



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
FEELT

**FONTE LINEAR REGULADA + CIRCUITO
AMPLIFICADOR**

Relatório da Disciplina de Eletrônica Analógica I
por

Ana Júlia Costa Santana - 11811ETE003
Lesly Viviane Montúfar Berrios - 11811ETE001

Prof. Daniel Pereira de Carvalho
Uberlândia, Dezembro / 2019

Sumário

1	Introdução	2
2	Fonte de Alimentação Linear Regulada	3
2.1	Componentes e orçamento	3
2.2	Estágios do circuito	4
2.2.1	Retificação	5
2.2.2	Filtragem	5
2.2.3	Regulação	5
2.2.4	Transistores em configuração Darlington	6
2.2.5	Resistor para descarga do capacitor	7
2.3	Finalização e considerações sobre a PCB	7
2.3.1	Espessura da linha	7
2.3.2	Projeto final no <i>PROTEUS</i>	8
2.4	Análise de testes	8
3	Circuito amplificador	9
3.1	Componentes e orçamento	9
3.2	Etapas do projeto	11
3.2.1	Primeiro estágio	11
3.2.2	Estágio intermediário	12
3.2.3	Estágio de saída	12
3.3	Projeto PCB	13
3.3.1	Considerações	14
4	Conclusões	15

1 Introdução

Na construção e planejamento da primeira placa de impresso (*PCB*) está a essência de qualquer curso da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), uma vez que, à despeito das dificuldades no entendimento da disciplina teórica, o planejamento e análise da forma de onda da grandezas de tensão e corrente demonstram e ilustram com lucidez cada processo intrínseco do circuito. Nesse sentido, o uso de simuladores, seja *PROTEUS*, *MULTSIM* ou qualquer outro, é ferramenta de imprescindível para a análise do qualquer circuito, e entendimento dos componentes necessários e melhor adaptáveis às exigências do projeto.

O projeto a ser destrinchado em cálculos e demonstrações é retirado do material *El Cheapo* [1] cujo título é *Um realmente simples amplificador de potência* (do inglês, *A Really Simple Power Amplifier*). Logo, é preciso planejar a elaboração de dois circuitos: a *fonte de alimentação linear regulada* e o *circuito amplificador*. Sabe-se que o projeto mencionado pode ser substituído em parte por um dispositivo menor (um amplificador operacional), contudo isso não é feito visto que o objetivo principal é o aprendizado dos componentes mais básicos da elétrica: resistores, capacitores, transistores e diodos.

À respeito da ***fonte de alimentação linear regulada***, tratada na Seção 2, pode obter-se melhor experiência, seja na busca por componentes, assim como melhor envolvimento com ferramentas de simulação e elaboração de placas de circuito impresso. Sabendo-se que trata-se de um dispositivo responsável por converter a tensão elétrica alternada em contínua, foi possível verificar experimentalmente as qualidades e resultados de um circuito retificador em ponte, além de filtros capacitivos e circuitos reguladores com diodos zener.

Já o ***circuito amplificador***, discutido na Seção 3, pode e deve ser realizado com maior empenho, devido à experiência adquirida durante a realização da fonte. Ademais, é interessante sua análise, uma vez que nesse circuito se vê a aplicação de conceitos aprendidos na disciplina teórica, por exemplo de circuitos amplificadores coletor-comum (ou seguidor de emissor) com/sem bootstrapping, amplificadores push-pull, e outros.

Na Seção 2, é descrita o procedimento completo para a construção na fonte, começando pela catalogação dos componentes necessários e seu orçamento, para assim poder estudá-lo em etapas de análise: retificação, filtragem e regulação. Em seguida, na Seção 3, são tratadas as peculiaridades do circuito amplificador, o qual abrange transistores amplificadores de distintas características. Para assim, na Seção 4 mostrar o resultado final obtido da fonte com o amplificador.

Tabela 1: Componentes e orçamento da fonte.

Componente	Especificação	Quantidade	Preço (R\$)	Descrição
Capacitores	$4700\mu F - 100V$	2	35	C1, C3
	$470\mu F - 100V$	1	9,50	C2
Resistores	$1k\Omega$	2	0,12	R1, R2
	$1k8\Omega - 5W$	2	4,84	Descarga do capacitor
Ponte Retificadora	6A	1	7,15	Havia a GBJ606
Transistores	BD139	1	0,85	Q1
	TIP35C	1	5,85	Q2
Fusível	4A	1	0,30	FUS
Borne Pannel	5A	4	5,25	Só havia de 20A
Placa de fenolite	$10 \times 15cm$	1	6,80	Tamanho adequado
Total:			R\$ 75,66	

2.2 Estágios do circuito

Cada componente possui uma função no circuito, que pode ser analisada a nível de tensão e corrente. Espera-se um sinal contínuo na saída, com o qual poderá conectar-se a carga que puxa no máximo 4A (limitação do fusível). Assim, é utilizada uma carga $R_{CARGA} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUTmax}} = \frac{60}{4} = 15\Omega$, como observa-se na Figura 2 utilizada na simulação.

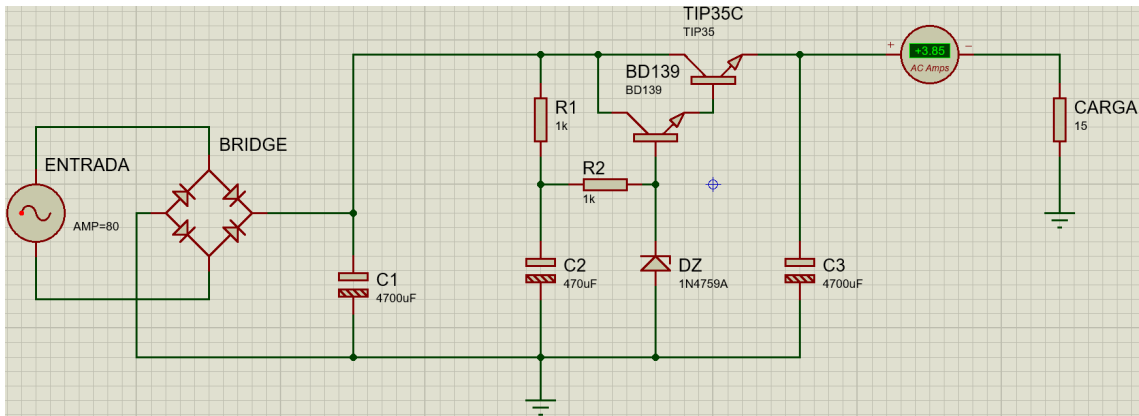


Figura 2: Circuito utilizado na simulação da fonte.

2.2.1 Retificação

Esta etapa transforma a tensão alternada em uma tensão contínua pulsante, e é realizada pela ponte retificadora, sendo escolhida a GBJ606 que suporta de 6A, 600 V e atende os parâmetros do circuito montado. Na Figura 3 observa-se o gráfico da forma de onda da tensão, após a retificação em onda completa pela ponte de diodos.

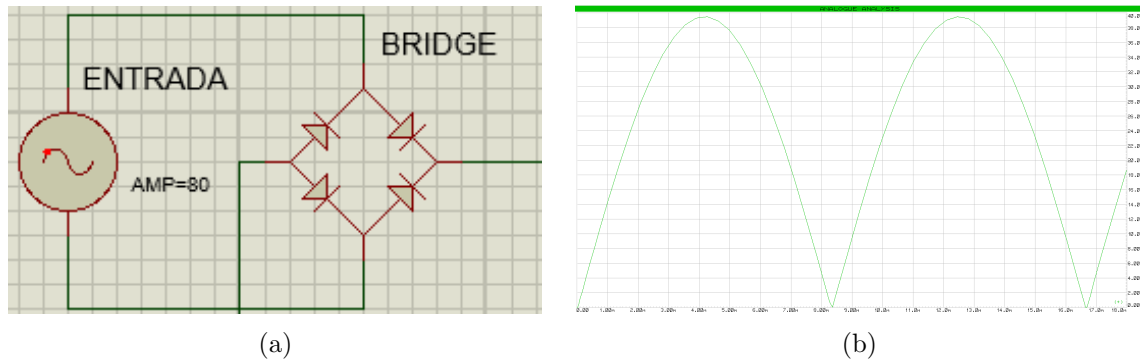


Figura 3: Estágio de retificação (a) circuito (b) resultado da retificação em onda completa.

2.2.2 Filtragem

Transforma a tensão contínua pulsante em uma tensão contínua quase perfeita. Mas essa tensão contínua apresenta, quando a fonte é ligada a uma carga, uma oscilação chamada Tensão de Ripple. Essa etapa é realizada pelos capacitores encontrados no circuito que devido a sua composição, ao sofrer o processo de carga e descarga diminuem a oscilação da tensão já que a tensão fornecida ao circuito agora nos momentos de pulso é suprida pela descarga do capacitor. Porém, como abordado anteriormente, resta ainda o ripple e para eliminar esse fator incômodo pode-se ainda implementar a etapa de regulação.

2.2.3 Regulação

Após a retificação e a filtragem, ocorre a etapa de regulação, com o objetivo de eliminar definitivamente a tensão de oscilação, mesmo com uma carga variável. O diodo utilizado, conta com uma tensão Zener nominal de 62 V para uma corrente de teste de 4 mA.

O comportamento do zener é observado para dois processos, a regulação de linha, que mostra a capacidade da fonte de manter a tensão de saída diante de variações na tensão de entrada.

Se a tensão de entrada aumenta muito, ao invés de ter todo esse acréscimo em cima da carga, o diodo Zener, regula esse valor de tensão, por meio da sua

característica de operação em ruptura reversa. Isso é bem observado na corrente, que sofre maiores alterações para que a tensão se mantenha constante. Para o processo inverso, com um decréscimo na tensão de entrada, um processo análogo. As variações na tensão de entrada, são direcionadas ao resistor limitador, mostrando serem válidas as equações abaixo.

$$I_S = I_Z + I_R \quad (1)$$

$$V_S = V_{in} - V_Z \quad (2)$$

Existe ainda a regulação de carga, que mostra a capacidade da fonte de manter uma tensão de saída constante diante de variações na corrente de carga. Que depende da potência requerida pela carga.

$$I_S = \frac{V_{in} - V_Z}{R_S} \quad (3)$$

Logo, para toda a variação na corrente de carga é compensada por uma variação oposta na corrente através do diodo Zener, mantendo a tensão constante. Ademais, releva-se que quando a tensão sobre o diodo zener atinge a tensão de ruptura, o diodo passa a conduzir e se a corrente que passará por ele for suficientemente grande para aumentar sua temperatura, a corrente aumentará

2.2.4 Transistores em configuração Darlington

A configuração Darlington permite maior sensibilidade do transistor, permitindo um ganho β (h_{FE}) maior. Assim, na Figura 4, vê-se o par Darlington com os transistores TIP35C [8] e BD139 [7], com β associado de $\beta_{total} = 25 \times 100 = 2500$.

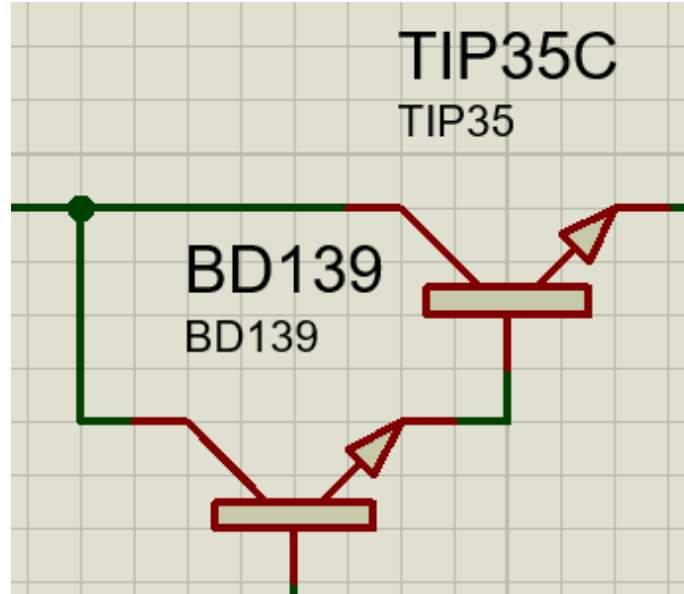


Figura 4: Configuração Darlington na fonte.

2.2.5 Resistor para descarga do capacitor

Para segurança do circuito, e daqueles que forem manejá-lo, resistores foram acrescentados em paralelo com os capacitores, para que, ao efetuar o desligamento da placa os capacitores pudessem ser descarregados em segurança. Para projetar a resistência necessária nos capacitores, as equações conhecidas para descarga num capacitor foram aplicadas.

$$t = RC \cdot \ln\left(1 - \frac{V_C}{V_{in}}\right) \quad (4)$$

Considerando os capacitores de 4700uF e um tempo de descarga de 10 s, para uma tensão média entre os dois capacitores, V_C de 64,85V (de acordo com simulação) e V_{in} de 80 V_{pp} , a resistência mínima necessária é de 1,3kΩ, para suprir esses requisitos mínimos, foi utilizado um resistor de 1,8kΩ de 5W.

2.3 Finalização e considerações sobre a PCB

2.3.1 Espessura da linha

Ao projetar a placa de circuito impresso. Um cuidado maior com relação as trilhas precisa ser tomado, para que não haja problemas quanto a passagem de corrente, e para otimizar a dissipação do calor na placa. Para escolher uma espessura de linha que cumprisse tais propósitos, utilizamos o equacionamento de acordo com a norma IPC-2221, que através de sua curva define as constantes k, b e c que são utilizadas no cálculo da espessura da trilha mais adequada. Iniciando pelo cálculo

da área temos:

$$A[th^2] = \left(\frac{I}{k \cdot (Temp - Rise[deg.C])^b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (5)$$

E em sequência a largura é dada:

$$L[th] = \frac{A}{Espessura[oz] \cdot 1,378} \quad (6)$$

Considerando $k = 0,048$, $b = 0,44$, $c = 0,725$ e a placa de fenolite de 1 OZ , e uma variação de temperatura de aproximadamente $10^\circ C$, descobriu-se um valor para a espessura das linhas de aproximadamente $90th$, o qual foi utilizado na maioria das trilhas do projeto.

2.3.2 Projeto final no *PROTEUS*

Utilizando todos os conceitos já descritos foi possível organizar os componentes em uma placa de circuito impresso, utilizando o software *PROTEUS*.

2.4 Análise de testes

Através de testes, ligando a fonte com o auxílio do transformador, logo é possível perceber que a tensão de saída diverge dos 62 V esperados, e isso ocorre porque a placa acaba esquentando bastante devido a sua operação, e assim os diodos que são sensíveis à temperatura acabam operando de um modo não esperado, já que a resistência diminui.

3 Circuito amplificador

3.1 Componentes e orçamento

O esquemático *El Cheapo*, apresentado na Figura 5, possui alguns dispositivos que são obsoletos hoje, por exemplo os trasistores de germânio, os quais podem ser equivalentemente substituídos pelos componentes descritos na Tabela 2.

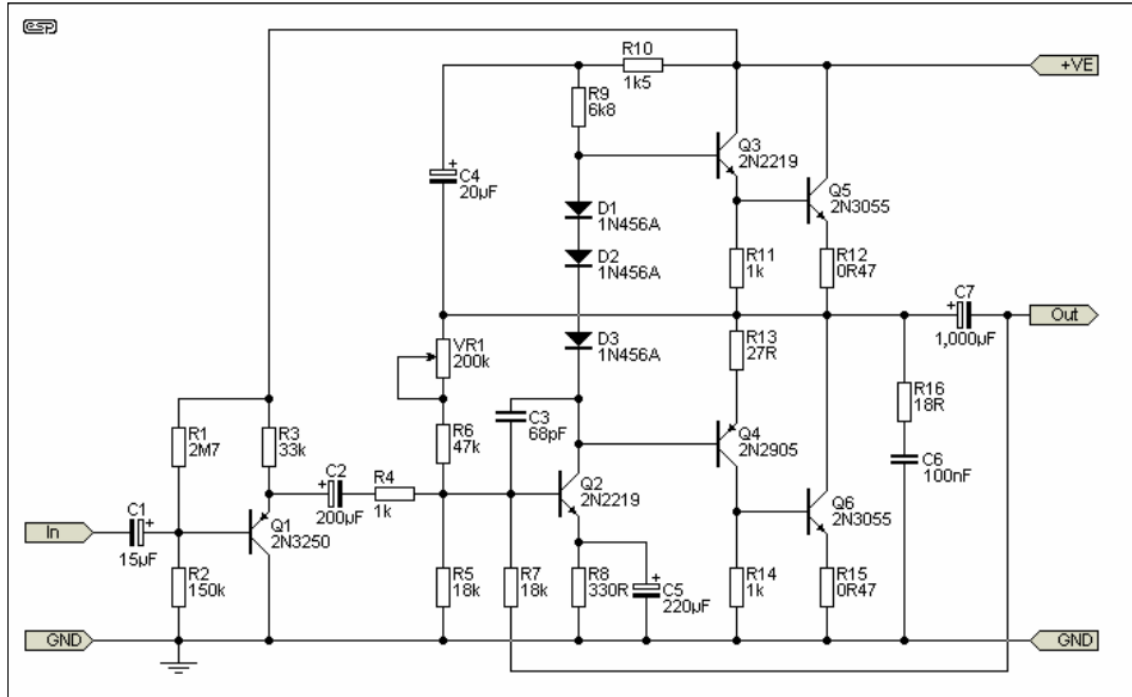


Figura 5: Esquemático *El Cheapo* do circuito amplificador [1].

Dos componentes da Tabela 2, extraídos do esquemático da Figura 5, ainda são possíveis mudanças para o aprimoramento dos mecanismo do circuito. O capacitor $C7^*$ por exemplo poderia ter aumento de capacitância para $4700\mu F$, com o intuito de suprir o amortecimento insuficiente do arranjo de capacitores. Ademais, é importante ressaltar que os diodos (D1, D2 e D3) devem estar em contato com o dissipador, uma vez que da simulação se terá uma tensão em torno de 4 vezes a tensão de pico da fonte.

Tabela 2: Componentes e orçamento do circuito amplificador.

Componente	Especificação	Quantidade	Preço	Descrição	Observações
Capacitores	$15\mu F$	1	0,40	C1	2 cap $10\mu F$ 50V(0,20)
	$200\mu F$	1	5,00	C2	
	$68pF$	1	0,50	C3	50V cerâmico
	$20\mu F$	1	0,76	C4	22UF 100V
	$220\mu F$	1	6,20	C5	220MF 100V (6,20) 220V (5,00)
	$100nF$	1	0,42	C6	100k 50V cerâmico
	$1000\mu F$	1	15,50	C7*	4700MF 63V(15,50)/1000MF 25V
Resistores	$2M7\Omega$	1	0,09	R1	
	$150k\Omega$	1	0,10	R2	1/8W
	$33k\Omega$	1	0,10	R3	1/8W
	$1k\Omega$	3	0,15	R4, R11, R14	
	$18k\Omega$	2	0,16	R5, R7	1/8W
	$47k\Omega$	1	0,10	R6	1/8W
	$330R\Omega$	1	0,10	R8	1/8W
	$6k8\Omega$	1	0,10	R9	1/8W
	$1k5\Omega$	1	0,10	R10	1/8W
	$0R47\Omega$	2	0,20	R12, R15	1/8W
	$27R\Omega$	1	0,10	R13	1/8W
	$18R\Omega$	1	0,05	R16	1/8W
Diodos	1N456A	3	0,30	D1, D2, D3.	
Transistores	BC559	1	0,93	Q1	
	BD139	2	5,40	Q2, Q3	
	BD140	1	1,68	Q4	
	2N3055 (TIP35C)	2	11,82	Q5, Q6	
Potenciômetro	200k	1	2,75	VR1	
Bornes	Painel	4	5,25		
	Jack J2M	1	1,70		PJ-301
		Total:	R\$ 59,96		

3.2 Etapas do projeto

3.2.1 Primeiro estágio

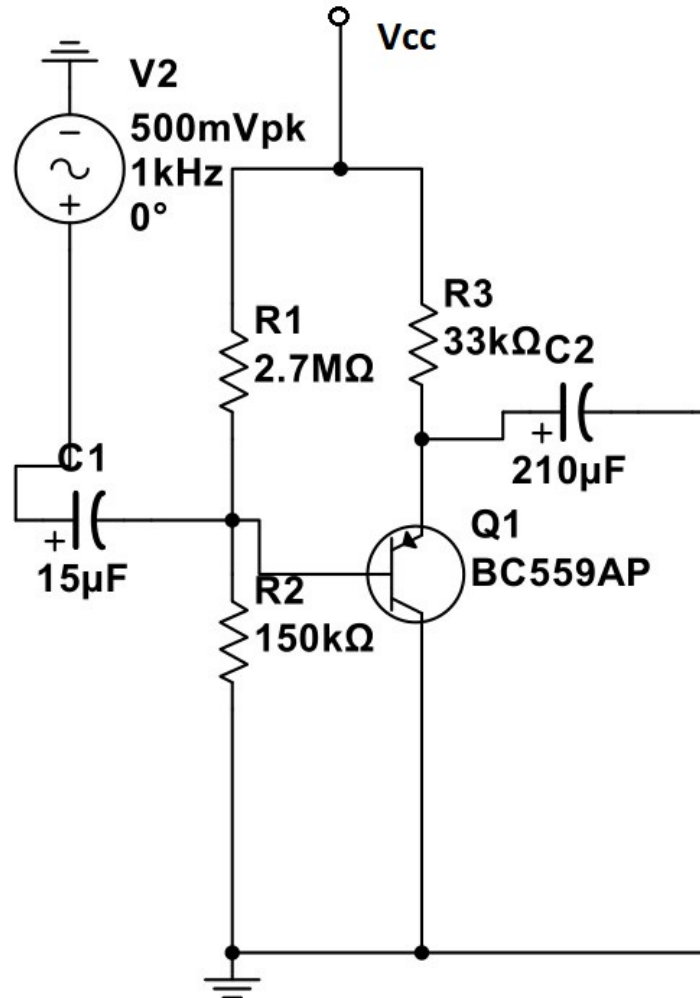


Figura 6: Preamp

Dividindo o projeto do amplificador existem 3 estágios. O preampm o driver e o de potência. No inicial para a alimentação do circuito, o transistor Q1 é utilizado, para parametrizar a entrada no amplificador de potência que conta com uma resistência de 1K, assim o transistor Q1, um seguidor de emissor é utilizado. Dessa forma o estágio de entrada se torna mais estável, o que minimiza os efeitos da Distorção de Intermodulação Transiente. Realizando alguns cálculos para esta etapa é possível estimar a tensão de emissor de 4V e uma corrente de coletor de 1,8mA.

3.2.2 Estágio intermediário

Neste estágio, conhecido também como driver, o transistor Q2 é usado para realizar uma conversão devido à característica inversora do transistor na etapa pre-amp, mas serve também é utilizado para aumentar o suprimento de corrente, ou seja amplificando-a, possibilitando a excitação par de transistores de saída.

Então com o pico máximo positivo na entrada é observada a tensão da fonte no coletor deste transistor, e com o pico mínimo negativo a tensão é zero.

3.2.3 Estágio de saída

No estágio de saída, ou o de potência é utilizado a configuração de pares complementares. Os transistores Q3 e Q4 se encontram acoplados com uma configuração Darlington. Por isso os diodos associados em série são vistos. Nesta etapa com o uso desse par, cada transistor opera em um ciclo, que são limitados pelos capacitores. E devido a configuração push- pull eles puxam a energia, logo tendo uma operação como que num sentido de vai e volta.

No final deste estágio, com o auxílio do osciloscópio é possível coletar as formas de onda associadas a entrada e a saída, de forma a tornar possível observar o ganho que o amplificador consegue dar ao sinal de entrada. Para este projeto um ganho de 16 é esperado, porém em testes no laboratório, esta relação ficou em torno dos 15, o que ainda é um valor considerado aceitável, dados os parâmetros de construção.

Abaixo temos o plot das formas de onda coletadas no osciloscópio. Com auxílio de um software matemático, neste caso para a entrada as ponteiros estavam com uma atenuação de 10X:

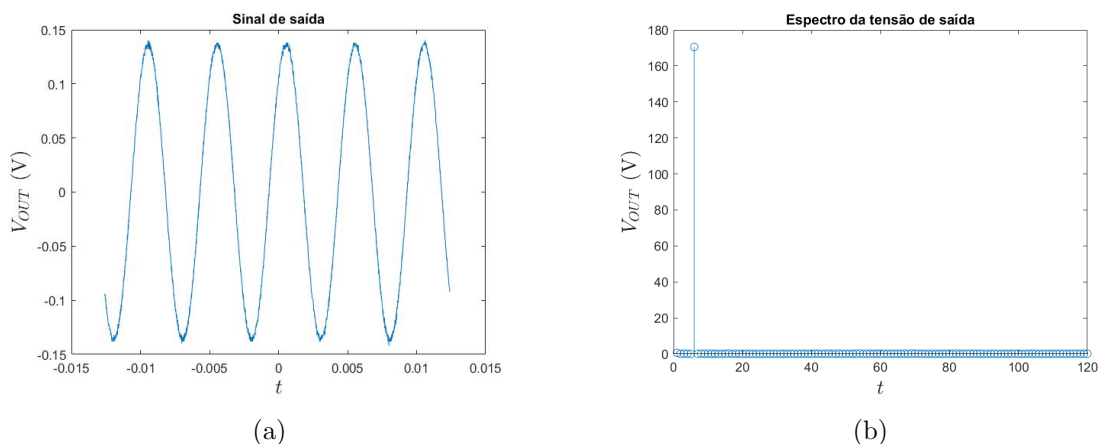


Figura 7: Dados de entrada do osciloscópio.

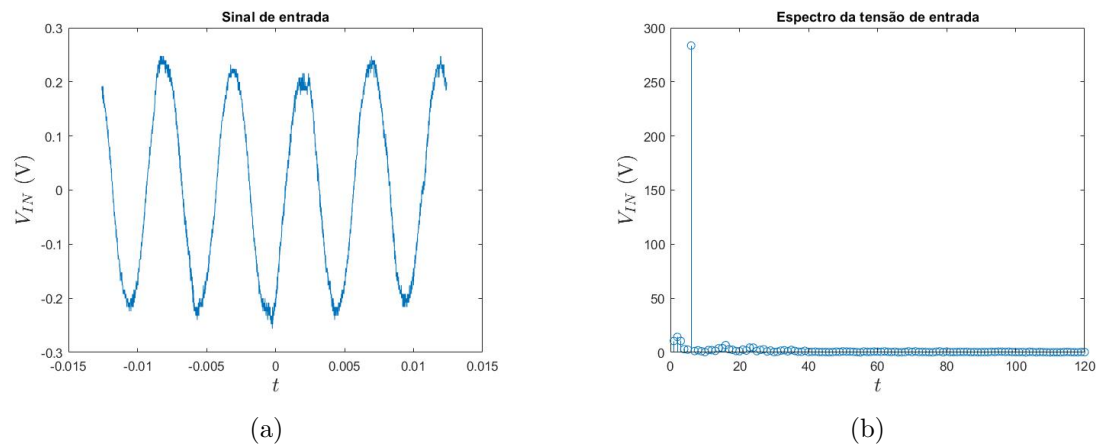


Figura 8: Dados de saída do osciloscópio.

3.3 Projeto PCB

Abaixo seguem os esquemáticos utilizados para a confecção da placas. Este foi o modelo utilizado para realizar a confecção da placa de circuito impressa. Abaixo, há a disposição dos elementos na placa, assim como a disposição dos mesmos feita no Proteus.

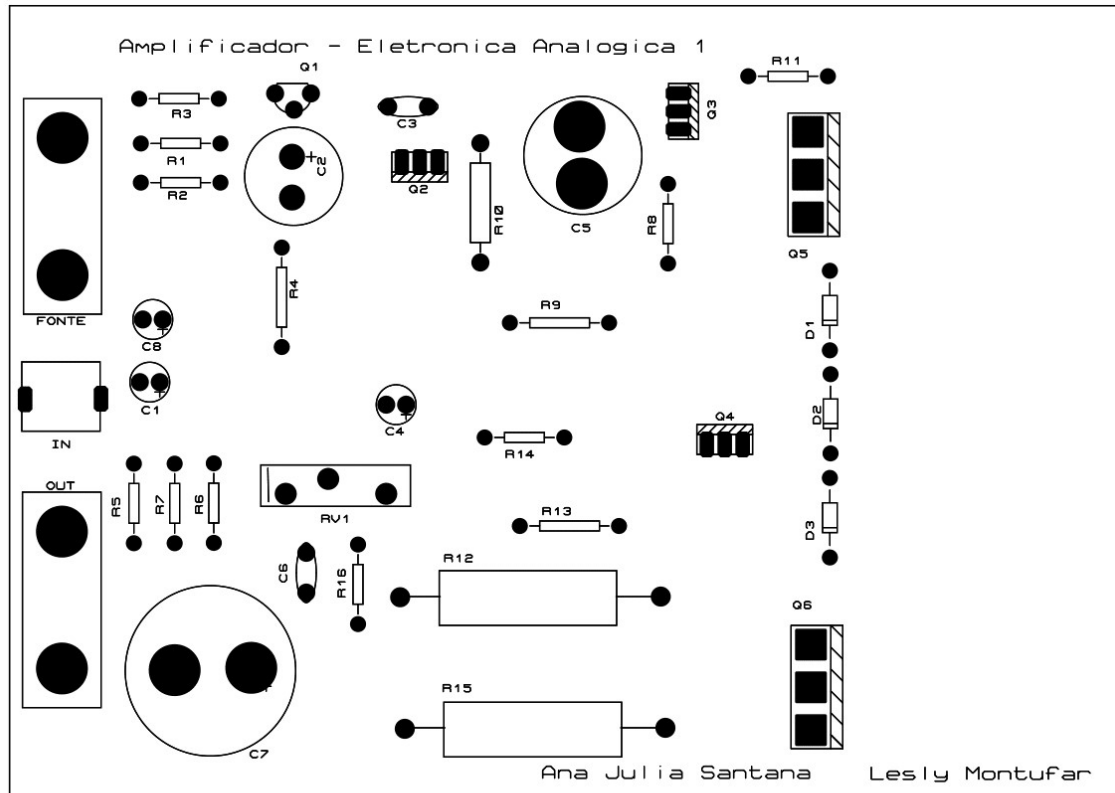


Figura 9: Layout da PCB.

3.3.1 Considerações

Como o circuito opera em ciclos alternados, o uso de capacitores cerâmicos se torna mais apelativo, porque estes não possuem polarização fixa como ocorre nos capacitores eletrolíticos, além das alterações que os eletrolíticos também podem sofrer devido a alta frequência.

No esquemático também dá pra ver um potenciômetro sendo utilizado, isso ocorre porque em aplicações onde a resistência necessária precisa ser ajustada através de testes práticos, para que seja regulada eficientemente como ocorre neste circuito, o potenciômetro é muito mais eficiente, pois é mais fácil realizar ajustes no mesmo do que realizar uma troca constante de resistores fixos.

As resistências de 0,47 nos pares de transistores acoplados é necessária para que a polarização dos transistores seja feita de forma mais correta, como resistores de compensação, já que os transistores Darlington são diferentes, sendo eles, um BD139 e o outro BD140, respectivamente Q3 e Q4.

Tratando-se de estabilidade a presença de realimentação no circuito, neste caso do tipo Bootstrap, que é uma realimentação positiva, e auxilia na operação da configuração push-pull, mantendo a tensão AC em ambos os lados do R9 constantes e diminuindo as oscilações que poderiam ser observadas no sinal de saída.

4 Conclusões

Ao realizar os testes, foi possível ver que a potência máxima alcançada no amplificador projetado, se encontra em torno de 36.44 W, a partir deste ponto, o sinal perde sua regulação e a leitura vista no osciloscópio se torna distorcida. Este acontecimento foi observado ao elevar a tensão do sinal de entrada em valores maiores que 1.1 Vpp.

Foi fácil perceber que num projeto de tal escala, o planejamento é muito importante, para que não hajam falhas nos resultados, visto que tanto o amplificador quanto a fonte, estão sujeitos a muitas falhas.

Notou-se que características como a temperatura no ambiente, embora muitas vezes desconsiderada em análises teóricas faz muita diferença na prática, daí a constante necessidade do uso de dissipadores.

Também foi possível observar de uma forma prática tudo o que foi estudado no semestre a respeito de amplificadores, e sua caracterização, sobre as diferenças entre base, coletor e emissor e as relações de ganho no circuito.

Referências

- [1] Rod Elliott, "El Cheapo - A Really Simple Power Amplifier", ESP, Elliott Sound Products, 2005. Disponível em: <https://sound-au.com/project12a.htm>. Acesso em: out. 2019.
- [2] Brooks Doug, Graves Dave, "Current Carrying Capacity of Vias" Disponível em: <https://www.ultracad.com/articles/viacurrents.pdf>. Acesso em: out. 2019.
- [3] Soares Camila, "Dedução das equações de carga e descarga dos capacitores utilizando equações diferenciais de primeira ordem". Disponível em: <https://camilasoares.wordpress.com/2009/04/07/dedacao-das-equacoes-de-carga-e-descarga-dos-capacitores-utilizando-equacoes-diferenciais-de-primeira-ordem/> Acesso em: out. 2019.
- [4] Petry Clovis Antonio, "D. PROJETO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO - BÁSICO "Disponível em: http://www.professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Projeto_PCI_Charles.pdf. Acesso em: out. 2019.
- [5] Eletronics Tutorials, "Amplifier Classes"Disponível em: <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>. Acesso em: dez. 2019.
- [6] "6.0A GLASS PASSIVATED BRIDGE RECTIFIER", DIODES INCORPORATED. Disponível em: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds21216.pdf>. Acesso em: out. 2019.
- [7] "BD135/137/139", FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. Disponível em: http://www.redrok.com/NPN_BD135_45V_1.5A_12.5W_Hfe40_T0-126.pdf. Acesso em: out. 2019.
- [8] "Silicon NPN Power Transistors TIP35/35A/35B/35C ", SavantIC Semiconductor. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/269985/SAVANTIC/TIP35.html>. Acesso em: out. 2019.