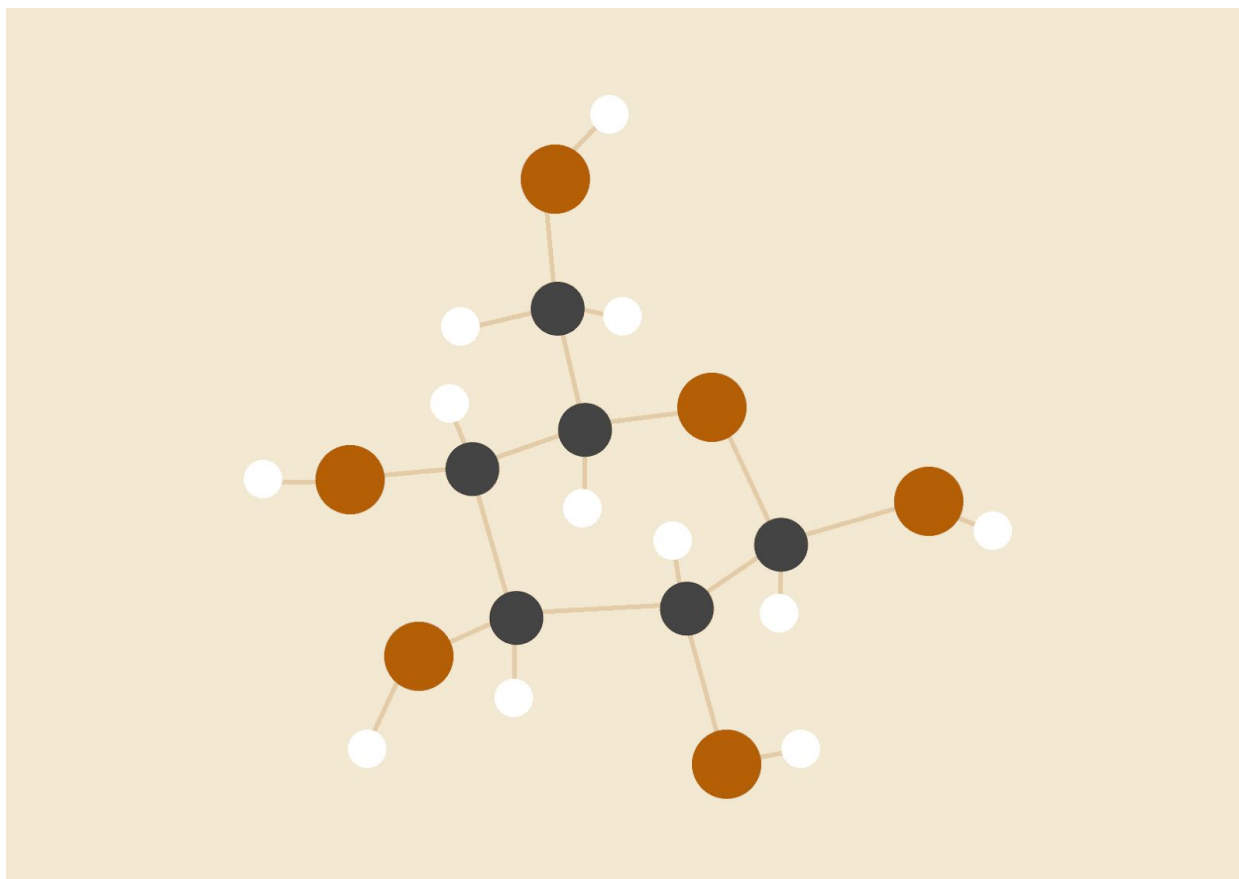


PROJETO DE UMA FONTE DE TENSÃO

Laboratório de Circuitos Eletrônicos I



Thiago Felicíssimo César

Bernardo Ferreira Torres

INTRODUÇÃO

Neste documento, reportamos os procedimentos e os cálculos envolvidos no projeto de uma fonte de tensão. Algumas de suas principais características são: corrente máxima, de 1 A e dois terminais de saída, um com tensão variável entre 0 V e 15 V e o outro entre -15 V e 0V. Ademais, o circuito dispõe de uma proteção digital que impede que a corrente ultrapasse seu valor máximo.

PROJETO DO CIRCUITO

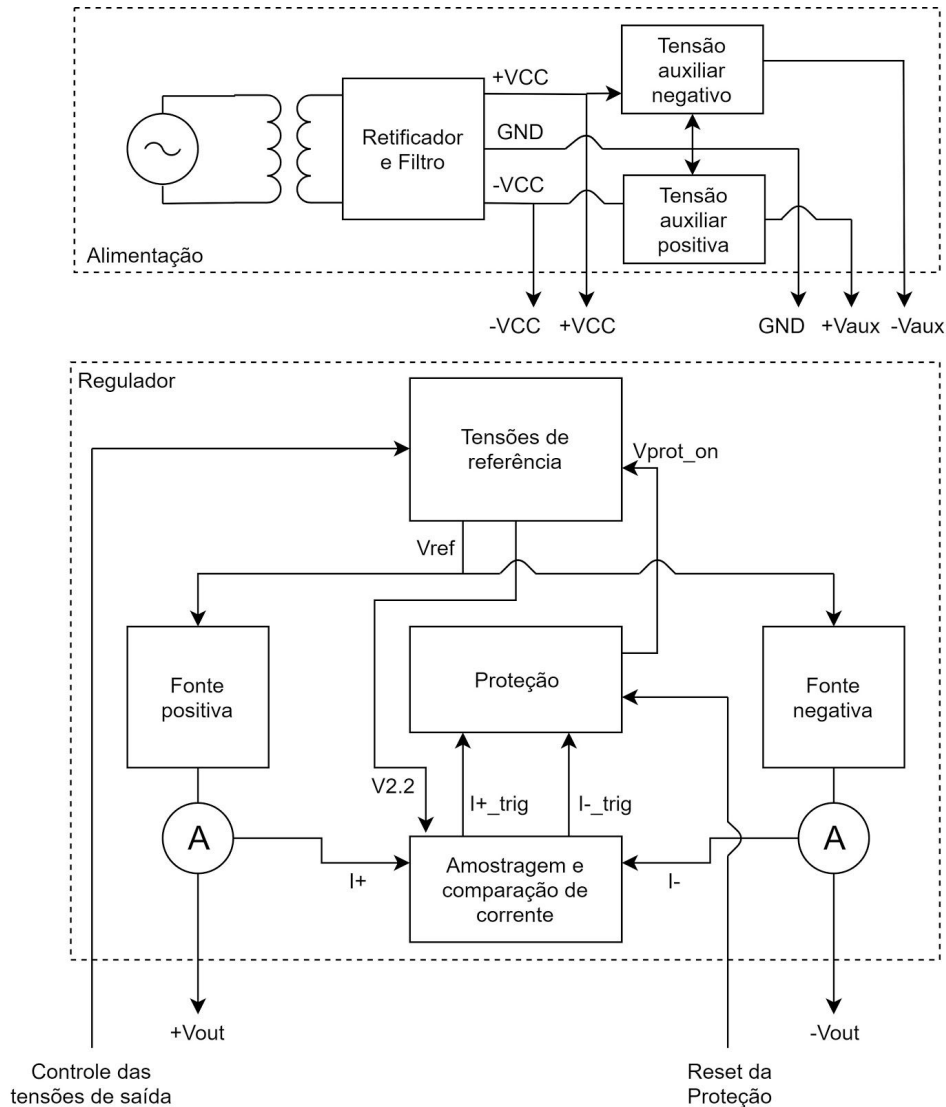
1. Visão de alto nível

A figura exibida nesta seção ilustra um diagrama de blocos de alto nível da fonte de tensão. Ele é formada por dois grandes blocos: o regulador, que produz as tensões escolhidas pelo usuário e protege a fonte, e a alimentação, que alimenta o circuito regulador.

Primeiro vamos ver o funcionamento da alimentação. A tensão da rede, que é senoidal, é abaixada para um nível mais adequado utilizando um transformador. Em seguida, ela é retificada e filtrada, gerando assim um par simétrico de tensões (+VCC e -VCC). Essas tensões, entretanto, não são apropriadas para serem utilizadas como alimentação de todos os dispositivos do circuito, pois são de valor alto (na casa das dezenas de volts) e apresentam um ripple considerável. Por esta razão, são projetadas fontes auxiliares que servirão também de alimentação para o circuito regulador.

No que concerne o funcionamento do bloco regulador, o componente principal deste é o circuito gerador de tensões de referência. A tensão de referência V_{ref} , que é controlada pelo usuário, comanda a tensão de saída nas fontes positiva e negativa. A tensão $V_{2.2}$, por sua vez, controla o limite de corrente que a fonte pode fornecer sem que a proteção seja acionada. Esta é fixa e não pode ser mudada pelo usuário.

As correntes que saem das fontes positiva e negativa são amostradas e comparadas com a tensão $V_{2.2}$. No caso de alguma das correntes ser maior que a máxima, um dos sinais de disparo da proteção (I^+_{trig} e I^-_{trig}) aciona a mesma. Uma vez que esta é acionada, o sinal V_{prot_on} faz com que o bloco gerador de tensões de referência leve V_{ref} para zero. Com isso, a fonte só volta a funcionar após o reset da proteção pelo usuário.



2. Retificador/Transformador

Algumas considerações são importantes para o projeto do retificador. Primeiramente, como a fonte deve fornecer tensões positivas e negativas, foi escolhido um design de retificador com tap central e com saídas positivas e negativas. Esse design é ilustrado mais abaixo.

Como a fonte deve fornecer tensões até mais ou menos 15 V, é necessário que a tensão fornecida pelo retificador seja em módulo maior que a tensão máxima, de modo a compensar pelas quedas de tensão internas a fonte. Dessa forma, foi escolhido um transformador 15 - 0 - 15, projetado para 110 V. Como a fonte funcionará em uma rede de

127 V, a tensão de pico no secundário pode ser calculada em 24,5 V.

$$V_p = 15 \cdot \frac{127}{110} \cdot \sqrt{2} = 24,5 \text{ V}$$

Como a queda de tensão no diodo é de 0,7 V, espera-se na saída uma tensão de pico de 23,8 V. Escolhendo-se um ripple de 4V, a tensão média na saída será de aproximadamente 22 V, o que dá uma boa margem para a fonte operar. A seguir é exibida a equação do PIV (*peak inverse voltage*) na topologia escolhida para o retificador. Utilizando V_s igual a 24,5 e V_d igual a 0,7 V, obtemos um PIV de 48,3 V. Convertendo para RMS, temos 34,2 V.

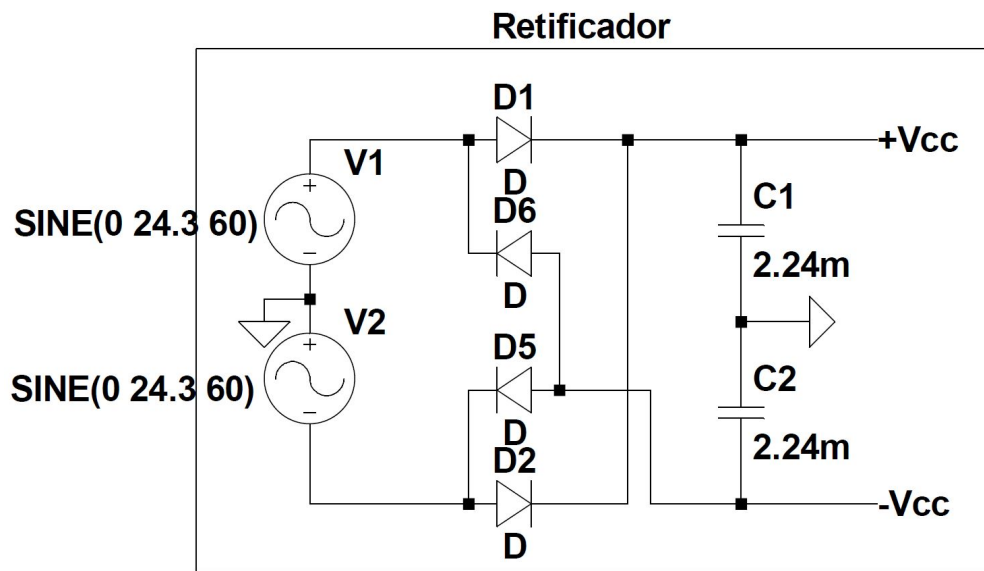
$$\text{PIV} = 2V_s - V_d$$

Ademais, como a fonte deve fornecer 1 A em cada um dos terminais, a priori o retificador deveria fornecer 1 A nos terminais positivo e negativo. Entretanto, como o circuito da fonte também consome corrente, escolhemos uma margem de 20% da corrente em cada terminal, de forma que as saídas positivas e negativas do retificador forneçam 1,2 A. Como as saídas em conjunto consomem mais que 2 A, escolheu-se um trafo com corrente nominal de 3 A.

Consideramos a resistência vista pelo retificador como sendo a tensão de pico dividido pela corrente, ou seja, $20 \text{ } \Omega$. A partir do ripple escolhido, da frequência da rede (60Hz), da tensão de pico e da resistência calculada, o capacitor é calculado, utilizando a equação 4.33 do livro texto[1], como sendo 2,48 mF.

$$V_r = \frac{V_p}{2fCR} \quad (4.33)$$

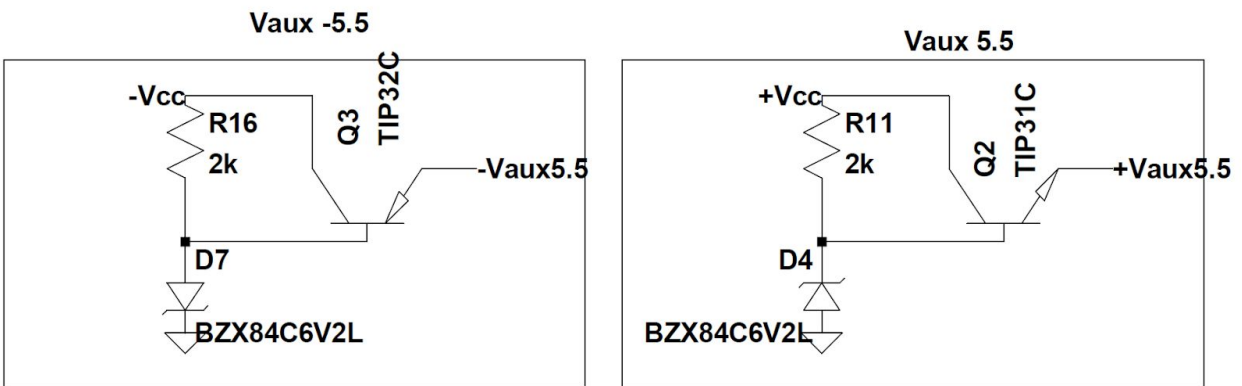
No que concerne a escolha de componentes, utilizou-se um capacitor eletrolítico de 2,20mF fabricado para operar em 35 V, uma tensão bem acima da necessária. Ademais, para os diodos retificadores, escolheu-se o 1N5408, que suporta correntes RMS de até 3 A e tensões reversas RMS de até 700 V, atendendo portanto tranquilamente à demanda do circuito.



3. Fontes auxiliares

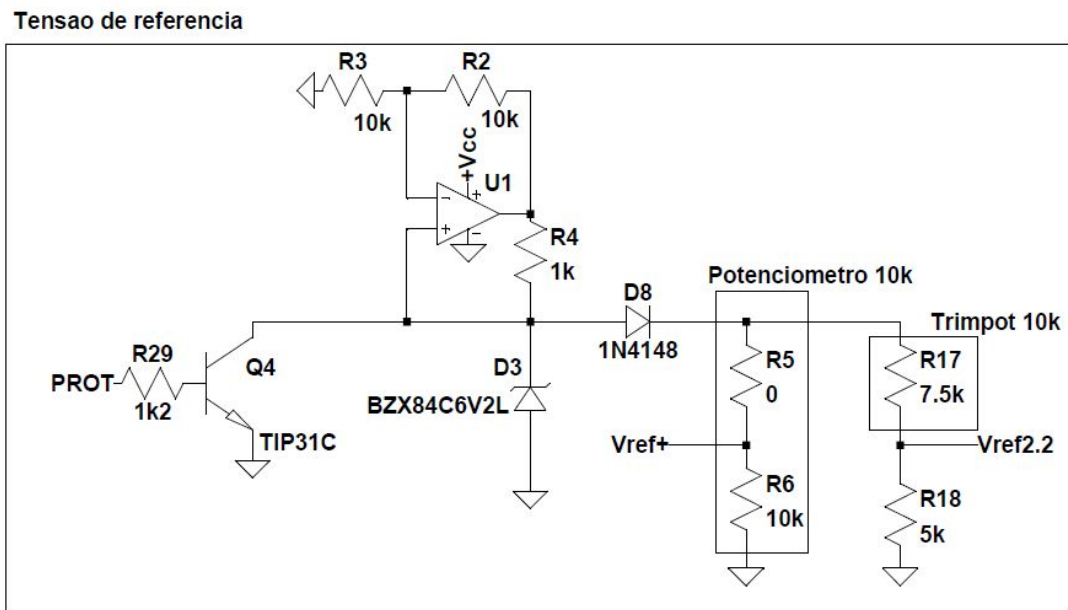
Para as fontes auxiliares, utilizou-se de uma configuração de regulador zener, com um transistor bipolar ligado em configuração seguidor de emissor, de modo a reduzir o efeito de carga sobre o zener. Considerando os dispositivos utilizados no circuito, optou-se por projetar fontes de aproximadamente $\pm 5,5$ V. Fez-se essa escolha pois o flip flop utilizado tem tensão nominal de 5 V e tensão máxima de 6 V. Além disso, por questões de estabilidade é preferível alimentar alguns amp ops com tensões simétricas do que simplesmente aterrar uma das portas de alimentação. Entretanto, como os amplificadores operacionais não suportam alimentações maiores que 36 V, caso se utilizasse +Vcc e -Vcc para alimentar os amplificadores, teria-se uma alimentação no total de 44 V, muito maior que a suportada. Dessa forma, torna-se necessário haver fontes de tensões menores.

Como a queda de tensão base-emissor (ou emissor-base, nos transistores pnp) é de aproximadamente 0,7 V, escolheu-se um diodo zener 1N4735, de 6,2 V. Com uma resistência de 2 k Ω , asseguramos que passa pelo diodo zener uma corrente de aproximadamente 8 mA, o que é suficiente para que ele opere corretamente (a corrente de joelho é de 1 mA, portanto bem menor que a utilizada, o que garante que o diodo está de fato na região de breakdown). O transistor TIP31C foi utilizado na fonte positiva, ao passo que na fonte negativa se utilizou o TIP32C.



4. Tensão de referência

O circuito mostrado abaixo gera as tensões de referência utilizadas no circuito. Utiliza-se um amplificador operacional ligado na alimentação positiva (saída positiva do retificador) e no terra, além de um diodo zener 1N4735 - que opera a 6,2 V - e um transistor bipolar modelo TIP31C, para o controle da proteção.



O amp op é ligado numa configuração em que basicamente se escolhe a corrente de polarização do diodo zener. Mostra-se por Leis de Kirchoff que a malha de realimentação faz com que, independentemente do valor de R4, apareça uma tensão de 12,4 V na saída, o que gera uma queda de tensão de 6,2 V no resistor R4. O valor desse resistor, portanto, permite escolher a corrente que entra na parte inferior do circuito - levadas em conta as

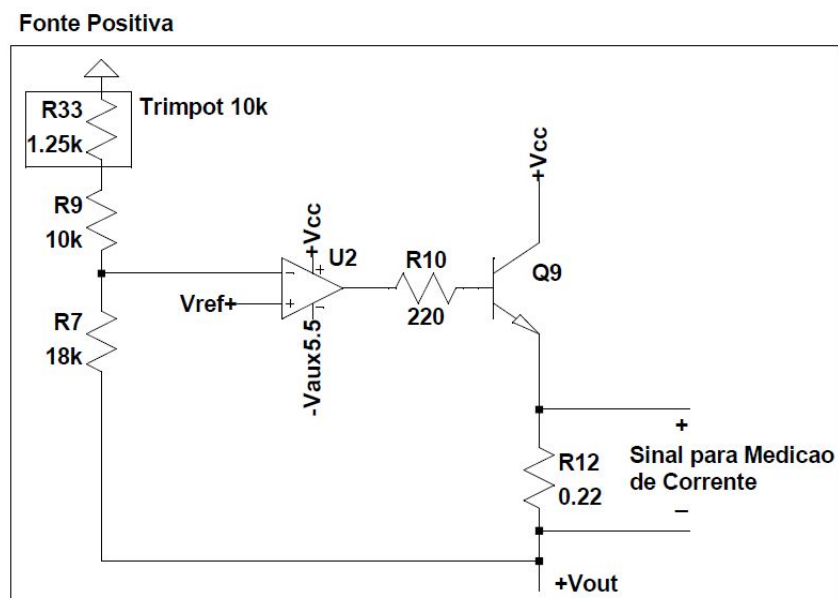
limitações do amp op, que não é capaz de fornecer mais que 20 mA. Com uma resistência de $1\text{ k}\Omega$, a corrente que entra no circuito é portanto 6,2 mA.

Considerando que o diodo D8 apresenta uma queda de tensão de 0,7 V, a tensão na associação de resistores será de 5,5 V. Desta forma, a máxima corrente que passa pelo diodo (ou seja, no caso em que trimpot estiver ajustado em $0\ \Omega$) será de 1,65 mA.

Concluimos então que na pior situação passa no diodo zener uma corrente de $6,2 - 1,65 = 4,55\text{ mA}$. Como a corrente de joelho é de 1 mA, vemos que o diodo certamente está na região de breakdown, confirmando os cálculos feitos.

Por fim, o transistor TIP31C tem como função atuar como uma chave para comandar a proteção. Quando a proteção é ativada, a corrente que sai do amp op é redirecionada para o transistor. Dessa forma, o diodo zener sai da sua zona de operação normal e a tensão cai para próximo de zero. O resistor de $1,2\text{ k}\Omega$ é colocado na base do emissor de forma a limitar a corrente que sai do flip flop (esse detalhe ficará mais claro em seções futuras). Para que essa proteção funcione corretamente, é necessário que a tensão no potenciômetro caia para 0 V. Todavia, a queda de tensão entre os terminais coletor e emissor do transistor supramencionado na região de saturação é, na verdade, cerca de 0,2 V. Por tal motivo se faz necessário o uso do diodo D8.

5. Fonte Positiva



A fonte positiva é composta por um circuito com um amplificador operacional na configuração não inversora e um transistor tipo Darlington. O amplificador operacional

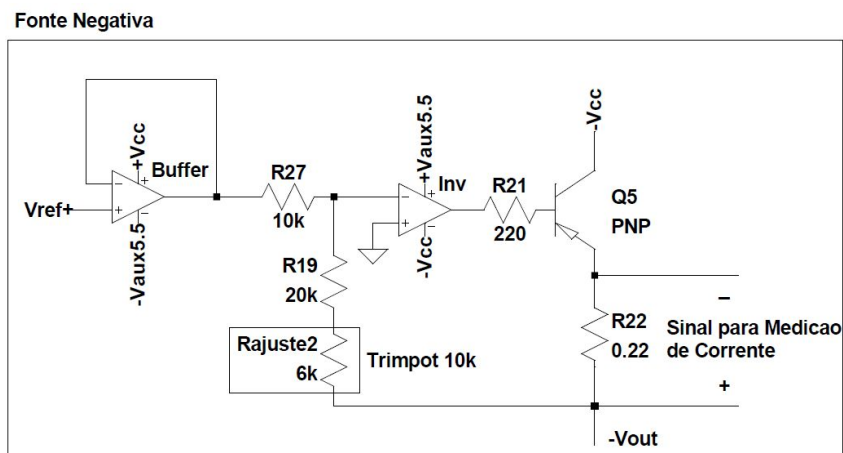
proporciona um ganho na tensão de referência, tornando possível a excursão de 15V na saída. Como o amp-op possui uma corrente máxima de saída baixa, utiliza-se o transistor bipolar Darlington para aplicar um ganho de corrente e fornecer a corrente de até 1A na saída.

Como a tensão de referência varia entre 0 e 5,5 V, o ganho do amplificador é inicialmente configurado como 2,8 V/V, utilizando os resistores R7 (18 k Ω) e R9 (10 k Ω). Esse ganho é então ajustado com um trimpot de 10 k Ω , posicionado em série com o resistor R9, de forma a garantir que, quando a tensão de referência for máxima, tem-se 15V na saída da fonte. O amplificador operacional utilizado é alimentado com +VCC (23,8 V) e -VAUX (-5,5 V). Essa alimentação foi escolhida levando em consideração a tensão máxima de alimentação de 36 V [2] e a tensão máxima em sua saída, evitando a saturação.

Um resistor de 220 Ω (R10) é necessário entre a base do transistor e a saída do amp op para limitar a corrente de saída. O transistor Darlington npn utilizado (Q9) é o modelo TIP122, que possui um ganho de corrente de 1000 e suporta uma corrente de 5A [3]. Dessa forma, na situação de fornecimento de corrente máxima, o amplificador operacional fornece 1 mA, muito abaixo do seu limite de corrente.

Para medir a corrente fornecida para a carga, um resistor shunt é conectado em série com o transistor Darlington. Como a queda de tensão em um resistor é proporcional à corrente que passa por ele, essa tensão será utilizada pelo circuito amostrador e comparador para verificar se a corrente fornecida está dentro do limite de 1 A.

6. Fonte Negativa



A fonte negativa foi projetada de forma semelhante a fonte positiva. Como a fonte fornece uma tensão (e corrente) de saída negativa, é utilizado um transistor pnp TIP121 (complementar ao TIP122) e um amplificador operacional na configuração inversora - permitindo o uso da mesma tensão de referência da parte positiva.

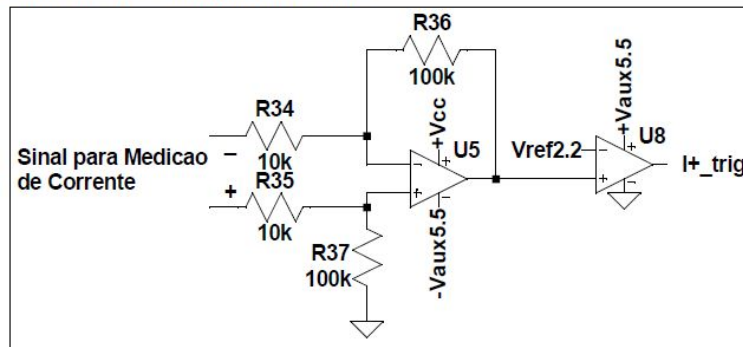
O amplificador foi projetado com ganho de 2,8 V/V por meio dos resistores R27 e R19. O ganho é ajustado utilizando um trimpot em série com R19.

Como a configuração inversora possui um resistor na entrada, de forma a evitar efeito de carga no circuito da tensão de referência, é utilizado um amplificador operacional na configuração buffer.

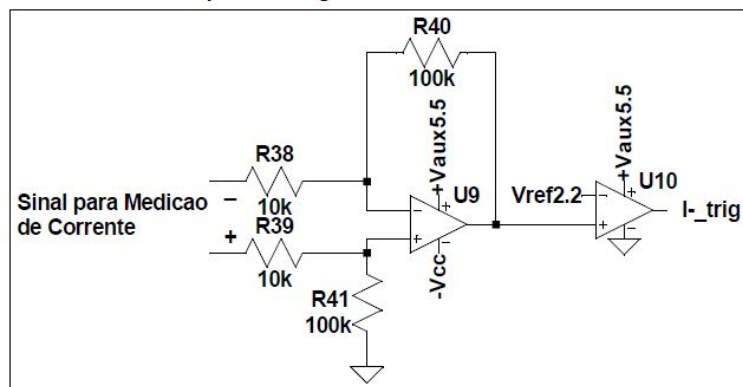
Assim como a fonte positiva, a fonte negativa possui um resistor Shunt de $0,22\ \Omega$ em série com o emissor do transistor.

7. Circuitos amostradores e comparadores

Amostrador e Comparador Positivo



Amostrador e Comparador Negativo



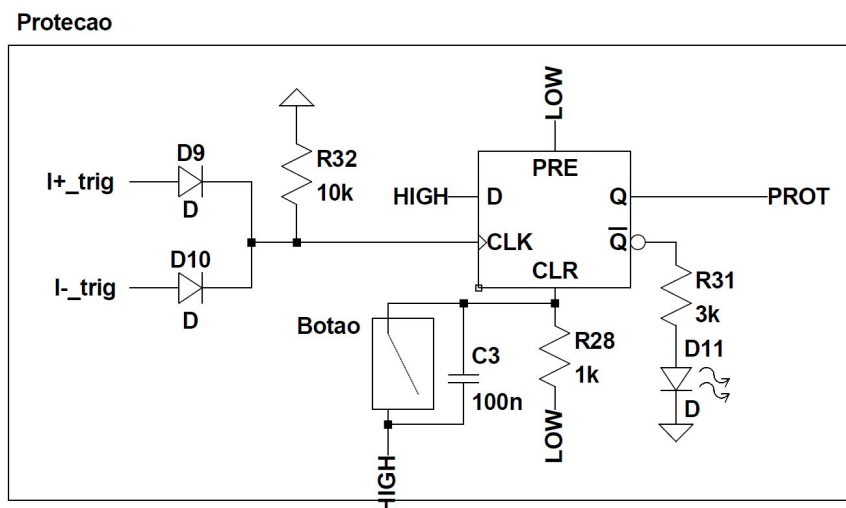
Os circuitos amostradores comparadores possuem a função converter a queda de tensão nos resistores shunt em uma tensão e de ativar a proteção quando a corrente na

fonte positiva ou negativa ultrapassa o valor de 1 A. Os resistores Shunt presentes nas fontes são utilizados para medir a corrente, uma vez que esta é proporcional a tensão nos seus terminais. Contudo, percebe-se que, para a corrente de 1 A, a tensão nos terminais é 0,22 V. Faz-se necessário, portanto, um estágio de amplificação.

Amplificadores operacionais são utilizados na configuração de amplificador de diferenças, com um ganho de 10, para amplificar a tensão nos terminais do shunt. Dessa forma, uma corrente de 1 A resulta em uma tensão de 2,2 V na saída do amplificador. Essa tensão, por sua vez, é comparada com a tensão de referência $V_{ref2,2}$ por meio de um amp op em malha aberta. Portanto, caso a corrente seja superior a 1 A, o comparador satura a saída. Caso seja menor, a saída é mantida em 0 V. Essa saída será utilizada para acionar o circuito de proteção.

No amplificador de diferenças são utilizados resistores de precisão 10 k Ω e 100 k Ω . Eles são alimentados com +VCC (23,8 V) e -VAUX (-5,5 V). Já o amplificador comparador é alimentado com 5,5 V e 0 V. Há um amplificador e um comparador para ambas a fonte positiva e negativa.

8. Circuito de proteção

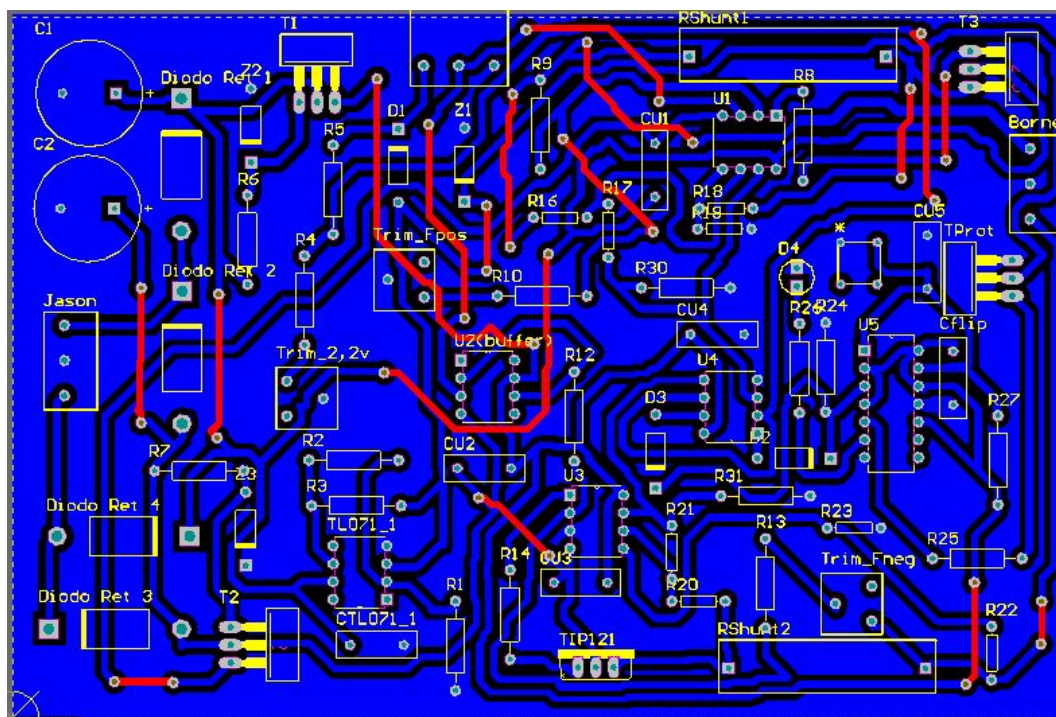


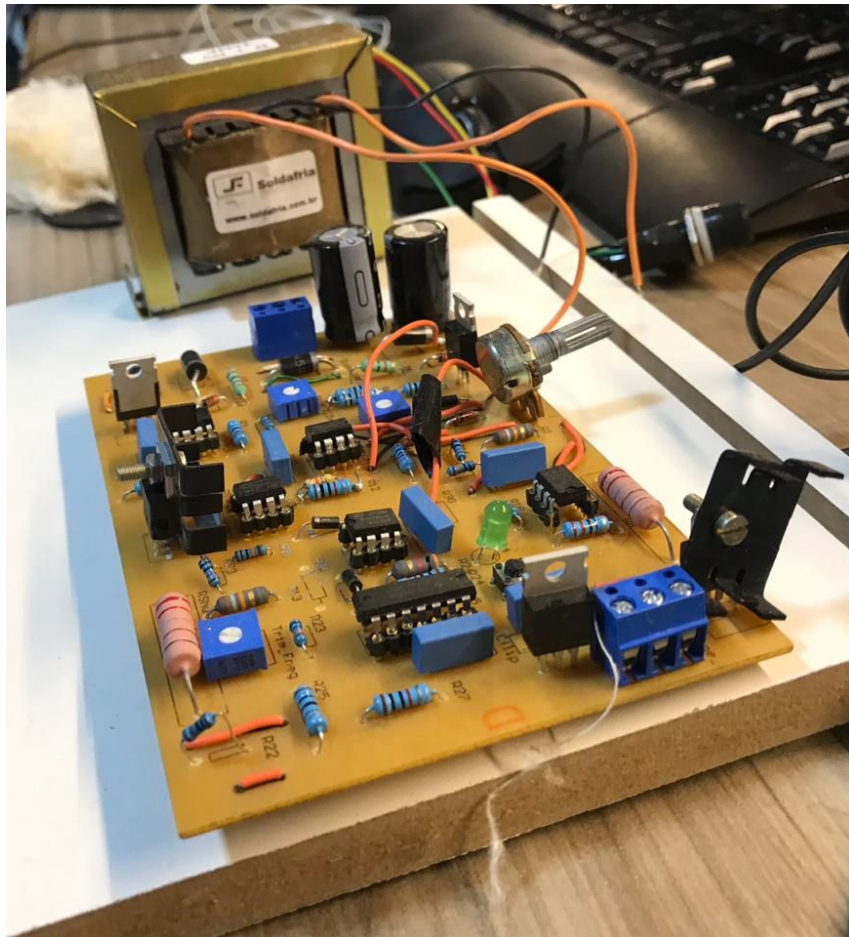
Para esse circuito, escolheu-se utilizar o CI 74HC74, que é um flip flop de dois canais (dessa forma, um dos canais não será utilizado). O nível lógico com o qual opera o flip flop é 5,5 V (que está dentro dos requisitos do CI escolhido [4]), proveniente da fonte de alimentação auxiliar. As saídas do estágio anterior são ligadas a dois diodos, formando uma porta OR. Esse nó é ligado a entrada CLK de um flip flop e a um resistor. Esse resistor é necessário pois, quando algum dos sinais de trigger é acionado, o diodo

Quanto um sinal de acionamento é recebido pelo circuito, a borda de subida faz com que o flip flop carregue o bit na porta D, ativando a proteção. Para reativar a proteção, um botão deve ser pressionado, que coloca um sinal de nível alto na porta de clear do flip flop. Uma vez dado o clear, o flip flop retorna sua saída para o nível lógico zero.

9. Placa de circuito impresso

O circuito projetado foi construído em uma PCI (placa de circuito impresso). Para o projeto dessa PCI, foi utilizado o software Altium Designer. A placa possui dimensões 10x15 cm. O circuito possui somente uma camada, com exceção de jumpers que foram utilizados para fazer ligações impossíveis de serem feitas em uma só camada. A PCI projetada é ilustrada abaixo.





MATERIAIS

A lista de materiais utilizados para a construção da fonte de tensão encontra-se abaixo.

Item	Quantidade
Diodo 1n5408	4

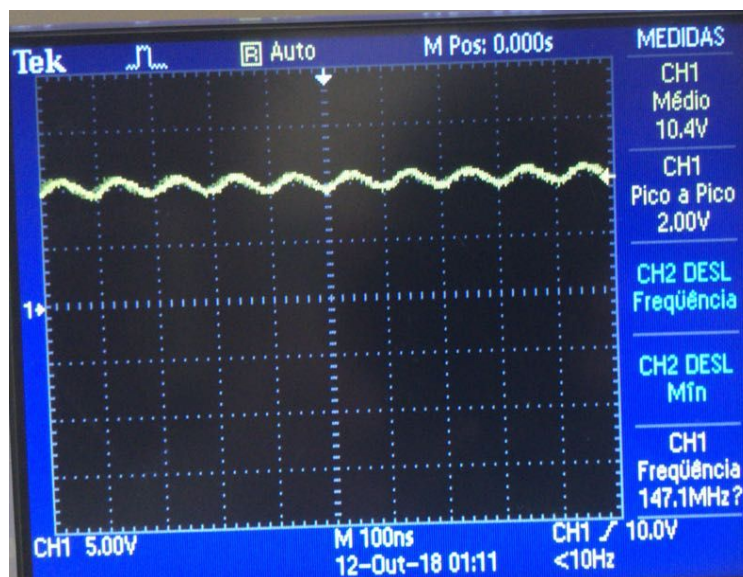
Diodo Zener 6,2V	3
TL072CN	3
TL071	2
Resistor de 0R22 Ohms 5W	2
Transistor TIP122	1
Transistor TIP127	1
Transistor TIP31C	2
Transistor TIP32C	1
Flip Flop D 74HC74	1
Capacitor eletrolitico 2200u	2
Trimpot 1k	2
Resistor precisao 10k	4
Resistor precisao 100k	4
Diodo 1N4148	3
Potenciometro 10k	1
Soquete para CI	2
Cabo De Força 2P Paralelo 2x0,5mm 1,0 M	1

Fusível De Vidro (3AG) 0,5A 6x30mm 250V Rápido	5
Dissipador	2
Porta fusível	1
Placa de nêutro 10x15	1
Transformador 15+15V 3A - Entrada 110/220VAC	1
Resistor 18K 5% 1W (MR,CZ,LR,DR)	3
Trimpot 5k	3
Resistor 1K2 5% 1W (MR,VM,VM,DR)	1
Resistor 10k	8
Resistor 3k	1
Botão	1
Chave	1
Resistor 220	2
Capacitor 100n	5
Resistor 2k	2
Resistor 1K 5% 1W (MR,PT,VM,DR)	1

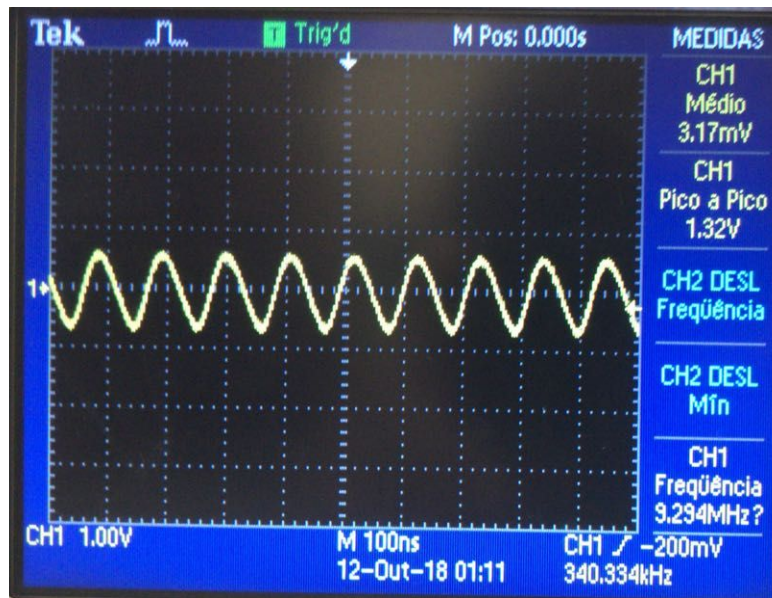
RESULTADOS

Nessa seção são exibidos os resultados dos testes executados. Eles incluem o funcionamento com carga nominal e do acionamento da proteção, tanto para a fonte positiva quanto para a negativa. Outros testes foram também feitos com o objetivo de comparação.

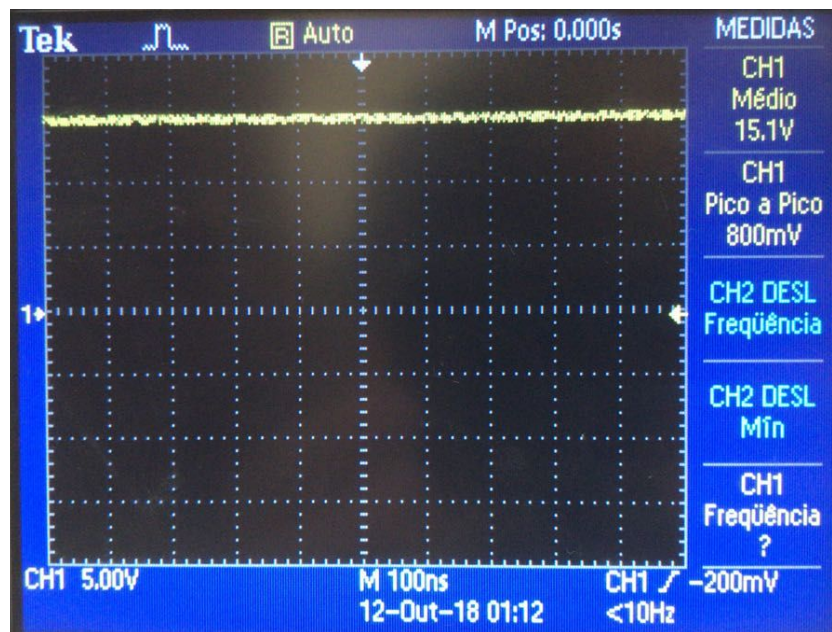
Tensão na saída positiva (10V) com carga de $30\ \Omega$



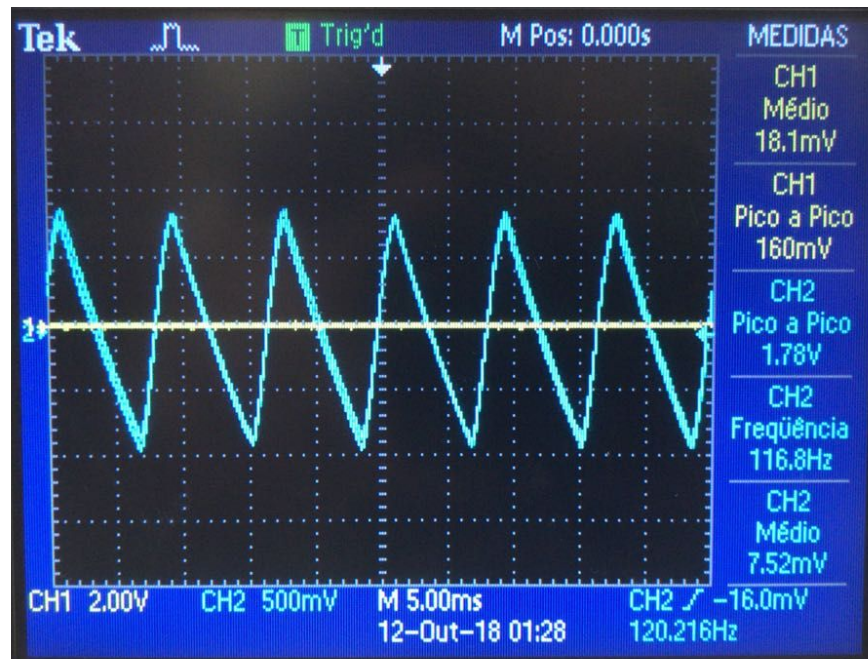
Tensão na saída positiva (10V) com carga de $30\ \Omega$, somente componente AC



Tensão na saída positiva (15V) com carga de $30\ \Omega$



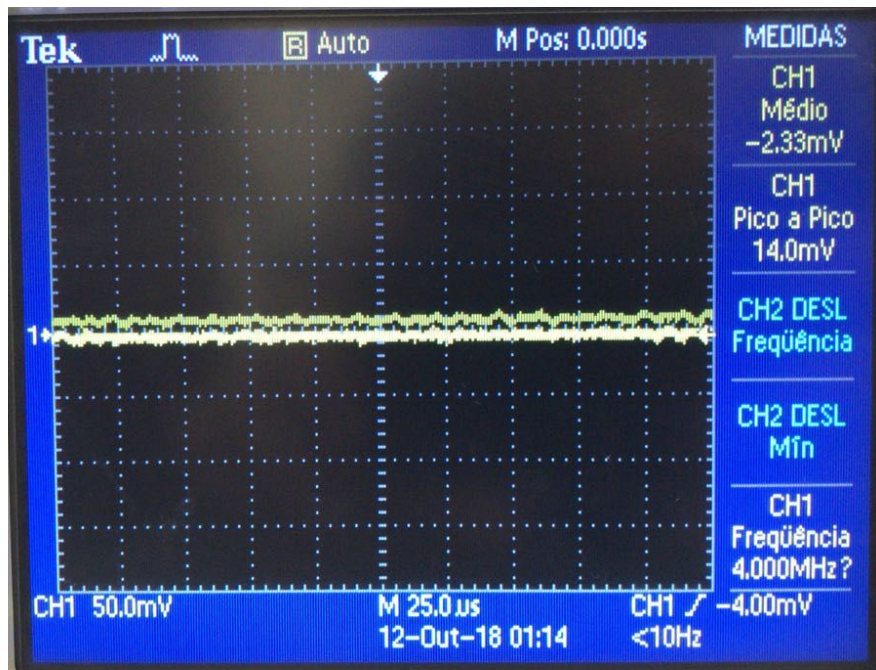
Tensão na saída positiva (15V) (amarelo) e tensão de alimentação positiva +VCC (azul) com carga de $30\ \Omega$, somente componente AC



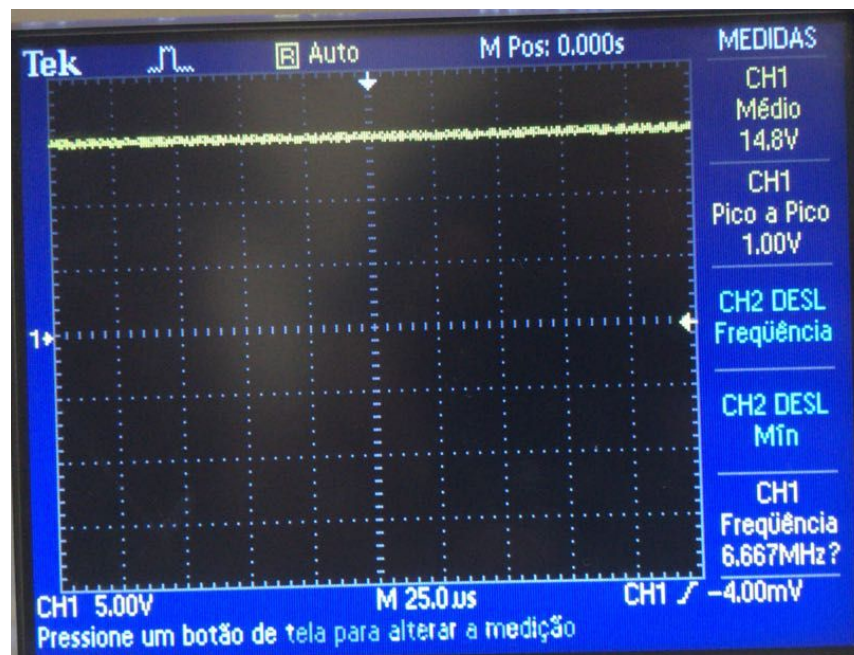
Tensão na saída positiva (10V) com carga de $15\ \Omega$



Tensão na saída positiva (10V) com carga de $15\ \Omega$, somente componente AC



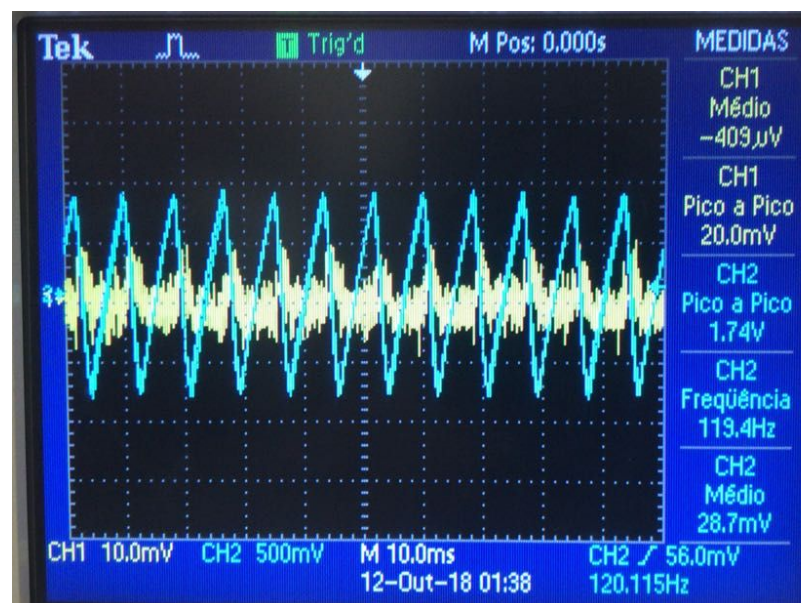
Tensão na saída positiva (15V) com carga de $15\ \Omega$



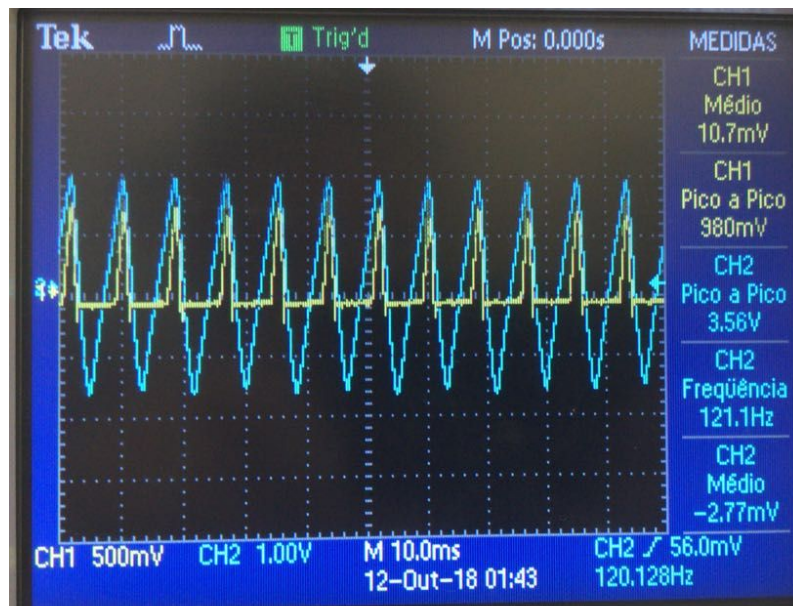
Tensão na saída positiva (15V) (amarelo) e tensão de alimentação positiva +VCC (azul) com carga de 15Ω , somente componente AC



Tensão na saída negativa (-15V) (amarelo) e tensão de alimentação negativa -VCC (azul) com carga de 30Ω , somente componente AC



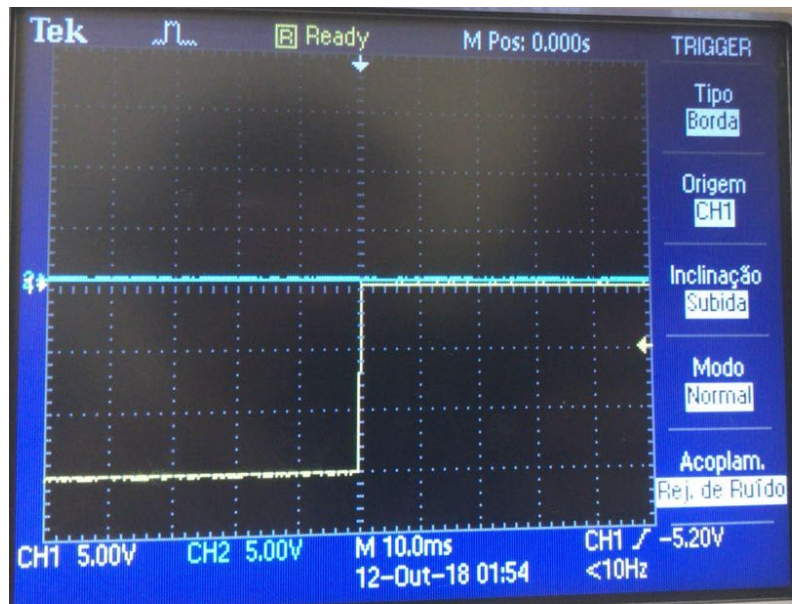
Tensão na saída negativa (-15V) (amarelo) e tensão de alimentação negativa -VCC (azul) com carga de 15Ω, somente componente AC



Proteção positiva atuando



Proteção negativa atuando



DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante os testes, notou-se que a fonte comportou como o esperado em quase todos os casos. Quando operando na condição nominal (15 V, 1 A), percebemos que, devido ao fato do ripple da alimentação ser maior nesse cenário, a tensão na saída não fica totalmente estável. Isso ocorre tanto na fonte positiva quanto na negativa. Uma explicação provável para esse resultado é que, como as tensões de alimentação dos amplificadores operacionais que controlam os transistores Darlington abaixam por causa do ripple, este acaba não conseguindo manter a tensão na saída e satura. Esta explicação é baseada no fato da tensão na saída parecer acompanhar a tensão de alimentação, quando esta cai muito (ver testes de ± 15 V, 15 Ω). Entretanto, consideramos que esse fato não prejudica em muito a qualidade da fonte.

Com relação aos testes da proteção, notou-se que ela operou como o previsto, como mostrado nas imagens, que registram o evento de curto nos terminais da fonte. Observa-se que a tensão caiu subitamente para o valor de 0 V, como o esperado.

CONCLUSÃO

O projeto da fonte linear de tensão foi um sucesso, na medida em que todas as partes projetadas funcionaram como o previsto, e foi possível atender às especificações requeridas.

Por mais que a fonte apresente um comportamento um pouco fora do esperado quando operando na tensão máxima com a carga nominal, consideramos que o ripple introduzido na saída não deve ser um problema para a maior parte das aplicações.

REFERENCIAS

1. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith - Microelectronic Circuits. 7th edition-Oxford University Press (2014)
2. TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers datasheet (Rev. N):
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl071.pdf>
3. Datasheet: Plastic Medium-Power Complementary Silicon Transistors:
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP120-D.PDF>
4. Dual D-type flip-flop with set and reset; positive edge-trigger datasheet:
https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT74.pdf