

UNICAMP

Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física Gleb Wataghin

Construção de um Theremin



(9/12/2009)

Aluna: Mariana Carolina de Assis (sabathela@gmail.com)
Orientador: Maurício Kleinke (kleinke@ifi.unicamp.br)

RA: 016847

Coordenador: Prof. José J. Lunazzi

1. Resumo

O experimento consiste na construção de um circuito no qual poder-se-á controlar manualmente a frequência e a amplitude sonora por meio de fotoresistores – em analogia ao instrumento Theremin, onde, neste último, o controle se dava a partir da alteração do campo magnético em torno e entre antenas.

2. Introdução

Desde o seu surgimento, a eletrônica mostrou-se uma forte aliada à criação musical, seja na gravação ou na reprodução de música.

De fato, o primeiro instrumento eletrônico que se teve notícia, o *Telharmonium*, criado por Thaddeus Cahills em 1897, porém, publicado pela primeira vez na revista *Electrical World* de 1906. Dezessete anos mais tarde, o **Theremin** é criado – não sendo, portanto, o primeiro instrumento eletrônico (apesar de, atualmente, ser conhecido como tal).

O Theremin deve esta sua denominação a seu inventor, o russo Lev Sergeivitch Termen, físico e ex-agente da KGB. Quando ainda na KGB, era responsável pela construção de equipamentos eletrônicos voltados para espionagem. Também foi diretor do Laboratório de Osciladores Elétricos no Instituto Físico-Teórico de Petrogrado, em 1919. Em 1920, mostrou o protótipo do Theremin para Lenin, porém, somente conseguiu patentear-lo em 1928 quando já havia se refugiado nos EUA.

Seu ponto de partida para a construção desse instrumento foi a percepção da interferência no sinal de um aparelho de rádio ao aproximar a mão de sua antena. Assim, baseando-se neste conceito, construiu uma caixa de válvulas – como as comuns aos rádios da época -, adaptando-lhe duas antenas: uma do lado esquerdo, na horizontal, e outra do lado direito, na vertical. Dessa forma, a partir da maior ou menor proximidade das mãos relativamente a estas antenas, altera-se o campo eletromagnético destas, de forma que pode-se variar a intensidade através da primeira antena – portanto, controle de volume -, e pode-se

variar a frequência – portanto, tonalidade, das mais agudas às mais graves notas – através da segunda.

Assim, neste projeto, nos propomos, a exemplo do Theremin, montar um sistema de controle da frequência e da amplitude sonora sem que haja necessidade do contato físico direto. Para isso, ao invés de um conjunto de antenas, utilizamos duas fotocélulas, de forma que o controle manual servirá para regular a intensidade da luz incidente neste tipo especial de resistores. Sem contar que as fotocélulas são mais simples de operar – do ponto de vista eletrônico -, estas também são fáceis de se obter.

Nosso circuito fará uso de dois temporizadores 555 – cada um tendo uma respectiva fotocélula acoplada (pino7); sendo um deles funcionando como um oscilador, de forma que ocorrerá uma variação na frequência do sinal de saída a partir da variação na resistência da fotocélula, isto é, através da variação da intensidade luminosa sobre esta; e o segundo 555 atua como um gerador de pulso único, modulando a frequência dentro de amplitudes – portanto, intensidade – determinadas a partir da variação de luz na segunda fotocélula.

Por fim, realizamos uma duplicata de nossa montagem, a fim de se obter uma dupla saída sonora, simulando uma sonorização estéreo.

3. Material Necessário

Essencialmente, utilizamos os seguintes materiais – referente às duas montagens de theremin, no intuito de simular uma sonorização estéreo:

- 4 circuitos integrados temporizadores 555;
- 4 fotocélulas de CdS;
- 4 capacitores de 0,01 μF , 4 capacitores de 0,1 μF , 4 capacitores de 1 μF ;
- 2 resistências de 10 $\text{k}\Omega$, 2 resistências de 1 $\text{k}\Omega$;
- 2 trimpots (resistência variável);
- 2 auto-falantes (que podem ser de computadores) de 8 Ω ;
- Uma fonte de tensão de 5V (pode-se também usar uma bateria de 9V);

- Dois chaveadores (de no mínimo 8 chaves);
- Fios;
- Placa para montagem do circuito.

*, **, ***: Utilizamos um conjunto de capacitores e resistores para que pudéssemos variar as condições de funcionamento do Theremin, e, assim, perceber seus efeitos conforme manipulação nas capacitâncias (portanto, tempo de carga e descarga dos capacitores) e resistências. Para tal, utilizamos dois chaveadores (um para cada circuito de theremin, independentes), que nos permitiram selecionar essa faixa de valores de capacitores e resistências.

Dentre os materiais e condições experimentais, podemos destacar:

3.1 Iluminação controlada

Como a regulação da intensidade luminosa sobre as fotocélulas que irão determinar o poder de manipulação sobre a frequência e volume do som obtido, então é essencial que se crie condições de melhor controle da luz para que, assim, possamos ter melhor sensibilidade aos efeitos do Theremin.

A capacidade resistiva da fotocélula é um determinante para que se escolha o limite de iluminação a se trabalhar, pois, existe um limite de saturação para a operação eficiente destas.

Um outro fator é a distribuição da iluminação sobre o experimento, pois, como quanto maior o controle da intensidade de luz sobre as fotocélulas, melhor será a sensibilidade às nuances do som emitido.

Dessa forma, podemos inferir que as melhores condições experimentais dependem diretamente da iluminação a que será submetido; seja numa sala escura, tendo controle de uma iluminação artificial sobre o experimento, ou, à luz ambiente, mantendo o experimento (ou, somente as fotocélulas) em algum recipiente mais opaco à entrada indiscriminada da luz (por exemplo, uma caixa).

3.2 Fotocélulas de CdS

Um dos materiais mais importantes na construção do Theremin é a fotocélula de CdS, portanto nessa seção serão abordados o funcionamento desta fotocélula, assim como seu papel em nosso experimento. Estas fotocélulas são dispositivos semicondutores de dois terminais, cuja resistência varia linearmente com a intensidade da luz incidente.

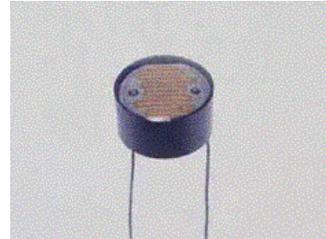


Figura1: Fotocélula de CdS

São muito sensíveis, embora relativamente "lentas" quando comparadas aos fotodiodos, pois não conseguem detectar o "pisca" das lâmpadas fluorescentes - algo de valia para nosso projeto, onde se pretende controlar a variação da intensidade luminosa sobre as fotocélulas manualmente. Estas são compostas por uma cápsula plástica onde existe uma lâmina de sulfeto de cádmio, que é o material semicondutor.

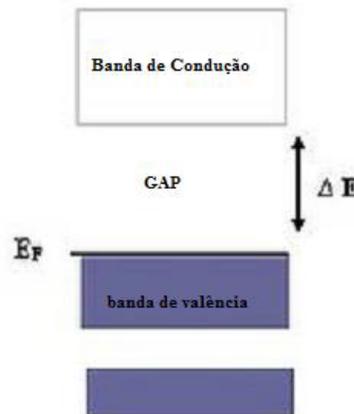


Figura 2: Bandas de Valência, Condução, Gap e Energia de Fermi num semicondutor.

Quando incide luz nestas fotocélulas com energia suficiente para se "transportar" elétrons da *banda de valência* - totalmente preenchida para o material semiconductor - para a *banda de condução* - dessa forma, necessita-se que os fótons incidentes devam ter energia suficiente para superar o *gap* que separa estas duas bandas. E aqui, para o CdS, tem-se *gap* de energia entre estas duas bandas na ordem da energia de fótons da luz visível.

3.3 Temporizador 555 e o Circuito RC

O temporizador 555 é um circuito integrado de 8 pinos formado por transistores, diodos e resistores:

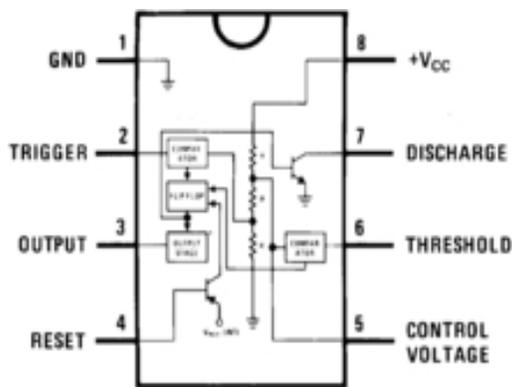


Figura 3: Esquematização CI timer 555

Suas formas de funcionamento, a saber *astável* e *monoestável*, serão base para nosso projeto. Estas duas formas de atuação dependem exclusivamente da configuração do circuito RC acoplado à ele.

No **modo monoestável**, o 555 atua como um gerador de pulso único, que, em nossa montagem, refere-se ao segundo subcircuito RC [vide figuras 1 e 4 - circuito de baixo], que assumiu a função de modulador de frequência. O pulso se inicia no momento em que o 555 recebe um sinal no trigger - aqui, em nossa configuração, entre o resistor e capacitor ligados em série -, e a largura desse pulso é determinada a partir da constante de tempo do circuito RC.

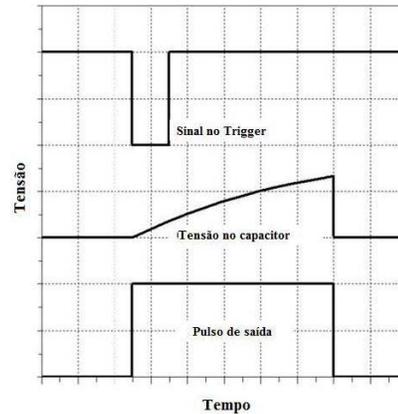


Figura 4: Relação entre Sinal no Trigger, Tensão no Capacitor e largura do pulso no modo monoestável.

O pulso termina quando a carga no capacitor se iguala a 2/3 da V_{cc} (tensão de alimentação ligada no pino 8 - vide figura 1). A largura do pulso de saída pode ser aumentado ou diminuído a partir dos ajustes nos valores de R e C. De fato, analisamos o efeito destes ajustes ao expormos os resultados comparados da substituição do capacitor de $0,01\mu F$ por $0,1\mu F$, onde se obteve o alargamento do pulso, conforme observado nas formas de onda da figura 8.

A constante t do circuito RC - determinante para a largura do pulso -, que é o tempo necessário para carregar o capacitor até 2/3 de V_{cc} (monoestável) é dada por:

$$t = RC \ln(3) \approx 1,1 RC \quad (i)$$

onde $C = 0,1\mu F$ e $R = R_{fotocélula} + 1k\Omega$, pois o resistor de $1k\Omega$ e a fotocélula estão em série.

No **modo astável**, o 555 gera um fluxo contínuo de pulsos regulares de frequência específica. Em nossa montagem, refere-se ao primeiro subcircuito RC [vide figuras 1 e 2], que assumiu a função de oscilador. Um resistor é conectado entre V_{cc} e o pino 7 (descarga) - em nossa montagem, a fotocélula de CdS -; e outro resistor é

conectado entre o pino 7 e os pinos 2 (trigger) e pino 6 - onde, estes dois últimos, se ligam num mesmo nó [vide figura 1] - que, em nossa montagem, foi um resistor de 1kOhm. Assim, neste modo de operação, o capacitor é carregado através de $R_{\text{fotocélula}}$ e R_{1k} , e descarregado através do R_{1k} . Aqui, a constante de tempo t do circuito será dada por:

$$t = \ln(2) \cdot C (R_{\text{fotocélula}} + 2R_{1k}) \quad \text{(ii)}$$

onde $C = 0,1\mu\text{F}$ e $R_{1k} = 1\text{k}\Omega$. Conforme observado nos gráficos das formas de onda para este circuito astável [vide figuras 5 e 8], tínhamos que a frequência do pulso de saída estava em torno de 3kHz para $C = 0,1\mu\text{F}$ e 30kHz para $C = 0,01\mu\text{F}$. Portanto, para $f = 3\text{kHz}$:

$$t = 1/f = 3,3 \cdot 10^{-4} = \ln(2) \cdot 0,1\mu\text{F} (R_{\text{fotocélula}} + 2\text{k}\Omega)$$

$$R_{\text{fotocélula}} \approx 3\text{k}\Omega$$

Sendo essa resistência específica para a intensidade luminosa aproximada à que foi submetida à fotocélula, para uma frequência de rede de 60Hz. A intensidade luminosa varia com o inverso do quadrado da distância; portanto, nos cálculos acima, estamos considerando os fotoresistores com posição fixa em relação à fonte luminosa. De fato, se quisermos calcular a intensidade luminosa, devemos levar em conta, além da distância, o tipo de lâmpada (potência e comprimento de onda).

4. Experimento

O circuito proposto faz uso de dois temporizadores 555 por Theremin. O primeiro deles em operação astável - portanto, funcionando como oscilador - tem sua frequência controlada pela incidência de luz sobre a fotocélula.

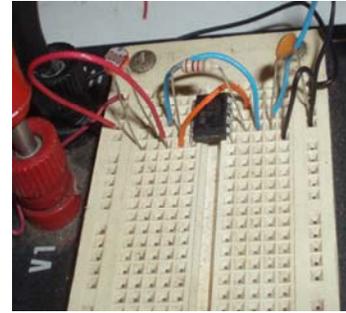


Figura5: primeira parte do circuito – oscilador

É possível observar nesta primeira montagem do circuito, além do pulso fundamental sincronizado no ponto zero, temos uma distribuição randômica modulada por uma gaussiana, devido, provavelmente, à incidência da fonte luminosa de 60Hz:

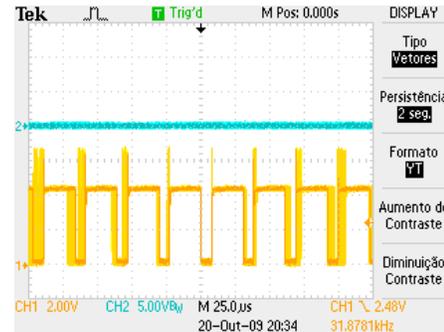


Figura6: Forma de onda para circuito astável

O segundo circuito, em montagem monoestável, é disparado pelos eventos do primeiro temporizador. Seu pulso de saída será modulado ainda pela incidência de luz na segunda fotocélula e pelo capacitor de temporização de $0,01\mu\text{F}$.

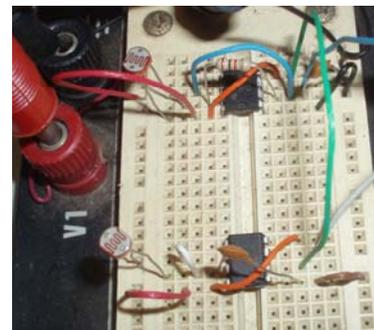


Figura7: montagem completa - circuitos astável (acima) e monoestável (abaixo).

Observa-se, dessa maneira, uma frequência modulada pela incidência de luz nas fotocélulas:

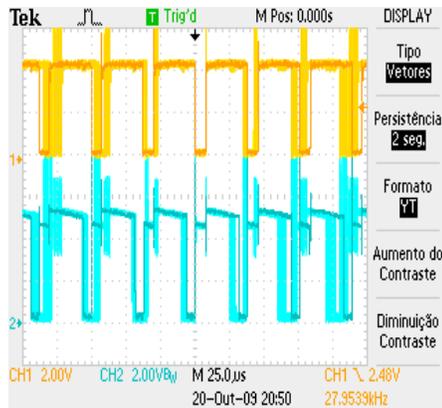


Figura 8: formas de onda para circuitos astável (amarelo) e monoestável (azul)

Na configuração proposta inicialmente no projeto, com capacitores de $0,01\mu\text{F}$, o som produzido era muito agudo (frequências muito elevadas). Para contornar isso, e, assim, melhorar a qualidade do som produzido, dentro de nossa faixa audível, optamos por trocar os capacitores iniciais por outros dois de $0,1\mu\text{F}$ cada, portanto, aumentando em uma ordem de grandeza a temporização regulada através da carga e descarga do capacitor; além de remover o potenciômetro de atenuação, de forma a possibilitar a produção de um som mais intenso. Com isso, obtivemos um som mais audível, menos ruidoso, cujos efeitos, devido ao controle manual da incidência de luz, tornaram-se mais perceptíveis. Segue abaixo as formas de onda nessa nova configuração de capacitores:

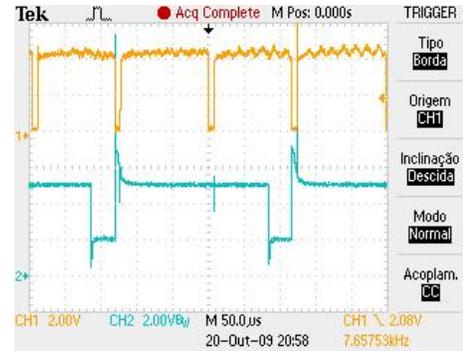


Figura 9a: Aqui, manteve-se o primeiro capacitor de $0,01\mu\text{F}$ (amarelo), substituindo o segundo capacitor por um de $0,1\mu\text{F}$ (azul).

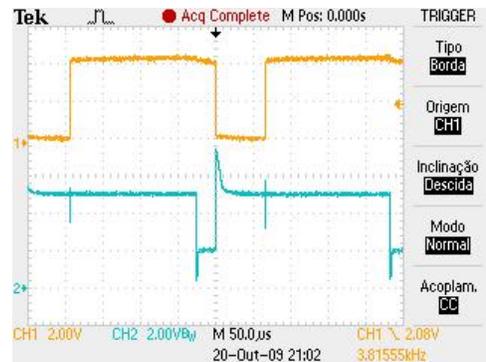


Figura 9b: Aqui, ambos os capacitores são de $0,1\mu\text{F}$.

Porém, para pouca luminosidade, um menor de tempo de carga/descarga do capacitor, que resultava em uma resposta, em frequência, menor em nossa circuito, passava a ser mais conveniente. Dessa forma, assim de aumentarmos nossa capacidade manipulação do Theremin, utilizamos um chaveador, de forma a podermos variar os capacitores e resistores da montagem. Assim, passamos a nos apoiar numa nova montagem, a partir do aperfeiçoamento da original:

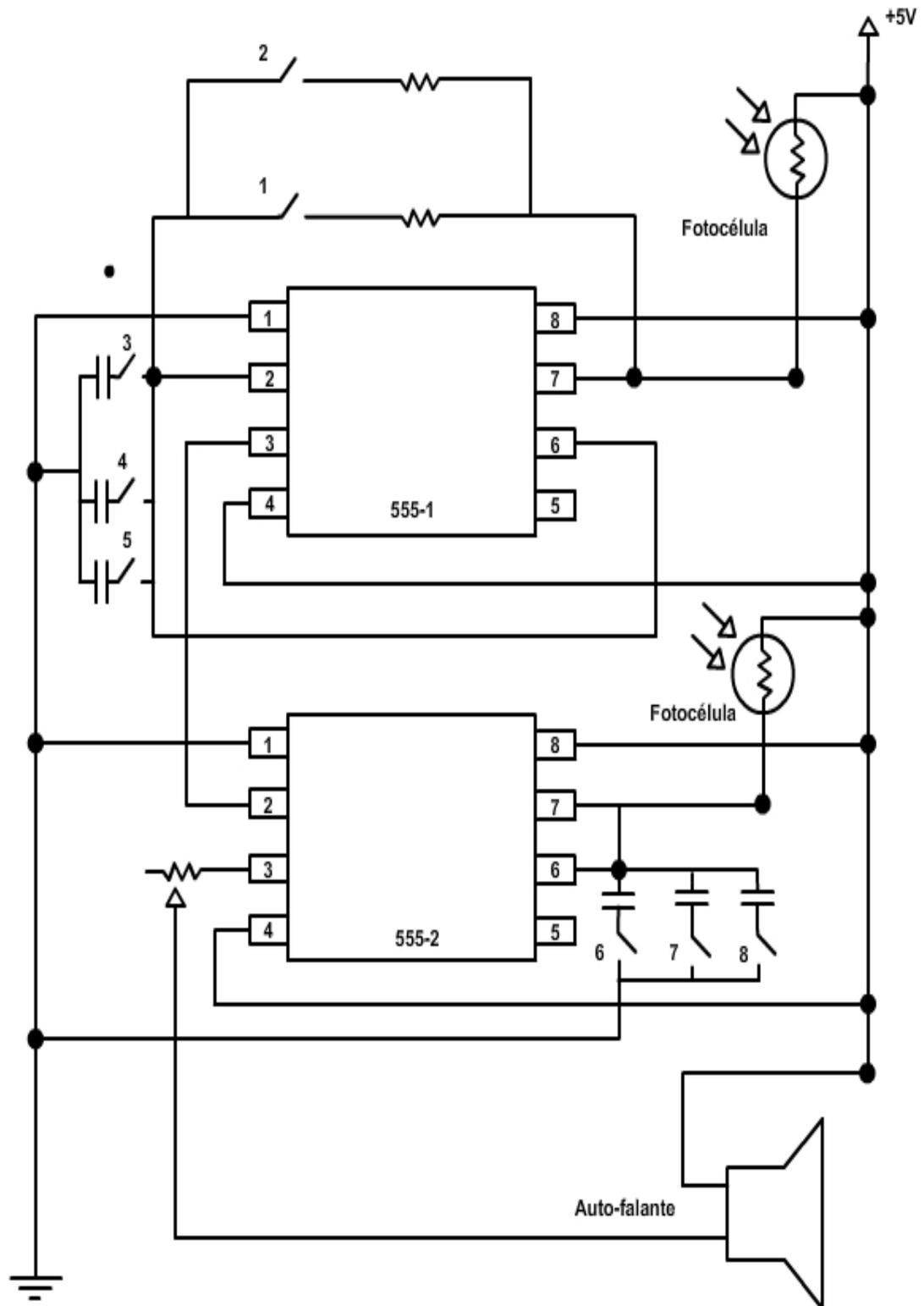


Figura 9: Esquemática do novo circuito para único Theremin

No circuito da página anterior, temos a numeração de 1 à 8 referentes às 8 chaves do chaveador. Os valores respectivos à essas posições, em nossa montagem, foi:

- Resistências: (1) = $1k\Omega$, (2) = $10k\Omega$;
- Capacitores: (3) e (6) = $0,01\mu F$, (4) e (7) = $0,1\mu F$, (5) e (8) = $1\mu F$

Porém, da figura 9, é necessário que, pelo menos, uma dentre as chaves (6), (7), (8); (3), (4), (5) e (1), (2); para, assim, manter a configuração do Theremin. No entanto, com essa nova esquematização adquirimos um conjunto de 147 possibilidades de montagem, unicamente com o abrir e fechar destas oito chaves – respeitando a regra que limita o conjunto dentro o qual pode se fechar ou não estas chaves. É claro que dentre esse enorme conjunto de possibilidades, não teremos sensibilidade auditiva, ou mesmo, de controle do Theremin, para que sejam percebidas – por exemplo, com as chaves 1 e 2 fechadas, passamos a ter uma resistência de $0,9k\Omega$, enquanto que, com a chave(1) fechada, teremos uma resistência de $1,0k\Omega$, portanto, equivalentes. O mesmo vale para o conjunto de capacitores, que estão associados em paralelo – portanto, as capacitâncias equivalentes serão dadas pelas somas das capacitâncias individuais. Assim, quando fecharmos as chaves (3) e (5) e/ou (6) e (8), teremos capacitâncias de $1,01\mu F$, portanto, equivalente a situação de termos somente a (5) e/ou (8), quando $C = 1,00\mu F$.

Uma outra mudança que se fez necessária, foi o uso de um trimpot, que servirá para regular a intensidade a partir do segundo temporizador (e, respectivamente, segunda fotocélula). Assim, ao invés do potenciômetro na ordem de alguns quilo-ohms, regulamos nosso trimpot para uma ordem inicial de alguns poucos ohms ($\sim 10\Omega$), para que, então, estivesse na ordem de grandeza da resistência do auto-falante, para que assim sua variação se tornasse perceptível através do som produzido por este mesmo auto -falante.

5. Resultado

Segue abaixo uma foto da montagem final, conforme esquematizada na figura 6:

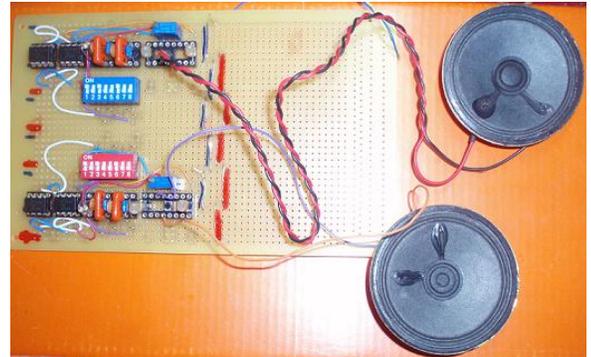


Figura 10: Montagem final para Theremin estereofônico.

Assim, conforme pôde-se observar na figura acima, duplicamos nossa montagem, repetindo exatamente os mesmos componentes. Nosso objetivo, ao manter tais theremins independentes idênticos – é de que seus sinais de saída e, conseqüentemente, som produzido, esteja sincronizado no tempo, simulando assim, estereofonia. Os objetivos da modificação era permitir ampliar a gama de sons saindo do Theremin, com maior variação e maior controle, e possibilitar a conexão desse experimento com o experimento do gerador de sinais tridimensional, realizado no semestre passado [ref 4].

De fato, termos duas saídas de som melhorou a qualidade do som, mesmo que estas não estivesse em exata sincronia – pois, os valores de resistência e capacitância experimentais diferem entre si, mesmo quando iguais pelo fabricante; e, principalmente, a alta sensibilidade das fotocélulas faz com que mesmo separados por poucos centímetros, há uma diferença na

luminosidade incidente em ambos os Theremins; resultando, assim, em sinais diferentes.

6. Conclusão

A partir deste projeto pôde-se contemplar os princípios por trás do funcionamento de fotoresistores, assim como de circuitos integrados temporizadores, por meio de um experimento de montagem simples e barata. Tal experimento, além da analogia direta com o Theremin original – dando-nos, portanto, uma idéia geral de seu funcionamento – ilustra o conceito de frequência como som, a partir das discrepâncias entre tonalidades agudas e graves.

Primeiramente, conforme esboçado no Relatório Parcial, analisamos os efeitos dos componentes eletrônicos individualmente no circuito, de forma a compreendermos os possíveis resultados ao variarmos estes. Dessa forma, nos foi possível aperfeiçoar nossa proposta inicial, otimizando a qualidade do som e, portanto, nosso poder de manipulação; concretizando, assim, o nosso objetivo de aproximar esta montagem eletrônica de um instrumento musical.

7. Referências

[1] Fotoresistores

<http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Fotoresistor.html>

http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/foto/fotorresistores.htm

[2] Circuito Integrado 555 e Circuitos RC

<http://ivairijs.vilabol.uol.com.br/CI-555.html>

<http://www.national.com/ds/LM/LM555.pdf> [Datasheet CI LM555]

http://www.ele.ita.br/~atinoco/graduacao/ele_59/Lab5_timer555.pdf

[3] Theremin

HERRERA, C.G., *Sintetizador Musical Analógico – Uma releitura sob a ótica da eletrônica moderna*. UFMG – Depto de Engenharia Eletrônica, 2001. Páginas 3-5.

<http://www.ruadireita.com/instrumentos-musicais/info/theremin-o-primeiro-instrumento-musical-electronico-da-historia/>

http://www.netsaber.com.br/biografias/ver_biografia_c_2587.html

[4] Construção de um defletor de laser por auto-falantes

http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem_1_2009%20ate90817/RonaldS-Lunazzi_RP.pdf

8. Apêndices

A1 – Parecer do Orientador

Meu orientador concorda com o expressado neste relatório final e deu a seguinte opinião:

O trabalho foi desenvolvido a contento, no que se refere a criação do Thevenin simplificado como instrumento musical eletrônico. Acredito que com um pouco de ensaio, e uma montagem um pouco mais elaborada sob o aspecto mecânico/ótico da distribuição e incidência luminosa sobre os fotoresistores será possível obter sons musicais controlados. Já a conexão com o gerador de imagens tridimensionais terá que ser cuidadosa do ponto de vista de escolhas de frequências adequadas para permitir uma boa visualização do processo.

A2 – Comentários do Coordenador

- *Ao projeto: Projeto aprovado (PA). Gostaria que uma vez montado, pensasse em colocar alguma diferenciação a dois canais, um sinal estéreo virtual, que poderia ser colocado no experimento de geração de figuras tridimensionais por altofalantes do semestre passado.*
- *Ao Relatório Parcial: RP aprovado. somente que nem pensou em fazer um som estéreo como sugeri, coisa que o Theremin não conhecia. Tenha coragem de ao menos pensar casos diferentes!*