistência interna do supercapacitor contribui para diminuir as perdas por efeito joule e torna o processo de carga/descarga mais rápido e altamente reversível, o que prolonga o tempo de vida útil da bateria. A bateria poderá

fornecer corrente de carga quase que constante, enquanto que os supercapacitores além de diminuir as perdas por efeito joule interna, também impedirá queda significativa de tensão entre os terminais da carga e contribuirá para a diminuição do *ripple* da tensão (SEIM, 2011).

Figura 2 – Sistema Híbrido de Baterias



Fonte: Produção do próprio autor.

Por isso, é de grande importância conhecer os equipamentos que compõem esse sistema, como os Supercapacitores que serão explorados neste trabalho. Como todo e qualquer componente eletrônico os valores de capacitância são estimados e possuem margem de erro que dependendo do fabricante pode estar em torno de  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$  e até  $\pm 5\%$ .

Figura 3 – Supercapacitor



Fonte: <http://www.eaton.com/eletronics> .

Quando se utiliza capacitores com tão alta capacitância e densidade de potência, como por exemplo o Eaton 400F/2.7V, mostrado na Figura 3, a margem de variação da capacitância e resistência série podem ser determinantes para a definição de energia armazenada no capacitor e da tensão nos terminais do capacitor como pode ser explicado pela Equação 1.4 e pela Equação 1.6.

Em acordo com o livro Elementos do Eletromagnetismo (SADIKU, 2012), define-se que:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1.1)$$

Portanto, baseado na definição de energia segundo o Sadiku:

$$dE = V_c \cdot dQ \quad (1.2)$$

$$dE = V \cdot dQ = \frac{Q}{C} \cdot dQ$$

Temos que:

$$\int dE = \frac{1}{C} \int_0^Q Q \cdot dQ \quad (1.3)$$

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{C \cdot V_c^2}{2} \quad (1.4)$$

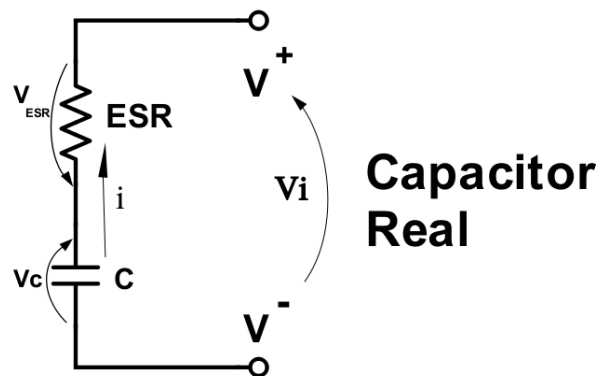
Onde,

- $C$  é o valor de capacitância; e
- $V_c$  a tensão no capacitor.

Logo, é fundamental encontrar os valores reais e aproximados dos parâmetros do capacitor, entre eles a capacitância e a resistência série, podendo-se assim, com estes parâmetros, quantificar a energia armazenada internamente.

O diagrama elétrico simplificado que representa um capacitor real é mostrado no circuito da Figura 4.

Figura 4 – Modelo de Capacitor para Baixa Frequência



Fonte: Produção do próprio autor.

Aplicando-se a Lei de Kirchoff para tensão, tem-se que:

$$V_c - V_{ESR} - V^+ + V^- = 0 \quad (1.5)$$

Logo,

$$V_i = V^+ - V^- = V_c - V_{ESR}$$

$$V_i + V_{ESR} = V_c \quad (1.6)$$

Onde,

$$V_{ESR} = ESR.I$$

De forma que:

- $I$  é a corrente no capacitor;
- $V$  a tensão nos terminais do capacitor observado na Figura 4; e
- ESR, resistência interna do capacitor real.

Ou seja, caso não encontre o valor correto da resistência, a tensão nos terminais do capacitor não poderá ser mensurada corretamente, pois esta depende diretamente do valor da Resistência Série(ESR).

Portanto, é de suma importância encontrar os parâmetros do capacitor. Para isto, é importante um equipamento que seja capaz de obter os valores de Capacitância(C) e Resistência Série(ESR). Dessa forma, será construída uma fonte de corrente constante e controlada por uma placa controlada que alimentará os Supercapacitores de forma a gerar curvas de carga para possibilitar a extração desses dados.

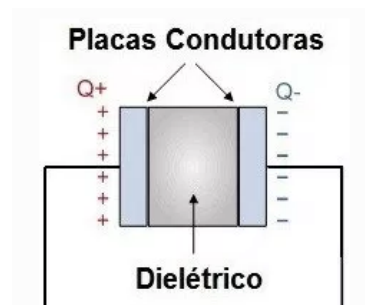
## 1.1 Capacitor

Os capacitores são elementos elétricos importantíssimos utilizados nas mais variadas aplicações, desde um simples ventilador de teto até sistemas mais complexos de energia. Eles possuem a capacidade de se carregar eletricamente e permanecer carregado por um certo tempo. O capacitor com características construtivas mais simples é o plano, que consiste em duas placas paralelas e condutoras separadas por um material dielétrico ou isolante, como ilustrado na Figura 5. Os mais comumente utilizados são os eletrostáticos (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Ainda há mais duas categorias de capacitores: Eletrolítico e Eletroquímico. Na primeira versão, os dielétricos são substituídos por eletrólito de sal que entra em contato direto com



Figura 5 – Representação do Capacitor

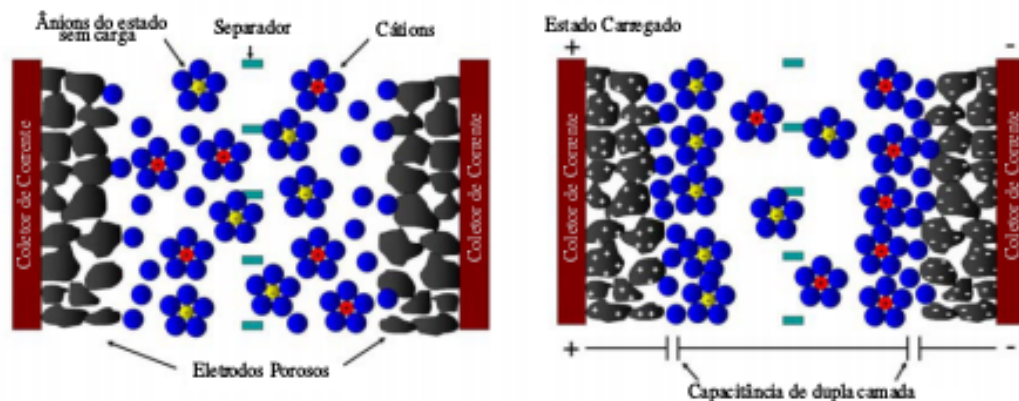


Fonte: <https://www.sabereletrica.com.br/entenda-o-funcionamento-dos-capacitores/>

os eletrodos. Em comparação com os dielétricos ou isolantes, o eletrólito ocupa menos espaço e portanto consegue-se utilizar a mesma distância entre as placas para a produção de capacitores com maior capacitância (SEIM, 2011).

Já a segunda categoria foi baseada no capacitor eletrolítico, porém foram adicionados eletrodos porosos e sofisticados que aumentam a área de contato com o eletrólito e invariavelmente irá promover um aumento considerável da capacitância. Hoje, esses capacitores são conhecidos como Supercapacitores, cuja estrutura é ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura do Supercapacitor



Fonte: Modeling, Control and Experimental Testing of a Supercapacitor/Battery Hybrid System - Passive and Semi-Active Topologies Lars Hagvaag Seim.

Adaptado pelo autor.

### 1.1.1 Princípio de Funcionamento

O capacitor inicialmente não funciona como um condutor. Tanto o dielétrico, quanto o isolante ou eletrólito, não permite que exista um fluxo de carga de uma placa condutora

para a outra. Porém, quando se aplica uma diferença de potencial em seus terminais, ocorre um deslocamento das cargas no dielétrico do capacitor devido atração de cargas opostas e repulsão de carga semelhantes. Portanto, conforme a tensão varia com o tempo, o deslocamento de carga varia da mesma forma (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Logo,

$$I = C \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1.7)$$

A capacitância é relacionada diretamente com a área das placas, ou seja, quanto maior for a sua área maior será a capacitância, e inversamente proporcional à distância entre as placas pois quanto mais afastadas menor a capacitância (NILSSON; RIEDEL, 2009). Portanto, segundo James Nilsson e Susan Riedel, a capacitância é definida pela seguinte função:

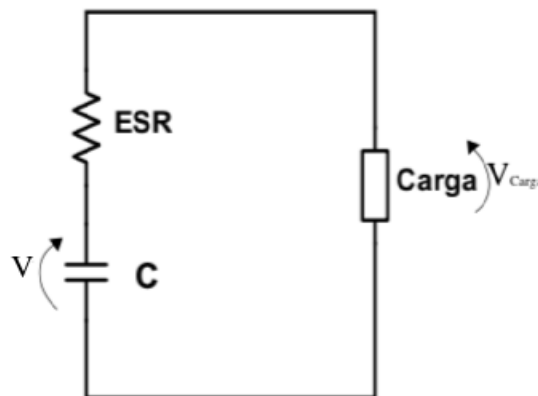
$$C = \frac{\epsilon_o \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (1.8)$$

Onde,

- $\epsilon_o$  é a permissividade do ar; e
- $\epsilon_r$  a permissividade do meio.

A Resistência Série Equivalente (ESR) corresponde às resistências das placas, dos contatos dos terminais com as placas e dos próprios terminais do capacitor (MUSSOI; VILLAÇA, 2000). Esse parâmetro tem grande importância, pois está relacionada com a máxima potência transferida pelo capacitor à carga (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Figura 7 – Circuito Simplificado do capacitor como fonte de tensão



Fonte: Produção do próprio autor.

A máxima potência de transferência que esse capacitor pode desenvolver é quando a

resistência da carga seja igual a ESR do capacitor (NILSSON; RIEDEL, 2009). Em acordo com a Figura 7, tem-se que

$$R_{total} = 2.ESR$$

Logo,

$$V_{Carga} = \frac{V}{2}$$

Então, a potência máxima do capacitor transferida à carga será dada por

$$P_{máx} = \left(\frac{V}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{ESR}$$

$$P_{máx} = \frac{V^2}{4.ESR} \quad (1.9)$$

Ou seja, o ESR irá limitar a potência máxima do capacitor.

Os capacitores eletroquímicos, como visto anteriormente, apresentam placas porosas que aumentam a área do contato com o eletrólito que além de aumentar a capacitância do componente, eles promovem a redução da ESR. Ou seja, permitem que o capacitor obtenha maior nível de potência transferida para a carga de acordo com a Equação 1.9.

## 1.2 Supercapacitor

Atualmente existem três modelos de supercapacitores, conhecidos: de camada dupla, pseudocapacitor e os híbridos. A diferença entre eles basicamente está na forma em que ocorre a movimentação das cargas internamente. Nos de camada dupla não há movimentação de carga entre o eletrodo e eletrólito, enquanto que o pseudocapacitor irá se valer da troca de cargas entre as placas e o eletrólito. Essa diferença influenciará no valor da capacitância e na capacidade de manter esse valor ao longo do tempo, devido a perdas existentes nas reações eletroquímicas (CARVALHO, 2004). Já o capacitor híbrido tenta aproveitar os pontos fortes de cada construção e encontrar capacitores com valores altos de capacitância e ainda assim estável (TRIGUEIRO, 2014).

### 1.2.1 Dupla camada

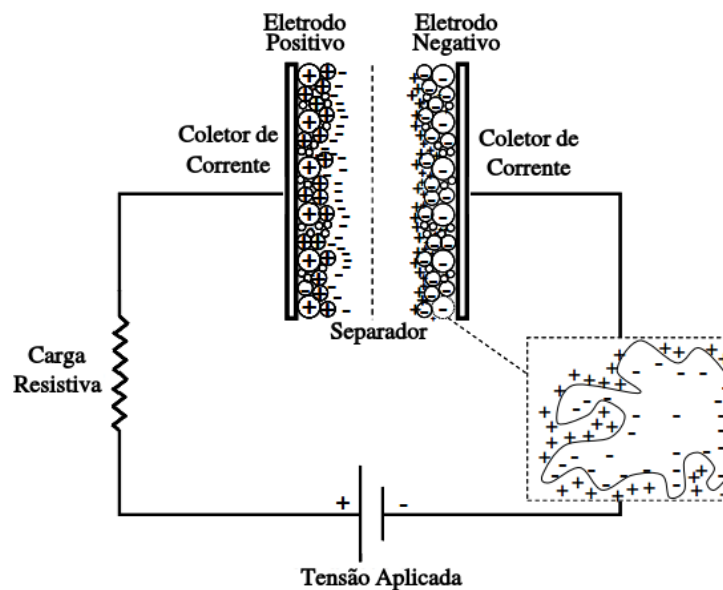
Os capacitores de dupla camada são construídos basicamente de eletrodos em carbono porosos, um eletrólito e um separador. Esses capacitores utilizam mecanismo não faradaico, onde não há transformação química nos materiais do eletrodo nem transferência de carga entre as placas e o eletrólito (TRIGUEIRO, 2014).

Nesse modelo, os eletrodos são ionizados de maneira que um esteja com excesso de cátions enquanto que outro rico em íons negativos. Ou seja, serão formadas no eletrólito

duas camadas de íons separadas por um separador permeável quando aplicado uma fonte de tensão ou corrente nos terminais do capacitor. Uma camada será criada pelos íons negativos do eletrólito que será atraído pelo eletrodo com cargas positivas e paralelamente a isso formará uma outra camada de cátions atraídos pelo eletrodo com cargas negativas, conforme apresentado na Figura 8. A distância entre as cargas do eletrólito e o eletrodo serão tão pequenas que de acordo com a Equação 1.8, a capacitância desses tipos de capacitores serão extremamente altas (SEIM, 2011) (TRIGUEIRO, 2014).

Capacitores com camada dupla vão apresentar maiores forças eletrostáticas do que um capacitor convencional, mas além disso manterão a estabilidade eletroquímica do capacitor ao longo do tempo. Pois, como não há mudança química no eletrodo, o mesmo não sofrerá com reações que geram enfraquecimento nas ligações químicas que são afetadas a cada processo de oxidação ou redução das cargas. Com isso, pode-se utilizar o mesmo capacitor por anos com a mesma capacidade de armazenamento (HALPER; ELLENBOGEN, 2006).

Figura 8 – Estrutura do capacitor de dupla camada



Fonte: M. Harper and J. Ellenbogen, Supercapacitors: A Brief Overview. Mitre Nanosystems Group, Mclean, Virginia, 2006.

Adaptado pelo autor.

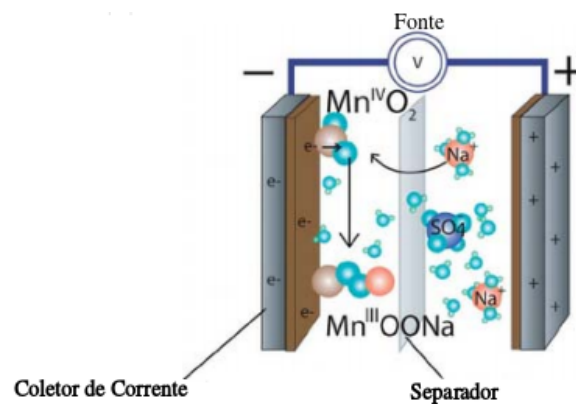
### 1.2.2 Pseudocapacitor

Diferentemente dos capacitores de dupla camada, as forças eletrostáticas nos pseudocapacitores são formadas pela transferência de carga entre eletrólito e eletrodo. Utilizando diferentes formas de reações faradaicas como oxi-redução, eletrossorção e processos de intercalação. O termo pseudocapacitor é adotado pelo fato das rápidas reações ocorrerem

entre eletrodo e eletrólito formando assim uma dupla camada de cargas se comportando como capacitância eletrostática, apresentado na Figura 9 (SEIM, 2011) (HALPER; ELLENBOGEN, 2006).

Os pseudocapacitores apresentam altos valores de capacitância e densidade de energia comparada às baterias, maiores do que os de camada dupla. Esse modelo utiliza dois materiais para o armazenamento de carga: os polímeros e óxidos metálicos. Porém, devido às reações, esses capacitores apresentam forte instabilidade eletroquímica ao longo de vários ciclos de carga e descarga. (HALPER; ELLENBOGEN, 2006).

Figura 9 – Estrutura do Pseudocapacitor



Fonte: <http://www.afs.enea.it/lampasi/workshopsupercapacitors/DeRiccardis2017.pdf>

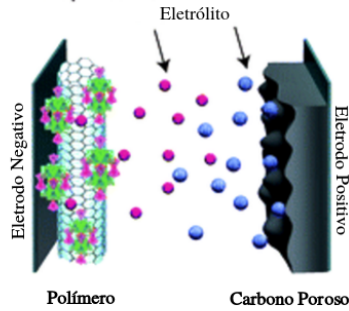
- V é a fonte de tensão que alimenta os eletrodos;
- $Mn^{IV}O_2$  o dióxido de Manganês; e
- $Mn^{III}OONa$  o permanganato de sódio.

### 1.2.3 Capacitor Híbrido

Estes capacitores têm sido desenvolvidos com a intenção de manter os valores de capacitância e densidade de potência altos e diminuir os problemas com a instabilidade eletroquímica que os Pseudocapacitores sofrem ao longo dos vários ciclos de carga e descarga. Portanto, estudos têm sido feitos com materiais à base de carbono para proporcionar o aumento da área de contato com o eletrólito, como nos de dupla camada, além de apresentar boa condução como os polímeros ou óxidos metálicos. Outra forma também encontrada foi a utilização de dois eletrodos diferentes, um de carvão carregado positivamente e outro de polímero carregado negativamente, que contribuem para uma maior estabilidade cíclica e

com alta densidade de potência, respectivamente, como pode ser visto na Figura 10 (SEIM, 2011).

Figura 10 – Estrutura do capacitor híbrido

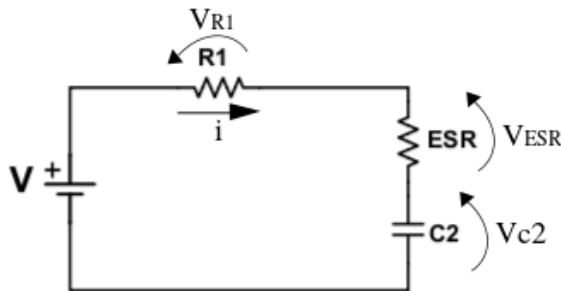


Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/Generation-I-is-an-ordinary-electric-double-layer-capacitor-EDLC-system-that-has-afig2301553255>

### 1.3 Carregamento de capacitor

O processo de carga do capacitor pode ser feito de duas formas: com fonte de corrente ou fonte de tensão constante. Aplicando-se a lei de Kirchhoff para Tensão na malha apresentada na Figura 11, chega-se a seguinte equação:

Figura 11 – Circuito RC com fonte de tensão constante



Fonte: Produção do próprio autor.

$$V = V_{R1} + V_{ESR} + V_{C2} \quad (1.10)$$

Onde  $V_{R1}$  é a tensão sobre o resistor  $R_1$ ,  $V_{ESR}$  é tensão sobre a Resistência Série Equivalente do capacitor e  $V_{C2}$  a tensão sobre o capacitor  $C_2$ .

Como:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.11)$$

e,

$$V_{C2} = \frac{Q}{C_2} \quad (1.12)$$

Substituindo

$$V_{R1} + V_{ESR} = (R_1 + ESR).i$$

na Equação 1.10, tem-se que:

$$V = (R_1 + ESR) \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C_2} \quad (1.13)$$

$$V - (R_1 + ESR) \frac{dQ}{dt} - \frac{Q}{C_2} = 0 \quad (1.14)$$

Resolvendo a Equação 1.14, chega-se a seguinte solução (NILSSON; RIEDEL, 2009):

$$V_{C2}(t) = V.(1 - e^{\frac{t}{(R_1 + ESR)C_2}}) \quad (1.15)$$

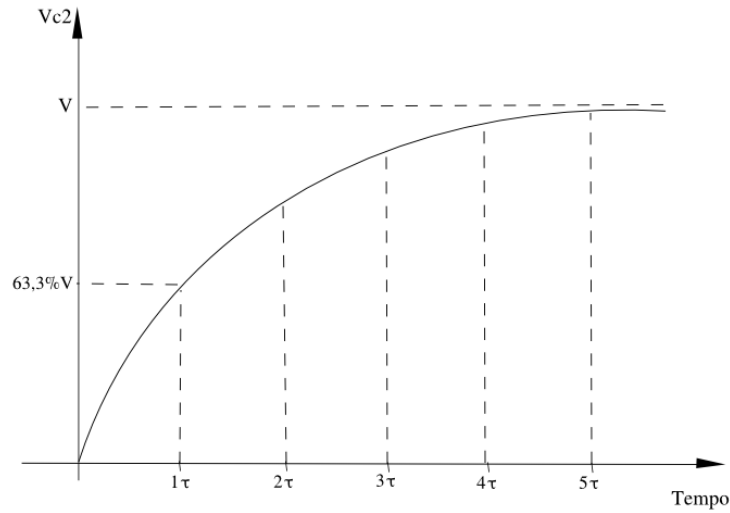
De forma que:

$$\tau = (R_1 + ESR)C_2 \quad (1.16)$$

Onde,  $\tau$  é a constante de tempo de carga.

Com base na Equação 1.15, obtém-se o gráfico qualitativo mostrado na Figura 12

Figura 12 – Curva de carga com tensão constante



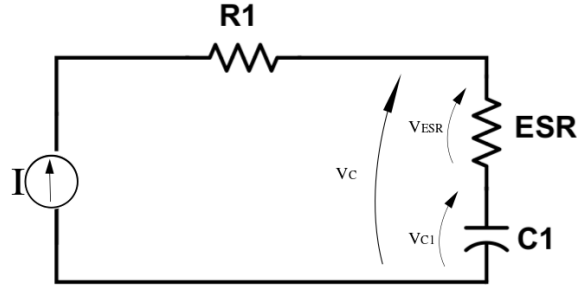
Fonte: Produção do próprio autor.

para a tensão nos terminais do capacitor em função do tempo. No processo de carga do capacitor também pode ser utilizado uma fonte de corrente contínua, como pode ser visto na Figura 13.

Em acordo com a Equação 1.7, pode-se definir que a corrente no capacitor  $C_1$  é

$$I = C_1 \cdot \frac{dV_{C1}}{dt} \quad (1.17)$$

Figura 13 – Circuito RC com fonte de corrente constante



Fonte: Produção do próprio autor.

$$I \cdot dt = C_1 \cdot dV_{C1} \quad (1.18)$$

$$I \cdot \int_0^{\delta T} dt = C_1 \cdot \int_0^{\delta T} dv_c \quad (1.19)$$

Logo, tem-se que:

$$V_{c1}(t) = \frac{I}{C_1} \cdot t \quad (1.20)$$

Que comparada a uma função linear:

$$y(x) = Ax + B \quad (1.21)$$

$$A = \frac{I}{C_1} \quad (1.22)$$

e

$$x = t$$

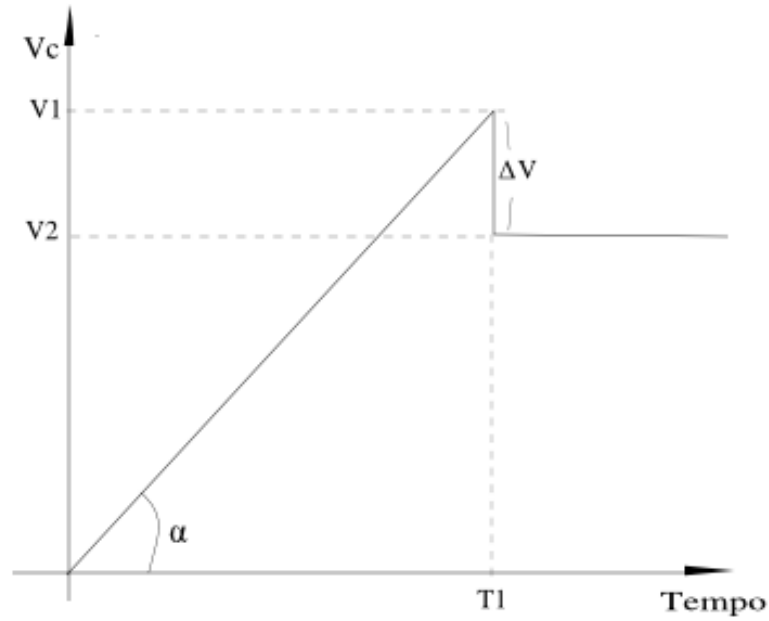
Onde A é o coeficiente angular da reta.

Tratando-se de um capacitor real, quando o processo de carga no capacitor é finalizado, a curva de carga pode ser observado pela Figura 14 e a Figura 15, pois desligando-se a fonte de corrente constante, ocorre uma queda de tensão  $\Delta V$  nos terminais do capacitor devido sua Resistência Série Equivalente(ESR) (MAXWELL, 2015) (MAXWELL, 2009). Então, como o capacitor é carregado com corrente  $I$  constante, a tensão aplicada aos terminais do mesmo será  $V_c = V_{C1} + V_{ESR}$  como apresentado na Figura 13, onde:

$$V_{ESR} = ESR \cdot I$$

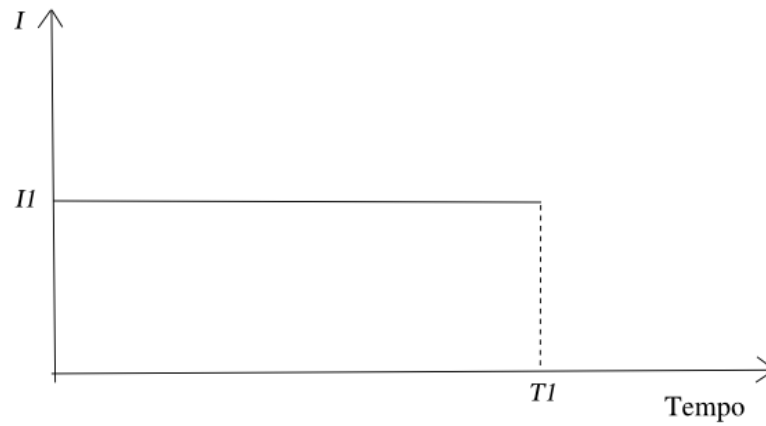


Figura 14 – Curva de carga com corrente constante



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 15 – Fonte de alimentação de corrente constante



Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, ao desligar-se a fonte, a corrente que flui pelo capacitor se torna nula de maneira que:

$$V_{ESR} \simeq 0$$

Portanto, logo após o tempo  $T_1$ , instante em que a fonte é desligada, tem-se que:

$$V_c = V_{C1} + 0 = V_2$$

e portanto,

$$\Delta V = V_1 - V_2 = ESR \cdot I$$

$$ESR = \frac{V1 - V2}{I} \quad (1.23)$$

Comparando-se as Equações 1.15 e 1.20 observa-se que para a obtenção dos dados desejados é mais viável que o capacitor seja carregado através de uma fonte de corrente, pois apresentará menor complexidade matemática já que são utilizadas apenas equações lineares. Posteriormente será tratada a construção de uma fonte de corrente contínua e constante para o procedimento de carga dos supercapacitores ensaiados (MAXWELL, 2015).

## 1.4 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo a construção de uma bancada que seja capaz de realizar ensaios em supercapacitores com a finalidade de determinar os valores de Capacitância(C) e Resistência Série(ESR), de maneira que os resultados sejam comparados com circuitos simulados.

### 1.4.1 Objetivos específicos

- Construção de uma fonte de corrente contínua controlada.
- Carregamento de supercapacitores e captura da tensão aplicada nos terminais dos mesmos.
- Implementação da resposta gráfica para os dados adquiridos.
- Aplicação das equações do capacitor para encontrar valores de Capacitância e Resistência Série.

## 1.5 Estrutura do Texto

Este trabalho, para melhor compreensão, foi dividido em cinco capítulos, descritos a seguir:

- **Introdução:** capítulo inicial que tem como objetivo contextualizar o trabalho desenvolvido, mostrando o ponto de partida e a análise feita para o início do projeto proposto.
- **Referencial Teórico:** nesse capítulo será apresentado o embasamento adotado para a construção da fonte de corrente escolhida.
- **Protótipo:** nesse ponto será descrito o processo do projeto, desenvolvimento e montagem da bancada apresentada com os pontos necessários para a obtenção dos resultados.

- **Experimentos e Resultados:** esse capítulo apresentará as curvas de carga nos capacitores e seus respectivos valores de Capacitância(C) e Resistência Série(ESR).
- **Conclusões e Trabalhos Futuros:** para finalizar, o capítulo explanará a conclusão a respeito dos supercapacitores e os futuros trabalhos que podem ser realizados.

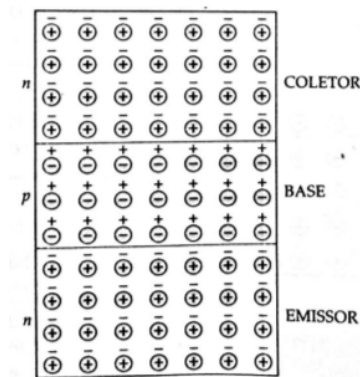
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Fonte de corrente

Uma das formas de se construir uma fonte de corrente é utilizando-se transistores, que são dispositivos semicondutores que podem ser divididos em dois tipos: transistores *npn* e transistores *pn*.

Um transistor possui três regiões chamadas de coletor, base e emissor como pode ser observado na Figura 16 cujo esquema representa um transistor *npn* (MALVINO, 1995).

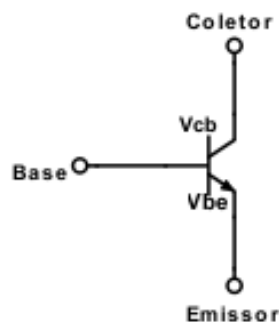
Figura 16 – Estrutura do Transistor *npn*



Fonte: Malvino : Eletrônica, Vol 1 Ed.4

A simbologia elétrica do transistor *npn* é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Simbologia do Transistor *npn*

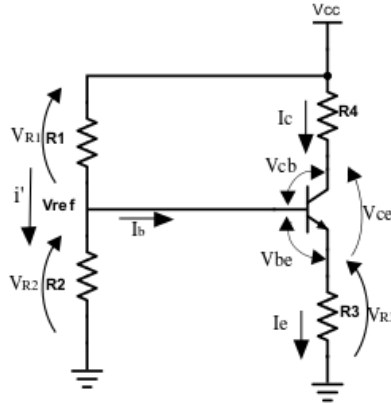


Fonte: Produção do próprio autor.

Uma das aplicações para os transistores é de ser utilizado como fonte de corrente, como

no circuito da Figura 18, onde é chamado de polarização universal (MALVINO, 1995).

Figura 18 – Fonte de Corrente com transistor



Fonte: Produção do próprio autor.

Segundo Malvino, considerando os valores de  $R_1 + R_2$  tal que a corrente  $i'$  seja bem maior que a corrente de base  $I_b$ . Então, tem-se que:

$$V_{ref} = V_{cc} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

De acordo com a Malha 01 apresentada na Figura 19 e aplicando a Lei de Kirchhoff da Tensão, encontra-se que:

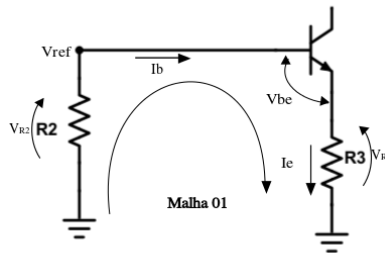
$$V_{ref} - V_{be} - V_{R3} = 0$$

Onde,

$$V_{R2} = V_{ref}$$

Nessa malha, utiliza-se o resistor  $R_3$  como importante estabilizador térmico no transistor de

Figura 19 – Malha da tensão



Fonte: Produção do próprio autor.

maneira que funcione como uma fonte de corrente constante. Considerando  $V_{be} = 0,7V$ , ou

seja, na região ativa do transistor, conclui-se que:

$$V_{R3} = V_{ref} - 0,7 \quad (2.2)$$

De forma que:

$$V_{R3} = V_{cc} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 0,7$$

Utilizando-se da Lei de Ohm no resistor  $R_3$ , a corrente que flui pelo emissor é igual a:

$$I_e = \frac{V_{R3}}{R_3} = \frac{V_{cc} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 0,7}{R_3} [A] \quad (2.3)$$

Assim, pode-se chegar a uma fonte de corrente  $I_e$  constante.

Para que o transistor funcione na região ativa e obedeça a Equação 2.3 é necessário ainda observar a tensão  $V_{CE}$  apresentada na Figura 18. De maneira que:

$$V_{CE} > V_{sat} \quad (2.4)$$

Onde,  $V_{sat}$  é a tensão de saturação do transistor.

Segundo Millman e Halkias, quando  $I_b \simeq 0$  tem-se que  $I_e \simeq I_c$  e

$$I_c = (1 + \beta_{cc})I_{co} + \beta_{cc}I_b$$

Ou seja,

$$I_c = (1 + \beta_{cc})I_{co}$$

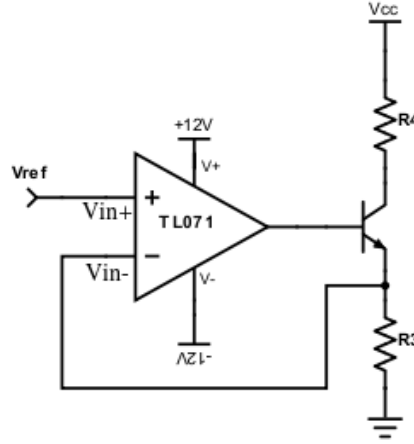
Onde,  $I_{co}$  é a corrente reversa na junção base-coletor.

Ainda de acordo com Millman e Halkias, à medida que a temperatura aumenta na junção do coletor-base,  $I_{co}$  aumenta da mesma forma na razão em que  $I_{co}$  dobra a cada aumento de  $10^\circ C$ . Esse fato provoca variações não desejadas quando o transistor é utilizado como fonte de corrente (MILLMAN JACOB; HALKIAS, 1981).

Assim, é preciso construir uma fonte que seja imune a essas variações. Esse problema, no entanto, pode ser resolvido adicionando-se um amplificador operacional como na Figura 20 (MALVINO, 1987).

Observa-se que há uma realimentação negativa nesta fonte da Figura 20 que caracterizará o amplificador em malha fechada, onde é realizado ajuste automático no  $V_b$  e no  $V_{ce}$  para manter a corrente constante no emissor (MAXWELL, 2015).

Figura 20 – Fonte de Corrente com Amp op



Fonte: Produção do próprio autor.

Considerando o amplificador TL071 ideal, tem-se que o ganho  $A \simeq \infty$ , devido ao curto-circuito virtual (MALVINO, 1987).

$$\frac{V_{saída}}{V_{in^+} - V_{in^-}} = A \quad (2.5)$$

Logo, como  $A \simeq \infty$  tem-se que:

$$V_{in^+} - V_{in^-} \simeq 0 \quad (2.6)$$

De acordo com a malha da Figura 21, aplicando a Lei de Kirchhoff para Tensão, tem-se que:

$$V_{ref} - (V_{in^+} - V_{in^-}) - V_{R3} = 0$$

Onde, devido ao curto circuito virtual,

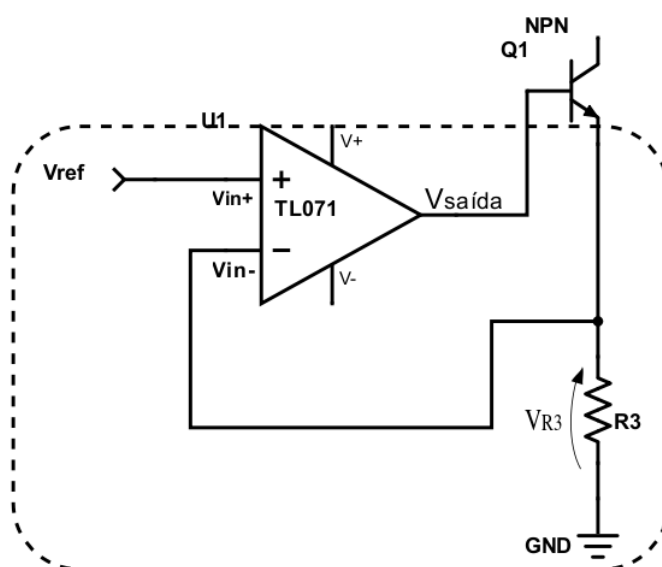
$$V_{ref} = V_{R3}$$

Dessa forma, a corrente através do resistor  $R_3$  será:

$$I_e \simeq \frac{V_{ref}}{R_3} [A] \quad (2.7)$$

Com isso, é possível construir uma fonte de corrente controlada por um sinal de tensão  $V_{ref}$ . Devido a essa modelagem, se o  $V_{ref}$  for originado por um diodo zener ou de outra fonte de tensão CC estável, então o transistor se apresenta para a carga  $R_3$  como uma fonte de corrente contínua estável (MALVINO, 1987).

Figura 21 – Malha de tensão no Amplificador



Fonte: Produção do próprio autor.

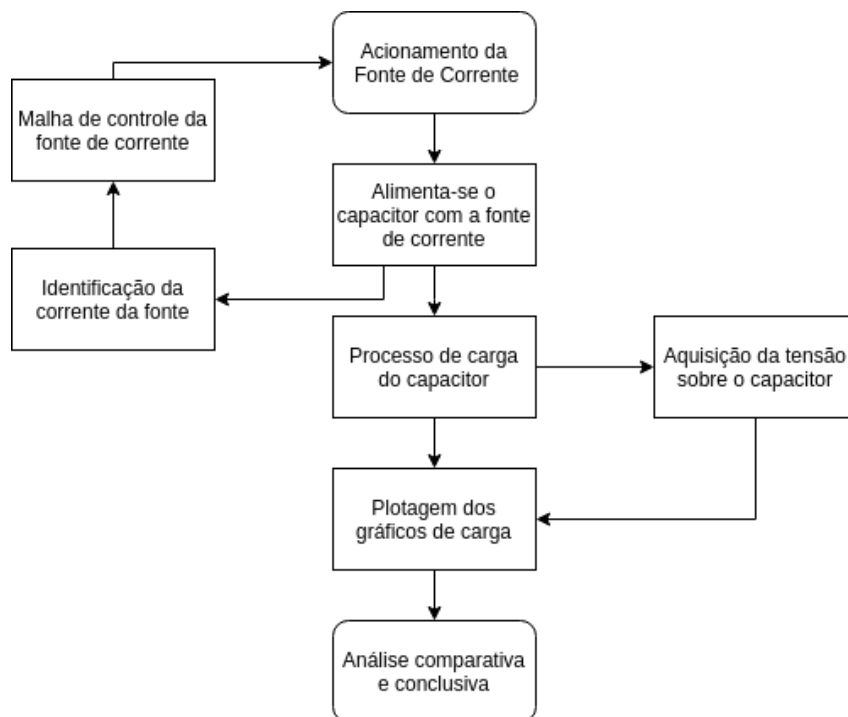


### 3 INFRAESTRUTURA DO PROTÓTIPO

Neste capítulo serão detalhados todas as etapas do processo de construção da bancada que é composta por: Fonte de Corrente, Sistema de Controle, Sistema Automatizado de carga e Circuito de Captura de dados.

No diagrama em blocos do protótipo da Figura 22 é possível observar o processo desde o funcionamento da fonte até a extração dos parâmetros desejados e a análise dos mesmos.

Figura 22 – Diagrama em Blocos do Protótipo

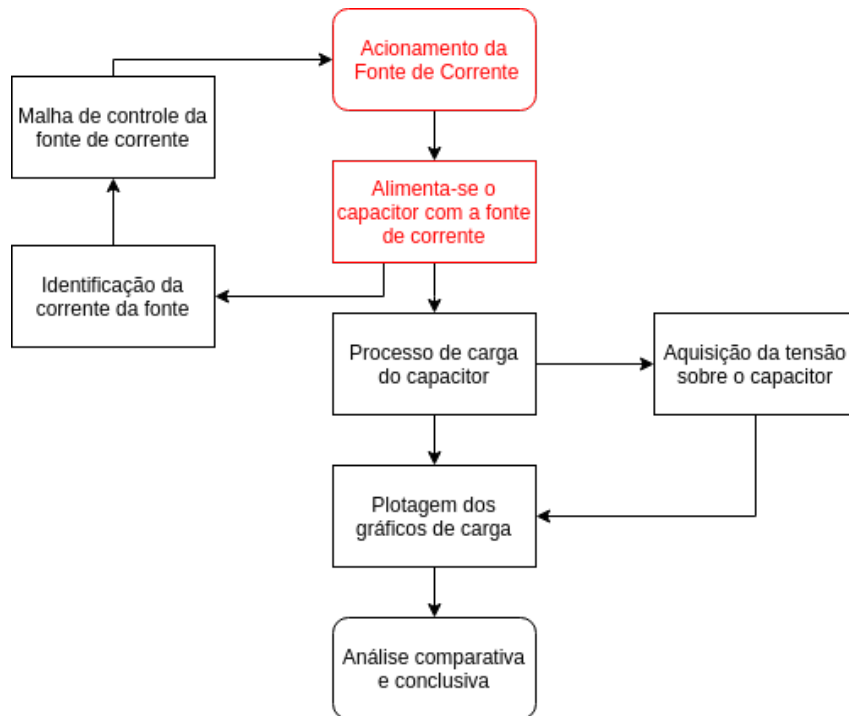


Fonte: Produção do próprio autor.

#### 3.1 Fonte de Corrente

Projetou-se a construção de uma fonte de corrente que fornecesse até 5A, pois os dois principais capacitores ensaiados apresentavam corrente máxima menor do que esse valor. Para isso, optou-se por utilizar o transistor TIP142, que segundo o *datasheet* do componente, apresenta corrente contínua máxima de 10 A (SEMICONDUCTOR, 2012). Desse modo, para segurança de projeto e para que a temperatura não cause instabilidade no circuito, decidiu-se que seriam utilizados dois transistores em paralelo de forma que cada um fornecesse no máximo 2,5 A.

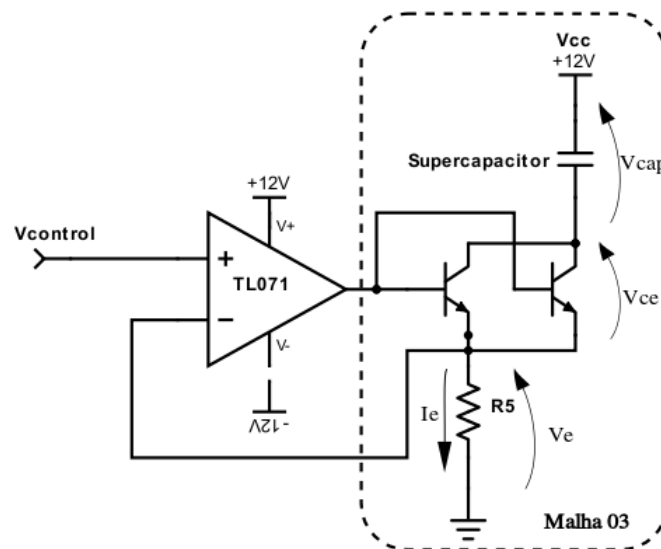
Figura 23 – Fase da Fonte de Corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

Para definição dos parâmetros escolhidos para a fonte, analisou-se a Malha 03 do circuito da Figura 24.

Figura 24 – Malha de tensão no coletor-emissor



Fonte: Produção do próprio autor.

De acordo com a Lei de Kirchoff pra tensão, tem-se que:

$$V_{cc} - V_{cap} - V_{ce} - V_e = 0 \quad (3.1)$$

Então,

$$V_{ce} = 12 - V_{cap} - V_e$$

Em acordo com a Equação 2.4, define-se que:

$$V_{ce} > 2V$$

Pois,  $V_{ce_{sat}}$  do TIP142 é igual a 2 V (SEMICONDUCTOR, 2012). Portanto, para evitar que  $V_{ce} < 2$ , decidiu-se trabalhar com resistências que possibilitassem a condição de  $V_{ce} \geq 4$  V. Logo,

$$12 - V_{cap} - V_e \geq 4 \quad (3.2)$$

Então,

$$V_{cap} + V_e \leq 8$$

e

$$V_e \leq 8 - V_{cap} \quad (3.3)$$

No projeto serão ensaiados dois modelos de capacitores: de 5 F e 25 F, que apresentam tensão máxima de operação igual a 2,7 V (EATON, 2015) (MAXWELL, 2013).

Logo, para maior tensão aplicada sobre o capacitor tem-se que:

$$V_e \leq 8 - 2,7 \quad (3.4)$$

$$R_5 \cdot I_e \leq 5,3V \quad (3.5)$$

$$R_5 \leq \frac{5,3}{5}$$

Então

$$R_5 \leq 1,06 \quad (3.6)$$

No mercado foi encontrado resistência de valor aproximado a 1Ω e 5W. Então, para que seja obedecida a condição da Equação 3.6, pensou primeiramente na utilização de dois resistores em paralelo, de forma que a resistência equivalente seja de:

$$R_{eq} = \frac{1}{2} = 0,5 \Omega$$

Sendo a potência total suportada pelo conjunto de:

$$P_{total} = P_{uni} \cdot 2 = 10 W$$

Para a corrente de  $I_e = 5 A$ , tem-se:

$$P = 0,5.(I_e^2) = 12,5 W > P_{total}$$

Logo, não é possível utilizar os dois resistores em paralelo. Então, utilizou-se um arranjo com três resistores que apresenta uma resistência equivalente a:

$$R_{eq} = \frac{1}{3} = 0,33 \Omega$$

Sendo a potência total suportada pelo conjunto de:

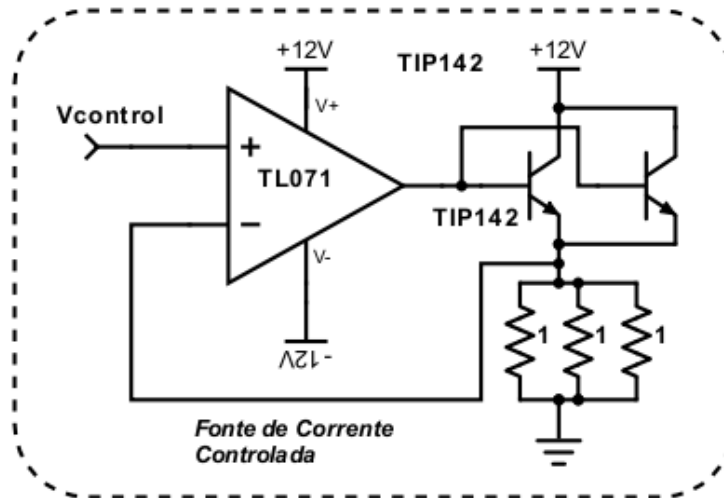
$$P_{total} = P_{uni}.3 = 15 W$$

Para a corrente de  $I_e = 5 A$ , tem-se:

$$P = 0,33.(I_e^2) = 8,25 W < P_{total}$$

Portanto, decidiu-se que, o circuito da Figura 24, fosse substituído pelo circuito da Figura 25.

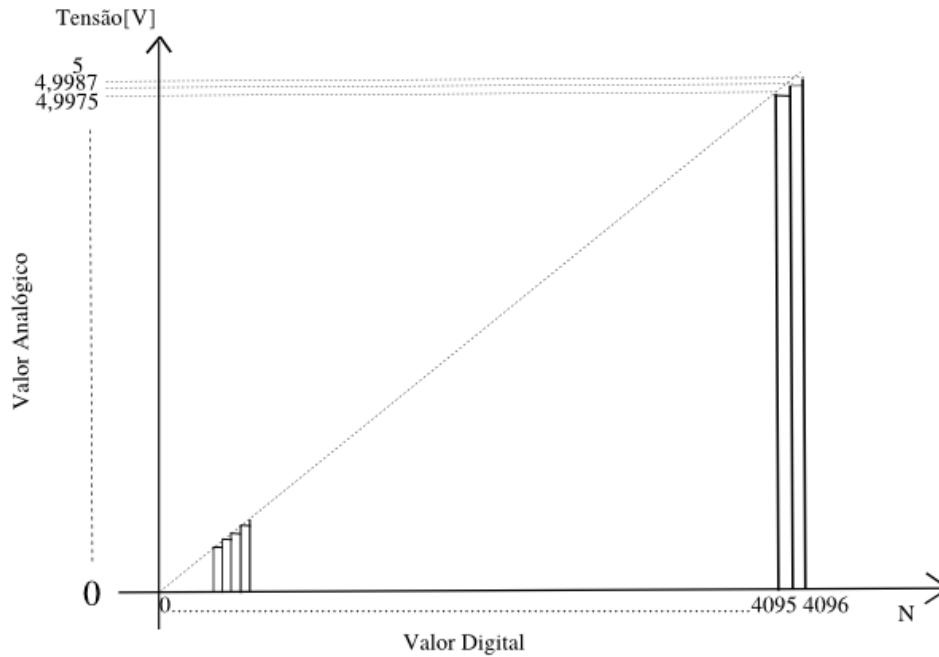
Figura 25 – Circuito da fonte controlada



Fonte: Produção do próprio autor.

O sinal da tensão  $V_{control}$  é fornecido pelo Arduino Nano, porém por ele não possuir um conversor digital-analógico, era inviável utilizar as saídas do Arduino como alimentação da fonte, já que elas são portas digitais (ARDUINO, 2018). Então, foi adicionado um conversor por aproximação sucessiva DAC MCP4725 de 12 bits, que utiliza comunicação I2C, conforme mostrado na Figura 27. Essa comunicação é um protocolo de barramento por onde transmite os dados de até 127 dispositivos para o Arduino sem a necessidade de mais conexões. A tensão de saída analógica é gerada a partir de um sinal digital do Arduino como ilustrado na Figura 26 (MICROCHIP, 2007).

Figura 26 – Sinal Analógico



Fonte: Produção do próprio autor.

Devido o DAC ser de 12 bits, o sinal de saída do Arduino e entrada do DAC precisa ser discretizado numa resolução de 4096 níveis, que permitirá a variação de 0 – 5V na saída do DAC de forma que:

$$V_n = \frac{5 - 0}{4096 - 0} = 1,22 \text{ mV} \quad (3.7)$$

Onde  $V_n$  é o valor da mínima variação de tensão possível para a mudança de um bit na entrada do conversor (MICROCHIP, 2007).

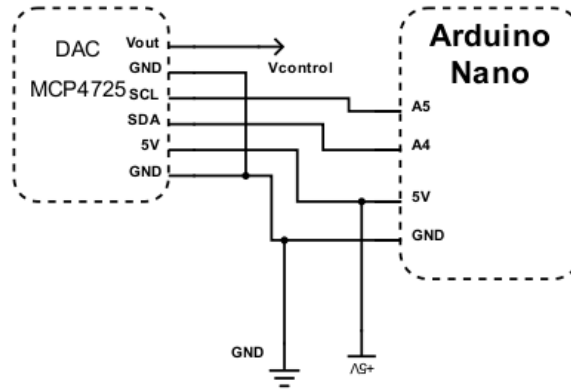
Sua conexão ao Arduino é mostrada no esquema da Figura 27.

Ou seja,

- O *GND* do DAC deve ser ligado ao *GND* do Arduino Nano.
- O  $V_{cc} = 5 \text{ V}$  do DAC deve ser ligado ao  $V_{out} = 5 \text{ V}$  do Arduino Nano.
- O Serial Clock deve ser conectado ao pino SCL do microcontrolador que corresponde ao pino A5 do conector do kit Arduino e o pino *SDA* deve ser conectado à entrada analógica A4 do Arduino, pois essas duas entradas analógicas são responsáveis pelo endereçamento I2C do conversor no Arduino. Além disso, deve-se realizar essa conexão com cuidado pois caso exista alguma inversão de ligação, ocorrerá a queima do conversor.

- O pino OUT é o valor da tensão responsável por alimentar a fonte de corrente controlada com  $V_{control}$

Figura 27 – Esquema de ligação do DAC-Arduino



Fonte: Produção do próprio autor.

Para exemplificar, caso seja enviado pelo Arduino um sinal digital equivalente a 200 ao conversor:

$$V_{control} = 200 \cdot \frac{5 - 0}{4096 - 0} = 0,246 \text{ V}$$

Ou seja, a saída do conversor apresentará uma tensão de saída igual a 0,246 V. Logo, segundo a Equação 2.7, tem-se que:

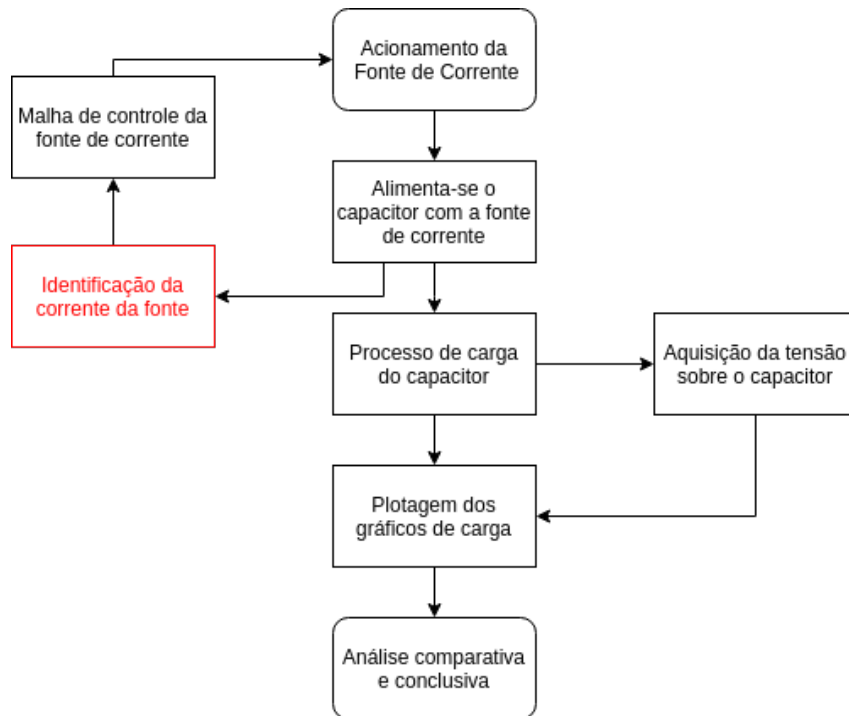
$$I_e = \frac{0,246}{0,33} = 0,74 \text{ A}$$

## 3.2 Leitura do sensor

Nesta etapa será realizada a leitura da corrente fornecida pela fonte enquanto o supercapacitor é carregado. A leitura dessa corrente será utilizada para dois momentos: controle da fonte e plotagem do gráfico da corrente. Escolheu-se para essa função o Módulo Sensor acs712  $\pm 30$  A da Figura 29.

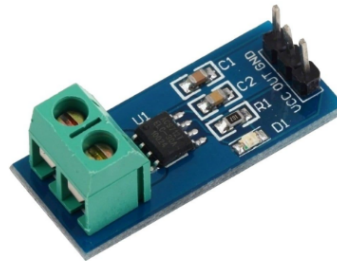
Esse sensor de corrente realiza a medição da corrente por meio do efeito Hall a partir do campo magnético gerado pela corrente que passa pelo condutor. Mesmo que o atual projeto realize carregamento de capacitores com corrente máxima de até 5 A, optou-se por adquirir o modelo do sensor de 30 A o qual possui resolução de 66 mV/A para ser realizados em futuros trabalhos.

Figura 28 – Fase de Leitura da Corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 – Módulo Sensor de Corrente



Fonte: Inobot. Disponível em: <http://www.inobot.com.br/pd-21d18a-sensor-de-corrente-acs712-30a.html>

Segundo o *datasheet* do sensor, quando a corrente for igual a zero o sensor apresentará uma tensão de saída  $V_{out} = \frac{V_{cc}}{2}$ , onde  $V_{cc}$  é o valor da tensão de alimentação do mesmo (ALLEGRO, 2013). Por isso, devido os níveis de tensão nas portas digitais do Arduino serem 0 e 5 V, o valor da tensão de alimentação do módulo sensor foi definido como  $V_{cc} = 5\text{ V}$  (ARDUINO, 2018). Logo, o valor da tensão de saída no sensor para corrente nula será:

$$V_{out} = \frac{5}{2} = 2,5\text{ V}$$

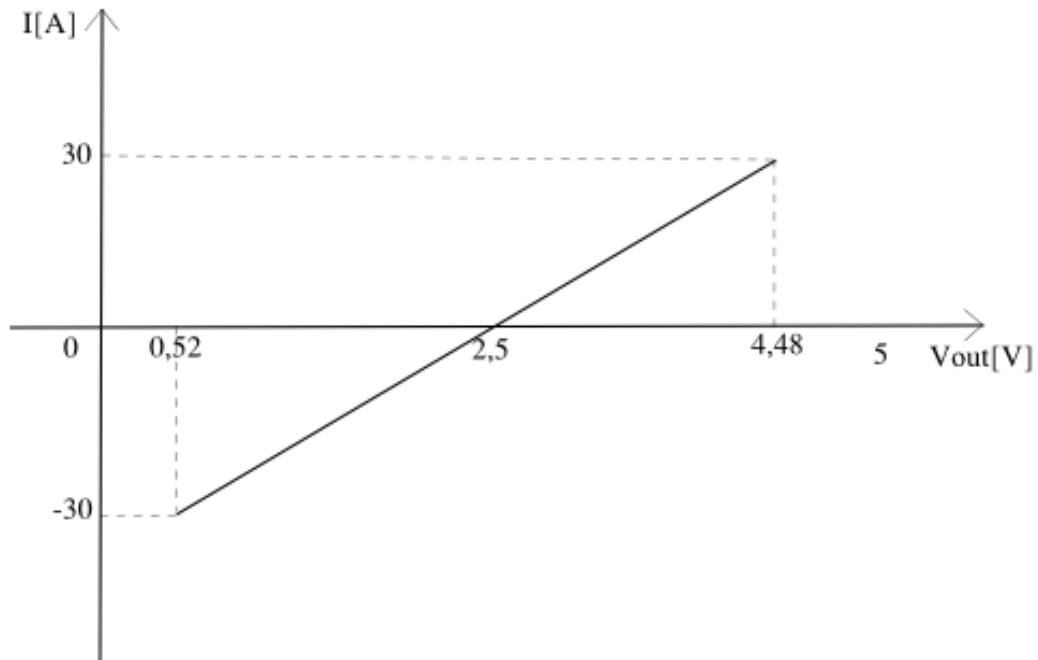
De forma que:

$$V_{out}(I) = 2,5 + 0,066.I[V]$$

Portanto, a leitura da corrente em termos de tensão pode ser representada pelo gráfico da

Figura 30.

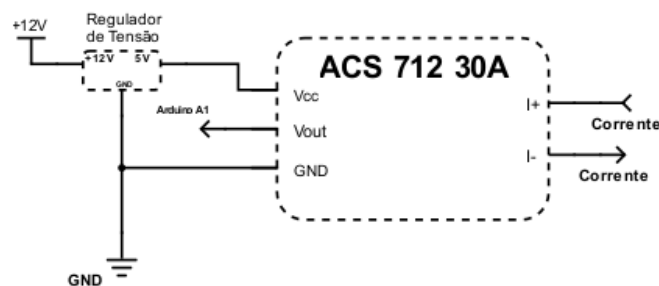
Figura 30 – Função da Tensão de Saída



Fonte: Produção do próprio autor.

Para, garantir que a alimentação do sensor seja  $V_{cc} = 5V$ , foi incluído o regulador de tensão como apresentado no circuito da Figura 31.

Figura 31 – Ligação do Sensor ACS712

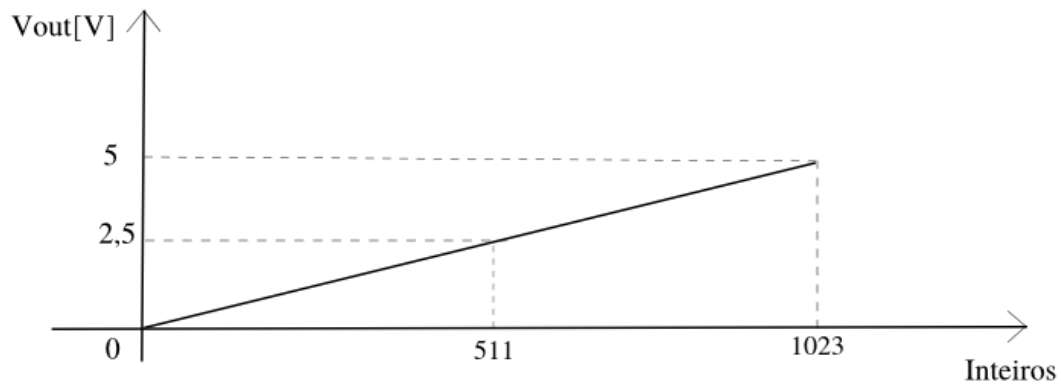


Fonte: Produção do próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 31, a tensão de saída do sensor  $V_{out}$  é enviada a porta analógica A1 do Arduino. A tensão nessa porta aceita valores entre 0-5 V, que após passar por um conversor analógico-digital de 10 bits, estará discretizado em valores inteiros que variam entre 0 – 1023 (ARDUINO, 2018). O gráfico da Figura 32 mostra essa relação. Ou seja, para  $I_e = 0 A$  implicará em  $V_{out} = 2,5 V$ , de modo que para o *firmware* no Arduino representaria  $V_{out} = 2,5 V \rightarrow 511$ .



Figura 32 – Relação inteiro por tensão



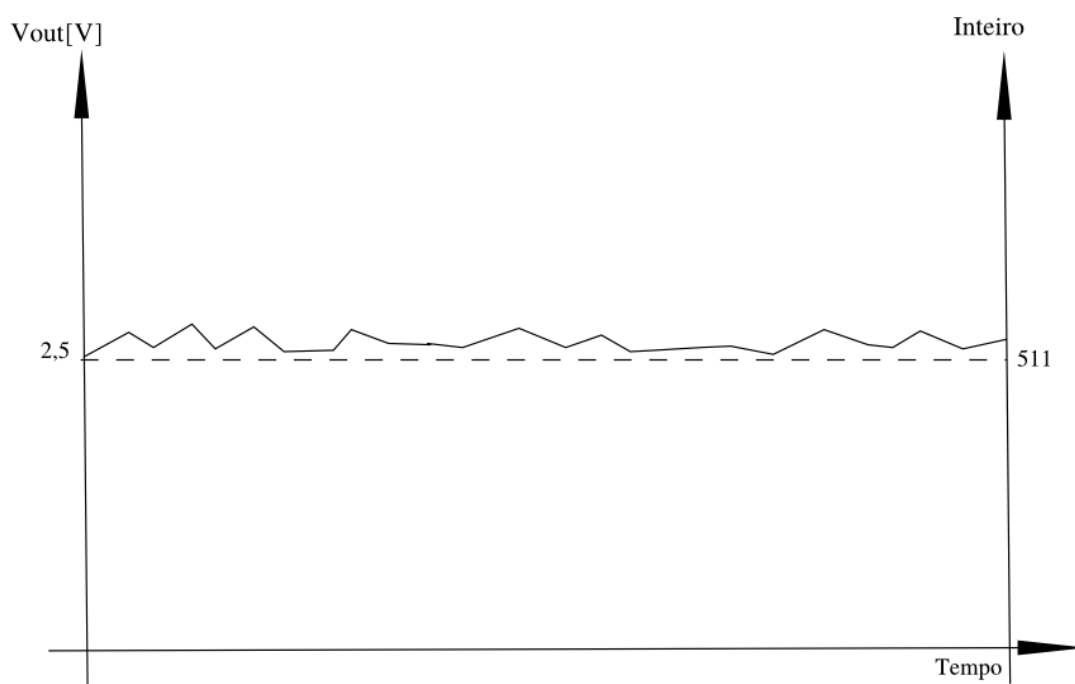
Fonte: Produção do próprio autor.

Porém, existem dois problemas que afetam a leitura do valor da tensão: os ruídos de quantificação do DAC e o offset inerente ao sensor de Efeito Hall. Os ruídos são interferências aleatórias, também chamados de *sujeiras externas* que podem prejudicar e favorecer erros de medição. Os ruídos simplesmente são inerentes aos dispositivos eletrônicos devido aos contatos, soldas ou pequenas impedâncias (ARTUZI, 2001). Na comunicação entre Sensor e Arduino, tem-se ruídos originados pela oxidação de condutores, oxidação dos pontos de solda, umidade ou em conectores.

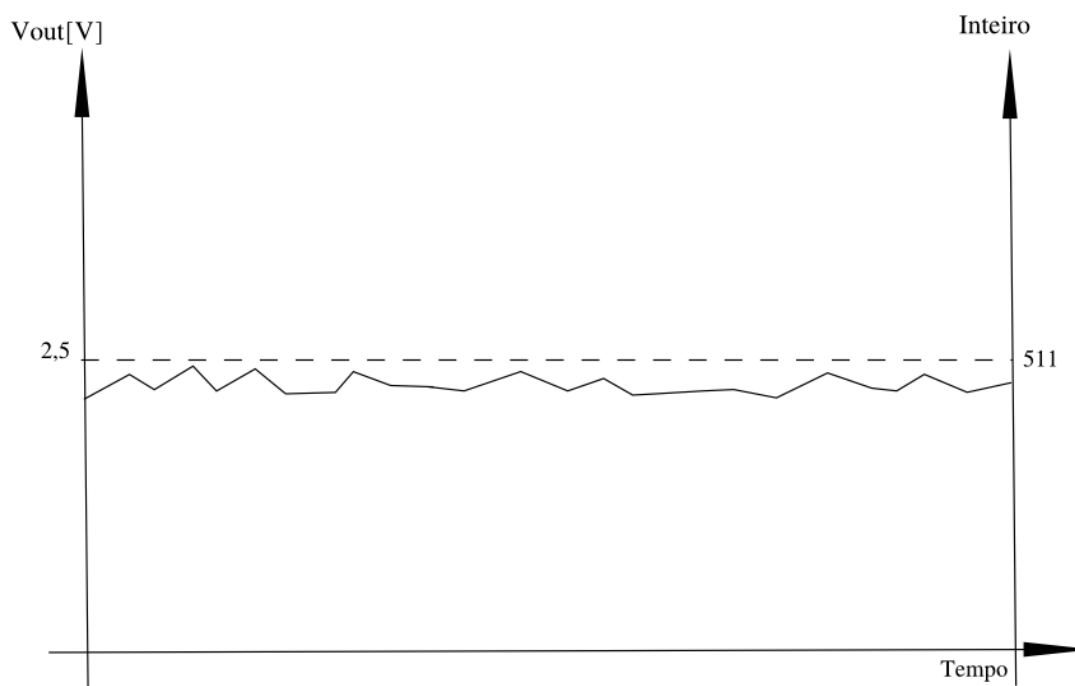
Com isso, podem ocorrer atenuações ou amplificação de um sinal que provocará erros na leitura do valor. Portanto, é preciso se utilizar filtros que possam minimizar esse efeito e assim apresentar um valor mais próximo do real. Esses filtros podem ser realizados tanto por *software* quanto por *hardware*. No presente trabalho foi utilizado um filtro média móvel implementado em *software*.

Além dos ruídos, é preciso realizar no início de cada processo de carga, o ajuste na tensão do *offset*, que é um deslocamento não desejado no valor de tensão extraído de um circuito. Esse deslocamento pode ser tanto positivo quanto negativo e acontece devido ao desequilíbrio que existem entre os GND dos circuitos e componentes utilizados para implementação de cada equipamento, sensor ou controlador.

Assim, para exemplificar este problema, supondo que há uma corrente nula passando pelo sensor. O resultado encontrado poderá ser ilustrado pelas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Erro de *Offset* Positivo

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 34 – Erro de *Offset* Negativo

Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, para que possa ser feito o ajuste de *offset* é necessário forçar a fonte fornecer corrente igual a *zero* e então calcular o erro que há entre o valor lido e o valor esperado. Para isso, foi feito o seguinte trecho de código:

```

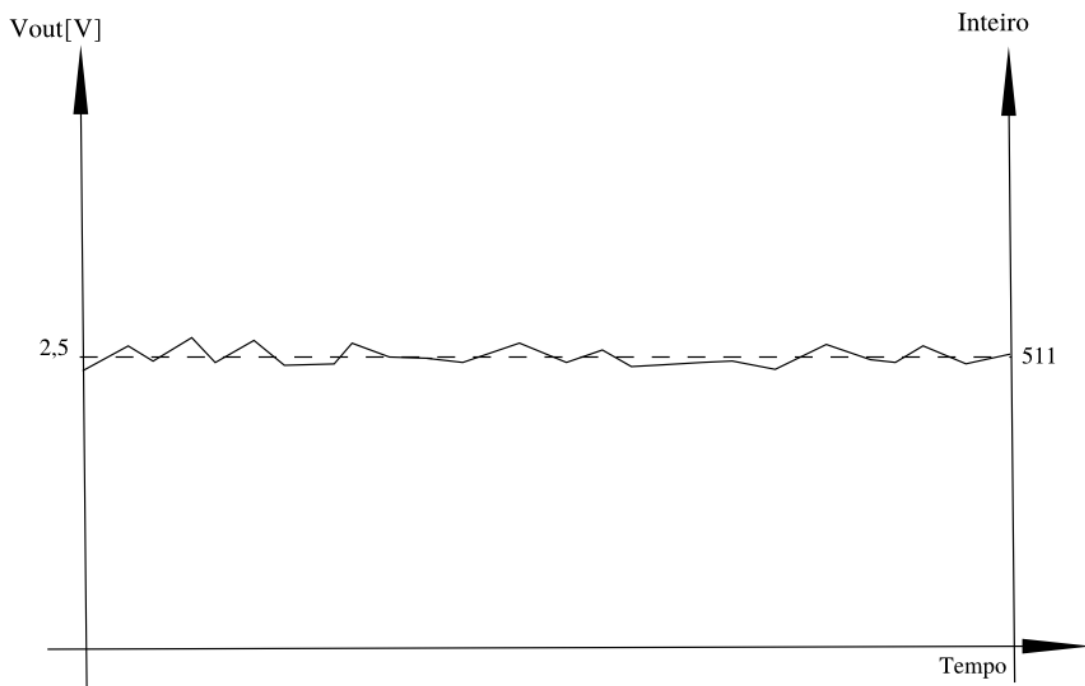
void setup() {
    dac.setVoltage(0, false); // Comando responsável por enviar a tensão Vcontrol
    0-4096 => 0-5V. Nesse caso, Vcontrol=0V.

    zero=analogRead(A1); // Leitura do valor da corrente feita pelo sensor.
    offset=zero-512; // É o valor do desvio no offset. Esse valor será descontado
    ou adicionado no valor detectado pelo sensor para que seja realizada a
    correção do offset. Onde, 512 é o valor esperado.
}

```

Dessa forma é possível corrigir o valor do *offset* de forma que o resultado seja semelhante ao da Figura 35.

Figura 35 – Tensão de Offset Ajustado



Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.2.1 Média Móvel

Para solucionar o problema com os ruídos, foi programado um filtro média móvel com janela fixa que é um dos mais simples. Ele realiza a média aritmética dos últimos  $N$  dados coletados e salvos num vetor (KUO SEN M.; LEE, 2001). Inicialmente tem-se que:

$$Corrente[0] = a_0$$

$$Corrente[1] = a_1$$

$$Corrente[2] = a_2$$

$$\begin{aligned} & \vdots \\ & Corrente[n-2] = a_{n-2} \\ & Corrente[n-1] = a_{n-1} \end{aligned}$$

Onde o vetor *Corrente* é o vetor dos valores coletados no universo de valores definidos. Portanto, a média aritmética desses dados coletados é:

$$Média = \frac{Corrente[0] + Corrente[1] + \dots + Corrente[n-2] + Corrente[n-1]}{n} \quad (3.8)$$

Para esse caso, escolheu-se por utilizar um vetor com 20 posições, que apresenta boa aproximação do valor real, de forma que seja realizada a Equação 3.8. Para o primeiro valor de corrente, são preenchidas todas as posições do vetor antes de resolver a média, como é apresentado na Equação 3.9

$$Média = \frac{Corrente[0] + Corrente[1] + \dots + Corrente[18] + Corrente[19]}{20} \quad (3.9)$$

O próximo passo é encontrar o segundo valor de corrente em um tempo de amostragem, que permita a realização da Equação 3.9 e o deslocamento mencionado mais a frente em *firmware*, de modo que o tempo seja o suficiente para a realização do controle da corrente. Por isso, neste trabalho definiu-se o tempo de amostragem por *5ms*. Para a segunda corrente, capta-se a próxima leitura do sensor adicionando-o na última posição do vetor e desloca-se as outras 19 posições para uma posição a frente, conforme apresentado abaixo:

$$\begin{aligned} & Corrente[0] = a_1 \\ & Corrente[1] = a_2 \\ & Corrente[2] = a_3 \\ & \vdots \\ & Corrente[18] = a_{19} \\ & Corrente[19] = I_0 \end{aligned}$$

Logo,

$$Média = \frac{Corrente[0] + Corrente[1] + \dots + Corrente[18] + Corrente[19]}{20} \quad (3.10)$$

Onde  $I_0$  é o novo valor lido pelo sensor. E para o terceiro valor de corrente realiza-se:

$$\begin{aligned} & Corrente[0] = a_2 \\ & Corrente[1] = a_3 \\ & Corrente[2] = a_4 \end{aligned}$$

$$\vdots$$

$$Corrente[18] = I_0$$

$$Corrente[19] = I_1$$

Logo,

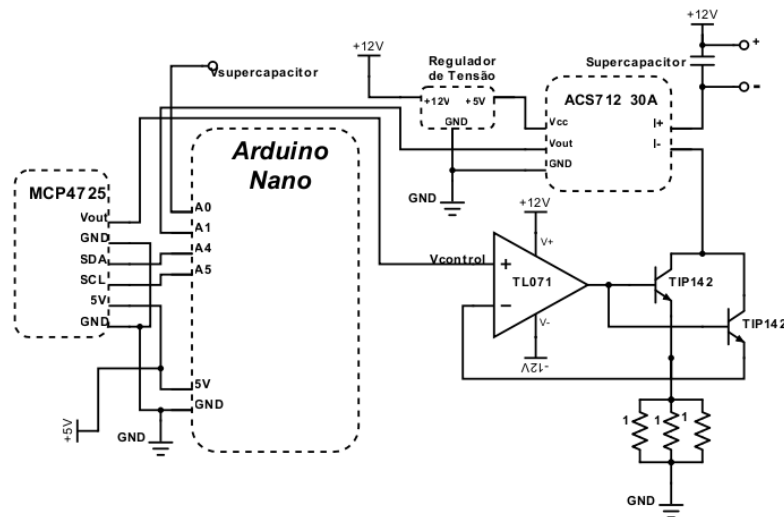
$$Média = \frac{Corrente[0] + Corrente[1] + \dots + Corrente[18] + Corrente[19]}{20} \quad (3.11)$$

Onde  $I_1$  é o novo valor lido pelo sensor e assim sucessivamente. Desse modo, consegue-se realizar uma leitura mais fiel da enviada pelo sensor, de forma que *Média* será o valor identificado no código como a corrente da fonte, que pode ser visto no código abaixo. Além disso, esse código já apresenta a correção do *offset* de leitura.

```
void timerIsr(){
    if(y==0){
        for( int t=0 ; t<20 ; t++){
            int Tensao_Corrente=analogRead(A1); // VALOR LIDO PELO ARDUINO ORIGINADO DO SENSOR
            vetor[t]=Tensao_Corrente; // FORMA O PRIMEIRO VETOR COM OS PRIMEIROS VALORES CAPTURADOS
        }
    }
    if(y==1){ // CONDIÇÃO QUE JÁ HOUVE O PRIMEIRO VETOR CRIADO
        for( int u=0 ; u<19 ; u++){
            vetor[u]=vetor[u+1]; // DESLOCA-SE UMA POSIÇÃO NO PRIMEIRO VETOR ANTERIOR
        }
        vetor[19]=analogRead(A1); // NOVO VALOR CAPTURADO PELO SENSOR
    }
    media=0.0; // ZERA O VALOR DA CORRENTE PARA INICIAR A NOVA SOMA DO VETOR
    for( int s=0 ; s<20 ; s++){
        media=media+vetor[s]; // SOMA DE TODOS OS VALORES DO VETOR DA CORRENTE
    }
    media=(media/20.0); // MÉDIA ARITMÉTICA DO VETOR DA CORRENTE
    media=media-float(offset); // CORREÇÃO DO OFFSET COM O VALOR IDENTIFICADO NO CÓDIGO ANTERIOR
    CORRENTE= media*(5.0/1024.0); // CONVERSÃO DO VALOR INTEIRO EM TENSÃO
    CORRENTE=2.5-CORRENTE; // RESULTADO DA TENSÃO DEVIDO A CORRENTE
    CORRENTE= CORRENTE/(0.066); // VALOR DA CORRENTE EM AMPERES POR MEIO DA RESOLUÇÃO
    y=1;
}
```

Para visualização de todo o sistema interligado construiu-se o diagrama da Figura 36, onde é possível observar partes da fonte de corrente e seus circuitos auxiliares. Além disso, apresenta o local em que será adicionado o supercapacitor.

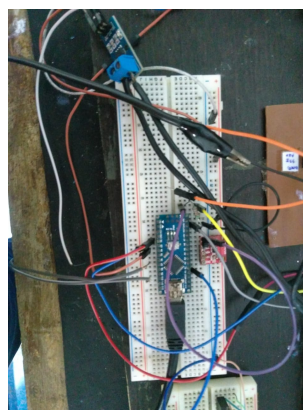
Figura 36 – Esquema em Blocos da Bancada de Corrente e seus Auxiliares



Fonte: Produção do próprio autor.

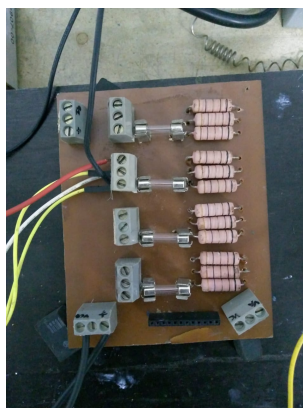
O Sensor e o DAC, os Bancos de Resistores, Amplificadores e Transistores podem ser vistos na Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40, respectivamente.

Figura 37 – Ligação do Sensor e o DAC no Arduino



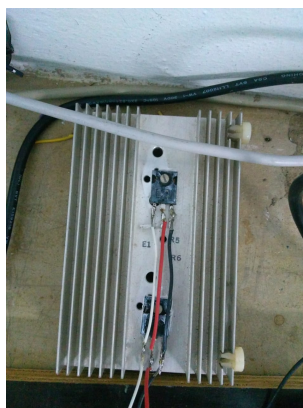
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 38 – Banco de Resistores



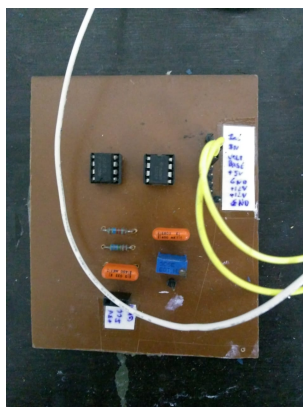
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 39 – Banco de Transistores TIP142



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 40 – Amplificador do circuito da Figura 25

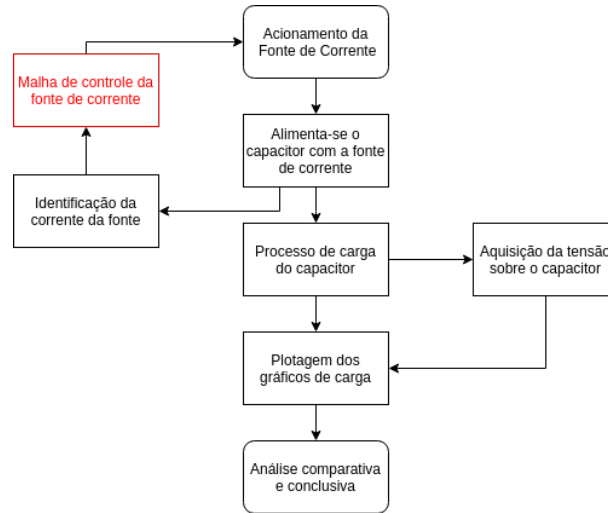


Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.3 Malha de controle

O fluxograma da Figura 41 destaca a etapa que será detalhada nesta Seção.

Figura 41 – Fase da Malha de Controle



Fonte: Produção do próprio autor.

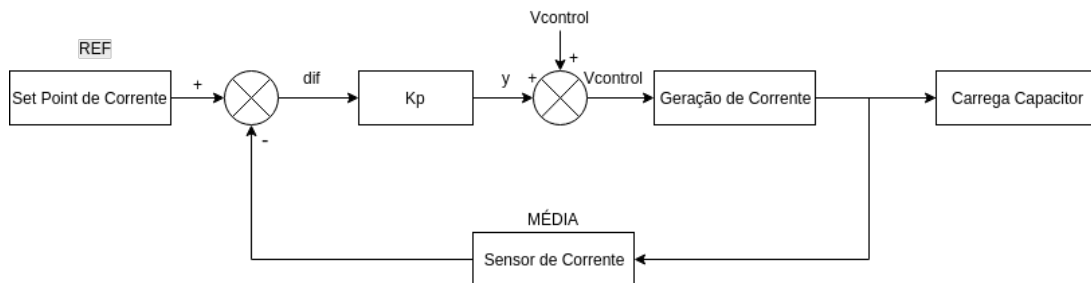
Para o controle da fonte foi projetada uma malha, por meio de *software* no Arduino, responsável por identificar a corrente que carrega o capacitor e aplicar o controle na fonte controlada projetada para que a corrente mantenha-se constante. A malha pode ser vista na Figura 42.

Visto a simplicidade do circuito e pela carga utilizada para controlar a corrente ser puramente resistiva, optou-se por utilizar um controlador proporcional. Esse controle é realizado pela relação entre saída( $y(t)$ ) e entrada( $x(t)$ ) no controlador chamada de  $K_p$  (OGATA, 2003).

$$y(t) = K_p \cdot x(t),$$

de modo que a entrada do controlador é o erro entre a corrente atual na fonte e o valor desejado.

Figura 42 – Malha de controle



Fonte: Produção do próprio autor.

O erro, chamado de *dif* na malha da Figura 42, é encontrado por:

$$dif = REF - MÉDIA \quad (3.12)$$



Logo, realiza-se o controle proporcional de forma que a saída do controlador seja:

$$y = K_p \cdot dif$$

De tal forma que, quanto maior for o ganho, menor será o erro estacionário e maior será o tempo para a estabilização. Além disso, em certos casos, altos valores de  $K_p$  podem gerar uma resposta oscilatória (Ogata). Portanto, para o presente trabalho, utilizou-se uma constante  $K_p$  que pudesse minimizar o erro aceitável e que não promovesse oscilação da corrente.

Então, logo após a realização do controle, a tensão que alimenta a fonte é ajustada para que seja gerada uma corrente mais próxima possível daquela desejada. Dessa forma, tem-se que:

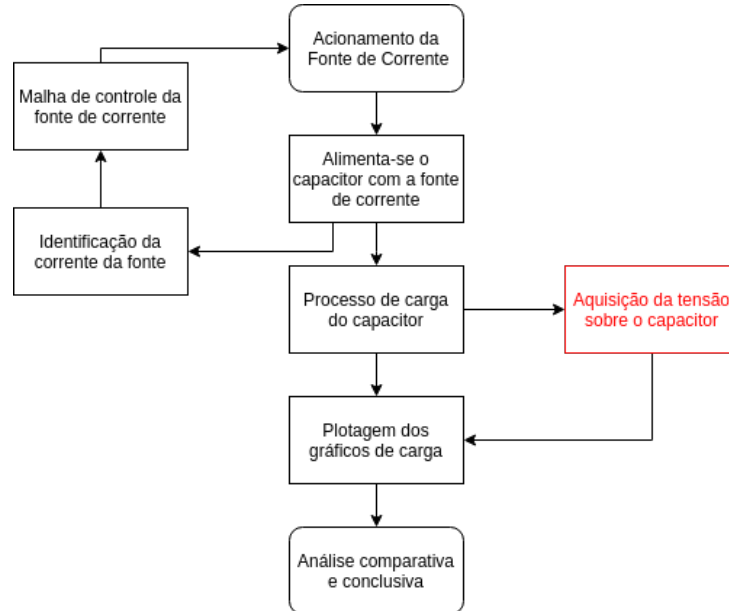
$$V_{control_{novo}} = V_{control} + K_p \cdot dif \quad (3.13)$$

De maneira que:

$$I_e = \frac{V_{control_{novo}}}{0,33}$$

### 3.4 Aquisição da tensão sob o capacitor

Figura 43 – Fase de Aquisição da Tensão

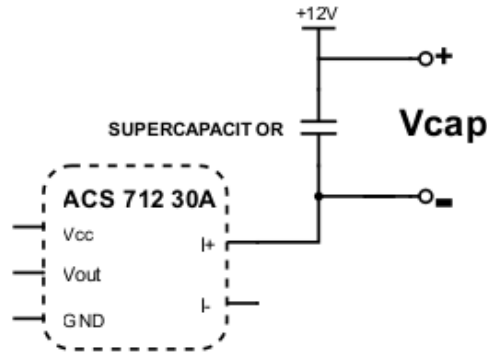


Fonte: Produção do próprio autor.

A partir de então, foi construído um circuito capaz de capturar a diferença de potencial nos terminais do capacitor da Figura 44.

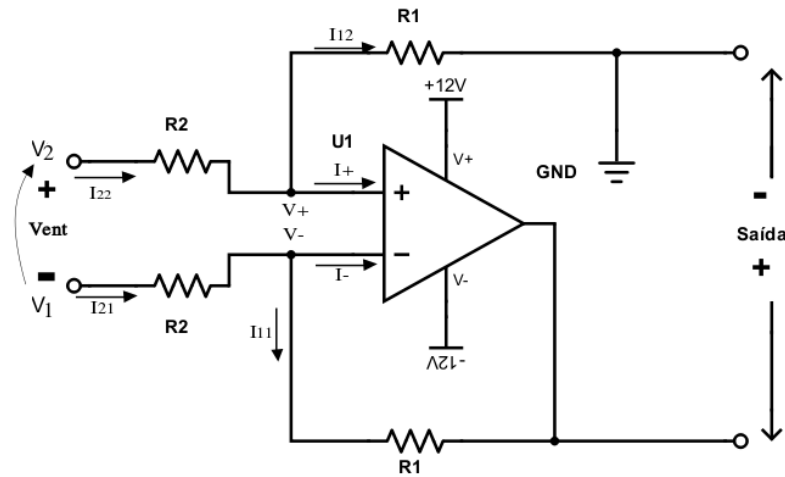
O circuito foi baseado no amplificador conhecido como Amplificador Diferencial que é apresentado na Figura 45.

Figura 44 – Tensão Capturada



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 45 – Circuito de Amplificador Diferencial



Fonte: Produção do próprio autor.

Este circuito é capaz de amplificar a diferença  $V_{ent}$  entre as tensões  $V_1$  e  $V_2$  da Figura 45 (MALVINO, 1987). Onde,

$$V_{ent} = V_2 - V_1$$

Considerando o amplificador ideal, ou seja, as correntes  $I^+ = I^- \simeq 0$ , o ganho da tensão é encontrado aplicando a Lei de Kirchoff para Corrente no nó  $V^+$  e no nó  $V^-$  de forma que (MALVINO, 1987):

$$I_{22} = I_{12} + I^+$$

$$I_{22} = I_{12} \quad (3.14)$$

Como,

$$I_{22} = \frac{V_2 - V^+}{R_2} \quad (3.15)$$

e,

$$I_{12} = \frac{V^+}{R_1} \quad (3.16)$$

Substituindo a Equação 3.15 e a Equação 3.16 na Equação 3.14, tem-se que:

$$V^+ = V_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.17)$$

Também encontra-se que:

$$I_{21} = I_{11} + I^- \quad (3.18)$$

Como,

$$I_{21} = \frac{V_1 - V^-}{R_2} \quad (3.19)$$

e,

$$I_{12} = \frac{V^- - V_{saída}}{R_1} \quad (3.20)$$

Substituindo a Equação 3.19 e a Equação 3.20 na Equação 3.18, tem-se que:

$$V^- = \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left( \frac{V_1}{R_2} + \frac{V_{saída}}{R_1} \right) \quad (3.21)$$

Considerando o amplificador operacional ideal, pode-se aplicar o curto circuito virtual (Malvino/Vol2). O que implica em:

$$V^+ = V^- \quad (3.22)$$

Logo, conclui-se que substituindo a Equação 3.17 e a Equação 3.21 na Equação 3.22 tem-se que:

$$V_{saída} = \frac{R_1}{R_2} (V_2 - V_1) \quad (3.23)$$

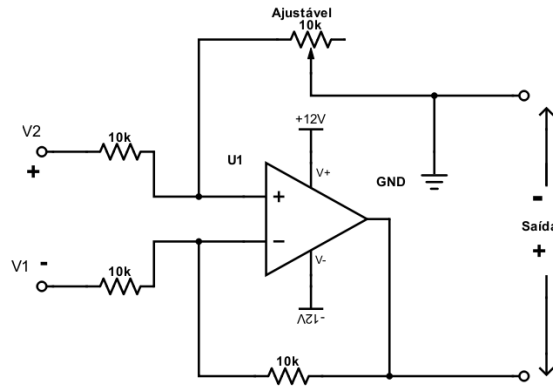
No entanto, como a tensão do capacitor varia de 0 a 2,7 V, não será necessário amplificar  $V_{ent}$  e então definiu-se que  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ . Logo,

$$V_{saída} = \frac{R_1}{R_2} \cdot (V_2 - V_1) = V_2 - V_1$$

Porém, sabe-se que é muito difícil encontrar resistores com valores idênticos ao outro, portanto adicionou-se um potenciômetro no circuito substituindo um dos resistores como visto na Figura 46.

Assim, é possível ajustar o resistor para que o ganho seja unitário. O ajuste é feito aplicando um  $V_{ent}$  conhecido e ao mesmo tempo variando a resistência do potenciômetro até que

Figura 46 – Banco de Captura da Tensão

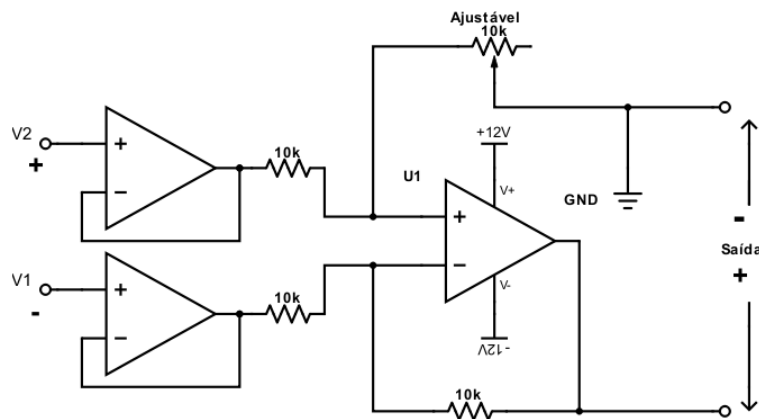


Fonte: Produção do próprio autor.

$$V_{saída} = V_{ent}.$$

Porém, esse circuito sofre com um grande problema, a baixa impedância provocada pelas resistências de entrada no amplificador. Com isso é necessário adicionar um seguidor de tensão em cada sinal de entrada, conhecido como *buffer*, de maneira que o circuito seja como o da Figura 47.

Figura 47 – Circuito de Instrumentação

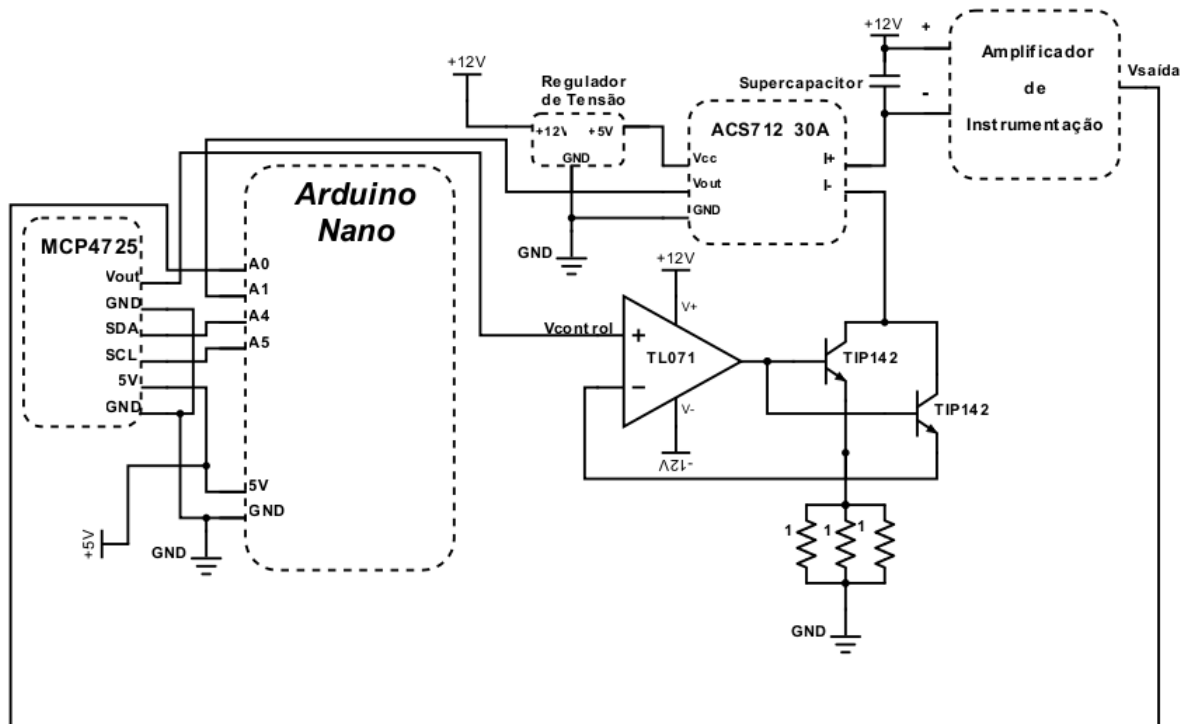


Fonte: Produção do próprio autor.

Esse circuito é conhecido como Amplificador de Instrumentação, que dentre das suas vantagens, há baixo ruído e baixa impedância de saída por meio de uma realimentação em curto que caracteriza o ganho unitário. Portanto, o diagrama em blocos da Figura 36 pode ser completado na Figura 48, de maneira que aplica-se os mesmos conceitos de *offset* e média móvel explicados na Seção 3.3, como visto nos códigos abaixo.

O *offset* é corrigido com o seguinte código:

Figura 48 – Diagrama em Blocos Completo



Fonte: Produção do próprio autor.

```
void setup() {
    dac.setVoltage(0, false); // Comando responsável por enviar a tensão Vcontrol
    // 0-4096 => 0-5V. Nesse caso, Vcontrol=0V.

    zero1=analogRead(A0); // Leitura do valor da tensão sobre o capacitor feita pelo sensor.
    offset1=zero1-0; // É o valor do desvio no offset. Esse valor será descontado
    // ou adicionado no valor detectado pelo amplificador de instrumentação para que seja
    // realizada a correção do offset. Onde, 0 é o valor esperado da tensão.
}
```

Já o filtro é realizado também por um *firmware* aplicado pelo código seguinte:

```
void timerIsr(){
    if(y==0){
        for( int t=0 ; t<20 ; t++){
            int Tensao=analogRead(A0); // VALOR LIDO PELO ARDUINO ORIGINADO DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO
            vetor1[t]=Tensao; // FORMA O PRIMEIRO VETOR COM OS PRIMEIROS VALORES DE TENSÃO CAPTURADOS
        }
    }

    if(y==1){ CONDIÇÃO QUE JÁ HOUVE O PRIMEIRO VETOR CRIADO
```

```

    for( int u=0 ; u<19 ; u++){

        vetor1[u]=vetor1[u+1]; // DESLOCA-SE UMA POSIÇÃO NO PRIMEIRO VETOR ANTERIOR
    }

    vetor1[19]=analogRead(A0); // NOVO VALOR CAPTURADO PELO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO
}

mediato=mediato*(5.0/1024.0);mediat=0.0; // ZERA O VALOR DA CORRENTE PARA INICIAR A NOVA SOMA DO VETOR
for( int s=0 ; s<20 ; s++){

    mediat=mediat+vetor[s]; // SOMA DE TODOS OS VALORES DO VETOR DA TENSÃO
}

mediato=mediat/20.0; // MÉDIA ARITMÉTICA DO VETOR DA TENSÃO
mediato=mediato-float(offset1); // CORREÇÃO DO OFFSET COM O VALOR IDENTIFICADO NO CÓDIGO ANTERIOR
Tensao_cap= mediato*(5.0/1024.0); // CONVERSÃO DO VALOR INTEIRO EM TENSÃO
y=1;
}

```

Na próxima seção serão plotados os dados capturados pelo Arduino. Esses dados serão a tensão sobre o supercapacitor e a corrente fornecida pela fonte.

### 3.5 Algoritmos para plotagem das Curvas de Carga

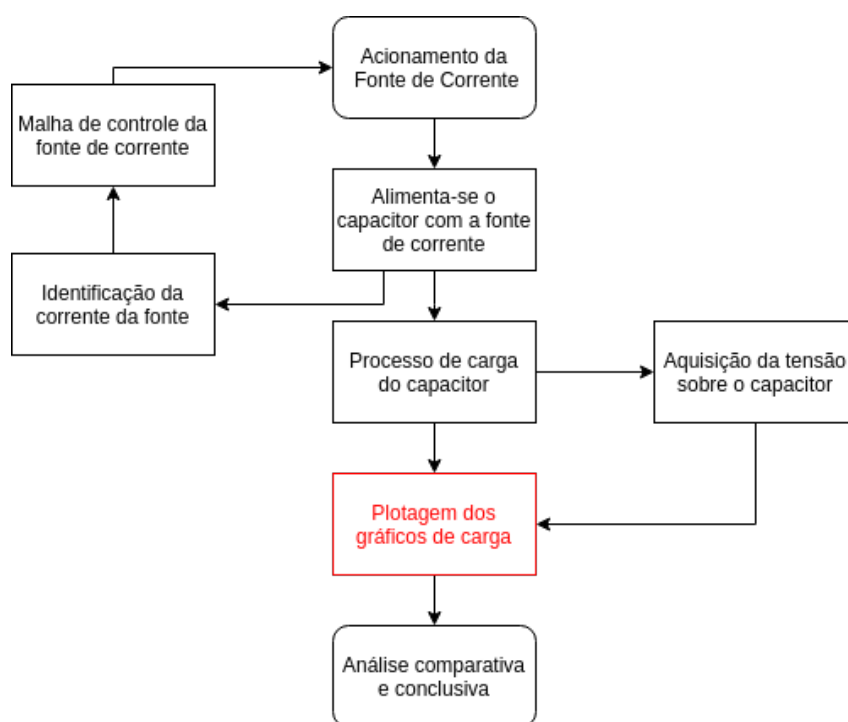
Nesta seção será abordada a utilização do Python como linguagem para a plotagem dos gráficos apresentados no Capítulo 4.

Esse *software* apresenta algumas vantagens que contribuíram para essa escolha. São elas:

- Simples e intuitivo;
- gratuito;
- acessível com bibliotecas abertas e módulos reutilizáveis;
- possui bibliotecas que facilitam a comunicação serial com o Arduino.

Utilizou-se para a plotagem dos dados as bibliotecas *matplotlib* e *pySerial*. O *matplotlib* é uma biblioteca de plotagem 2D utilizada por *script* no Python, semelhante ao Matlab (DROETTBOOM, 2012). Nessa biblioteca foi possível plotar os dados de tensão e a corrente presentes no supecapacitor. Já a *pySerial* é responsável por comunicação entre o Arduino, Computador e o Python, transmitindo por meio da UART do Arduino os valores de corrente e tensão.

Figura 49 – Fase de Plotagem dos dados de Carga



Fonte: Produção do próprio autor.

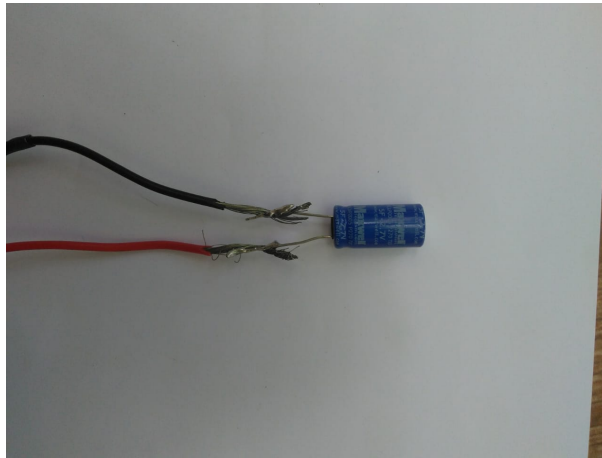
## 4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados experimentais para os seguintes supercapacitores ensaiados: 5 F/2,7 V; 25 F/2,7 V e 400 F/2,7 V.

### 4.1 Supercapacitor de 5 F

Para a realização desta etapa, utilizou-se o capacitor da Figura 50.

Figura 50 – Capacitor Maxwell de 5F BCAP005



Fonte: Produção do próprio autor.

Em acordo com o *datasheet* da Maxwell, para a realização do teste é ideal que a corrente obedeça a razão de  $I = 100 \text{ mA}/F$  ou uma corrente diferente que esteja dentro do limite máximo especificado pelo fabricante (MAXWELL, 2015). Para o capacitor da série HC da Maxwell, conforme com o seu *datasheet*, tem-se os dados da Tabela 1.

Tabela 1 – Dados do capacitor Maxwell HC5F/2,7V

Especificações Elétricas	BCAP005
Capacitância nominal	5F
Capacitância mínima, inicial	4F
Máximo $ESR_{DC}$ , inicial	170m $\Omega$
Corrente de teste para capacitância e $ESR_{DC}$	0.5A
Tensão nominal (65°/85°C)	2.7/2.3V
Tensão absoluta máxima	2.85V
Corrente absoluta máxima	3.2A
Corrente de fuga em 25° C, máximo	0.015mA

Fonte: DATASHEET MAXUELL HC SERIES ULTRACAPACITORS: Modificado pelo autor

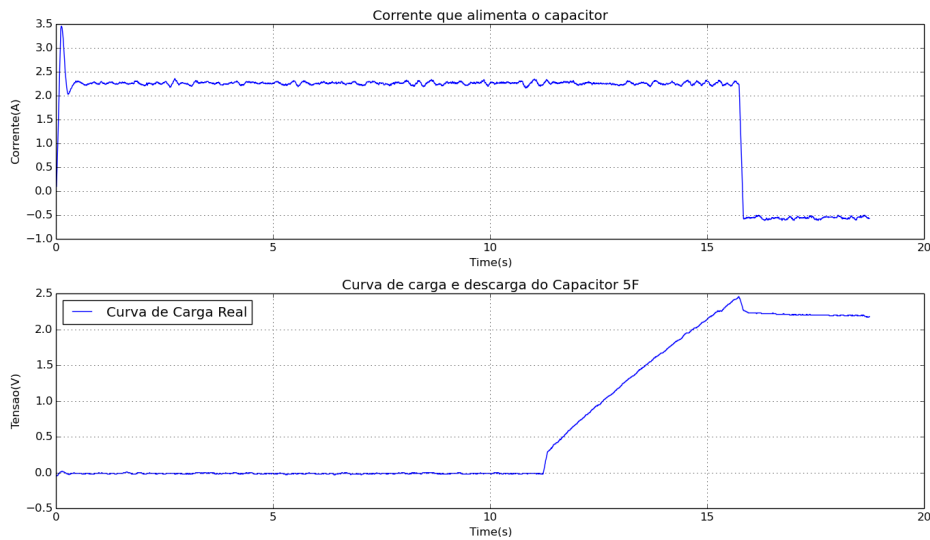


De acordo com a Tabela 1 entende-se que a corrente de teste para esse capacitor esteja no seguinte intervalo:

$$0,5A \geq I_{teste} \geq 3,2A \quad (4.1)$$

Para realizar um processo de carga mais rápido e que não arriscasse ultrapassar a corrente máxima, realizou-se o processo de carga do capacitor com a corrente de 2.3 A. Esse processo consiste no acionamento da fonte de corrente a partir de um certo tempo de modo que, inicialmente o capacitor estará em curto-circuito para que a corrente seja estabilizada posteriormente a mesma carregue o capacitor até que ele chegue à tensão de  $V = 2,5 V$ . Após esse momento desliga-se a fonte sendo possível visualizar a queda de tensão devido à Resistência Equivalente(ESR). O resultado encontrado ao final é apresentado na Figura 51.

Figura 51 – Resposta de Carga do capacitor



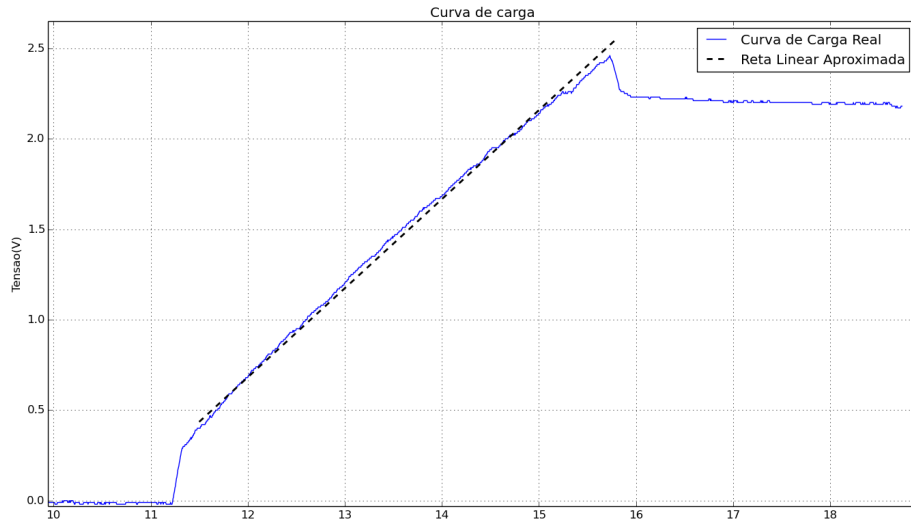
Fonte: Produção do próprio autor.

Em acordo com a Equação 1.20, procurou por uma função linear que pudesse representar o processo de carga desse capacitor. Existe uma função implementada no *Python* pela seguinte linha de código:

```
np.poly1d(np.polyfit(X,Y, 1)),
```

onde X e Y são os valores no eixo x e y respectivamente dos dados coletados pela Serial do Arduino. Essa função realiza a interpolação do intervalo de valores desejados, que nesse caso foi apenas no momento de carga até a tensão máxima alcançada, para aproximar a curva de uma função linear. A função encontrada foi sobreposta à curva real como observado na Figura 52.

Figura 52 – Intervalo de carga do capacitor



A função linear que representa o processo de carga é

$$V_c = 0,4923t - 5,226$$

Que pode ser vista na Figura 52. Onde, em acordo com a Equação 1.20, tem-se que:

$$\frac{I}{C_5} = 0,4923$$

Como o capacitor foi carregado com  $I = 2,3 \text{ A}$ , tem-se que:

$$C_5 = \frac{2,3}{0,4858} = 4,67 \text{ F}$$

Que está dentro do limite apresentado na Tabela 1. Logo, o próximo passo é encontrar o valor de Resistência Série(ESR), portanto, em acordo com a Equação 1.23 e a Figura 53. Tem-se que,

$$V_1 = 2,46 \text{ V}$$

e

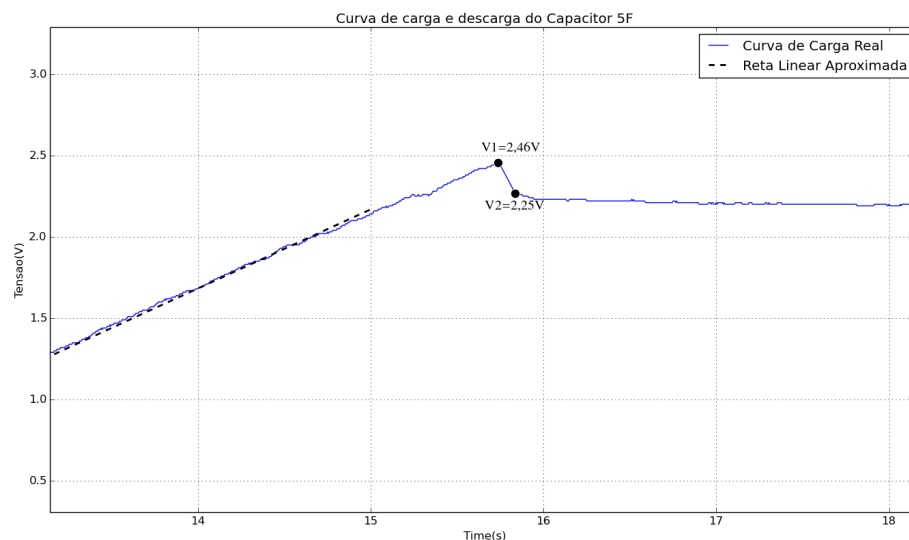
$$V_2 = 2,25 \text{ V}$$

Logo,

$$ESR_5 = \frac{2,46 - 2,25}{2,3} = 70 \text{ m}\Omega$$

Resultado esse que está dentro do limite estabelecido pelo fabricante em acordo com a Tabela 1. Pois, o valor de  $ESR_{DC}$  deve ser menor do que  $170 \text{ m}\Omega$ .

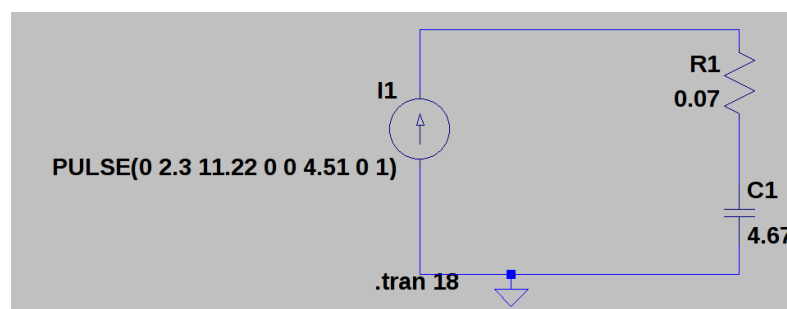
Figura 53 – Queda da Tensão devido à ESR



Fonte: Produção do próprio autor.

Para comprovar os valores encontrados, foi realizada uma simulação no LTspice em acordo com a Figura 54.

Figura 54 – Circuito para simulação

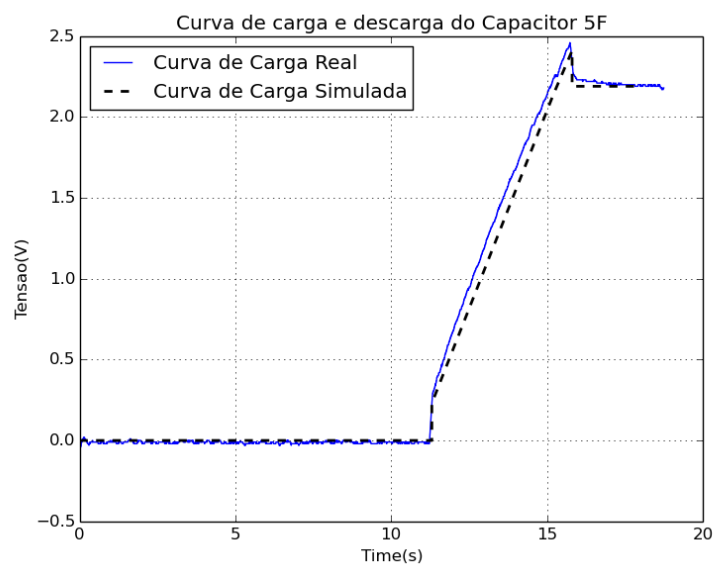


Fonte: Produção do próprio autor.

Foi obtido então o resultado apresentado na Figura 55 com a sobreposição das curvas de tensão real e simulada.

Levando em conta que o resultado simulado não sofre com as pequenas ondulações("ripple") na corrente que foram reduzidas com o sistema de controle da fonte de corrente real, o resultado obtido foi satisfatório.

Figura 55 – Resposta da Simulação

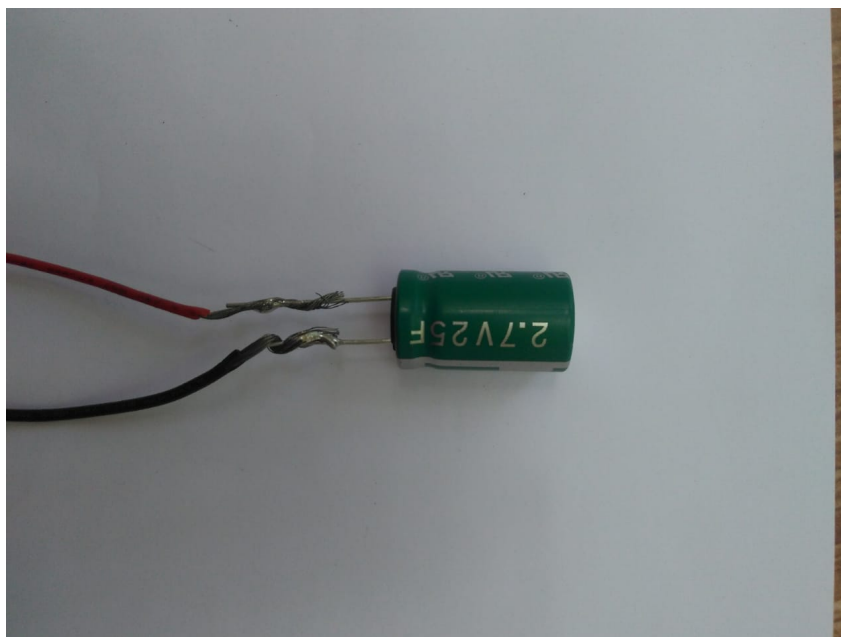


Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.2 Supercapacitor de 25 F

Para a realização desta etapa, utilizou-se o capacitor da Figura 56.

Figura 56 – Capacitor EATON HV de 25F HV1625-2R7256-R



Fonte: Produção do próprio autor.

Utilizando como base a razão para corrente de teste de  $100 \text{ mA}/F$  até a corrente máxima do capacitor, como abordado na Seção 4.1, definiu-se que a corrente de carga do capacitor

de 25 F seria de 3,4 A de acordo com a Tabela 2.

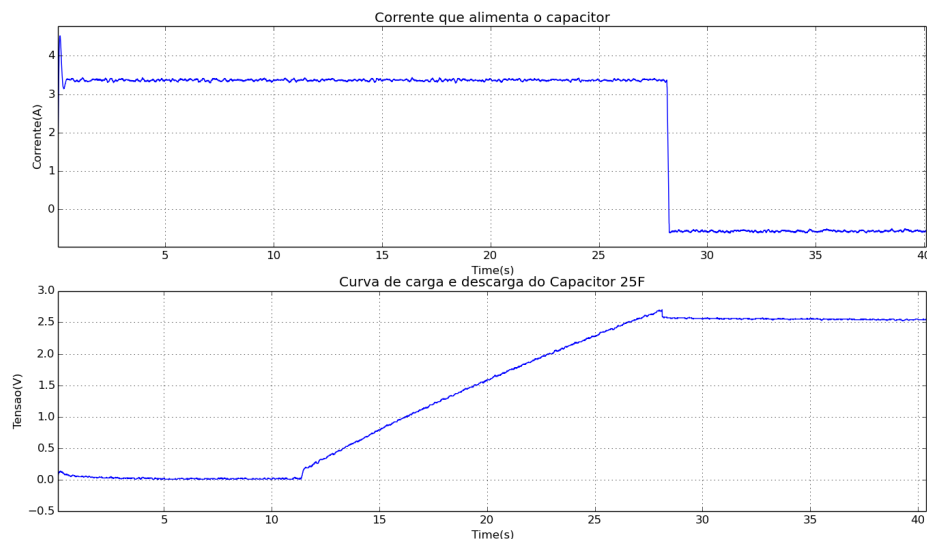
Tabela 2 – Dados do capacitor EATON HV25F/2,7V

Especificações Elétricas	HV1625-2R7256-R
Capacitância Nominal	25F
Capacitância mínima, inicial	22,5F
Máximo $ESR_{DC}$ , inicial	27m $\Omega$
Tensão nominal(25°C/85°C)	2,7/2,3V
Tensão absoluta máxima	3.0V
Corrente absoluta máxima	3.4A
Corrente de fuga em 25°C, máxima	0,045mA

Fonte: DATASHEET EATON HV Supercapacitors: Modificado pelo autor

Portanto, a fonte é mantida até que a tensão atinja 2,7 V e a partir de então desliga-se a fonte. Dessa forma é possível visualizar a reta de carga do capacitor e a queda de tensão devido a Resistência Equivalente(ESR). O resultado encontrado pode ser observado na Figura 57.

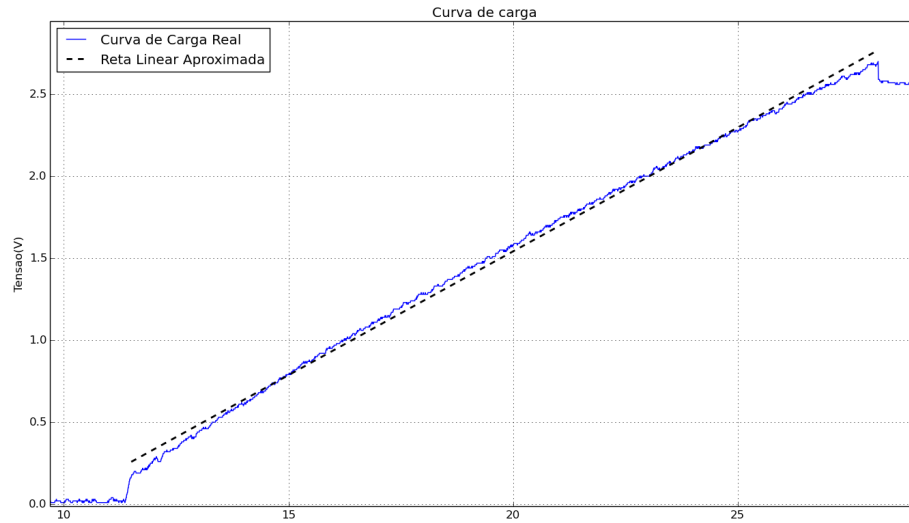
Figura 57 – Resposta de Carga do capacitor



Fonte: Produção do próprio autor.

Idem ao capacitor de 5 F, foi determinada a função linear interpolada pelos dados da curva de carga. A função é extraída pelo intervalo de carga como pode ser visto na Figura 58.

Figura 58 – Intervalo de carga do capacitor



Fonte: Produção do próprio autor.

A função linear que representa o processo de carga é

$$V_c = 0,1509t - 1,477$$

Que pode ser vista na Figura 58. Onde, em acordo com a Equação 1.20, tem-se que:

$$\frac{I}{C_{25}} = 0,1509$$

Como o capacitor foi carregado com  $I = 3,4 \text{ A}$ , tem-se que:

$$C_{25} = \frac{3,4}{0,1509} = 22,53 \text{ F}$$

Que está dentro do limite apresentado na Tabela 2. Logo, o próximo passo é encontrar o valor de Resistência Série(ESR), portanto, em acordo com a Equação 1.23 e a Figura 59. Tem-se que,

$$V_1 = 2,7 \text{ V}$$

e

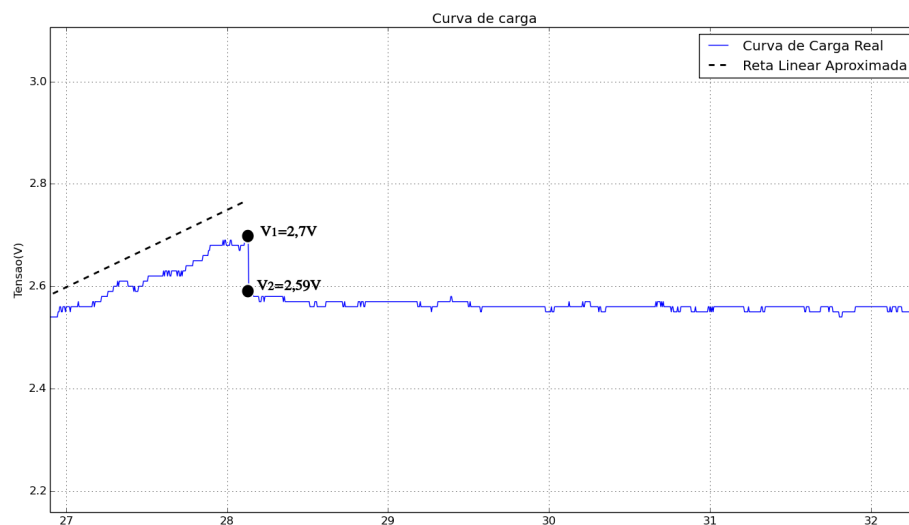
$$V_2 = 2,59 \text{ V}$$

Logo,

$$ESR_{25} = \frac{2,7 - 2,59}{3,4} = 32,3 \text{ m}\Omega$$

O que se aproxima muito do parâmetro no *datasheet* do fabricante que de acordo com a Tabela 2 deve ser menor do que  $27 \text{ m}\Omega$ .

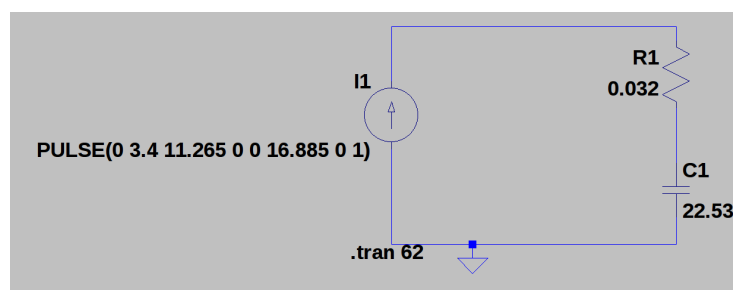
Figura 59 – Queda da Tensão devido à ESR



Fonte: Produção do próprio autor.

Para comprovar os valores encontrados, idem ao capacitor de 5F, realizou-se simulação no LTspice de acordo com a Figura 60.

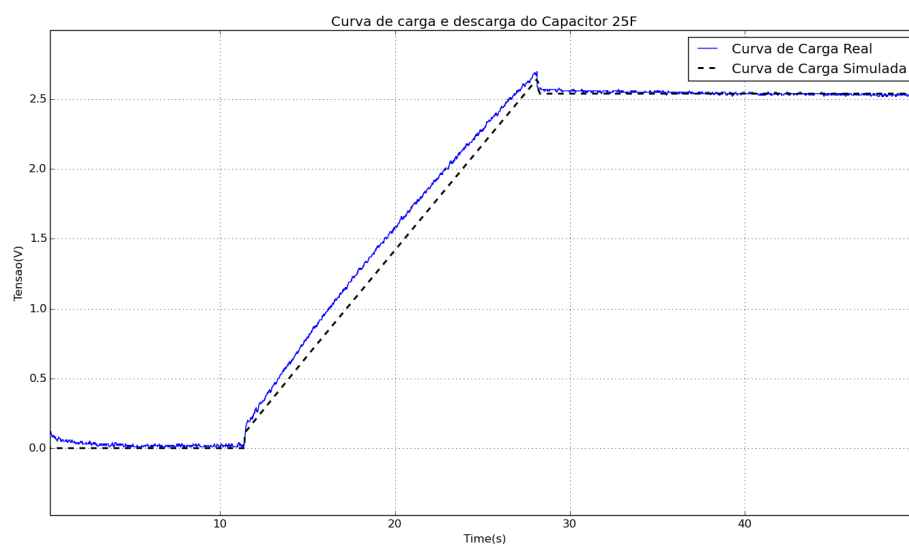
Figura 60 – Circuito para simulação com 22,53 F



Fonte: Produção do próprio autor.

Obteu-se então o resultado apresentado na Figura 61 idem o capacitor de 5F.

Figura 61 – Resposta da Simulação com 22,53 F



Fonte: Produção do próprio autor.

### 4.3 Supercapacitor de 400 F

Optou-se por realizar a mesma experiência realizada nos capacitores de 5 F e 25 F, dentro dos limites pelos quais a fonte se encontra, em um capacitor de 400 F.

Para a realização desta experiência, utilizou-se o capacitor da Figura 62.

Figura 62 – Capacitor EATON de 400 F XV3560-2R7407-R



Fonte: Produção do próprio autor.



Utilizando como base a razão para corrente de teste de  $100\text{ mA}/F$  até a corrente máxima do capacitor, como abordado na Seção 4.1, entende-se que a corrente de carga deveria ser de 26 A em acordo com a Tabela 3. Porém, lembrando-se que a corrente máxima gerada pela fonte é de 5 A. Para efeitos de comparação, realizou-se um processo semelhante aos outros dois capacitores com a corrente de carga igual a  $I_{m\acute{a}x}$  da fonte.

Tabela 3 – Capacitor EATON XV400F/2,7V

Especificações Elétricas	HV1625-2R7256-R
Capacitância nominal	400F
Capacitância máxima, inicial	440F
Capacitância mínima, inicial	380F
Máximo $ESR_{DC}$ , inicial	$3.2m\Omega$
Tensão nominal( $25^{\circ}C/85^{\circ}C$ )	2,7/2,3V
Tensão absoluta máximo	2.85V
Corrente absoluta mínima	26A
Corrente de Fuga em $25^{\circ}C$ , máximo	0,85mA

Fonte: Capacitor EATON XV 400F XV3560-2R7407-R: Modificado pelo autor

Além disso, foram extraídos dados do *datasheet* do Capacitor EATON que podem ser vistos na Tabela 4. Eles são de grande importância, pois identificam as possíveis variações de Capacitância(C) e Resistência Série(ESR) ao longo do tempo.

Tabela 4 – Performance do Capacitor EATON XV400F/2,7V ao longo do tempo sem Carga

Parâmetros	Tempo	Mudança de capacitância (% do valor inicial)	ESR(% do valor máximo inicial)
$-40^{\circ}C$ to $+65^{\circ}C$	1500 horas	$\leq 20\%$	$\leq 200\%$
$\leq 30^{\circ}C$	3 anos	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$

Fonte: Capacitor EATON XV 400F XV3560-2R7407-R: Modificado pelo autor

A Tabela 4 detalha as variações da Capacitância e Resistência Série do capacitor para intervalos de tempo sem a utilização do mesmo, ou seja, sem que ele seja carregado. Há duas condições abordadas na referida tabela que relaciona a variação ao ambiente pelo qual ele estava imerso.

Pode ser visto na Tabela 4 que para a inutilização do capacitor por 1500 horas em um ambiente com temperatura dentro de intervalo do  $-40^{\circ}C$  a  $+65^{\circ}C$ , a Capacitância pode sofrer uma variação de até 20% do valor inicial enquanto que a Resistência Série pode sofrer uma variação de até 200%.

A segunda condição pela qual pode provocar variações é a inutilização do capacitor por três anos em um ambiente com temperatura menor ou igual a  $30^{\circ}C$ . Nesta condição,

a Capacitância pode sofrer uma variação de até 5% enquanto que a Resistência Série pode sofrer com uma variação de até 10%.

Em acordo com a Tabela 3, nota-se que

$$380 \leq C_{incial} \leq 440 \quad (4.2)$$

O capacitor utilizado para essa experiência se encontra na primeira condição, de maneira que:

$$380.0,8 \leq C_{400} \leq 440.1,2 \quad (4.3)$$

Então,

$$304 \leq C_{400} \leq 528 \quad (4.4)$$

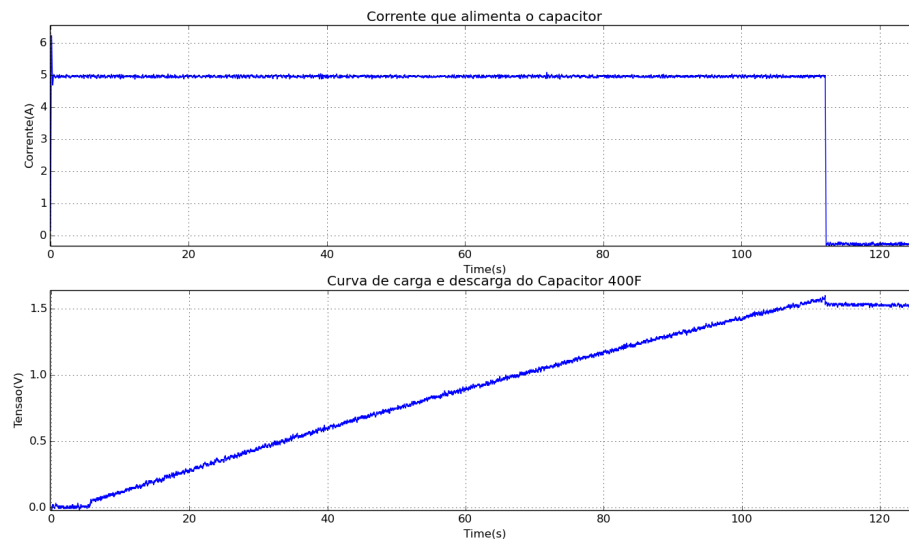
Já a resistência  $ESR_{DC}$  terá uma variação de:

$$ESR_{DC} \leq 3,2.(1 + 200\%)\Omega \quad (4.5)$$

$$ESR_{DC} \leq 9,6 \text{ m}\Omega \quad (4.6)$$

O resultado encontrado é apresentado na Figura 63.

Figura 63 – Resposta de Carga do Capacitor



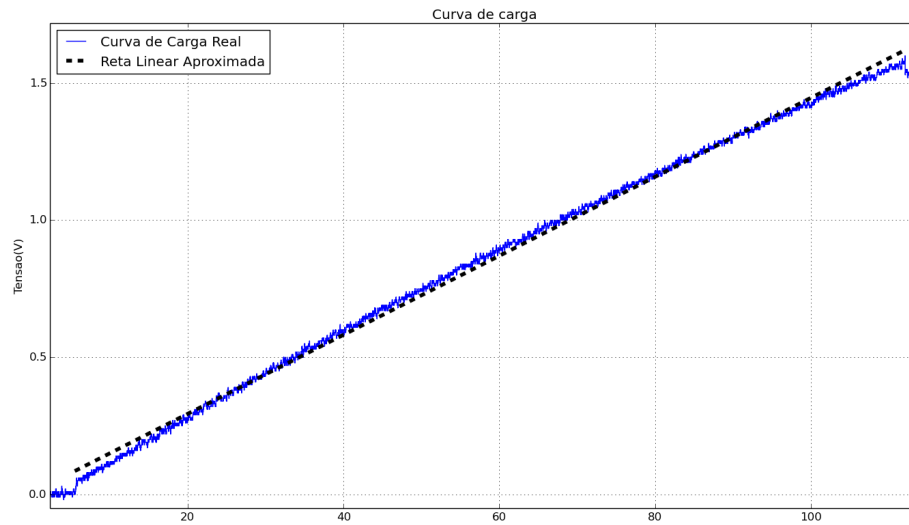
Fonte: Produção do próprio autor.

Em acordo com a Equação 1.20, foi determinada uma função linear interpolada de forma semelhante aos capacitores 5 F e 25 F que pode ser vista na Figura 64.

A função linear que representa o processo de carga é

$$V_c = t = 0,01441t - 0,1057$$

Figura 64 – Intervalo de carga do Capacitor



Fonte: Produção do próprio autor.

Onde, em acordo com a Equação 1.20 tem-se que:

$$\frac{I}{C_{400}} = 0,01441$$

Como o capacitor foi carregado com  $I = 5,0$ , tem-se que:

$$C_{400} = \frac{5,0}{0,01441} = 346,98 \text{ F}$$

Que está dentro do limite apresentado pelo intervalo da Equação 4.4. Logo, o próximo passo é encontrar o valor de Resistência Série(ESR), portanto, em acordo com a Equação 1.23 e a Figura 65.

Tem-se que,

$$V_1 = 1,6 \text{ V}$$

e

$$V_2 = 1,54 \text{ V}$$

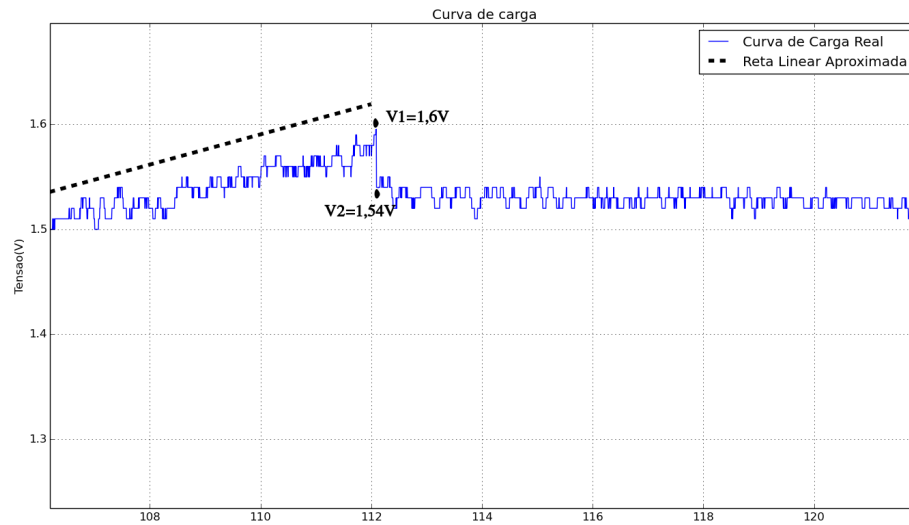
Logo,

$$ESR_{400} = \frac{1,6 - 1,54}{5,0} = 12 \text{ m}\Omega$$

Que está próximo ao limite da Equação 4.5.

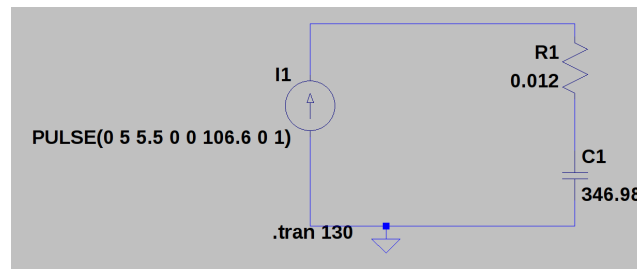
Para comprovar os valores encontrados, idem aos capacitores 5 F e 25 F, realiza-se simulação no LTspice de acordo com a Figura 66.

Figura 65 – Queda da Tensão devido à ESR



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 66 – Circuito para simulação



Fonte: Produção do próprio autor.

Obteu-se então o resultado apresentado na Figura 67 idem aos capacitores de 5 F e 25 F. Portanto tem-se ao final dos três experimentos, os valores encontrados apresentados na Tabela 5. Sendo que o valor de ESR para os capacitores da EATON de 22,53 F e 346,98 F foram maiores do que esperava-se. Porém, o erro de leitura da resistência pode ser calculado como,

$$Erro_{ESR25} = 32m - 27m = 5m\Omega$$

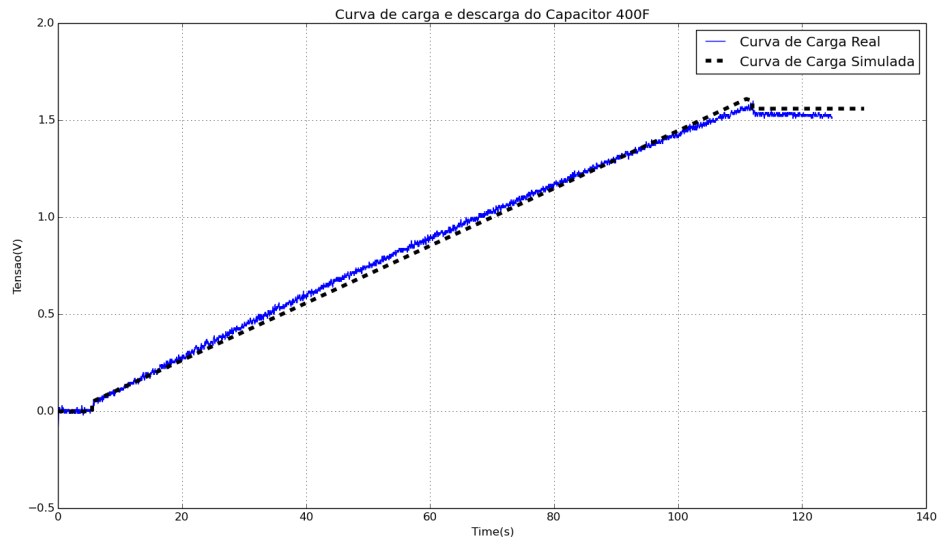
para o capacitor de 22,53 F e

$$Erro_{ESR400} = 12m - 9,6m = 2,4m\Omega$$

para o capacitor de 346,98 F.

Logo, entende-se que levando em consideração às imperfeições naturais de um circuito e os valores tão pequenos de resistência, consideram-se os resultados satisfatórios e condizentes

Figura 67 – Resposta da Simulação



Fonte: Produção do próprio autor.

com os capacitores apresentados.

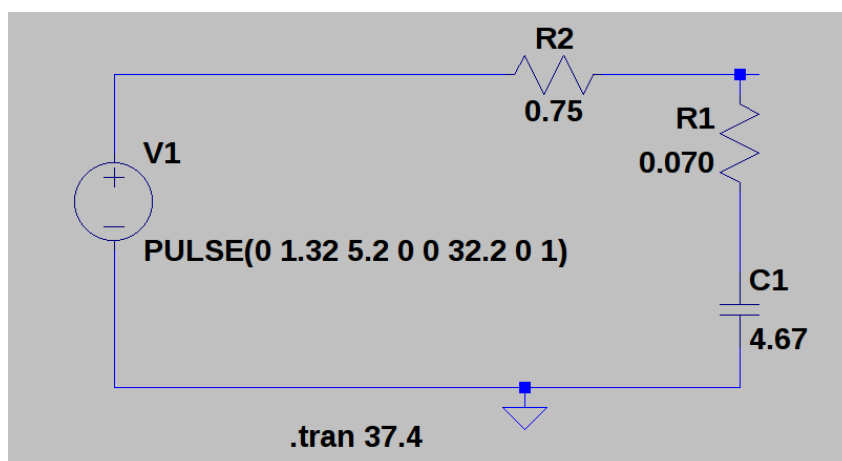
Tabela 5 – Valores de Capacitância e Resistência Série Equivalente encontrados com as curvas de carga

Parâmetros	Capacitância	
	Real	ESR
Capacitor 5F	4,67 F	70 $m\Omega$
Capacitor 25F	22,53 F	32 $m\Omega$
Capacitor 400F	346,98 F	12 $m\Omega$

#### 4.4 Avaliação e comparação dos resultados obtidos

Para comprovar os valores encontrados com a fonte de corrente, submeteu-se os mesmos capacitores a um processo de carga com tensão constante. A partir de então, capturou-se os valores de tensão como apresentado na Seção e posteriormente foram apresentadas as curvas de carga real e simulada sobrepostas em acordo com valores encontrados na Tabela 5. Para o primeiro capacitor de 4,67 F foi contruído o circuito da Figura 68 onde a resistência  $R_1$  foi adicionada para limitar a corrente de fornecimento, que para a fonte utilizada é no máximo de 2,4 A.

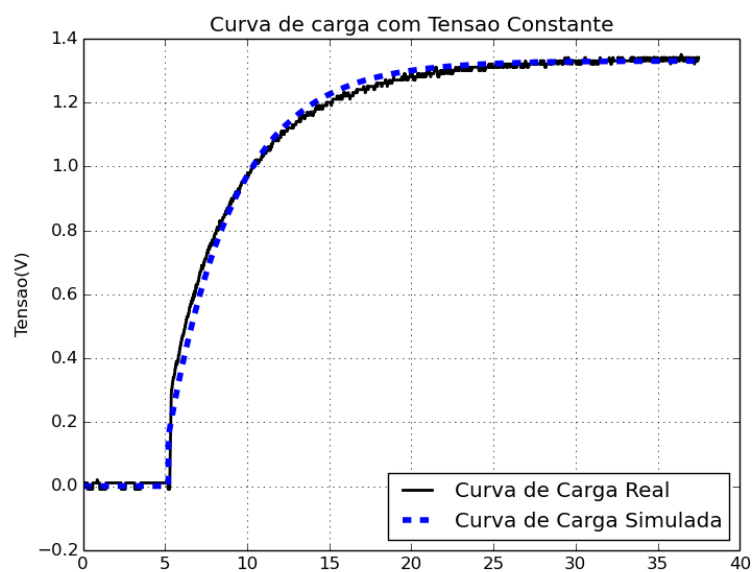
Figura 68 – Circuito de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 4,67 F



Fonte: Produção do próprio autor.

De modo que o resultado pode ser visto na Figura 69.

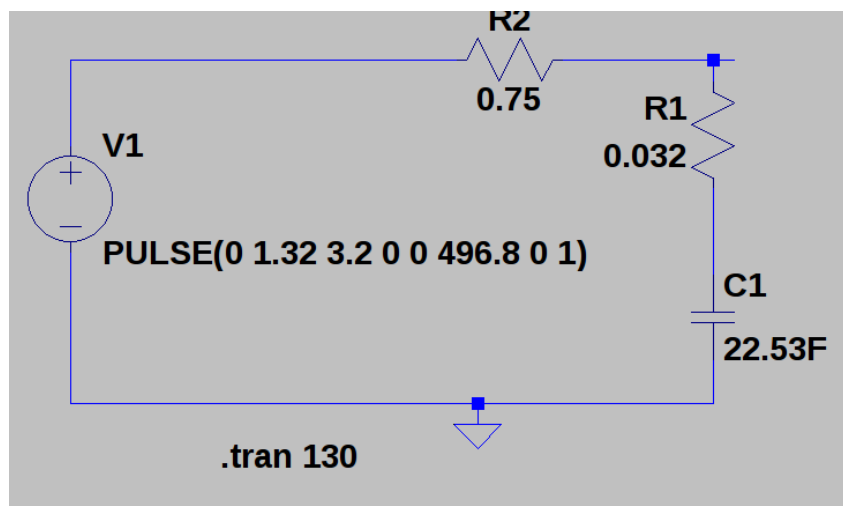
Figura 69 – Curva sobreposta de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 4,67 F



Fonte: Produção do próprio autor.

Da mesma maneira realizou-se a carga com tensão constante de 1,32 V para o capacitor de 22,53 F, em acordo com o circuito da Figura 70.

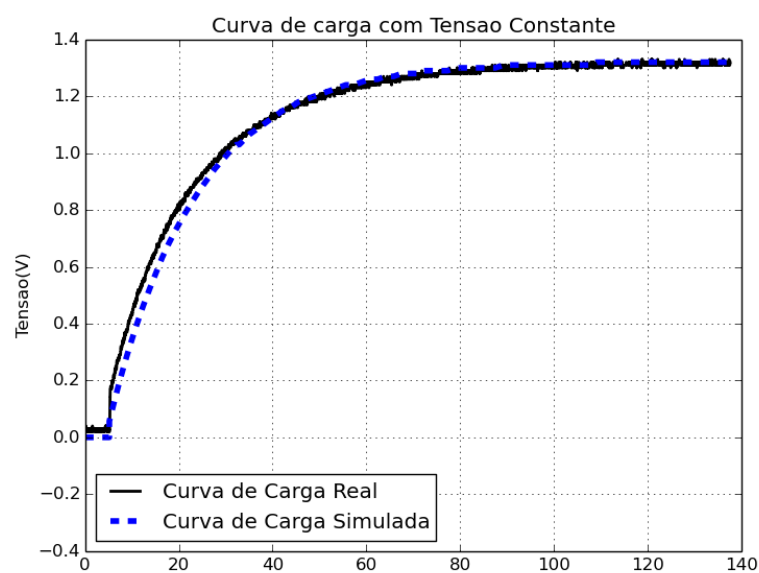
Figura 70 – Circuito de Carga com Tensão Constante para Capacitor de 22,53 F



Fonte: Produção do próprio autor.

De modo que o resultado pode ser visto na Figura 71.

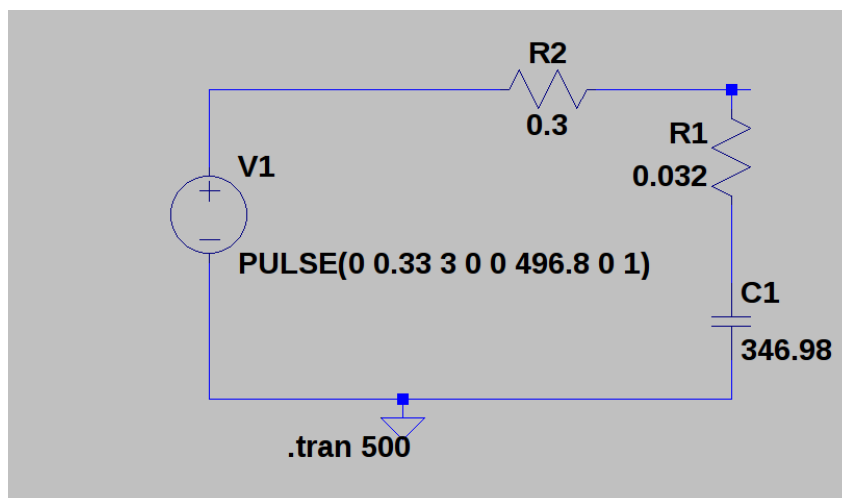
Figura 71 – Curva sobreposta de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 22,53 F



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, realizou-se o mesmo processo para o capacitor de 346,98 F alimentado por uma fonte de 0,33 V, em acordo com o circuito da Figura 72.

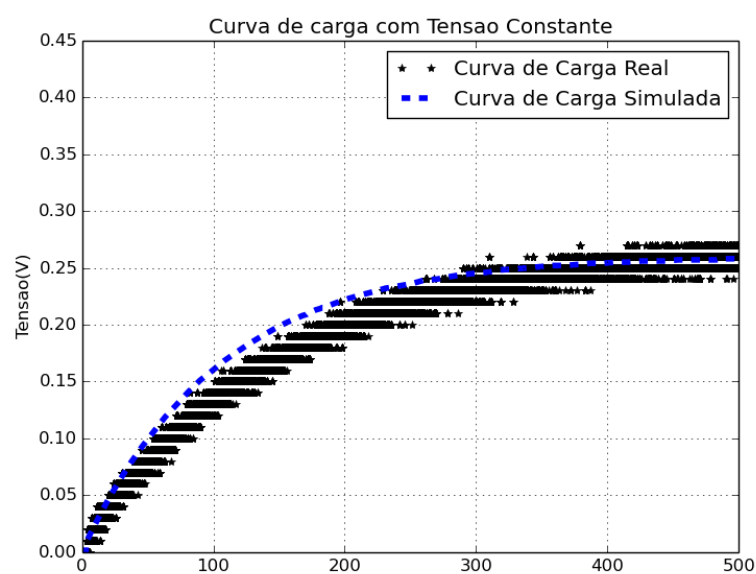
Figura 72 – Circuito de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 346,98 F



Fonte: Produção do próprio autor.

De modo que o resultado pode ser visto na Figura 73.

Figura 73 – Curva sobreposta de Carga com Tensão Constante para o Capacitor de 346,98 F



Fonte: Produção do próprio autor.



## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A proposta deste trabalho foi de realizar o levantamento dos valores de Capacitância e Resistência Série de um conjunto de Supercapacitores a partir da construção de uma fonte de corrente. Em relação aos valores encontrados, consideram-se satisfatórios levando-se em conta as limitações ocasionadas pela realidade de circuitos, componentes e sensores. Em termos de aplicabilidade da bancada construída, é possível extrair os valores desejados mediante a bancada construída.

Apesar do ótimo resultado encontrado, vale ressaltar importantes propostas de trabalhos futuros:

- Aumento da capacidade de corrente da fonte para realização de teste em capacitores com maiores valores de capacitância;
- Implementação de interface gráfica para acompanhamento em tempo real da curva de carga;
- Comunicação remota entre a captura dos dados e demonstração da curva de carga;
- Levantamento do valor de resistência paralela, responsável pela descarga do capacitor ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEGRO, M. *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. Massachusetts, EUA: [s.n.], 2013. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com>>.

ARDUINO. Arduino nano: Documentation. *Arduino*, 2018. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>.

ARTUZI, W. A. J. Ruído em circuitos elétricos lineares. Departamento de Engenharia Elétrica - UFPR, Paraná, Brasil, 2001. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/artuzi/apostila/cap1/pg24.html>>.

AWEA. The clean air benefits of wind energy. EUA, p. 1–4, 2014.

CARVALHO, L. A. d. *Investigação das propriedades eletroquímicas do sistema  $Ti/Ru_{0,3}Ti_{(0,7-x)}Sn_xO_2$  utilizando a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica*. Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil: USP - Química, 2004.

DROETTBOOM, J. H. D. D. E. F. M. Matplotlib. 2012. Disponível em: <<https://matplotlib.org/>>.

EATON. *Technical Data 4376: HV Supercapacitors Cylindrical cells*. Cleveland, EUA: [s.n.], 2015.

G1. Tesla atinge meta de produzir 5 mil unidades do model 3 em uma semana. *Auto Esporte - Globo*, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/tesla-atinge-meta-de-produzir-5-mil-unidades-do-model-3-em-uma-semana.ghtml>>.

HALPER, M. S.; ELLENBOGEN, J. C. *Supercapacitors: A Brief Overview*. McLean, Virginia, EUA: MITRE, 2006. 2-20 p.

KUO SEN M.; LEE, B. H. Real-time digital signal processing. Wiley, Chichester, England, p. 83–85, 2001.

MALVINO, A. P. *Eletrônica, Edição Revisada*. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill, 1987. 617-643 p.

MALVINO, A. P. *Eletrônica, Ed.4*. São Paulo, Brasil: Makron Books, 1995. 194-344 p.

MAXWELL, T. *Product Guide: BOOSTCAP Ultracapacitors*. San Diego, EUA: [s.n.], 2009.

MAXWELL, T. *DATASHEET: HC SERIES ULTRACAPACITORS*. San Diego, EUA: [s.n.], 2013.

MAXWELL, T. *Test Procedures for Capacitance, ESR, Leakage Current and Self-Discharge Characterizations of Ultracapacitors*. San Diego, EUA: [s.n.], 2015.

MICROCHIP. Mcp4725: 12-bit digital-to-analog converter with eeprom memory in sot-23-6. 2007. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/MCP4725.pdf>>.

- MILLMAN JACOB; HALKIAS, C. C. *Eletrônica: dispositivos e circuitos, Ed.2*. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill, 1981.
- MUSSOI, F. L. R.; VILLAÇA, M. V. M. *Capacitores, Ed.3*. Florianópolis, Brasil: CEFET/SC, 2000. 18-19 p.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. *Circuitos Elétricos, Ed.8*. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall, 2009. 89-137 p.
- OGATA, K. Modern control engineering. Prentice Hall, Ney Jersey, EUA, p. 669–690, 2003.
- SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo, Ed.5*. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2012. 130-133 p.
- SEIM, L. H. *Modeling, Control and Experimental Testing of a Supercapacitor/Battery Hybrid System - Passive and Semi-Active Topologies*. Kjeller, Norway: Norwegian Institute of Energy Technology, 2011.
- SEMICONDUCTOR, O. *Darlington Coplementary Silicon Power Transistors: TIP140 TIP141 TIP142 NPN / TIP145 TIP146 TIP147 PNP*. [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP140-D.PDF>>.
- TRIGUEIRO, A. Revolução energética já é realidade. *Globo*, 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/platb/mundo-sustentavel/2013/02/14/revolucao-energetica-ja-e-realidade>>.
- TRIGUEIRO, J. P. C. *Desenvolvimento de supercapacitores de alto desempenho baseados em eletrodos nanoestruturados e eletrólitos de líquidos iônicos*. Belo Horizonte, Brasil: Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- WELLE, D. Frota mundial de carros eletrificados cresce 55 por cento em um ano. *Auto Esporte - Globo*, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/frota-mundial-de-carros-eletricos-cresce-55-em-um-ano.ghtml>>.

## Apêndices

## APÊNDICE A – CÓDIGO PARA ARQUIVAMENTO DOS DADOS

Para o arquivamento dos dados capturados pelo arduino, implementou-se no Python um código responsável para esse fim. De maneira que pode ser visto abaixo:

```
import serial
import time
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import sys
media=0.0
cont=0
t = []          # time vector
v = []          # capture vector
data = 0        # data captured from serial
samples = 200000      # number of samples to be captured
Vc1=[]
I=[]
vetorx=0
k=0
tempo=[]
tensao="A"
corr="B"
space="C"
Volt=[]
Corrente=[]
Temp=[]
def save_list(mylist, filename):
    '''This function save a list in a file
    mylist = list to save
    filename = file name at string format:'filename.txt'''
    myfile=open(filename,'w')          # open a file to write it
    x =map(str, mylist)                # convert to string
    myfile.write(time.strftime('%c'))    # write current time
    for n in x:
        myfile.write(n+'\n')          # write vector
    return
    myfile.close()                    # close file
```

```

def Plot_Mode():
    serialport=serial.Serial('/dev/ttyUSB0',115200,timeout=1)#open serial port
    ct = 0
    while (ct < samples):#capture data from serial port until (samples-1) samples
        v.append(serialport.readline())
        ct = ct + 1
    serialport.close()          # close serial port communication
    c=0
    for n in range(len(v)):# To separate Courrent and Voltage that vector
        if (v[n].find(tensao)==0): Volt.append(v[n])# Create current vector
        if (v[n].find(corr)==0): Corrente.append(v[n])# Create voltage vector

    for n in range(0,len(Volt)):
        if(Volt[n].index(tensao)>0):Volt[n]='0'
        Volt[n]=Volt[n].replace(tensao,' ') # withdraws string that identifies
voltage
        try:
            Volt[n]=float(Volt[n])
        except:
            Volt[n]=0.0

    for n in range(0,len(Corrente)):
        if(Corrente[n].index(corr)>0):Corrente[n]='0'

        Corrente[n]=Corrente[n].replace(corr,' ') # withdraws string that identifies
current
        try:
            Corrente[n]=float(Corrente[n])
        except:
            Corrente[n]=0.0

    k=min(len(Volt),len(Corrente))

    tempo=[]

    for n in range(k):
        tempo.append(n)
    tempo=0.005*np.array(tempo)

```

```

for n in range(k):
    Vc1.append(Volt[n])
    I.append(Corrente[n])

for n in range(k):          # exception handling
    if(Vc1[n]==0.0 and n==0 ): Vc1[n]=Vc1[n+1]
    if(Vc1[n]==0.0 and n>0): Vc1[n]=Vc1[n-1]
    if(I[n]==0.0 and n==0 ): I[n]=I[n+1]
    if(I[n]==0.0 and n>0): I[n]=I[n-1]

save_list(tempo, \'time.txt\') # save vectors into txt file
save_list(Vc1, \'tensao.txt\')
save_list(I, \'Corrente.txt\')

print ("=====")
print ("=")
print ("=          Capture Interface v1.0          =")
print ("=          April 17 2018          =")
print ("=          By Wallastan Melo da Silva Jr          =")
print ("=")
print ("=    Today:" + time.strftime("%c") + "    =")
print ("=")
print ("=====\\n")

```

## APÊNDICE B – CÓDIGO PARA PLOTAGEM DOS DADOS E PARA OBTENÇÃO DE FUNÇÃO DO INTERVALO DE CARGA

O código apresentado abaixo teve a função de plotar os dados recebidos pelo arduino e arquivados pelo código do Apêndice A. Além disso, o mesmo teve a função de encontrar a função a partir da interpolação da curva de carga do capacitor. `import serial`

```
import time
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import sys
# from scipy.interpolate import *
texto=[]
y = open('tensao.txt','r')          # Tensão para curva de carga com fonte de tensão
x = open('tempo.txt','r')          # Tempo para curva de carga com fonte de tensão
arqy = open('Tensao5.txt','r')      # Tensão para o intervalo de carga com fonte
de corrente para obtenção da função
arqx = open('Tempo5.txt','r')      # Tempo para o intervalo de carga com fonte
de corrente para obtenção da função
t = open('Tempo_400F_5A.txt','r')# Tensão para curva de carga com fonte de corrente
I = open('Corrente_400f_5A.txt','r')# Tensão para curva de carga com fonte de corrente
V = open('Tensao_400f_5A.txt','r')# Tensão para curva de carga com fonte de corrente
Tensao=y.readlines()
times=x.readlines()
textoX= arqx.readlines()
textoY= arqy.readlines()
tempo= t.readlines()
corrente= I.readlines()
volt = V.readlines()
y.close()

x.close()
arqy.close()
arqx.close()
I.close()
t.close()
V.close()

te=[]    # Vetor de tempo simulado para fonte de corrente constante
simulation=[]    # Vetor de tensão simulado para fonte de corrente constante
temp_volt=[]    # Vetor de tempo simulado para fonte de tensão constante
```



```

volt_simulation=[] # Vetor de tensão simulado para fonte de tensão constante
k=min(len(Tensao),len(times)) # Elimina os últimos valores não significantes para
que os vetores tenham o mesmo tamanho
for n in range(k):
    Tensao[n]=Tensao[n].replace("/n",' ') # Elimina o /n
    times[n]=times[n].replace("/n",' ') # Elimina o /n
    try:
        times[n]=float(times[n]) # Converte string para float
        Tensao[n]=float(Tensao[n]) # Converte string para float
    except:
        times[n]=0.0
        Tensao[n]=0.0 if(times[n]==0.0 and n==0 ): times[n]=(times[n+1]+0.0)/2
        if(times[n]==0.0 and n>0): times[n]=times[n-1]
        if(Tensao[n]==0.0 and n==0 ): Tensao[n]=(Tensao[n+1]+0.0)/2
        if(Tensao[n]==0.0 and n>0): Tensao[n]=Tensao[n-1]
for n in range(len(textoX)):
    textoX[n]=textoX[n].replace("/n",) # Elimina o /n
    textoY[n]=textoY[n].replace("/n",) # Elimina o /n
    try:
        textoX[n]=float(textoX[n]) # Converte string para float
        textoY[n]=float(textoY[n]) # Converte string para float
    except:
        textoX[n]=0.0
        textoY[n]=0.0
    if(textoX[n]==0.0 and n==0 ): textoX[n]=(textoX[n+1]+0.0)/2
    if(textoX[n]==0.0 and n>0): textoX[n]=textoX[n-1]
    if(textoY[n]==0.0 and n==0 ): textoY[n]=(textoY[n+1]+0.0)/2
    if(textoY[n]==0.0 and n>0): textoY[n]=textoY[n-1]
for n in range(len(volt)):
    corrente[n]=corrente[n].replace("/n",) # Elimina o /n
    volt[n]=volt[n].replace("/n",) # Elimina o /n
    tempo[n]=tempo[n].replace("/n",) # Elimina o /n
    try:
        volt[n]=float(volt[n]) # Converte string para float
        corrente[n]=float(corrente[n]) # Converte string para float
        tempo[n]=float(tempo[n]) # Converte string para float
    except:
        volt[n]=0.0
        corrente[n]=0.0

```

```

    tempo[n]=0.0
    if(corrente[n]==0.0 and n==0 ): corrente[n]=(corrente[n+1]+0.0)/2
    if(corrente[n]==0.0 and n>0): corrente[n]=corrente[n-1]
    if(volt[n]==0.0 and n==0 ): volt[n]=(volt[n+1]+0.0)/2
    if(volt[n]==0.0 and n>0): volt[n]=volt[n-1]
    if(tempo[n]==0.0 and n==0 ): tempo[n]=(tempo[n+1]+0.0)/2
    if(tempo[n]==0.0 and n>0): tempo[n]=tempo[n-1]
p = np.poly1d(np.polyfit(textoX, textoY, 1)) # Faz a interpolação da curva de carga

t = np.linspace(5.5, 112, 1100) # Cria o vetor de tempo para plotar a curva de
carga
print ("= Funcao de carga do capacitor 400F =\n")
print p # Escreve a função encontrada com a interpolação

#Plotagem dos Gráficos
#Plotagem do Gráfico de carga e de corrente
plt.figure(1)
plt.subplot(2,1,2)
plt.plot(tempo,volt)
plt.title('Curva da tensão ')
plt.xlabel('Time(s)')
plt.ylabel('Tensao(V)')
plt.grid(True)
plt.subplot(2,1,1)
plt.plot(tempo,corrente,'b')
plt.title('Corrente que alimenta o capacitor ')
plt.xlabel('Time(s)')
plt.ylabel('Corrente(A)')
plt.grid(True)

#Plotagem do Gráfico de carga e da função de interpolação
plt.figure(2)
plt.plot(tempo,volt,'b',label="Curva de Carga Real")
plt.plot(t,p(t),'k-',linewidth=4,label="Reta Linear Aproximada")
plt.legend(loc='best')
plt.title('Curva de carga')
plt.ylabel('Tensao(V)')
plt.grid(True)

#Plotagem do Gráfico de carga e da simulação com os valores encontrados
plt.figure(3)
plt.plot(tempo,volt,'b',label="Curva de Carga Real")

```

```
plt.plot(te,simulation,'k-',linewidth=4,label="Curva de Carga Simulada")
plt.title('Curva de carga e descarga do Capacitor 400F ')
plt.legend(loc="best")
plt.xlabel('Time(s)')
plt.ylabel('Tensao(V)')
plt.grid(True)

#Plotagem do Gráfico da simulação dos valores encontrados para uma fonte de tensão
constante
plt.figure(4)
plt.ylim(0.0,0.45)
plt.plot(times,Tensao,'k',linewidth=2,label="Curva de Carga Real")
plt.plot(temp_volt1,volt_simulation1,'b-',linewidth=4,label="Curva de Carga Simulada")
plt.title('Curva de carga com Tensao Constante')
plt.legend(loc='best')
plt.ylabel('Tensao(V)')
plt.grid(True)
plt.show()
```

## APÊNDICE C – CÓDIGO NO ARDUINO PARA CONTROLE DA FONTE E CAPTURA DOS DADOS

```
#include <TimerOne.h>

int Flag_led;
int Flag_Serial;
int i;
int Volt=400;

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>

Adafruit_MCP4725 dac;

#define DAC_RESOLUTION (8) const PROGMEM uint16_t DACLookup_FullSine_9Bit[512] =
{ 2048, 2073, 2098, 2123, 2148, 2174, 2199, 2224, 2249, 2274, 2299, 2324, 2349, 2373,
2398, 2423, 2448, 2472, 2497, 2521, 2546, 2570, 2594, 2618, 2643, 2667, 2690, 2714,
2738, 2762, 2785, 2808, 2832, 2855, 2878, 2901, 2924, 2946, 2969, 2991, 3013, 3036,
3057, 3079, 3101, 3122, 3144, 3165, 3186, 3207, 3227, 3248, 3268, 3288, 3308, 3328,
3347, 3367, 3386, 3405, 3423, 3442, 3460, 3478, 3496, 3514, 3531, 3548, 3565, 3582,
3599, 3615, 3631, 3647, 3663, 3678, 3693, 3708, 3722, 3737, 3751, 3765, 3778, 3792,
3805, 3817, 3830, 3842, 3854, 3866, 3877, 3888, 3899, 3910, 3920, 3930, 3940, 3950,
3959, 3968, 3976, 3985, 3993, 4000, 4008, 4015, 4022, 4028, 4035, 4041, 4046, 4052,
4057, 4061, 4066, 4070, 4074, 4077, 4081, 4084, 4086, 4088, 4090, 4092, 4094, 4095,
4095, 4095, 4095, 4095, 4095, 4095, 4094, 4092, 4090, 4088, 4086, 4084, 4081, 4077,
4074, 4070, 4066, 4061, 4057, 4052, 4046, 4041, 4035, 4028, 4022, 4015, 4008, 4000,
3993, 3985, 3976, 3968, 3959, 3950, 3940, 3930, 3920, 3910, 3899, 3888, 3877, 3866,
3854, 3842, 3830, 3817, 3805, 3792, 3778, 3765, 3751, 3737, 3722, 3708, 3693, 3678,
3663, 3647, 3631, 3615, 3599, 3582, 3565, 3548, 3531, 3514, 3496, 3478, 3460, 3442,
3423, 3405, 3386, 3367, 3347, 3328, 3308, 3288, 3268, 3248, 3227, 3207, 3186, 3165,
3144, 3122, 3101, 3079, 3057, 3036, 3013, 2991, 2969, 2946, 2924, 2901, 2878, 2855,
2832, 2808, 2785, 2762, 2738, 2714, 2690, 2667, 2643, 2618, 2594, 2570, 2546, 2521,
2497, 2472, 2448, 2423, 2398, 2373, 2349, 2324, 2299, 2274, 2249, 2224, 2199, 2174,
2148, 2123, 2098, 2073, 2048, 2023, 1998, 1973, 1948, 1922, 1897, 1872, 1847, 1822,
1797, 1772, 1747, 1723, 1698, 1673, 1648, 1624, 1599, 1575, 1550, 1526, 1502, 1478,
1453, 1429, 1406, 1382, 1358, 1334, 1311, 1288, 1264, 1241, 1218, 1195, 1172, 1150,
1127, 1105, 1083, 1060, 1039, 1017, 995, 974, 952, 931, 910, 889, 869, 848, 828,
808, 788, 768, 749, 729, 710, 691, 673, 654, 636, 618, 600, 582, 565, 548, 531, 514,
497, 481, 465, 449, 433, 418, 403, 388, 374, 359, 345, 331, 318, 304, 291, 279, 266,
254, 242, 230, 219, 208, 197, 186, 176, 166, 156, 146, 137, 128, 120, 111, 103, 96,
88, 81, 74, 68, 61, 55, 50, 44, 39, 35, 30, 26, 22, 19, 15, 12, 10, 8, 6, 4, 2, 1,
1, 0, 0, 0, 1, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 19, 22, 26, 30, 35, 39, 44, 50, 55, 61,
```

```
68, 74, 81, 88, 96, 103, 111, 120, 128, 137, 146, 156, 166, 176, 186, 197, 208, 219,
230, 242, 254, 266, 279, 291, 304, 318, 331, 345, 359, 374, 388, 403, 418, 433, 449,
465, 481, 497, 514, 531, 548, 565, 582, 600, 618, 636, 654, 673, 691, 710, 729, 749,
768, 788, 808, 828, 848, 869, 889, 910, 931, 952, 974, 995, 1017, 1039, 1060, 1083,
1105, 1127, 1150, 1172, 1195, 1218, 1241, 1264, 1288, 1311, 1334, 1358, 1382, 1406,
1429, 1453, 1478, 1502, 1526, 1550, 1575, 1599, 1624, 1648, 1673, 1698, 1723, 1747,
1772, 1797, 1822, 1847, 1872, 1897, 1922, 1948, 1973, 1998, 2023 };
```

```
int zero1;
int dif;
int cont=0;
int desl=0;
int zero;
int offset;
int y=0;
float media=0.0;
float mediat;
float mediato=0.0;
int vetor[20];
int vetor1[20];
int u=0;
float CORRENTE=0.0;
float REF=( 2.5 - ( 10.0*0.066))*(1024/5.0);
void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    analogWrite(A2, 0);
    analogWrite(A3, 255);
    pinMode(A0, INPUT);
    pinMode(A1, INPUT);
    pinMode(A2, OUTPUT);
    pinMode(A3, OUTPUT);
    pinMode(7, OUTPUT);
    pinMode(8, OUTPUT);
    pinMode(10, OUTPUT);
    digitalWrite(7, HIGH);
    digitalWrite(10, LOW);
    dac.begin(0x62);
    while(cont<100){
        dac.setVoltage(0, false);
```

```
    zero=analogRead(A1);
    zero1=analogRead(A0);
    offset=zero-512;
    offset1=zero1-0;
    cont=cont+1;
}

Timer1.initialize(5000); // set a timer of length 100000 microseconds (or 0.1
sec - or 10Hz => the led will blink 5 times, 5 cycles of on-and-off, per second)
Timer1.attachInterrupt( timerIsr ); // attach the service routine her
digitalWrite(7,LOW);
}
void loop()
{
    digitalWrite(7,HIGH);
    dac.setVoltage(0, false);
    if(millis()>=3000){
        digitalWrite(7,HIGH);
        digitalWrite(10,HIGH);
    }
} void timerIsr(){
    if(y==0){
        for( int t=0 ; t<20 ; t++){
            int Tensao_Corrente=analogRead(A1); // VALOR LIDO PELO ARDUINO ORIGINADO
DO SENSOR
            vetor[t]=Tensao_Corrente; // FORMA O PRIMEIRO VETOR COM OS PRIMEIROS VALORES
CAPTURADOS

            int Tensao=analogRead(A0); // VALOR LIDO PELO ARDUINO ORIGINADO DO AMPLIFICADOR
DE INSTRUMENTAÇÃO
            vetor1[t]=Tensao; // FORMA O PRIMEIRO VETOR COM OS PRIMEIROS VALORES DE
TENSÃO CAPTURADOS
        }
    }
    if(y==1){ CONDIÇÃO QUE JÁ HOUVE O PRIMEIRO VETOR CRIADO
        for( int u=0 ; u<19 ; u++){
            vetor[u]=vetor[u+1]; // DESLOCA-SE UMA POSIÇÃO NO PRIMEIRO VETOR ANTERIOR
            vetor1[u]=vetor1[u+1]; // DESLOCA-SE UMA POSIÇÃO NO PRIMEIRO VETOR ANTERIOR
        }
        vetor[19]=analogRead(A1); // NOVO VALOR CAPTURADO PELO SENSOR
```

```
vetor1[19]=analogRead(A0); // NOVO VALOR CAPTURADO PELO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTO
}
media=0.0; // ZERA O VALOR DA CORRENTE PARA INICIAR A NOVA SOMA DO VETOR
mediat=0.0; // ZERA O VALOR DA CORRENTE PARA INICIAR A NOVA SOMA DO VETOR
for( int s=0 ; s<20 ; s++){
    media=media+vetor[s]; // SOMA DE TODOS OS VALORES DO VETOR DA CORRENTE
    mediat=mediat+vetor[s]; // SOMA DE TODOS OS VALORES DO VETOR DA TENSÃO
}
media=(media/20.0); // MÉDIA ARITMÉTICA DO VETOR DA CORRENTE
media=media-float(offset); // CORREÇÃO DO OFFSET COM O VALOR IDENTIFICADO NO
CÓDIGO ANTERIOR
CORRENTE= media*(5.0/1024.0); // CONVERSÃO DO VALOR INTEIRO EM TENSÃO
CORRENTE=2.5-CORRENTE; // RESULTADO DA TENSÃO DEVIDO A CORRENTE
CORRENTE= CORRENTE/(0.066); // VALOR DA CORRENTE EM AMPERES POR MEIO DA RESOLUÇÃO
mediato=mediat/20.0; // MÉDIA ARITMÉTICA DO VETOR DA TENSÃO
mediato=mediato-float(offset1); // CORREÇÃO DO OFFSET COM O VALOR IDENTIFICADO
NO CÓDIGO ANTERIOR
Tensao_cap= mediato*(5.0/1024.0); // CONVERSÃO DO VALOR INTEIRO EM TENSÃO
y=1;
float(dif)=REF-media;
Volt=Volt-dif;
Serial.print('B');
Serial.println(CORRENTE);
Serial.print('A');
Serial.println(Tensao_cap);
}
```