



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
CAMPUS CARAÚBAS  
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

LUIZ SOARES DA SILVA NETO

## **PROJETO DE UMA FONTE LINEAR REGULÁVEL 0-30 V/ 1 A**

CARAÚBAS

2019

LUIZ SOARES DA SILVA NETO

**PROJETO DE FONTE LINEAR REGULÁVEL 0-30 V/ 1 A**

Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,  
Campus Caraúbas para obtenção do título  
de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador:

Prof. Msc. José Ailton L. Barboza Júnior

CARAÚBAS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N469p Neto, Luis Soares da.  
Projeto de uma fonte linear regulável 0-30V 1A  
/ Luis Soares da Neto. - 2019.  
56 f. : il.

Orientador: José Ailton L. Barbosa Júnior.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2019.

1. Fonte de Alimentação. 2. Regulador de  
tensão. 3. Microcontroladores. I. Júnior, José  
Ailton L. Barbosa, orient. II. Título.

LUIZ SOARES DA SILVA NETO

**PROJETO DE UMA FONTE LINEAR REGULÁVEL 0-30 V/1 A**

Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,  
Campus Caraúbas para obtenção do título  
de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador:

Prof. Msc. José Ailton L. Barboza Júnior

APROVADO EM 14 / 08 / 2019

[Redacted Signature]

Luiz Soares da Silva Neto

Banca Examinadora:

[Redacted Signature]

Prof. Msc. José Ailton L. Barboza Júnior.  
Orientador

[Redacted Signature]

Prof. Dr. Walber Medeiros de Lima.  
Examinador

[Redacted Signature]

Prof. Msc. Antônio Alisson Alencar Freitas.  
Examinador

“O segredo do êxito na vida de um homem está em preparar-se para aproveitar a ocasião, quando ela se apresenta.”

Benjamin Disraeli.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida. A meus pais pelo sustento, pelo cuidado de sempre e pelo amor.

Sou grato à toda a minha família pelo apoio em minha jornada acadêmica e na vida como um todo, em nome de minha avó Gercina de Freitas, que sempre cuida de mim desde minha tenra idade.

Agradeço a meu irmão e grande amigo Eduardo Oliveira Silva, que também auxiliou na realização deste trabalho, e que agora caminha ao meu lado na jornada acadêmica, sempre um apoiando o outro e se desentendendo às vezes, mas sempre mantendo a admiração e apreço mútuos. Agradeço-te de coração.

Deixo também meus agradecimentos ao meu orientador José Ailton L. Barboza Júnior, por toda a paciência ao longo da orientação, por todo o suporte e prontidão para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, pelo valiosíssimo conhecimento repassado e pelo seu comprometimento com a profissão, sem a qual este trabalho jamais poderia ser desenvolvido. Tens a minha eterna gratidão, professor!

Agradeço também aos demais professores da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho, bem como meus antigos professores de graduação por toda a contribuição até aqui. Pois foi um caminho longo e árduo, e cada um teve um importantíssimo papel na minha formação, desde os mais cruéis ou até injustos, aos mais generosos e resilientes. Sou grato!

Sou grato também aos meus amigos pela consideração e apreço e pelo incentivo de cada um. Dedico a vocês este trabalho!

## RESUMO

O cotidiano de um estudante de engenharia elétrica se resume a estudar ou projetar circuitos elétricos. Quando se trata de circuitos eletrônicos é essencial que haja presença de uma fonte alimentação para o mesmo, uma vez que a tensão e a corrente disponíveis na rede de distribuição não são adequadas para alimentação de alguns circuitos. Tendo isto em vista, foi pensado em implementar um projeto de fonte linear regulável de 0 à 30 V de bancada para atender as necessidades de utilização nos laboratórios de eletrônica do campus. A fonte utiliza um circuito regulador de tensão LM317 que possibilita a regulação da tensão até os 30 V projetados e corrente de saída de 1 A. Nesse projeto a fonte dispõe também de um *display* para que o usuário tenha visualização dos valores de tensão e corrente de saída. Para isso é utilizado um microcontrolador para conversão analógica/digital desses valores e apresentada no *display*. O protótipo da fonte conseguiu atingir uma regulação próxima à faixa de 0,4 V e 26,8 V como está ilustrado nos resultados de simulação e experimentais.

**Palavras-chave:** Fonte Regulada. Regulador de tensão. Microcontrolador.

## ABSTRACT

The everyday life of an electrical engineering student comes down to studying or designing electrical circuits. When it comes to electronic circuits it is essential that there be a power supply for the same, since the voltage and current available in the distribution network is not suitable for powering these circuits. With this in view, it was intended to implement a linear adjustable source design from 0 to 30 V bench to meet the needs of use in the campus electronics labs. The power supply uses an LM 317 voltage regulator circuit that allows voltage regulation up to the projected 30 V, and the output current of 1 A, controlled by a potentiometer. In this project the source also has a *display* so that the user has visualization of the values of voltage and output current. For this, a microcontroller is used for the analogue / digital conversion of these values and is shown in the *display*. The prototype of the power supply was able to reach a regulation close to the 0.4 V and 26.8 V range as illustrated in the simulation and experimental results.

**Keywords:** Regulated source. Voltage regulator. Microcontroller.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Diagrama em blocos das etapas de uma fonte de alimentação linear .....                                            | 19 |
| Figura 2: Formas de ondas verificadas após cada estágio de uma fonte. ....                                                  | 19 |
| Figura 3: Trajetória do sinal ao longo da ponte retificadora durante o semicírculo positivo. ....                           | 20 |
| Figura 4: Trajetória do sinal ao longo da ponte retificadora durante o semicírculo negativo. ....                           | 20 |
| Figura 5: Forma de onda da tensão na saída do filtro capacitivo. ....                                                       | 21 |
| Figura 6: Forma de onda da tensão na saída do filtro capacitivo. ....                                                       | 23 |
| Figura 7: Arquitetura básica de um microcontrolador.....                                                                    | 24 |
| Figura 8: Exemplo de amplificador operacional .....                                                                         | 24 |
| Figura 9: Amplificador diferencial. ....                                                                                    | 25 |
| Figura 10: Transistor bipolar de junção do tipo NPN .....                                                                   | 27 |
| Figura 11: Transistor bipolar de junção do tipo PNP .....                                                                   | 27 |
| Figura 12: Exemplo de um relé de 5V e 1 canal .....                                                                         | 28 |
| Figura 13: Exemplo de um relé de 5V e 1 canal .....                                                                         | 30 |
| Figura 14: Capacitor utilizado no filtro capacitivo.....                                                                    | 35 |
| Figura 15: Malha da saída da fonte .....                                                                                    | 35 |
| Figura 16: Malha da saída da fonte para o 0 volts.....                                                                      | 37 |
| Figura 17: Amplificador operacional do circuito condicionador .....                                                         | 38 |
| Figura 18: Esquemático do sensor de corrente na saída da fonte .....                                                        | 39 |
| Figura 19: Pinagem do PIC18F4520 .....                                                                                      | 40 |
| Figura 20: Forma de onda da tensão no secundário obtida por simulação.....                                                  | 42 |
| Figura 21: Forma de onda da tensão no secundário obtida experimentalmente.....                                              | 43 |
| Figura 22: Forma de onda da tensão no filtro capacitivo, obtida em simulação. ....                                          | 43 |
| Figura 23: Forma de onda da tensão no filtro capacitivo, obtida em simulação. ....                                          | 44 |
| Figura 24: Associação de capacitores utilizadas no filtro capacitivo.....                                                   | 44 |
| Figura 25: Associação de capacitores utilizadas no filtro capacitivo.....                                                   | 45 |
| Figura 26: Comparação entre a tensão antes e depois do regulador para o caso de tensão para 0 V de saída .....              | 45 |
| Figura 27: Comparação entre a tensão antes (CH1) e depois (CH2) do regulador para o caso de tensão para 30 V de saída ..... | 46 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28: Circuito utilizado para simulação dos resultados.....                                          | 46 |
| Figura 29: Circuito utilizado para simulação dos resultados.....                                          | 47 |
| Figura 30:Circuito do amplificador operacional .....                                                      | 47 |
| Figura 31:Circuito do sensor de corrente (sensor Hall).....                                               | 47 |
| Figura 32: Circuito de acionamento do relé em caso de sobrecorrente (transistor). .....                   | 48 |
| Figura 33: Microcontrolador devidamente programado para monitoramento da tensão e corrente de saída. .... | 48 |
| Figura 34: Circuito experimental da medição dos valores de saída da fonte. ....                           | 49 |
| Figura 35: Circuito de monitoração para o funcionamento da fonte em 30 V e 1 A. ....                      | 49 |
| Figura 36: Circuito de monitoração para o funcionamento da fonte em 0 V e 0 A. ....                       | 49 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Considerações iniciais do projeto. .... | 33 |
| Tabela 2 – Especificações da fonte regulável.....  | 33 |

## SUMÁRIO

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>                              | <b>13</b> |
| 1.1. Objetivo .....                                          | 14        |
| 1.2. Motivação .....                                         | 14        |
| 1.3. Estrutura do trabalho .....                             | 14        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                         | <b>15</b> |
| 2.1 Introdução .....                                         | 15        |
| 2.2 Valor médio (CC) .....                                   | 15        |
| 2.3 Valor eficaz (RMS) .....                                 | 16        |
| 2.4 Fontes de alimentação .....                              | 18        |
| 2.5 Ponte retificadora .....                                 | 19        |
| 2.6 Filtro Capacitivo .....                                  | 21        |
| 2.7 Regulador de tensão .....                                | 22        |
| 2.8 Microcontrolador.....                                    | 23        |
| 2.5 Amplificador operacional .....                           | 24        |
| 2.5.1 Amplificador diferencial .....                         | 25        |
| 2.6 Transistor bipolar de junção (TBJ) .....                 | 26        |
| 2.7 Relé.....                                                | 28        |
| 2.8 Sensor de corrente .....                                 | 29        |
| 2.8.1 Sensor de efeito Hall .....                            | 29        |
| <b>3. METODOLOGIA E PROJETO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....</b> | <b>31</b> |
| 3.1 Introdução .....                                         | 31        |
| 3.2 Especificações e considerações de projeto .....          | 32        |
| 3.3 Parâmetros assumidos.....                                | 33        |
| 3.4 Dimensionamento do filtro capacitivo .....               | 34        |

|            |                                                             |           |
|------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.5</b> | <b>Projeto do circuito de regulação.....</b>                | <b>35</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Projeto do circuito de aquisição .....</b>               | <b>37</b> |
| 3.6.1      | Circuito condicionador de tensão .....                      | 38        |
| 3.6.2      | Circuito sensor de corrente:.....                           | 38        |
| <b>3.7</b> | <b>Especificações do Microcontrolador (PIC18F4520).....</b> | <b>39</b> |
| <b>4.</b>  | <b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS.....</b>         | <b>42</b> |
| 4.1.1      | Formas de ondas obtidas experimentalmente.....              | 42        |
| <b>5.</b>  | <b>APÊNDICE I – CÓDIGO DO MICROCONTROLADOR.....</b>         | <b>52</b> |
| <b>6.</b>  | <b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>                  | <b>54</b> |
| <b>7.</b>  | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                     | <b>55</b> |



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A chamada Eletrônica Analógica é um ramo da Eletrônica que consiste na ciência do funcionamento de circuitos e dispositivos analógicos bem como utilizá-los para diversos fins, principalmente como controlar sinais oscilantes de quaisquer frequências para utilizar este sinal como alimentador de máquinas e equipamentos elétricos e eletrônicos presentes no cotidiano. Em sua maioria, estes equipamentos carecem de uma fonte contínua (CC) para o funcionamento correto. Haja visto que a rede elétrica distribuída em massa se trata de um sinal alternado (CA), vê-se imediatamente a necessidade de uma adaptação (conversão) do sinal para que seja possível alimentar aqueles equipamentos elétricos. Esse processo é realizado pelas fontes de alimentação.

Uma fonte de alimentação linear regulada trata-se de um circuito eletrônico que, ligado à rede de alimentação (alternada), fornece uma tensão contínua para uma determinada carga, de acordo com sua necessidade. Uma fonte linear (ou analógica) regulada é constituída basicamente de transformadores (geralmente reduzindo os níveis de tensão no circuito, bem como proporcionando isolação ao mesmo), uma ponte de diodos (para retificação do sinal, impedindo que este mude de fase), filtros capacitivos (para reduzir a ondulação do sinal, ou *ripple*), e circuitos reguladores de tensão (para que a tensão de saída se mantenha constante). Estas fontes são denominadas de conversores CA/CC (tensões alternadas para tensões contínuas). As fontes tanto existem embutidas em equipamentos para fornecer a energia requisitada para seu funcionamento, quanto podem existir isoladas: para fins técnicos, desenvolvimento de projetos, uso em bancadas de reparo, testes e etc. Nas fontes, sejam lineares ou variáveis, tem-se a necessidade de monitoramento dos valores de tensão aplicados à carga, bem como a corrente que a percorre. Para isso, são empregados os circuitos indicadores, sejam analógicos, como galvanômetros; ou mesmo digitais, como módulos voltímetros, ou *displays* de (*light-emitting diode*, LED) ou (*liquid crystal diode*, LCD), os quais podem ser programados com um controlador para medir e apresentar as grandezas de saída (tensão ou corrente, no caso da fonte) em uma faixa específica.

### **1.1. Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo a implementação de um projeto de fonte linear regulável para disposição do laboratório, visando suprir a necessidade de equipamentos para o mesmo, bem como a perspectiva prática dos conhecimentos construídos em sala de aula.

### **1.2. Motivação**

Construir uma fonte de alimentação para utilização no laboratório da comunidade acadêmica da UFERSA Caraúbas.

### **1.3. Estrutura do trabalho**

O trabalho se estrutura da seguinte forma:

- Capítulo 1: O capítulo primeiro conta um breve resumo acerca de um projeto de fonte linear e elucida algumas metodologias utilizadas, além disso, expõe os objetivos bem como a motivação para o desenvolvimento desse trabalho;
- Capítulo 2: No capítulo dois está toda fundamentação teórica necessária para o projeto da fonte de alimentação, além de discorrer sobre os componentes do projeto;
- Capítulo 3: Este capítulo aborda as partes do projeto, valores, equações, componentes utilizados e etc.
- Capítulo 4: No último capítulo são apresentados os resultados obtidos e discussões acerca da comparação entre a simulação e experimento, para estudar possíveis melhorias.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

Muitas vezes, a tensão alternada proveniente da rede de distribuição é alta demais para ser utilizada em experimentos com circuitos eletrônicos. Nestes casos, é necessário diminuir essa tensão, antes de retificá-la. Esse abaixamento de tensão é feito por um transformador, modificando-a a níveis mais adequados para energização dos componentes elétricos e eletrônicos envolvidos no projeto. Obtida a amplitude desejada, deve-se retificar o sinal alternado, fazendo-o percorrer uma ponte retificadora, que permite a passagem desse sinal em um mesmo sentido no circuito, tanto no seu semicírculo positivo quanto no negativo. Estando a tensão retificada, é possível filtrar a pulsação remanescente utilizando capacitores, que, quando carregados, manterão o circuito energizado quando o valor da tensão pulsante for inferior ao valor médio desejado, é preciso projetar os capacitores devidamente para essa finalidade.

Submetendo a tensão retificada a uma filtragem, é obtido um valor CC considerável e, após isso, pode-se regular o sinal de saída para atingir um valor de tensão contínua desejada. Esta regulação é feita em geral por um circuito integrado regulador de tensão, que recebe a tensão contínua e fornece um valor de tensão menor, permanecendo constante mesmo com uma variação na tensão de entrada ou eventualmente uma mudança no valor da carga (BOYLESTAD, 1984).

Uma vez convertido o sinal, é necessário o monitoramento desse valor contínuo de tensão, e eventualmente também sua corrente. Neste caso pode ser utilizado um voltímetro, amperímetro ou multímetro, ou ainda lançar mão do uso de um microcontrolador devidamente programado para interpretar o valor e apresentá-lo para o usuário através de um *display (LCD)*.

### 2.2 Valor médio (CC)

O valor médio de uma função diz respeito a média desse sinal ao longo de um período dessa função (STEWART, 2005). Logo, quando se trata de corrente média ou tensão média, isso quer dizer que a média desse sinal ao longo do tempo. Esse valor médio está relacionado ao valor contínuo que compõe esse sinal. Pode-se calcular este

valor, integrando a função ao longo de um período, analiticamente, para a tensão média temos:

$$V_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1)$$

Se desejarmos calcular então o valor médio de uma função periódica  $V_m \cdot \sin(\omega t)$  variante no tempo:

$$V_{med} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m \cdot \sin(\omega t) dt$$

$$V_{med} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot [-\cos(\omega t) + \cos(\omega t)]_0^{2\pi}$$

$$V_{med} = 0$$

Logo, observa-se que este valor é zero para uma tensão alternada periodicamente no tempo, portanto esta função de tensão não possui componente contínua.

### 2.3 Valor eficaz (RMS)

O valor eficaz de um sinal alternado se relaciona com a potência entregue a carga em corrente contínua, isto é, o valor de sinal alternado que entregaria uma mesma potência à uma carga que fosse alimentada por um sinal contínuo.

Partindo da potência dissipada pela carga, que é dada por:

$$P = V \times I \quad (2)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

$$P = R \times I^2 \quad (4)$$

Utilizado o conceito de valor médio:

$$P_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v(t)^2}{R} dt \quad (5)$$

Igualando as equações (3) e (5):

$$\frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v(t)^2}{R} dt \quad (6)$$

$$\frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_m^2 \cdot \sin(\omega t)}{R} d\omega t \quad (7)$$

Simplificando os termos:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 \cdot \sin(\omega t) d\omega t} \quad (8)$$

Resolvendo a integral:

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\int_0^{2\pi} \frac{d\omega t}{2} - \int_0^{2\pi} \frac{\cos(2\omega t)}{2} d\omega t} \quad (9)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\left[ \frac{t}{2} \right]_0^{2\pi} - \left[ \frac{\sin(2\omega t)}{4} \right]_0^{2\pi}} \quad (10)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\pi} \quad (11)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

Está constatado então que o valor eficaz de um sinal alternado pode ser obtido dividindo-se o seu valor máximo pelo fator  $\sqrt{2}$ .

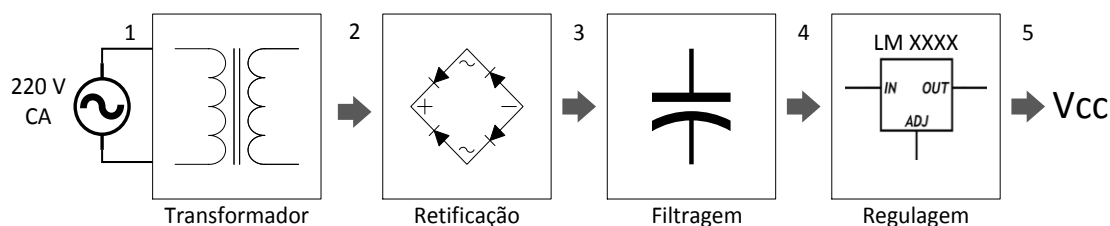
## 2.4 Fontes de alimentação

A conversão de um sinal elétrico que alterna seu sentido, com uma determinada frequência (como o da rede elétrica por exemplo), para um sinal que não alterne seu sentido nem sua amplitude é denominada conversão CA/CC. Essa transformação é feita através de uma fonte de alimentação.

Para isso, a eletrônica utiliza componentes de circuito passivos como capacitores e resistores, e ainda semicondutores e elementos de circuitos não-lineares (Diodos, transistores, etc). Essa conversão dá-se, porém, em uma fonte de alimentação linear em etapas distintas, nas quais são empregados esses elementos de circuito, de modo que cada qual desempenha uma tarefa que define uma etapa da conversão.

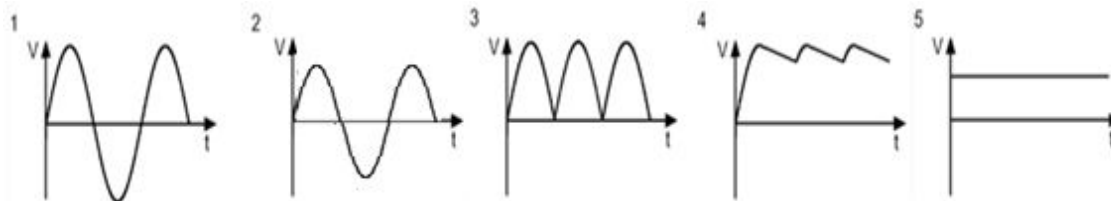
Primeiramente, é utilizado um transformador abaixador, geralmente de baixas frequências, para reduzir a tensão de pico e fazer isolamento do circuito com a rede alimentadora. Dada essa redução na amplitude do sinal ainda alternante, ele será submetido à uma ligação específica de diodos, chamada de ponte retificadora. Nessa ponte o sinal não sofre alteração em seu meio ciclo positivo, mas na metade negativa do ciclo o sinal sofre inversão, fazendo que o sinal não mude mais de sentido, agora apenas variando entre seu valor de pico e o valor zero, dentro de um mesmo sentido, e com uma frequência de pulsação aparentemente duas vezes maior. Essa etapa em que o sinal deixa de ser alternado e passa a ser contínuo pulsante, recebe o nome de retificação. Após a retificação, é feita a filtragem dessa variação pulsante do sinal, permitindo apenas que o sinal varie em uma pequena ondulação chamada *ripple*, não chegando mais a atingir o valor zero. Após a filtragem, utiliza-se um circuito para regular o sinal, mantendo-o fixo sem variações significativas perceptíveis para a carga.

Figura 1: Diagrama em blocos das etapas de uma fonte de alimentação linear



Fonte: Autoria própria.

Figura 2: Formas de ondas verificadas após cada estágio de uma fonte.



Fonte: Autoria própria.

## 2.5 Ponte retificadora

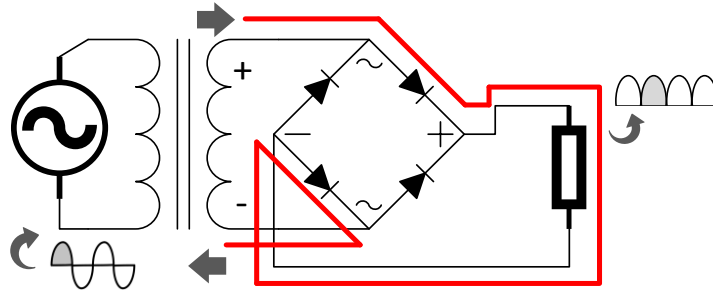
A ponte de diodo, ou ponte retificadora, permite que um sinal variante que inverte de sentido, a uma dada frequência, inserido na entrada da ponte, se apresente contínuo (sem inversão de sentido) na saída. A ponte é formada por duas trilhas, cada trilha possui dois diodos semicondutores ligados em série ao longo de si, que são percorridas pela corrente vinda do transformador. uma por vez, a cada semicírculo da tensão alternada da rede, devido à forma como os diodos estão dispostos na ponte. A maioria das pontes retificadoras é fabricada com diodos de silício (Si), que é o semicondutor mais largamente produzido pela indústria de componentes eletrônicos, devido à abundância do material na natureza, o que torna mais barata a sua produção. Os diodos de silício apresentam uma queda de tensão fixa de 0,7 V na polarização direta. Haja visto que apenas dois diodos da ponte são percorridos por corrente em cada semicírculo da tensão alternada, e que estando em série suas quedas de tensões são somadas, temos uma queda de tensão após a ponte de:

$$V_{\text{ponte}} = 0,7 \text{ V} + 0,7 \text{ V} \quad (13)$$

$$V_{\text{ponte}} = 1,4 \text{ V} \quad (14)$$

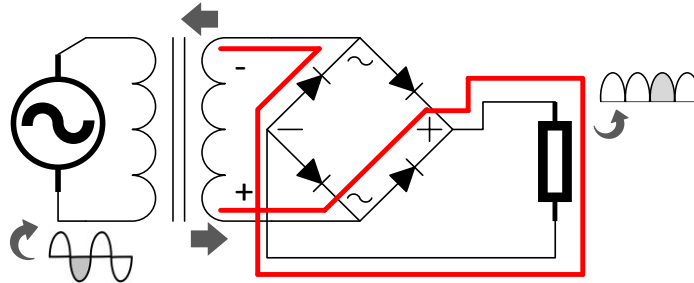
Portanto o sinal percorre apenas dois diodos por cada semicírculo, sempre no mesmo sentido, dessa forma o sinal não altera seu sentido na saída da ponte.

Figura 3: Trajetória do sinal ao longo da ponte retificadora durante o semicírculo positivo.



**Fonte:** Autoria própria.

Figura 4: Trajetória do sinal ao longo da ponte retificadora durante o semicírculo negativo.



**Fonte:** Autoria própria.

Como é possível observar, a corrente que percorre a carga após a ponte de diodos está sempre no mesmo sentido, tanto no semicírculo positivo quanto no semicírculo negativo. Isto implica que a tensão permanece acima de zero na carga em qualquer instante de tempo. Logo, obtemos, portanto, um valor médio ou contínuo diferente de zero. E uma vez que não existe mais semicírculo negativo na carga, a frequência dobra em relação a frequência do sinal antes da ponte.

Pode-se conhecer o valor de tensão contínua ( $V_{cc}$ ) na saída da ponte retificadora utilizando o conceito matemático do valor médio:

$$V_{med} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin(\omega t) dt \quad (15)$$

$$V_{med} = \frac{V_m}{\pi} \cdot [-\cos(\omega t) + \cos(\omega t)]_0^{\pi} \quad (16)$$

$$V_{med} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi} \quad (17)$$

$$V_{med} \cong 0,636 \cdot V_m \quad (18)$$

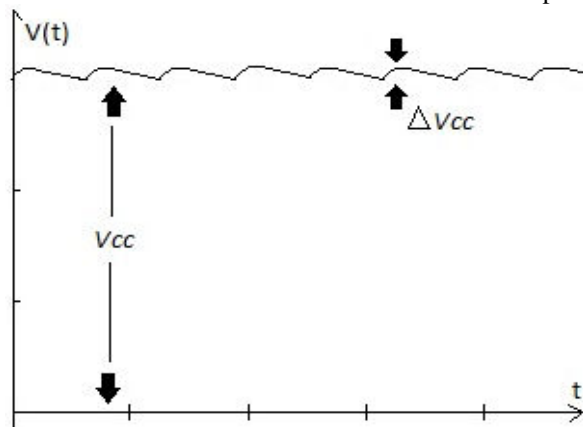
## 2.6 Filtro Capacitivo

A saída da ponte retificadora é basicamente um sinal pulsante com o dobro da frequência do sinal de entrada, e, portanto, já não se tratamos mais de um sinal alternado, no entanto o valor médio ou CC apresentado ainda não é expressivo.

Para tensões CC de alimentação como aquelas utilizadas em rádios, aparelhos de som, computadores etc., a tensão CC pulsante obtida de um retificador não é boa o suficiente. Para que a tensão CC de saída da fonte seja mais estável, um circuito de filtro torna-se necessário(BOYLESTAD, 1984, pg. 655).

O filtro capacitivo deve agir da seguinte maneira: Quando a tensão de saída da ponte retificadora varia crescendo abaixo do valor  $V_{cc}$  contínuo, o capacitor descarrega sua energia armazenada para a carga. Quando o sinal ultrapassa o valor CC, o capacitor é carregado. Estando a tensão no seu valor de pico, o capacitor estará completamente carregado, e por sua vez irá novamente descarregar sua energia para a carga uma vez que a tensão pulsante comece a decrescer até o valor médio, no qual o capacitor estará descarregado e novamente será carregado pelo sinal pulsante que por sua vez volta a alimentar a carga. Isto se repete ciclicamente conforme a pulsação da tensão de saída da ponte.

Figura 5: Forma de onda da tensão na saída do filtro capacitivo.



Fonte: Autoria própria

Para que o filtro capacitivo funcione harmonicamente com a pulsação da tensão de saída, deve-se dimensionar sua capacitância para que não permita uma ondulação maior que o *ripple* admissível no projeto (UNITRODE, 1986).

Admitindo que a energia transferida para o capacitor durante um semicírculo do sinal da rede é:

$$\frac{W_{in}}{2} \cong \frac{1}{2} \cdot C \cdot \Delta(V_c^2) \quad (19)$$

E que a energia armazenada, pode ser expressa por:

$$W_{in} = \frac{P_{in}}{f_{rede}} \quad (20)$$

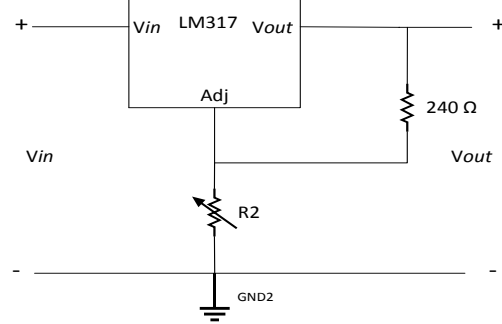
Pode-se:

$$C = \frac{P_{in}}{f_{rede}(V_{c \max}^2 - V_{c \min}^2)} \quad (21)$$

## 2.7 Regulador de tensão

Após a filtragem do sinal, chega-se a última etapa da fonte, que consiste em variar o valor médio obtido até aqui. Para isso, lançamos mão de um regulador de tensão em um circuito integrado (CI). Neste projeto, o regulador de tensão escolhido deve ser capaz de ajustar a tensão média vinda do filtro capacitivo para valores inferiores a 30 V. O CI regulador de tensão adotado foi o LM317 que pode variar a tensão na sua saída, entre 1,2 V e 37 V, e corrente de saída de até 1,5 A segundo as especificações do fabricante mostradas em sua folha de dados (*datasheet*), que expressa também a condição de 2 V acima da tensão máxima desejada na saída do regulador. Como a fonte é de 30 V, a tensão mínima no filtro capacitivo para o funcionamento correto do regulador é de 32 V. A figura a baixo especifica, segundo o *datasheet* do LM317, como o CI deve ser montado no circuito.

Figura 6: Forma de onda da tensão na saída do filtro capacitivo.



**Fonte:** Autoria própria.

Fazendo a análise do circuito, pode-se calcular o valor da tensão de saída pela equação:

$$V_{out} = V_{ref} + V_{R2} \quad (22)$$

Na qual,  $V_{out}$  é a tensão na saída do regulador,  $V_{ref}$  é a tensão de referência do CI, fixa em 1,2 V segundo o datasheet, e  $V_{R2}$  é a tensão no potenciômetro representado na figura por  $R2$ . A tensão no potenciômetro pode ser calculada sabendo a corrente que o percorre, sendo esta a soma da corrente que sai do pino de ajuste (Adj), que também é fornecida pelo fabricante e sendo 100  $\mu A$ , com a corrente no resistor de 240  $\Omega$ . Então:

$$V_{ref} = 1,2V \therefore I_{R1} = \frac{V_{ref}}{240 \Omega} \Rightarrow I_{R1} = \frac{1,2}{240 \Omega} \therefore I_{R1} = 5 \text{ mA} \quad (23)$$

Logo,

$$I_2 = I_{adj} + I_{R1} \quad (24)$$

$$I_2 = 100 \mu A + 5 \text{ mA} \therefore I_2 = 5,1 \text{ mA} \quad (25)$$

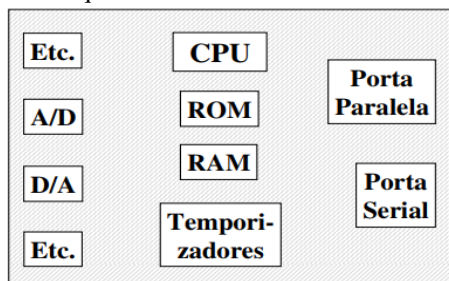
## 2.8 Microcontrolador

Um microcontrolador consiste em um CI programável com diversos blocos como memória, processador e periféricos de entrada e saída de dados, os quais variam em quantidade, tamanho da memória e velocidade de processamento de acordo com sua

arquitetura e com o tipo de microcontrolador. Ou seja, o microcontrolador é uma espécie de microprocessador básico incorporado a diversos dispositivos periféricos que possibilitam sua aplicação no controle digital (ZELENOVSKY, 2005).

Existem vários tipos de microcontroladores no mercado, por exemplo: 8051 da *Intel*, ARV fabricado pela *Atmel*, PIC (*Peripheral Interface Controller*), tendo sido este último desenvolvido pela empresa *Microchip Technology Inc.* O PIC 18F4520 foi utilizado neste trabalho. Ele foi programado para fazer a leitura da tensão de saída e da corrente de saída da fonte e apresentá-las em um *display* de cristal líquido (LCD).

Figura 7: Arquitetura básica de um microcontrolador

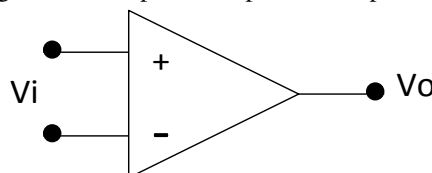


Fonte: (ZELENOVSKY, 2005)

## 2.5 Amplificador operacional

Chama-se amplificador operacional (AMP-OP) um amplificador de tensão CC multiestágio com entrada diferencial e que possui características que se aproximam a de um amplificador ideal (PERTENCE JUNIOR, 2003). Amplificadores operacionais estão disponíveis comercialmente em circuitos integrados.

Figura 8: Exemplo de amplificador operacional



Fonte: Autoria própria.

Pertence Junior (2003), lista estas características ideais de um AMP-OP:

- ganho de tensão infinito;
- resposta de frequência infinita (CC a infinitos Hertz);

- resistência de entrada infinita;
- resistência de saída nula;
- insensibilidade a temperatura (*drift* nulo).

### 2.5.1 Amplificador diferencial

O amplificador diferencial é um circuito que mostra uma dada tensão de saída ( $V_O$ ) dada pela multiplicação de seu ganho ( $A$ ) pela tensão de entrada ( $V_i$ ) (PERTENCE JUNIOR, 2003). Logo, têm-se:

$$V_O = AV_d \quad (26)$$

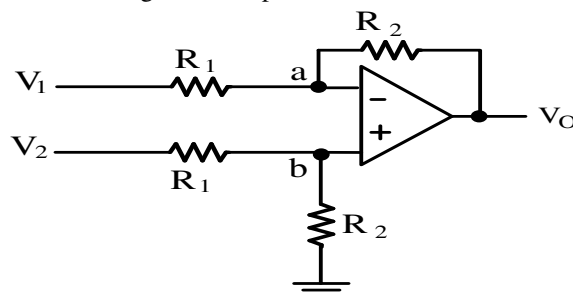
Sabendo que ( $A$ ) representa o ganho de tensão, e chamando de  $V_1$  e  $V_2$  as tensões aplicadas nos terminais da entrada, é válida a seguinte relação:

$$A = \frac{V_d}{V_O} \quad (27)$$

$$V_O = A(V_1 - V_2) \quad (28)$$

O circuito condicionador de sinal por amplificação, de acordo com Pertence Junior (2003), possibilita a obtenção de uma tensão de saída igual à multiplicação da diferença entre os sinais de entrada e o ganho diferencial.

Figura 9: Amplificador diferencial.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 9, têm-se:

Nó a:

$$\frac{(V_1 - V_a)}{R_1} + \frac{(V_o - V_b)}{R_2} = 0 \quad (29)$$

Nó b:

$$\frac{(V_2 - V_b)}{R_1} - \frac{V_b}{R_2} = 0 \quad (30)$$

Rearranjando as equações:

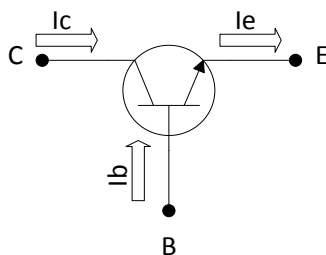
$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (31)$$

Este elemento será útil para baixar, proporcionalmente ao ganho, a de saída da fonte para que possa ser lida pelo PIC, uma vez que este não suporta tensões muito altas em suas portas.

## 2.6 Transistor bipolar de junção (TBJ)

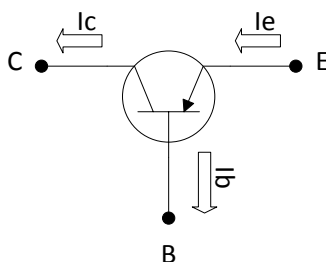
Um transistor é um dispositivo de estado sólido de três terminais ligados a três camadas de semicondutores que foi criado, a princípio para substituir as válvulas, que até o 1947 eram largamente utilizadas na indústria de fabricação de amplificadores. As válvulas eletrônicas ou válvula termoiônicas ainda são utilizadas nos dias de hoje para aplicações de amplificação de áudio para instrumentos musicais. No entanto por serem maiores que os transistores, e por requererem um aquecimento, as válvulas dissipam mais potência e levam mais tempo para entrar em pleno funcionamento. Os transistores bipolares de junção podem ser do tipo PNP ou NPN, de acordo com o arranjo dos semicondutores do tipo N ou P internos a ele. (BOYLESTAD, 1984).

Figura 10: Transistor bipolar de junção do tipo NPN



**Fonte:** Autoria própria.

Figura 11: Transistor bipolar de junção do tipo PNP



**Fonte:** Autoria própria.

As figuras acima representam os dois tipos de TBJ citados anteriormente. Observa-se que basicamente a diferença entre eles será o sentido das correntes em seus terminais, sendo estes representados pelos nós C (coletor), B (base) e E (emissor). De acordo com sua configuração no circuito pode-se polarizar essas junções direta ou inversamente, conforme a operação desejada, pois além de serem empregados em circuitos de amplificação, os transistores podem operar ainda em regiões de corte; no caso em que o transistor atua como um circuito aberto; ou ainda na região de saturação, agindo como um nó. São estas últimas as operações de interesse para este trabalho, pois o transistor atuará no acionamento da bobina de um relé, que é acionado no caso de uma corrente de curto circuito. Para o modo de operação em saturação, em um TBJ tipo NPN quando aplicada a lei das correntes de *Kirchhoff*, tem-se:

$$I_e = I_c + I_b \quad (32)$$

Na região de corte,  $I_e = 0 \text{ A}$  e os diodos internos tanto da junção BE (base-emissor), quanto da junção BC (base-coletor) estão polarizados inversamente. Já na região de saturação  $I_e \cong I_c$ , uma vez que a corrente na base  $I_b$  é proporcionalmente inferior à corrente no coletor, chegando a casa de  $\mu\text{A}$ . Essa constante de

proporcionalidade é o ganho ( $\beta$ ) do transistor, portanto depende da corrente do coletor e o ganho do transistor, atuando apenas o controle da quantidade de corrente elétrica que sai no emissor. Da seguinte maneira:

$$I_c = \beta I_b \quad (33)$$

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} \quad (34)$$

Substituindo  $I_c$  da equação (21) por  $I_c$  da equação (22), obtém-se:

$$I_e = I_b + (\beta I_b) \quad (35)$$

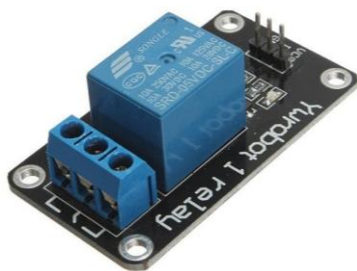
$$I_e = (\beta + 1) \cdot I_b \quad (36)$$

Com estas equações é possível polarizar o transistor como bem entendermos, controlando a corrente no coletor e na base com resistores devidamente dimensionados.

## 2.7 Relé

O relé consiste em um arranjo de espiras que quando energizadas produzem um campo magnético que aciona ou abre uma chave, caso ela seja normalmente aberta ou normalmente fechada respectivamente. No projeto, o relé deverá ser energizado caso haja uma sobre-corrente no circuito.

Figura 12: Exemplo de um relé de 5V e 1 canal



**Fonte:** Google Imagens.

No caso de uma sobre-corrente, o transistor conectado em série com a bobina do relé, deverá ser polarizado diretamente, operando no modo de saturação, permitindo que a bobina seja energizada, abrindo o circuito na saída da fonte.

## 2.8 Sensor de corrente

Um meio de medir a corrente de um circuito é útil para identificar uma sobre-corrente ou corrente de curto circuito, que gera um superaquecimento dos condutores, danificando os componentes do circuito e a carga, e também causando risco de incêndio. Sabendo a quantidade de corrente em um ramo específico do circuito, é possível por meio do módulo relé, abrir o circuito no caso de sobre-corrente. O sensor de corrente utilizado no projeto deve monitorar a corrente na carga da fonte. Uma vez que sabe-se a corrente e a tensão na carga, é possível aplicá-las na equação (2) e calcular a potência dissipada.

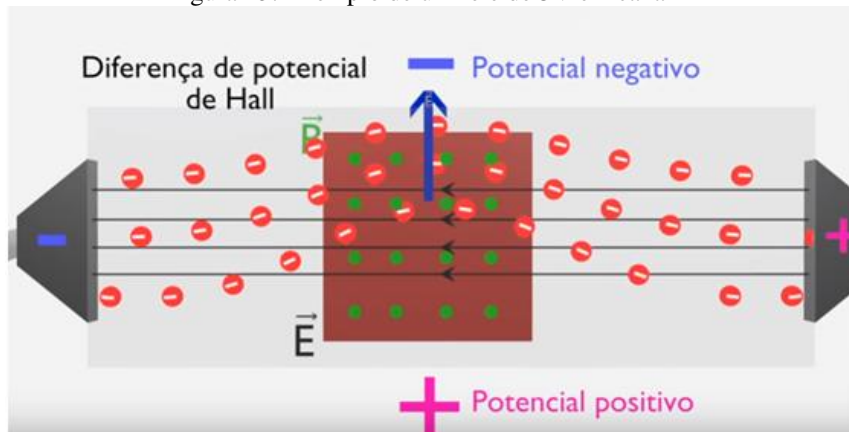
Existem dois tipos de sensores: não-invasivos e invasivos. Os sensores não-invasivos não interferem na instalação, pois medem a corrente de forma indireta como por exemplo o alicate amperímetro, que mede a corrente pelo campo magnético produzido pelas cargas que fluem na corrente através de um dado condutor. Estes sensores são práticos, no entanto sua medição é menos precisa. Já os sensores de corrente do tipo invasivos necessitam abrir o circuito, e na maioria das vezes se conectar em série com o ramo em que se quer medir a corrente, que é o caso neste projeto.

### 2.8.1 Sensor de efeito Hall

O sensor de efeito Hall, como sugere o nome, realiza a medição da corrente através do chamado efeito Hall. Esse efeito ocorre quando uma corrente que percorre um condutor é submetida a um campo magnético perpendicular ao campo elétrico produzido pela diferença de potencial aplicada no condutor. E esse campo magnético é produzido no próprio sensor. Pela ação da força magnética produzida pelo campo magnético externo, há um deslocamento dos elétrons livres que percorrem o condutor, provocando uma diferença de potencial elétrico dentro do condutor, perpendicular a direção da corrente que o percorre. O efeito Hall recebeu o nome do físico Edwin H.

Hall, que o descobriu em 1879 (Pinto, 2010). O efeito Hall está ilustrado na figura abaixo:

Figura 13: Exemplo de um relé de 5V e 1 canal



**Fonte:** (SILVA, LIMA & SALAZAR, 2017)

Uma corrente elétrica maior no condutor implica em uma maior quantidade de elétrons que são deslocados, pelo campo magnético externo, dentro do condutor. E consequentemente, maior será a tensão produzida pelo deslocamento desses elétrons. Essa tensão é apresentada na saída do sensor. E poderemos programar o microcontrolador para fazer o cálculo da corrente que está produzindo essa tensão de Hall.

### 3. METODOLOGIA E PROJETO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

#### 3.1 Introdução

Apresentados os conceitos teóricos a serem abordados no projeto da fonte de alimentação, segue-se a estrutura do trabalho com a introdução do dimensionamento dos componentes que serão adotados. Como foi mostrado anteriormente, o primeiro componente da fonte a ser escolhido é o transformador, que receberá uma tensão alternada menor que a de 220 V proveniente da rede de distribuição local, uma amplitude máxima mais próxima dos 30 V desejados do projeto, levando ainda em consideração que o regulador de tensão necessita de 2 V acima da tensão máxima na sua saída. Logo, o mínimo valor médio da tensão no terminal de entrada do regulador deve ser 32 V contínuos (CC), para garantir uma boa regulação na saída. Para manter o valor médio da tensão em 32 V, o filtro capacitivo será dimensionado de modo a manter a pulsação remanescente da frequência da rede elétrica no sinal, dentro do valor médio de 32 V.

Primeiramente, sabendo que o valor eficaz (RMS) da tensão entregue pela rede elétrica é de 220 V, utilizando a equação (9), conseguimos o valor máximo, ou valor de pico dessa tensão alternada:

$$Vm_{rede} = V_{eficaz} \cdot \sqrt{2} \quad (37)$$

$$Vm_{rede} = 311,127 \text{ V} \quad (38)$$

Sabendo que a tensão contínua necessária para regulação é 32 V, e que a queda de tensão da ponte retificadora é de 1,4 V, a utilizar novamente a equação (9) é possível conhecer o valor eficaz (RMS) mínimo de tensão na saída do transformador:

$$V_{eficaz} = \frac{(32 \text{ V} + 1,4 \text{ V})}{\sqrt{2}} \quad (39)$$

$$V_{eficaz} = 23,62 \text{ V} \quad (40)$$

O transformador adotado deve suprir no mínimo este valor de tensão eficaz. No caso deste projeto, foi utilizado um transformador de +12 V/-12 V e 1 A de corrente, de núcleo ferromagnético e com derivação central, devido a sua disponibilidade e que dada a soma das diferenças dos potenciais entre os terminais do secundário resultante em 24 V eficazes, o transformador supre as necessidades do projeto. Convertendo esse valor eficaz para seu valor máximo, através da equação (9):

$$V_m = 24 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \quad (41)$$

$$V_m = 33,94 \text{ V} \quad (42)$$

Logo, sabendo-se que a queda de tensão na ponte retificadora é de 1,4 V, é possível encontrar a tensão máxima de pico ( $V_{pc}$ ) no capacitor:

$$V_{pc} = 33,94 \text{ V} - 1,4 \text{ V} \quad (43)$$

$$V_{pc} = 32,54 \text{ V} \quad (44)$$

Pode-se saber o valor médio da tensão na saída da ponte retificadora pela equação (16):

$$V_{med} \cong 0,636 \cdot 32,54 \quad (45)$$

$$V_{med} \cong 20,7 \text{ V} \quad (46)$$

### 3.2 Especificações e considerações de projeto

Na Tabela 1 estão listadas as considerações iniciais utilizadas para determinação dos parâmetros assumidos no projeto. Uma dessas considerações iniciais, é que foi presumido um rendimento 80% da fonte baseado em valores obtidos através de pesquisas, ou seja, consideramos que a fonte entrega 80% da potência empregada na sua entrada. Outra consideração é que a ondulação máxima permitida da tensão nos capacitores deve ser de 20% do seu valor máximo.

Tabela 1– Considerações iniciais do projeto.

| Parâmetro                                                 | Simbologia   | Valor                 |
|-----------------------------------------------------------|--------------|-----------------------|
| Rendimento da fonte                                       | $\eta$       | 80%                   |
| Frequência de oscilação da rede                           | $f$          | 60 Hz                 |
| Tensão de pico nos terminais secundários do transformador | $V_s$        | 33,94 V               |
| Tensão de pico no Capacitor                               | $V_{cmax}$   | 32,54 V               |
| Ondulação da tensão no capacitor                          | $\Delta V_C$ | $20\% \cdot V_{cmax}$ |

**Fonte:** Autoria própria.

A Tabela 2 lista as especificações da fonte proposta:

Tabela 2– Especificações da fonte regulável

| Parâmetro                              | Simbologia | Valor |
|----------------------------------------|------------|-------|
| Tensão de máxima de regulação da fonte | $V_o$      | 30 V  |
| Corrente máxima de saída da fonte      | $I_o$      | 1 A   |
| Potência de saída do Conversor         | $P_o$      | 30 W  |

**Fonte:** Autoria própria.

### 3.3 Parâmetros assumidos

Como foi presumido um rendimento teórico, verificar na Tabela 1, já que há perdas nos componentes da fonte. Ao final do projeto será possível calcular o rendimento real da fonte. Por hora, calcula-se a potência ativa de entrada na fonte:

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = \frac{30 \text{ W}}{0.80} = 37,5 \text{ W} \quad (47)$$

A ondulação na tensão do filtro capacitivo  $\Delta V_{pc}$ , de acordo com os valores da tabela 1 é igual a:

$$\Delta V_C = 20\% \cdot 32,54 \cong 6,51 \text{ V} \quad (48)$$

Dessa forma é possível saber a tensão mínima permitida no filtro capacitivo:

$$V_{Cmin} = (32,54 \text{ V} - 6,51 \text{ V}) \quad \therefore \quad V_{Cmin} = 26,03 \quad (49)$$

### 3.4 Dimensionamento do filtro capacitivo

Tendo escolhido a ponte retificadora de diodos de silício e tendo conhecimento das tensões mínimas e máximas necessárias após a retificação, pode-se então fazer o cálculo do filtro capacitivo através da equação (19):

$$C = \frac{37,5 \text{ W}}{60 \text{ Hz} \cdot ((32,54 \text{ V})^2 - (26,03 \text{ V})^2)} \quad (50)$$

$$C = 1,64 \text{ mF} \quad (51)$$

Este é um valor bastante incomum de capacitância, e provavelmente só será possível atingi-lo valendo-se diversas associações de capacitores. Devido a falta de disponibilidade de uma gama maior de capacitores, foi adotado uma configuração de 2200 $\mu$ F de capacitância equivalente, utilizando dois capacitores em série de 2200 $\mu$ F e 25 V cada (resultando 50 V de tensão nesse ramo, sendo somente assim possível emprega-los como filtros capacitivos, pois a tensão mínima nesse ponto é de 26,03 V), em paralelo com outra associação em série de 2.2 mF e 25 V cada. Totalizando assim uma capacitância equivalente total de 2 mF e 50V.

Nesse caso, como a capacitância adotada foi maior do que a calculada para a ondulação de 20% no filtro, a nova ondulação no filtro poderá ser calculada sabendo a mínima tensão permitida para essa capacitância adotada:

$$2.2 \text{ mF} = \frac{37,5 \text{ W}}{60 \text{ Hz} \cdot ((32,54 \text{ V})^2 - (V_{Cmin})^2)} \quad (52)$$

Logo,

$$V_{Cmin} = 27,83 \text{ V} \quad (53)$$

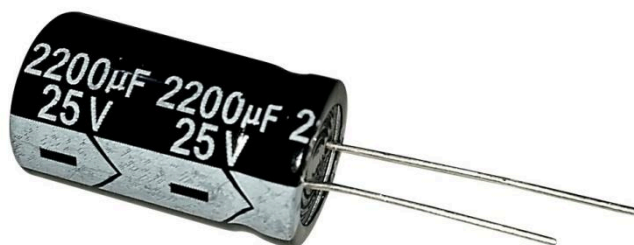
Então a nova ondulação ou *ripple* no filtro capacitivo é:

$$(32,54 - 27,82) = \text{ripple\%} \cdot 32,54 \quad (54)$$

$$\text{ripple\%} \cong 0,145 \quad (55)$$

Portanto, o novo *ripple* é de 14,5% do valor de pico da tensão no filtro capacitivo.

Figura 14: Capacitor utilizado no filtro capacitivo.

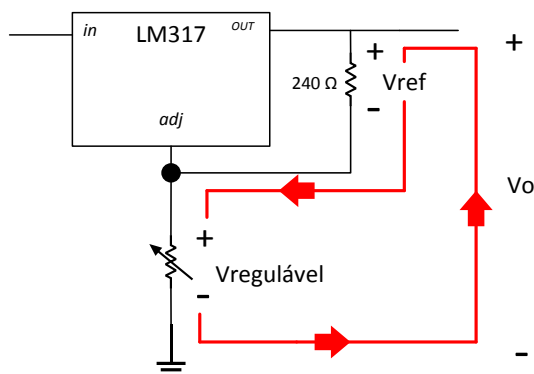


Fonte: Google imagens.

### 3.5 Projeto do circuito de regulação

Agora que já se possui a tensão mínima necessária para o funcionamento do LM317, é preciso encontrar o valor da resistência do potenciômetro indicado pela figura 2.4. A tensão no potenciômetro somada à tensão de referência  $V_{ref}$  do regulador será a tensão de saída da fonte, como pode ser observado na figura 3.5:

Figura 15: Malha da saída da fonte



**Fonte:** Autoria própria.

De acordo com a folha de dados do LM317 a tensão de referência  $V_{ref}$  é fixada por um diodo zener interno do regulador em 1,2 V. Assim, quando se deseja uma tensão de 30V na saída na sua saída, tem-se, de acordo com a equação (20):

$$30\text{ V} = 1,2\text{ V} + V_{regulável} \quad (56)$$

A tensão regulável do potenciômetro é produzido pela soma das correntes do pino de ajuste do regulador, que é fornecida no *datasheet* como sendo constante e igual a  $100 \times 10^{-6}$  A, e a corrente que passa pelo resistor de  $240\ \Omega$  que está em paralelo com a tensão de referência do regulador. Dessa forma sabe-se a corrente  $I_{ref}$  que o percorre:

$$I_{ref} = \frac{1,2\text{ V}}{242\ \Omega} \quad \therefore \quad I_{ref} = 5\text{ mA} \quad (57)$$

Utilizando a lei dos nós de Kirchhoff, tem-se que a corrente no potenciômetro:

$$I_{pot} = 5\text{ mA} + 100\ \mu\text{A} \quad (58)$$

Logo,

$$I_{pot} = 5,1\text{ mA} \quad (59)$$

Portanto, sendo a tensão regulável igual a corrente do potenciômetro e sua respectiva resistência:

$$V_{regulável} = 5,1\text{ mA} \cdot R_{pot} \quad (60)$$

Substituindo a equação acima na equação (49):

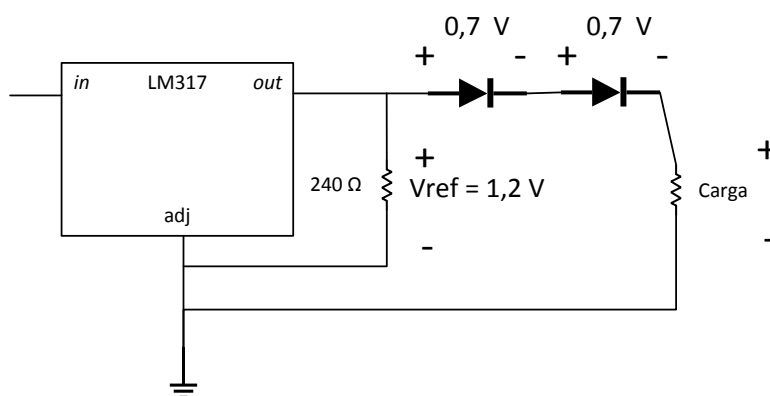
$$30\text{ V} = 1,2\text{ V} + (5,1\text{ mA} \cdot R_{pot}) \quad (61)$$

Assim,

$$R_{pot} = 5,647 \text{ k}\Omega \quad (62)$$

Este é a resistência mínima do potenciômetro necessária para que sua tensão somada à tensão fixa de referência seja igual a 30 V na saída. No entanto, ao observamos que quando a resistência do potenciômetro for mínima, e a tensão  $V_{regulável}$  se aproxime de 0, a tensão na saída da fonte não chegaria a 0 V, de acordo com a equação (20), uma vez que a tensão de referência  $V_{ref}$  é fixa e igual a 1,2 V. Para diminuir esse valor de tensão foram adotados dois diodos de silício, os quais produzem uma queda de tensão de 0,7 V cada. Em série eles produzem -1,4 V a menos na saída da fonte se houver uma carga conectada na fonte, para que produza essa queda de tensão nos diodos.

Figura 16: Malha da saída da fonte para o 0 volts



Fonte: Autoria própria.

### 3.6 Projeto do circuito de aquisição

Agora que a fonte está projetada, o último passo é projetar o circuito que vai monitorar os valores de corrente e tensão na saída da fonte. Para tal recurso, foi utilizado um circuito condicionador da tensão de saída, para que possa ser lido através do conversor analógico-digital do microcontrolador. O circuito deve diminuir proporcionalmente o nível de tensão contínua para que possa ser interpretado pelo código programado no PIC18F4520. A corrente também deve ser adaptada para que possa ser medida, uma vez que as portas do conversor interpretam a tensão nas mesmas,

e para essa finalidade foi utilizado o sensor Hall de corrente. A seguir estão os projetos de cada um.

### 3.6.1 Circuito condicionador de tensão

O circuito condicionador consiste no amplificador diferencial, que fará essa "conversão" do valor de tensão de saída da fonte para no máximo 5 V que é a tensão máxima suportada nos pinos do microcontrolador.

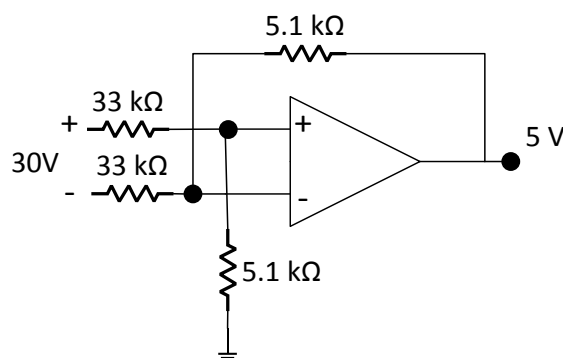
Ao utilizar-se a equação (26), quando deseja-se converter os 30 V da saída da fonte em 5 V, tem -se:

$$5\text{ V} = \frac{R_2}{R_1} (30\text{ V} - 0) \quad (63)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{6} \quad (64)$$

Então, pode se observar que o resistor R1 da configuração de amplificador diferencial, deve ser 6 vezes maior que R2 para obtenção de 5 V no amplificador quando aplicado os 30 V da fonte na sua entrada. Devido a disponibilidade dos materiais, foram utilizados resistores de 33 kΩ e 5.1 kΩ respectivamente para os resistores R1 e R2. O circuito fica o seguinte:

Figura 17: Amplificador operacional do circuito condicionador



**Fonte:** Autoria própria.

### 3.6.2 Circuito sensor de corrente:

O sensor de corrente utilizado, como já citado, é o de efeito Hall, que produz uma tensão proporcional a corrente que o percorre. O microcontrolador interpretará essa tensão, convertendo-a, através do código, novamente em seu valor de corrente, e apresentando-o no *display* de cristal líquido.

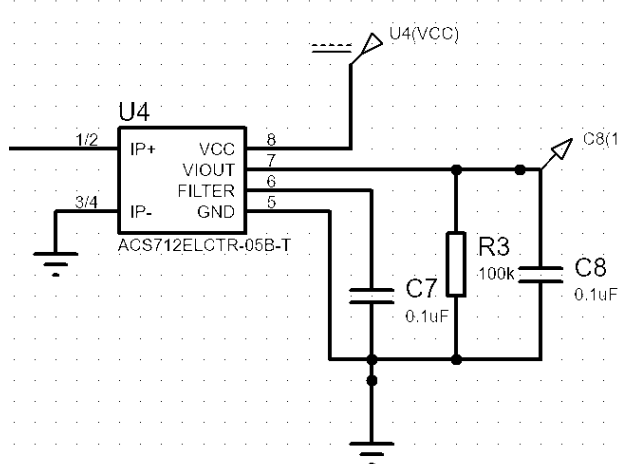
O sensor possui tensão de saída inicial fixa de 2,5 V, a tensão será somada à multiplicação do ganho de 1,33 mV/A, fornecido pela folha de dados, e a corrente medida. Dessa maneira, tem-se que a saída de tensão do sensor é igual a:

$$V_{sensor} = \left( 133 \frac{mV}{A} \times 1 A \right) + 2,5V \quad (65)$$

$$V_{sensor} = 2,633 V \quad (66)$$

Portanto, a tensão máxima presumida na saída do sensor, para a corrente máxima da fonte que é de 1 A, é 2,633 V. Quando não houver corrente percorrendo o sensor, a tensão na sua saída será os 2,5 V. O microcontrolador deve interpretar esse caso como sendo a corrente de saída da fonte igual a 0 A.

Figura 18: Esquemático do sensor de corrente na saída da fonte



Fonte: Autoria própria

### 3.7 Especificações do Microcontrolador (PIC18F4520)

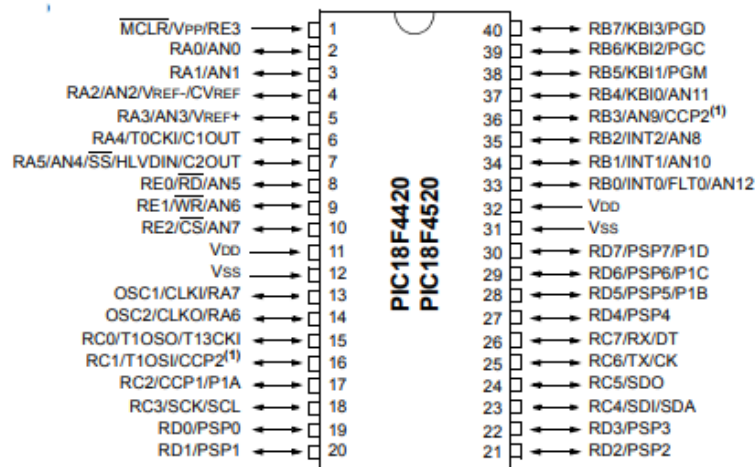
O PIC18F4520 é um microcontrolador que apresenta baixo custo, pois possui alto desempenho, e é recomendado tanto para utilização em ambientes industriais como

para pequenos projetos e automação residencial. De a folha de dados do PIC18F4520, as suas principais características são:

- 40 pinos;
- Memória de programa (*Flash*): 32 Kwords;
- Memória RAM: 1536 bytes;
- Memória EEPROM: 256 bytes;
- Velocidade CPU (*Mips*): 5
- Portas A/D (10-bit): 13
- Interfaces de comunicação: 1-UART, 1-A/E/USART, 1-SPI, 1-I2C-MSSP (SPI/I21C)
- Dois módulos CCP (*Capture, Compare e PWM*);
- *Timers*: 1x 8-bit, 3x 16-bit
- Conversor analógico digital (ADC): 13 canais de entrada, 10 bits de resolução;
- Tensão de operação: 2 a 5.5V
- Corrente por porta: 25 mA
- Comparadores: 2

A Figura 3.7 contém a pinagem do PIC18F4520, descrita na sua folha de dados:

Figura 19: Pinagem do PIC18F4520



Fonte: Datasheet do PIC18F4520.

Ao utilizar o conversor A/D com 10 bits, implica em uma variação  $V_{res}$  de:

$$V_{res} = \left( \frac{5}{1024} \right) \therefore 5\text{mV/bit} \quad (67)$$

Nesse caso, para que o voltímetro meça tensões de 0-30 V, e mostrá-las no display de LCD, a fração do valor real da tensão necessária é dada por:

$$V_{medido} = \left( \frac{V_{leitura}}{N_{bits}} \right) \cdot 30 \quad (68)$$

No caso da tensão provinda do sensor Hall, que é de no máximo 2,63 V, tem-se:

$$V_{sensor} = \left( \frac{V_{leitura}}{N_{bits}} \right) \cdot 2,633 \quad (69)$$

No código programado no microcontrolador, consta também a condição de controle do valor de corrente dentro de 1 A. Ao detectar uma corrente acima desse valor, o microcontrolador envia um sinal para um transistor bipolar de junção ligado a bobina de um relé. Quando o transistor recebe o sinal, ele entra em saturação e energiza a bobina do relé, fazendo com que este abra o circuito, protegendo a carga contra sobrecorrentes.

Agora apresentados os métodos utilizados para o projeto, bem como seus componentes, segue-se a sequência do trabalho com a simulação do projeto e a montagem experimental do protótipo da fonte de alimentação regulável.

## 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, tanto teóricos experimentais e obtidos da simulação, para que seja possível verificar as semelhanças entre os mesmos. O projeto que foi apresentado propõe uma fonte de alimentação de tensão contínua regulável que fornece também variação na sua corrente de saída.

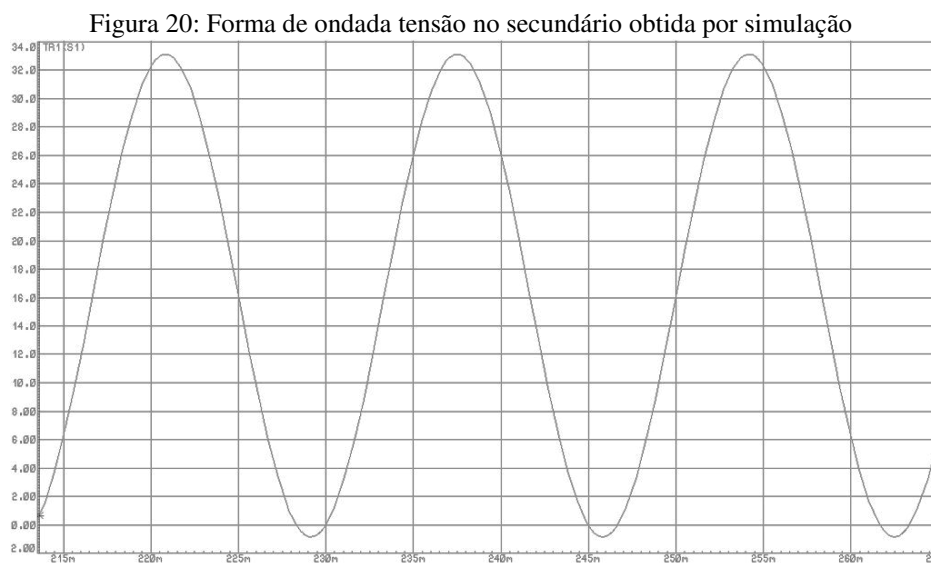
### 4.2 Resultados de simulação e experimentais

O transformador, bem como o circuito de retificação e de regulação foi constituído por componentes dimensionados de acordo com as especificações iniciais do projeto. É importante salientar que as figuras mostradas aqui foram obtidas sem que houvesse uma carga conectada a fonte de tensão.

#### 4.1.1 Formas de ondas obtidas experimentalmente

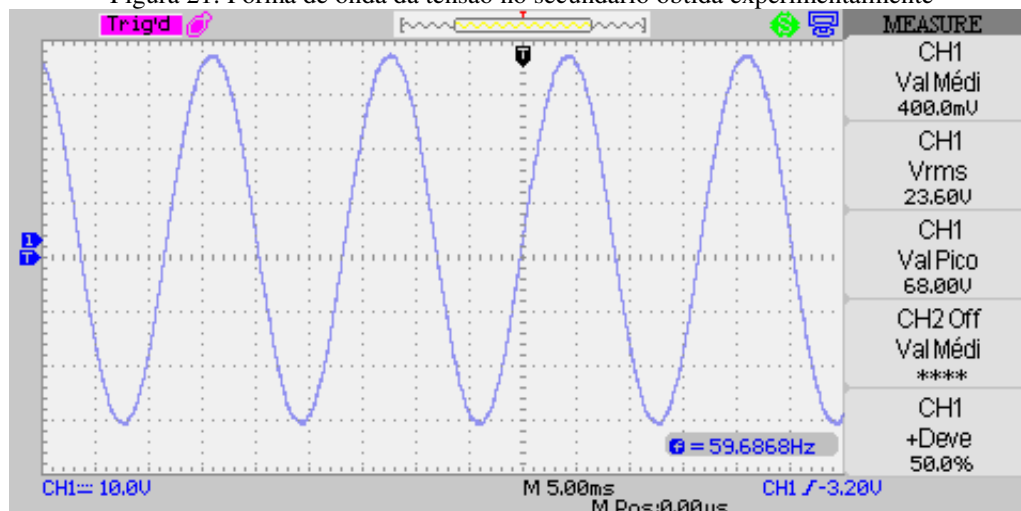
Estão listadas a seguir as formas de onda obtidas por meio de simulações de adquiridas do circuito montado.

A Figura 4.1.1 e 4.1.2 mostram as formas de onda da tensão no enrolamento secundário do transformador, obtidas por simulação e experimentalmente:



Fonte: Autoria própria.

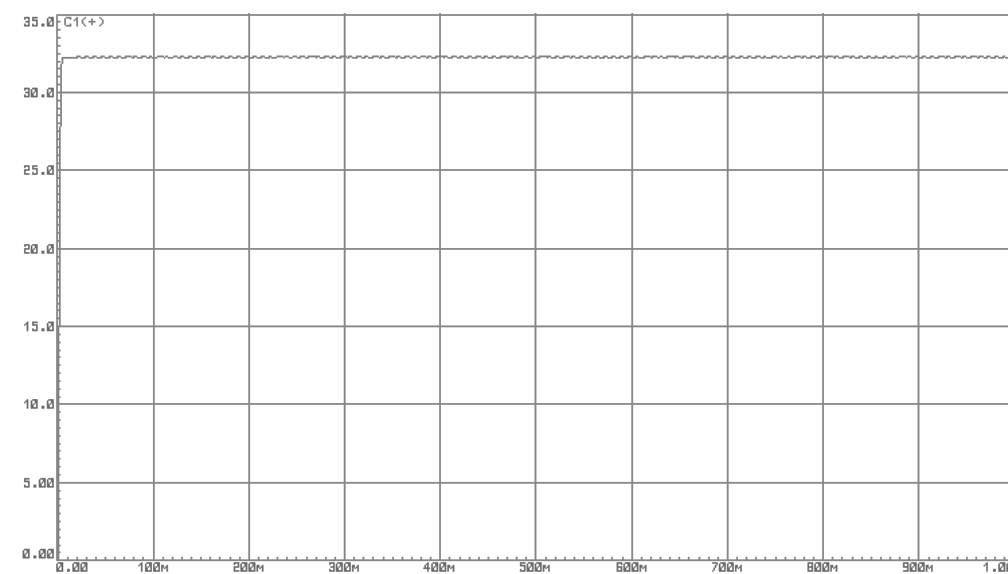
Figura 21: Forma de onda da tensão no secundário obtida experimentalmente



Fonte: Autoria própria.

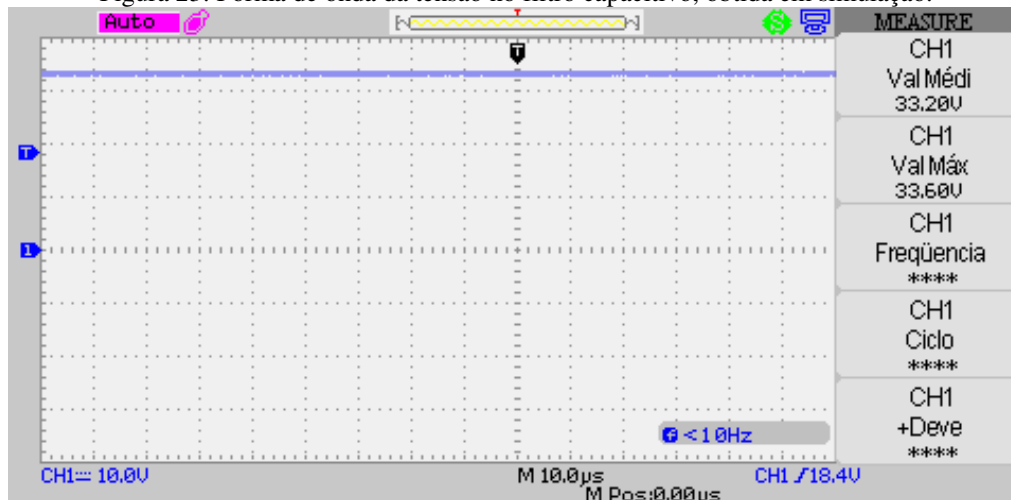
A próxima forma de onda é a tensão no nó que liga a saída da ponte retificadora, o filtro capacitivo e o regulador de tensão. A qual pode ser observada nas figuras 4.1.3 e 4.1.4:

Figura 22: Forma de onda da tensão no filtro capacitivo, obtida em simulação.



Fonte: Autoria própria

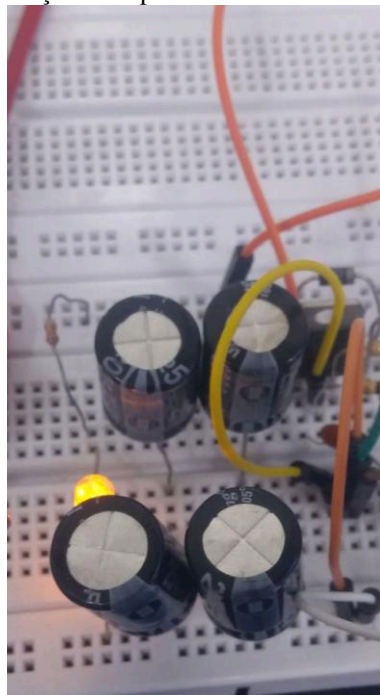
Figura 23: Forma de onda da tensão no filtro capacitivo, obtida em simulação.



Fonte: Autoria própria

Observa-se uma queda de tensão em relação ao valor de pico da tensão obtida no enrolamento secundário do transformador, queda essa proveniente da ponte retificadora, como foi previsto anteriormente no referencial bibliográfico.

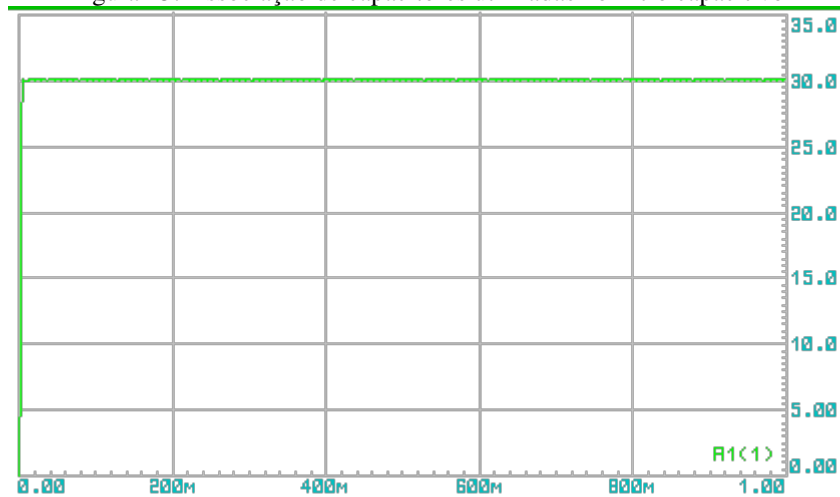
Figura 24: Associação de capacitores utilizadas no filtro capacitivo



Fonte: Autoria própria

Em seguida, pode-se verificar a forma de onda da tensão na saída do regulador de tensão obtida por simulação:

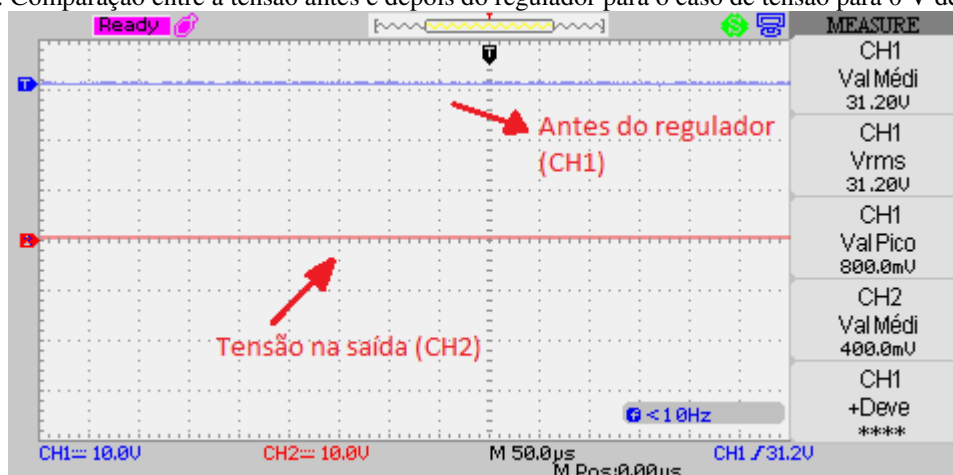
Figura 25: Associação de capacitores utilizadas no filtro capacitivo



Fonte: Autoria própria

Adiante está ilustrada a comparação entre a tensão antes do regulador e após o regulador, tanto no seu valor mínimo quando em seu valor máximo de regulação atingidos experimentalmente que foram de 0,4 V e 26,08 respectivamente, como mostram as figuras 26 e 27 a seguir:

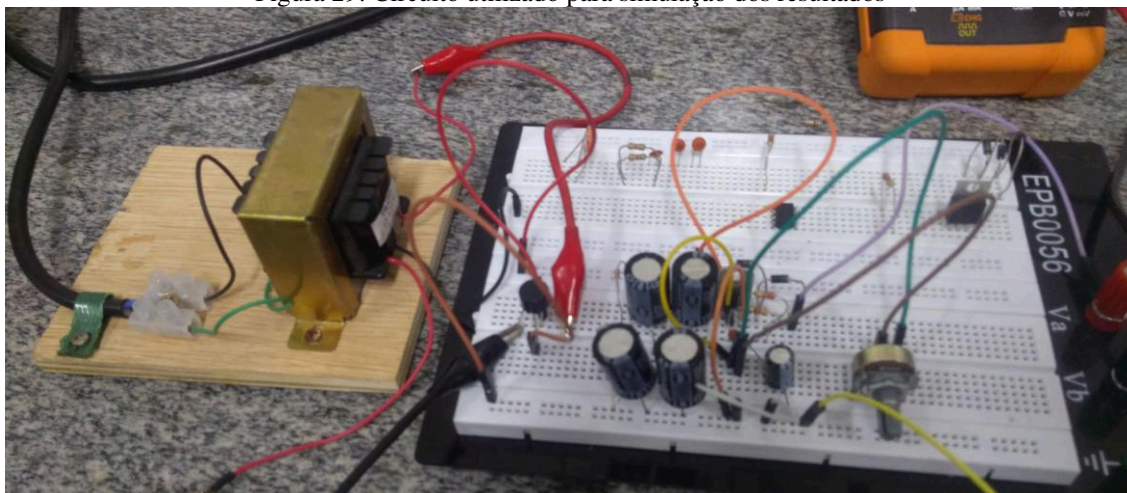
Figura 26: Comparação entre a tensão antes e depois do regulador para o caso de tensão para 0 V de saída



Fonte: Autoria própria



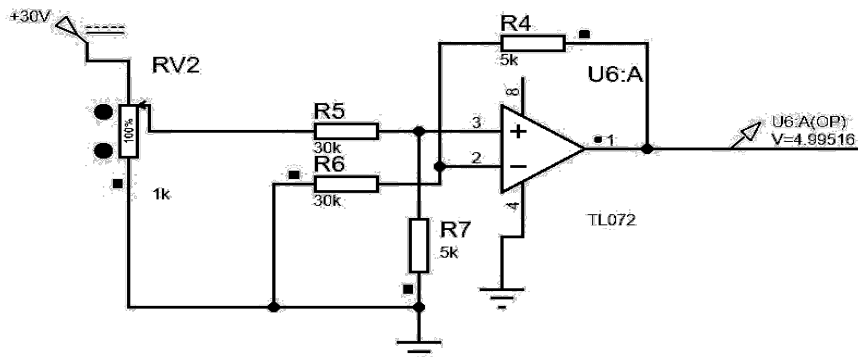
Figura 29: Circuito utilizado para simulação dos resultados



Fonte: Autoria própria

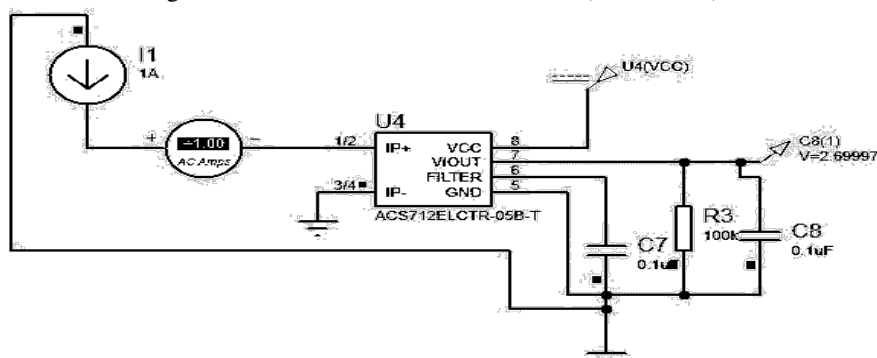
Agora que os resultados da fonte de alimentação já foram obtidos, restam agora os circuitos condicionadores de tensão que integram o circuito de monitoramento da corrente e tensão de saída da fonte. Os circuitos simulados para estas finalidades estão ilustrados abaixo:

Figura 30: Circuito do amplificador operacional



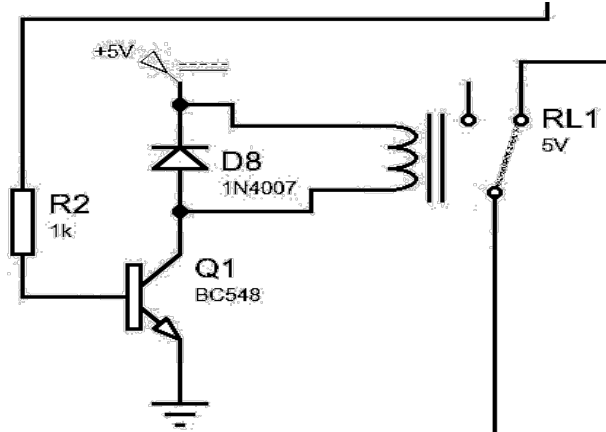
Fonte: Autoria própria

Figura 31: Circuito do sensor de corrente (sensor Hall)



Fonte: Autoria própria

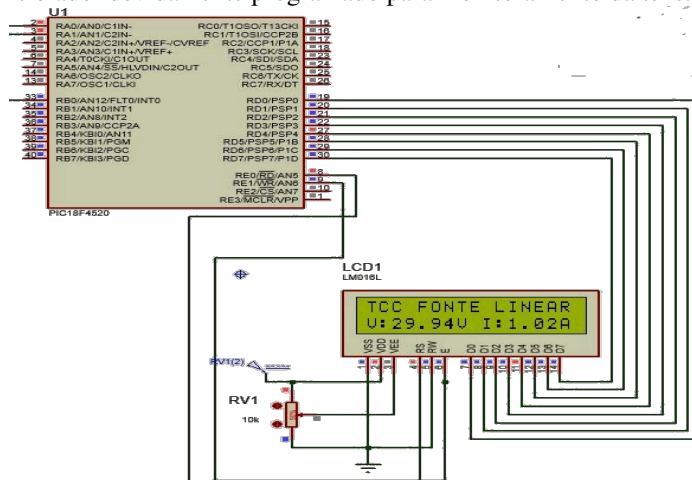
Figura 32: Circuito de acionamento do relé em caso de sobrecorrente (transistor).



Fonte: Autoria própria

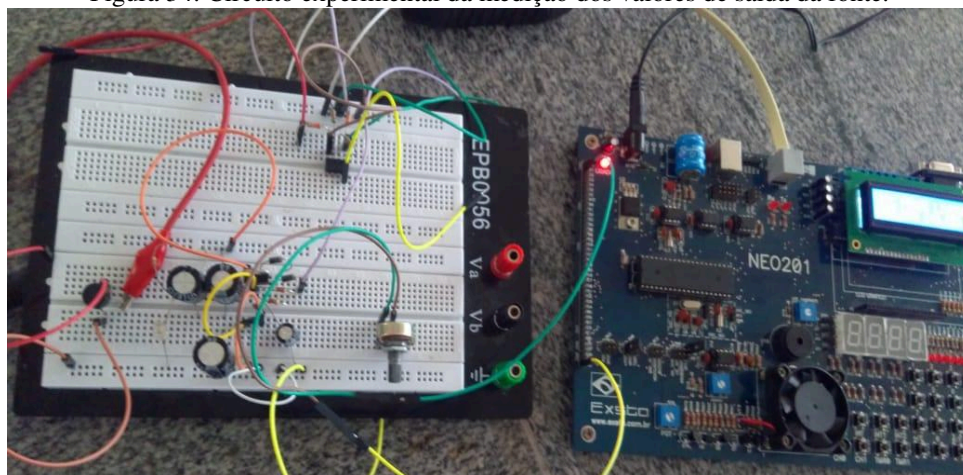
E por fim o circuito de monitoramento da tensão e corrente de saída da fonte de alimentação, composto pelo microcontrolador e pelo *display* de cristal líquido (LCD), que está ilustrado nas figuras 33, 34, 35 e 36 a seguir; com o circuito de simulação e experimental:

Figura 33: Microcontrolador devidamente programado para monitoramento da tensão e corrente de saída.



Fonte: Autoria própria

Figura 34: Circuito experimental da medição dos valores de saída da fonte.



Fonte: Autoria própria

Figura 35: Teste experimental do circuito de monitoração o caso 30 V e 1 A.



Fonte: Autoria própria

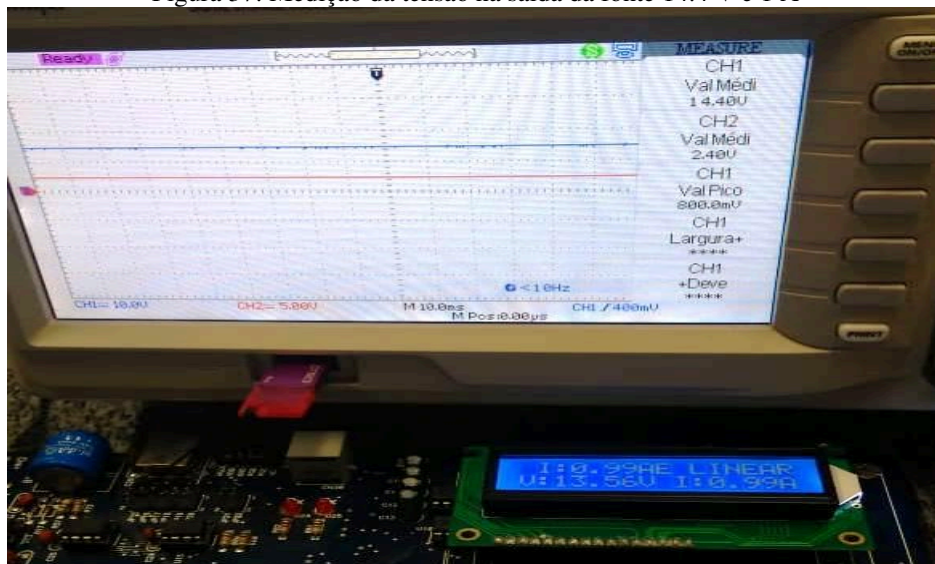
Figura 36: Teste experimental do circuito de monitoração o caso 0 V e 0 A.



Fonte: Autoria própria

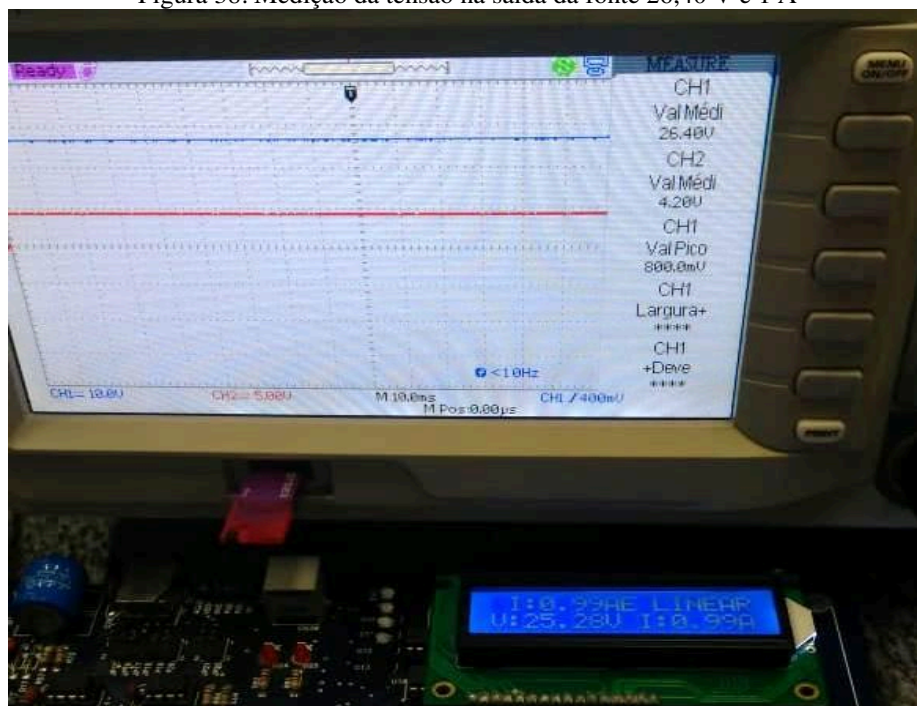
Já verificado o funcionamento do circuito de monitoração, resta agora utiliza-lo para fazer a leitura na saída da fonte. As figuras a seguir mostram o circuito de medição em funcionamento juntamente com a fonte de alimentação, mostrando seu valor de tensão de saída no display de LCD.

Figura 37: Medição da tensão na saída da fonte 14.4 V e 1 A



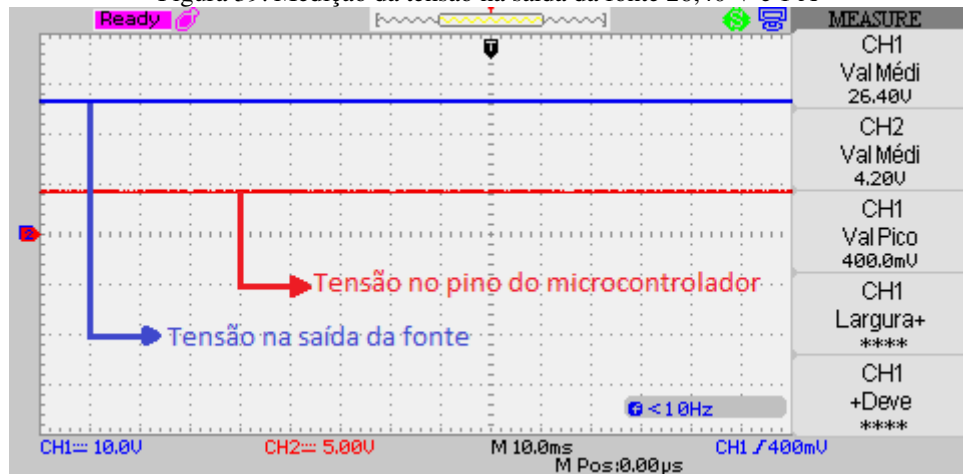
Fonte: Autoria própria

Figura 38: Medição da tensão na saída da fonte 26,40 V e 1 A



Fonte: Autoria própria

Figura 39: Medição da tensão na saída da fonte 26,40 V e 1 A



Fonte: Autoria própria

## 5. APÊNDICE I – CÓDIGO DO MICROCONTROLADOR

```

/*****//
//
// UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO (UFERSA) //
//
//
// TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
//
//
// OBJETIVOS: * Fazer a medição de tensão contínua 0-30 V utilizando o A/D com // resolução de 10
bits;
//
/*****//
#include <18F4520.h> //Definição do Dispositivo.
#define adc = 10
#define delay(clock=8000000) //Frequência do Oscilador Principal.
#include <lcd_ailtonjr.c> //Biblioteca do Display LCD.
#define FUSES HS //High speed Osc (> 4mhz)
#define FUSES NOWDT //No Watch Dog Timer
#define FUSES NOPROTECT //Code not protected from reading
#define FUSES NOBROWNOUT //No brownout reset
#define FUSES NODEBUG //No Debug mode for ICD
#define FUSES NOMCLR //Master Clear pin used for I/O
float Tensao =0, Corrente =0; //Tensão Medida.
//-----//
//Protótipo das Funções //
//-----//
void Config_PIC(); //Protótipo da Função de Config. do PIC.
//-----//
//Programa Principal //
//-----//
void main()
{
Config_PIC(); //Função de Config. do PIC.
while(true)
{
delay_ms(500); //Delay para temporização da leitura.
set_adc_channel(0); //Configuro o Canal 0 do A/D.
delay_us(20);
Tensao = Read_ADC(); //Leitura do A/D.
Tensao =(Tensao/1024)*30; //Adaptando os Valores.
set_adc_channel(1); //Configuro o Canal 1 do A/D.
delay_us(20);
Corrente = Read_ADC(); //Leitura do A/D.
Corrente = Corrente - 512;
Corrente =(Corrente/1024)*5; //Adaptando os Valores.
Corrente = Corrente*5.26;
if(Corrente>=1.5)
{
output_high(pin_B0);
}
lcd_pos_xy(1,2); //Posiciona o local de escrita no Display.
printf(lcd_escreve,"V:%fV I:%fA",Tensao, Corrente ); //Escreve no Display.
}
}
//-----//
//Função de Configuração Inicial do uC //

```

```
//-----//
void Config_PIC()
{
    set_tris_b(0);
    set_tris_d( 0x00 ); //Porta D como Saída utilizada pelo Display.
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN1); //Configura A/D em AN1.
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //Configuro o clock do A/D.
    lcd_ini(); //Inicialização do LCD.
    lcd_pos_xy(1,1); //Posiciona o local de escrita no Display.
    printf(lcd_escreve,"TCC FONTE LINEAR"); //Escreve no Display.
    //delay_ms(2000); //Delay para temporização da leitura.
    lcd_pos_xy(2,2); //Posiciona o local de escrita no Display.
    printf(lcd_escreve,"Prof.:AiltonJr"); //Escreve no Display.
    //delay_ms(2000); //Delay para temporização da leitura.
    lcd_pos_xy(1,2); //Posiciona o local de escrita no Display.
    lcd_escreve("          "); //Escreve no Display.
}
```

## **6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho apresentou o projeto de uma fonte de alimentação regulável utilizando o regulador de tensão variável LM 317 com o objetivo de ser utilizada em experimentos de bancada em laboratório de eletrônica. Como foi possível observar através dos resultados obtidos através simulações computacionais, procedimentos experimentais, e equacionamentos, foi constatado um valor de tensão aproximado dos 30 V propostos, sendo que este valor não pode ser atingido devido a indisponibilidade de componentes mais precisos como capacitores, potenciômetros e etc. Havendo ainda portanto a possibilidade de implementação de melhorias no projeto adotando-se componentes mais adequados. E para trabalhos futuros pode ser realizada a montagem final da fonte em uma placa de circuito impresso, com todos os componentes devidamente soldados e envolvidos em uma carcaça.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FREITAS, Luiz Fernando de França. **Desenvolvimento de um controlador lógico programável para fins didáticos**. 2016. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi - Árido, Caraúbas, 2016.

BOYLESTAD, Robert & NASHELSKI, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 1984.

STEWART, J. **Cálculo**. Vol. 1, 5a ed. Thomson, São Paulo, 2005.

SILVA, <sup>a</sup> Eduardo de Moraes. **DESENVOLVIMENTO DE TACÔMETRO MAGNÉTICO PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE EM PIGs INSTRUMENTADOS**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, v. n. 1 p. 81-104, out./mar., 2017.

**Microcontroladores** disponível em:

<[http://www.radioamadores.net/files/microcontroladores\\_pic.pdf](http://www.radioamadores.net/files/microcontroladores_pic.pdf)> Acesso em: 10 de setembro de 2017.

MENDONÇA, A.; ZELENOVSKY, A. "*Microcontroladores: Programação e Projeto com a Família 8051*." Rio de Janeiro: MZ Editora, agosto de 2005.

**Microcontroladores e PIC's** disponível em: <<http://www.microchip.com/>> Acesso em: 10 de setembro de 2017.

Braga, N. C. (2015). **Como Funcionam os Sensores de Efeito Hall**. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-comofuncionam-os-sensores-de-efeito-hall-art1050>. Acesso em: 06/08/2019.

PERTENCE JÚNIOR, Antônio. **Eletrônica Analógica: amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório..** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 299 p.

**PIC18F4520 Datasheet**. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/112665/MICROCHIP/PIC18F4520.html>> Acesso em: 02 de agosto de 2019.