

PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE TECLADO MUSICAL

Maria Eduarda Nascimento Andrade * e Sérgio Ricardo de Jesus Oliveira*

*Graduanda em Engenharia Elétrica pela UFU, Uberlândia, Brasil
e-mail: maria.andrade23@ufu.br

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de um teclado musical de duas oitavas, utilizando um oscilador com transistores e um amplificador. O projeto foi elaborado como parte da disciplina de Eletrônica Analógica Experimental I. O oscilador, baseado em relaxação, é composto por dois estágios: um com polarização por divisor de tensão e outro em configuração *push-pull*. A combinação com o amplificador gera um sinal capaz de acionar um alto-falante, resultando em um teclado funcional e eficiente.

Palavras-chave: Eletrônica, Teclado, Amplificador e Oscilador.

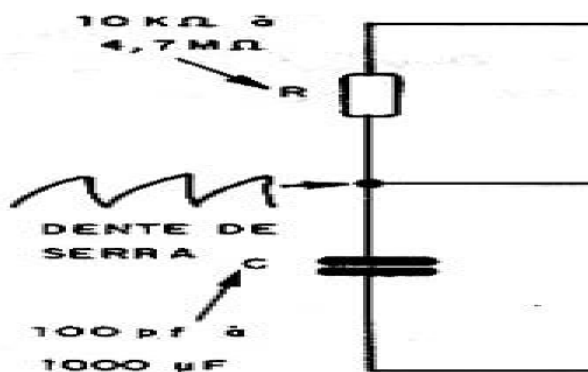
Introdução

A elaboração de um teclado musical envolve três etapas fundamentais. A primeira consiste na utilização de um oscilador de relaxação baseado em transistores, com frequência variável. A segunda etapa é a implementação de um amplificador de pequeno sinal, cuja função é aumentar a tensão de entrada. Por fim, a terceira etapa inclui um amplificador classe B, responsável por fornecer a corrente necessária para alimentar um alto-falante, que atua como carga.

Materiais e métodos

O oscilador de relaxação transistorizado tem papel essencial no sistema, pois gera um sinal periódico com frequência definida por meio do processo de carga e descarga de um capacitor. Seu funcionamento baseia-se no uso do transistor de uniunção (UTJ).

Figura 1 – Oscilador de relaxação



Fonte: Instituto Newton Braga, 2025.

O oscilador de relaxação gera oscilações por meio da

carga e descarga de um capacitor através de um resistor. A frequência do sinal depende dos valores desses componentes e da tensão de disparo do transistor. O funcionamento básico consiste no carregamento do capacitor pela fonte até atingir a tensão de disparo, momento em que o transistor conduz, permitindo a descarga e reiniciando o ciclo. A frequência gerada pode ser determinada por uma equação que considera a razão intrínseca de disparo do transistor de uniunção.

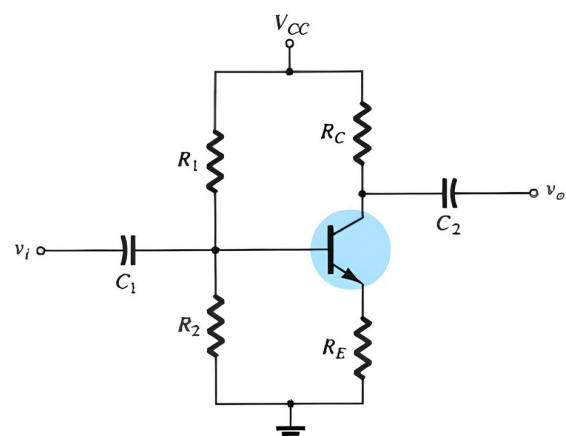
$$f_0 \approx \frac{1}{R_t C_t \ln \left[\frac{1}{1-\eta} \right]} \quad (1)$$

Utilizando $\eta = 0,56$, obtido a partir do datasheet do transistor utilizado (verificar componentes), temos:

$$f_0 \approx \frac{1,218}{R_t C_t} \quad (2)$$

O segundo estágio do circuito é o amplificador de pequenos sinais, sendo que este utiliza um transistor bipolar de junção (TBJ) com polarização realizada por meio de um divisor de tensão. Abaixo, é apresentado o diagrama do circuito PDT:

Figura 2 – TBJ por polarização de divisor de tensão



Fonte: BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L., Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, Pearson, 11ª edição, 2013.

Na análise em corrente contínua (CC), considera-se apenas o comportamento da parte contínua do circuito, e os capacitores são tratados como circuitos abertos, impedindo qualquer influência de sinais

alternados. Assim, o passo inicial consiste em calcular a corrente I_E que atravessa o resistor de emissor.

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad (3)$$

Com o valor obtido, é possível calcular a resistência dinâmica do diodo base-emissor, o que permitirá, em seguida, realizar a análise em corrente alternada (CA). Essa resistência é determinada por meio da seguinte expressão:

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \quad (4)$$

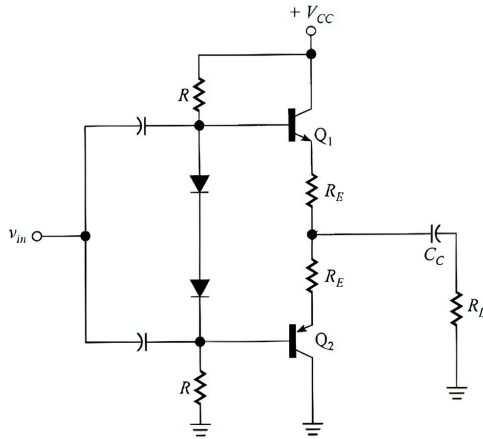
Já na análise CA, define-se o ganho por meio da equação 5 e com isso, é possível determinar a tensão de saída pela equação 6:

$$A = \frac{R_C R_C}{r_E R_E} \quad (5)$$

$$v_o = v_i A_{v1} \quad (6)$$

No estágio final de amplificação, é utilizado um segundo amplificador dividido em duas seções simétricas para processar o sinal de entrada. A primeira seção atua sobre a parte positiva da onda, enquanto a segunda lida com a parte negativa. O ponto de operação dos transistores deve estar na região de corte da reta de carga. Dessa forma, quando a tensão de entrada V_s é positiva, o transistor Q1 conduz o sinal e Q2 permanece em corte; já quando V_s é negativa, o capacitor CC se descarrega, fazendo com que Q2 conduza e Q1 entre em corte.

Figura 3 – Circuito do amplificador *push-pull*



Fonte: Própria, 2025.

A frequência de corte inferior associada ao capacitor C3 é determinada pela seguinte equação:

$$f_{C_C} = \frac{1}{2\pi(R_L + R_E)C_C} \quad (7)$$

A potência média alternada entregue à carga é dada por:

$$P_L = \frac{R_L V_p^2}{2(R_L + R_E)^2} \quad (8)$$

Como a corrente é drenada da fonte durante o semiciclo positivo de entrada, o valor médio de alimentação é dado por:

$$I_{SM} = \frac{V_P}{\pi(R_L + R_E)} \quad (9)$$

A potência média da fonte é dada por:

$$P_S = \frac{V_{CC} V_P}{\pi(R_L + R_E)} \quad (10)$$

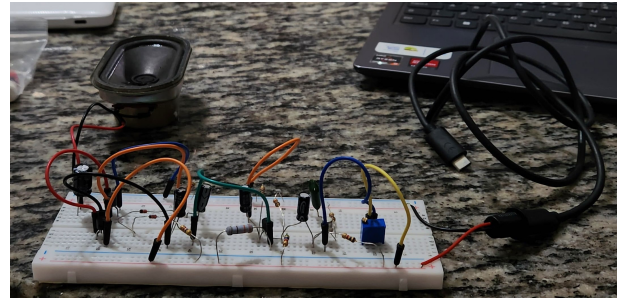
Dividindo a equação (10) pela (9), obtém-se o rendimento:

$$\eta = \frac{\pi}{2} \left(\frac{R_L}{R_L + R_E} \right) \left(\frac{V_P}{V_{CC}} \right) \quad (11)$$

Resultados e Discussão

Com base no desenvolvimento teórico previamente apresentado, foi realizada uma aplicação prática do experimento, utilizando uma placa de prototipagem com o objetivo de validar os resultados obtidos. A configuração específica adotada está ilustrada na representação a seguir.

Figura 4 – Circuito montado na *protoboard*



Fonte: Própria, 2025

A fonte de alimentação foi ajustada para fornecer 5V (*power bank* ou fonte DC). Com base na Figura 1, os seguintes componentes foram selecionados:

- $C = 100\text{nF}$
- $R_{B1} = 1000\Omega$
- $R_{B2} = 100\Omega$

O transistor utilizado foi o JFET modelo 2N2646. Para determinar teoricamente as frequências correspondentes às notas musicais, utilizou-se a equação (1). No entanto, devido à sensibilidade e variação dos componentes como o transistor e o diodo, foi necessário realizar ajustes finos nos trimpots, utilizando um aplicativo de afinação em um celular.

De acordo com a Figura 2, os componentes utilizados foram:

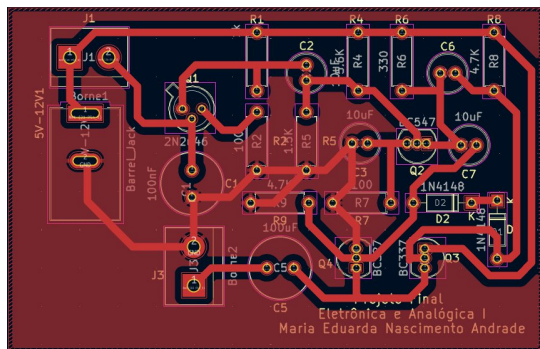
- $C1 = 10\mu F$
- $R1 = 5.6k\Omega$
- $R2 = 1500\Omega$
- $R3 = 330\Omega$
- $R4 = 100\Omega$
- $C2 = 10\mu F$

Para a montagem representada na Figura 3, foram definidos os seguintes valores:

- $R = 4.7k\Omega$
- $Q1 = BC337$
- $Q2 = BC327$
- $CC = 10\mu F$

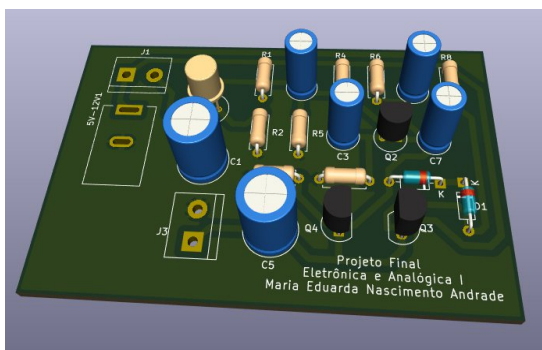
Os diodos empregados no circuito são do tipo 1N4148. Os esquemas elétricos e os layouts das placas de circuito impresso (PCIs) foram elaborados utilizando o software KiCad. Pode-se observar o *layout* do amplificador na Figura 5 e sua visualização 3D na Figura 6.

Figura 5 – *Layout* da PCI do amplificador



Fonte: Própria, 2025

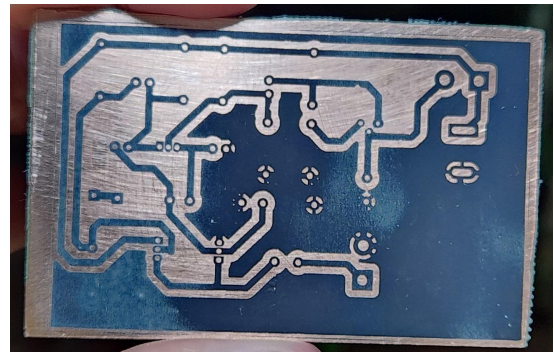
Figura 6 – Visualização 3D da PCI do amplificador



Fonte: Própria, 2025

O processo de corrosão da PCI foi realizado com sucesso utilizando percloro de ferro. Inicialmente, foi aplicada uma máscara protetora nas áreas onde o cobre deveria ser mantido. Essa máscara foi obtida por meio do método de termotransferência (Figura 7), utilizando uma impressão a laser.

Figura 7 – Visualização 3D da PCI do amplificador

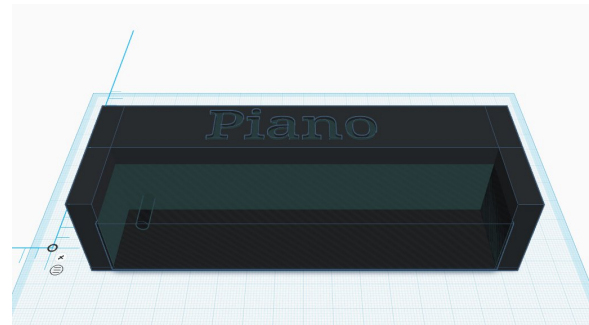


Fonte: Própria, 2025

Em seguida, a placa foi submersa cuidadosamente em uma solução de percloro de ferro. Durante a corrosão, o percloro reagiu com o cobre exposto, removendo-o seletivamente das regiões desprotegidas. Após o tempo necessário, a placa foi retirada da solução e lavada cuidadosamente para eliminar quaisquer resíduos do agente corrosivo.

Outro passo importante foi a modelagem 3D da *case* utilizada para dar suporte à PCI, e das teclas, para que fosse possível caracterizar o piano. Para isso foi utilizado o *software Tinkercad*, já para o fatiamento foi utilizado o *Bambu Studio*, próprio da impressora 3D da *Bambu Lab*.

Figura 8 – Modelagem tridimensional da *case* do piano



Fonte: Própria, 2025

Figura 9 – Resultado da PCI e a impressão 3D



Fonte: Própria, 2025

O desenvolvimento do piano transistorado — desde sua concepção, passando pela prototipagem, elaboração do design da PCI, até a confecção e soldagem — foi essencial para consolidar os conhecimentos adquiridos em laboratório na disciplina de Eletrônica Analógica I.

Os desafios enfrentados durante a produção da PCI exigiram um domínio mais aprofundado do conteúdo teórico, além de proporcionar uma vivência prática com os componentes eletrônicos, contribuindo significativamente para o aprendizado.

Referências

- [1]BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.
- [2]MARQUES, Jemerson. Mini Amplificador com 3 Transistores Batendo no SUB 600W RMS + PCI. Disponível em: <https://www.fvml.com.br/2020/03/circuito-mini-amplificador-com-3.html>.
- [3] ELECTROLAB. Transistores de unijunção! O que são e como funcionam! YOUTUBE, 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=eefELGGf0nM>.
- [4]BRAGA, Newton C. Como funcionam os osciladores: Oscilador de relaxação com transistor unijunção. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/como-funciona/2514-art379.html?start=2>.